

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2023**

**ADAM  
KLEPRLÍK**



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ  
A METROLOGIE**

**Soustružení niklových a CoCr slitin**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Adam Kleprlík

**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kleprlík** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **501375**  
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:

**Soustružení niklových a CoCr slitin**

Název bakalářské práce anglicky:

**Turning of nickel-base and CoCr-base Alloys**

Pokyny pro vypracování:

1. Mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti Ni a CrMo slitin.
2. Doporučené řezné materiály a řezné podmínky.
3. Technologické zkoušky obrobitelnosti.
4. Měření řezných sil.
5. Porovnání s běžnými konstrukčními oceli.

Seznam doporučené literatury:

OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.  
DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.  
STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. Metal cutting theory and practice. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 1-4665-8753-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

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

Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné poznámky a vstřícné jednání v průběhu tvorby této práce a možnost věnovat mi svůj čas během osobních konzultací. Poděkování patří také mé rodině, která mě podporovala v průběhu celého studia.

# Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku soustružení niklových a kobaltových superslitin, konkrétně na monitorování silových projevů při podélném soustružení. V první části bakalářské práce jsou popsány vlastnosti těchto unikátních materiálů a jejich rozdělení. Následně se práce zabývá obrobiteľností superslitin, nástrojovými materiály a řezným prostředím.

V experimentální části této práce je prováděna analýza měření řezných sil při soustružení Co-Cr superslitiny ASTM F75 a niklové superslitiny Inconel 713LC. Za účelem srovnání je práce doplněna o soustružení běžně používané uhlíkové oceli 12 050 (C45) při totožných řezných podmínkách i geometrii nástroje. Rozsah experimentu umožňuje provést komplexní hodnocení silových projevů a charakterizovat chování jednotlivých materiálů.

**Název diplomové práce:** Soustružení niklových a CoCr slitin

**Autor práce:** Adam Kleprlík

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.

**Akademický rok:** 2022/2023

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** 12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Vedoucí ústavu:** Ing. Libor Beránek, Ph.D.

**Rozsah práce:** 83 stránek, 36 tabulek, 44 obrázků

**Klíčová slova:** superslitiny, obrobiteľnost, soustružení, nástrojové materiály, řezná síla, měrná řezná síla, měření řezných sil, empirický vztah

# Annotation

This bachelor thesis focuses on the turning of nickel and cobalt superalloys, specifically on the monitoring of force manifestations during longitudinal turning. The first part of the bachelor thesis describes the properties of these unique materials and their division. Subsequently, the work deals with machinability of superalloys, tool materials and cutting environment.

In the experimental part of this work, the analysis of cutting force measurements during turning of Co-Cr superalloy ASTM F75 and nickel superalloy Inconel 713LC is carried out. For the purpose of comparison, the work is supplemented with turning of commonly used carbon steel 12 050 (C45) under identical cutting conditions and tool geometry. The scope of the experiment makes it possible to carry out a comprehensive assessment of force manifestations and to characterize the behavior of individual materials.

**Title of the final thesis:** Turning of nickel and CoCr alloys  
**Author:** Adam Kleprlík  
**Supervisor:** Ing. Zdeněk Pitrmuc, Ph.D.  
**Academic year:** 2022/2023  
**University:** CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering  
**Department:** 12134 – Department of Machining, Process Planning and Metrology  
**Head of department:** Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
**Extent:** 83 pages, 36 tables, 44 pictures  
**Keywords:** superalloys, machinability, turning, tool materials, cutting force, specific cutting force, measurement of cutting forces, empirical relationship

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE .....                            | 13 |
| 2. VLASTNOSTI SUPERSLITIN .....                      | 14 |
| 2.1 Mikrostruktura superslitin .....                 | 15 |
| 2.2 Mechanické vlastnosti superslitin.....           | 16 |
| 3. ROZDĚLENÍ SUPERSLITIN .....                       | 18 |
| 3.1 Superslitiny na bázi niklu.....                  | 19 |
| 3.1.1 Žáruvzdorné slitiny.....                       | 20 |
| 3.1.2 Žárupevné slitiny .....                        | 21 |
| 3.2 Superslitiny na bázi niklu a železa .....        | 21 |
| 3.3 Superslitiny na bázi kobaltu .....               | 21 |
| 3.3.1 Žárupevné slitiny .....                        | 22 |
| 3.3.2 Korozivzdorné slitiny .....                    | 23 |
| 3.3.3 Slitiny s vysokou tvrdostí .....               | 23 |
| 3.3.4 Slitiny s elektromagnetickými vlastnostmi..... | 24 |
| 3.3.5 Biokompatibilní slitiny .....                  | 24 |
| 4. OBRÁBĚNÍ SUPERSLITIN.....                         | 25 |
| 5. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY .....                        | 27 |
| 5.1 Rychlořezné oceli (HSS).....                     | 27 |
| 5.2 Slinuté karbidy .....                            | 27 |
| 5.3 Keramika .....                                   | 28 |
| 5.4 Kubický nitrid boru (CBN).....                   | 29 |
| 6. MECHANISMY OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE .....              | 30 |
| 7. ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ .....                             | 32 |
| 8. SÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ.....                            | 35 |
| 9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....                         | 39 |



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 9.1   | Testované materiály .....                         | 39 |
| 9.1.1 | ASTM F75 .....                                    | 39 |
| 9.1.2 | Inconel 713LC .....                               | 40 |
| 9.1.3 | Ocel 12 050 .....                                 | 40 |
| 9.2   | Stroj .....                                       | 41 |
| 9.3   | Nástroj .....                                     | 42 |
| 9.4   | Měřicí přístroje .....                            | 44 |
| 10.   | VOLBA A NASTAVENÍ PARAMETRŮ MĚŘENÍ .....          | 46 |
| 11.   | SCHÉMA NAVRŽENÉHO EXPERIMENTU .....               | 47 |
| 12.   | REALIZACE EXPERIMENTU .....                       | 48 |
| 13.   | ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....                   | 52 |
| 14.   | VYHODNOCENÍ .....                                 | 54 |
| 14.1  | Posuvová síla $F_f$ .....                         | 54 |
| 14.2  | Pasivní síla $F_p$ .....                          | 55 |
| 14.3  | Řezná síla $F_c$ .....                            | 57 |
| 14.4  | Určení empirických vztahů pro ASTM F75 .....      | 58 |
| 14.5  | Určení empirických vztahů pro ocel 12 050 .....   | 64 |
| 14.6  | Určení empirických vztahů pro Inconel 713LC ..... | 69 |
| 15.   | ZÁVĚR .....                                       | 74 |
|       | Bibliografie .....                                | 76 |
|       | Seznam tabulek .....                              | 80 |
|       | Seznam obrázků .....                              | 82 |

## Seznam použité symboliky a zkratek

|          |                     |   |
|----------|---------------------|---|
| A        | [%]                 | Tažnost   |
| a        | [–]                 | Koeficient  |
| $A_D$    | [mm <sup>-2</sup> ] | Plocha řezu   |
| $a_p$    | [mm]                | Hloubka řezu  |
| b        | [–]                 | Exponent  |
| BCC      | [–]                 | Body centered cubic<br>(Krychlová prostorově středěná – mřížka) |
| $C_{Fc}$ | [–]                 | Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu                 |
| $C_{Ff}$ | [–]                 | Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu                 |
| $C_{Fp}$ | [–]                 | Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu                 |
| $C_{kc}$ | [–]                 | Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu                 |
| CBN      | [–]                 | Cubic boron nitride<br>(Kubický nitrid boru)                    |
| CVD      | [–]                 | Chemical vapor deposition<br>(Chemická depozice z plynné fáze)  |
| f        | [mm/ot.]            | Posuv   |
| F        | [N]                 | Síla  |
| $F_c$    | [N]                 | Hlavní řezná síla   |
| $F_f$    | [N]                 | Posuvová síla   |
| $F_p$    | [N]                 | Pasivní síla  |
| $F_x$    | [N]                 | Síla působící ve směru osy x                                    |
| $F_y$    | [N]                 | Síla působící ve směru osy y                                    |
| $F_z$    | [N]                 | Síla působící ve směru osy z                                    |

|              |                       |   |
|--------------|-----------------------|---|
| FCC          | [–]                   | Face centered cubic<br>(Krychlová plošně středěná – mřížka)       |
| $h_1$        | [mm]                  | Tloušťka odřezávané vrstvy  |
| HCP          | [–]                   | Hexagonal close packed<br>(Hexagonální těsně uspořádaná – mřížka) |
| HSS          | [–]                   | High speed steel<br>(Rychlořezná ocel)                            |
| HV           | [–]                   | Hardness Vickers<br>(Tvrdość dle Vickerse)                        |
| $k_c$        | [N·mm <sup>-2</sup> ] | Měrná řezná síla  |
| MQL          | [–]                   | Minimum Quantity Lubrication<br>(Minimální množství mazání)       |
| PVD          | [–]                   | Physical vapor deposition<br>(Fyzikální depozice z plynné fáze)   |
| $r_\epsilon$ | [mm]                  | Poloměr špičky nástroje   |
| $R_m$        | [MPa]                 | Mez pevnosti  |
| $R_{p0,2}$   | [MPa]                 | Smluvní mez kluzu   |
| S-N-O        | [–]                   | Stroj-nástroj-obrobek   |
| $u_{kc}$     | [–]                   | Konstanta vyjadřující vliv posuvu                                 |
| $v_c$        | [m/min]               | Řezná rychlost  |
| $x$          | [–]                   | Nezávislá proměnná  |
| $x_{Fc}$     | [–]                   | Konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu                           |
| $x_{Ff}$     | [–]                   | Konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu                           |

|             |          |   |
|-------------|----------|---|
| $x_{Fp}$    | [-]      | Konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu |
| $y$         | [-]      | Závislá proměnná                        |
| $y_{Fc}$    | [-]      | Konstanta vyjadřující vliv posuvu       |
| $y_{Ff}$    | [-]      | Konstanta vyjadřující vliv posuvu       |
| $y_{Fp}$    | [-]      | Konstanta vyjadřující vliv posuvu       |
| $\alpha$    | [°], [-] | Úhel hřbetu, modifikace                 |
| $\gamma$    | [-]      | Austenitická matrice                    |
| $\gamma'$   | [-]      | Sekundární fáze $Ni_3(Al, Ti)$          |
| $\gamma''$  | [-]      | Sekundární fáze $Ni_3Nb$                |
| $\gamma_o$  | [°]      | Úhel čela v ortogonální rovině          |
| $\delta$    | [-]      | Sekundární fáze $Ni_3Nb$                |
| $\eta$      | [-]      | Sekundární fáze $Ni_3Ti$                |
| $\kappa$    | [°]      | Úhel nastavení hlavního ostří           |
| $\kappa_N$  | [°]      | Úhel nastavení vedlejšího ostří         |
| $\lambda_s$ | [°]      | Úhel sklonu hlavního ostří              |

# 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

V současném průmyslu je evidentním trendem zvýšená poptávka po progresivních materiálech, které nacházejí uplatnění v klíčových odvětvích jako je energetika, letectví a medicína. Pro splnění početných nároků musí tyto materiály disponovat vysokou odolností vůči agresivním prostředím, dlouhou životností a excelentními mechanickými vlastnostmi. Mezi takové materiály patří i niklové a kobaltové superslitiny. Avšak jejich unikátní vlastnosti představují při snaze docílit rychlého a efektivního obrábění značnou výzvu a potíže.

Tato bakalářská práce je zaměřena právě na soustružení těchto superslitin a poskytuje souhrnný pohled na jejich vlastnosti a obrobitelnost.

Cílem této práce je systematické prozkoumání mechanických, fyzikálních a technologických vlastností niklových a kobaltových superslitin. V návaznosti na tyto vlastnosti se práce zaměřuje na volbu a doporučení týkající se vhodných nástrojových materiálů a řezných podmínek při soustružení.

Stěžejní bod této práce představují technologické zkoušky obrobitelnosti. Hlavní podstatou je praktické měření řezných sil při soustružení kobaltové superslitiny ASTM F75, niklové superslitiny Inconel 713LC a uhlíkové oceli 12 050. Řezné síly jsou zde klíčové pro analýzu a optimalizaci obráběcího procesu a získané údaje umožňují lépe prozkoumat vlastnosti těchto materiálů a provést jejich případné modifikace.

V neposlední řadě je provedeno srovnání testovaných materiálů, díky kterému je možné zhodnotit rozdíly v chování těžkoobrobitelných superslitin oproti dobře obrobitelné uhlíkové oceli při procesu soustružení. Zjištěné poznatky představují cenné informace pro konkrétní aplikace.

Přínos této práce lze spatřit v teoretických a praktických poznatcích v rámci zpracování problematiky ovlivňující obrobitelnost superslitin. V praxi by výsledky bakalářské práce měly sloužit jako podklad pro průmyslové a vědecké pracovníky k predikci chování niklových a kobaltových superslitin při soustružení. Díky těmto informacím může být zajištěna optimalizace obráběcího procesu a dosaženo zvýšené kvality a efektivity při výrobě.

## 2. VLASTNOSTI SUPERSLITIN

Superslitiny jsou materiály, které díky jedinečné kombinaci prvků obsažených ve své struktuře vynikají ve speciálních průmyslových aplikacích, kde jsou vyžadovány vysoké pracovní teploty přesahující 540 °C a schopnost materiálu odolávat creepové deformaci, korozi a oxidaci. [1]

Pro složení superslitin se používá široká škála legujících materiálů. Ze zmíněných nároků na použití vychází zvýšené obsahové množství prvků jako chrom, wolfram, molybden, nikl či kobalt. Ve složení jednotlivých slitin lze také nalézt malé příměsi uhlíku, boru a zirkonia. Pro vybrané slitiny se jako přísadový prvek používá také hliník, tantal, titan a niob. [1]

Tabulka 1: Podíl prvků obsažených v superslitinách [1]

| Prvek             | Obsah [%]                  |                    |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
|                   | Slitiny na bázi Fe-Ni a Ni | Slitiny na bázi Co |
| Nikl              | ...                        | 0–22               |
| Kobalt            | 0–20                       | ...                |
| Chrom             | 5–25                       | 19–30              |
| Molybden, Wolfram | 0–12                       | 0–11               |
| Hliník            | 0–6                        | 0–4,5              |
| Titan             | 0–6                        | 0–4                |
| Niob              | 0–5                        | 0–4                |
| Tantal            | 0–12                       | 0–9                |
| Rhenium           | 0–6                        | 0–2                |

Pro průmysl se dodávají tyto slitiny ve formě litých, tvářených, válcovaných a extrudovaných polotovarů či v práškových formách. Dále nacházejí uplatnění pro použití v letectví, námořnictví, energetice, jako součástky plynových turbín, leteckých motorů, plášťů letadel, jaderných reaktorů a konstrukcí kosmických lodí. [1]

## 2.1 Mikrostruktura superslitin

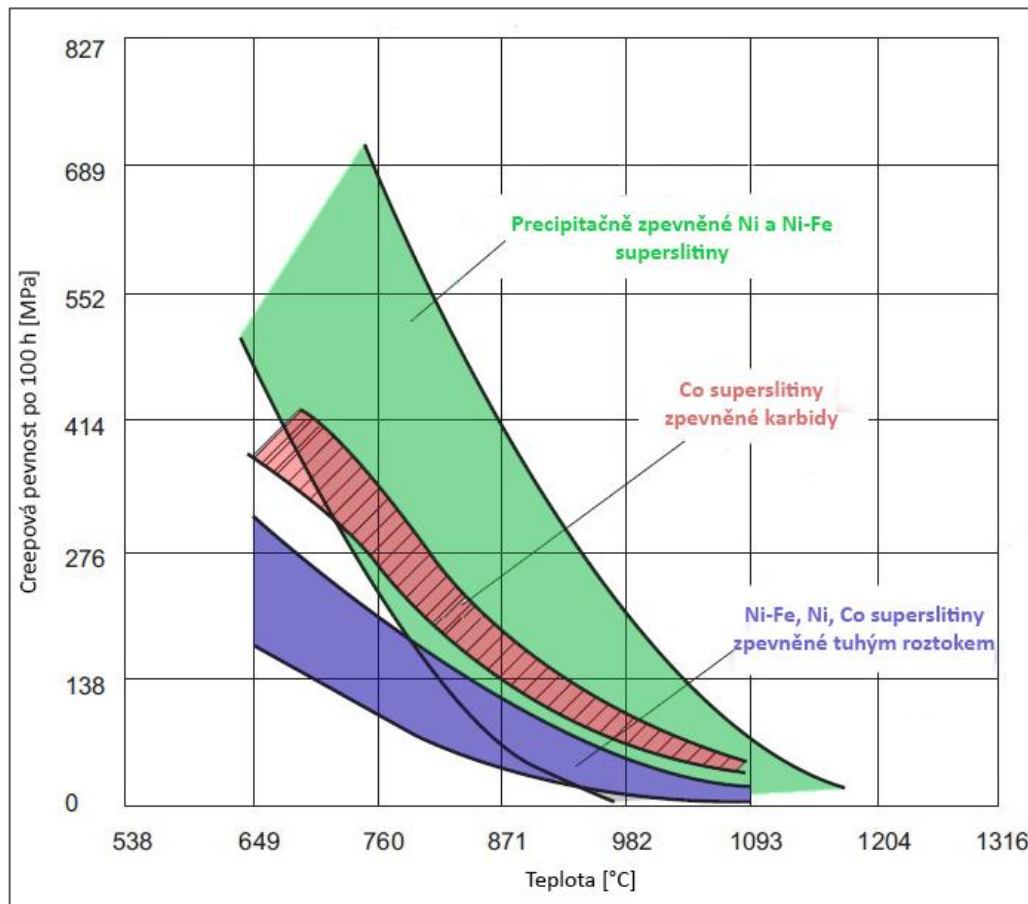
Mikrostruktura superslitin se skládá z austenitické matrice  $\gamma$  s krychlovou plošně centrovanou mřížkou (FCC) a dalších sekundárních fází. Složení mikrostruktury je ovlivněno podílem přísadových prvků. Ty ovlivňují pevnost, odolnost proti oxidaci, stabilitu či zvýšení obsahu precipitátů. Do oblasti sekundárních fází ovlivňujících vlastnosti struktury materiálu patří tyto:

- $\gamma'$  – krychlově plošně středěná mřížka,  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ,
- $\gamma''$  – tetragonální prostorově středěná mřížka,  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ,
- karbidy  $\text{MC}$ ,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{M}_6\text{C}$ ,  $\text{M}_7\text{C}_3$ , kde M zastává typ přechodného kovu (Cr, Ti, Mo, Ta, Hf),
- $\eta$  – hexagonálně uspořádaná mřížka,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ,
- $\delta$  – ortorombická mřížka,  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ . [1] [2]

Na požadovanou pevnost superslitin má vliv přidání legujících prvků (Cr, Mo, C, W, Ni, Nb, Ta nebo Re) a precipitační fáze  $\gamma'$  a  $\gamma''$ . Karbidy mohou podpořit proces zpevnění přímou cestou (při disperzním zpevnění) nebo cestou nepřímou (při plošné poruše krystalové struktury stabilizují hranice zrn proti nadměrnému smyku). Silnými prvky tvořící karbidy jsou nejčastěji Ti, Ta nebo Hf. Fáze  $\eta$  a  $\delta$  jsou podstatnou složkou během řízení struktury tvářených superslitin při procesu výroby. Ke zlepšení mechanických a chemických vlastností mohou rovněž přispět přísady jako B a Zr, které mají vliv na hranice zrn nebo tvorbu boridů. [1] [2]

## 2.2 Mechanické vlastnosti superslitin

Superslitiny disponují vysokou pevností při zvýšené teplotě a odolností proti tečení. Na tyto vlastnosti mají vliv již zmíněné přísadové prvky ve slitině, sekundární fáze a karbidy. Následující diagram popisuje odolnost superslitin proti tečení při pracovní teplotě různými způsoby zpevnění fázové struktury. [1]



Obrázek 1: Pevnostní charakteristika v závislosti na teplotě pro superslitiny na bázi Ni, Fe a Co [1]

Charakteristika zástupců vybraných komerčně používaných superslitin na bázi Ni, Fe-Ni a Co z hlediska mechanických vlastností v závislosti na okolní a pracovní teplotě je popsána a porovnána v následující tabulce. Snadno lze zpozorovat, že jednotlivé superslitiny nabývají různých kombinací hodnot mechanických vlastností při změně teploty. Tyto hodnoty jsou prezentovány jako nejvíce pravděpodobné v případě náhodného testování a slouží pro účely porovnání. [1]



Tabulka 2: Mechanické vlastnosti komerčně používaných superslitin [1]

| Slitina           | Mez pevnosti |        |        | Smluvní mez kluzu |        |        | Prodloužení v tahu |        |        |
|-------------------|--------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------------------|--------|--------|
|                   | 21 °C        | 540 °C | 760 °C | 21 °C             | 540 °C | 760 °C | 21 °C              | 540 °C | 760 °C |
|                   | [MPa]        |        |        |                   |        |        | [%]                |        |        |
| <b>Na bázi Ni</b> |              |        |        |                   |        |        |                    |        |        |
| Inconel 718       | 1 435        | 1 275  | 950    | 1 185             | 1 065  | 740    | 21                 | 18     | 25     |
| Hastelloy X       | 785          | 650    | 435    | 360               | 290    | 260    | 43                 | 45     | 37     |
| Haynes 230        | 870          | 720    | 575    | 390               | 275    | 285    | 48                 | 56     | 46     |
| Nimonic 90        | 1 235        | 1 075  | 655    | 810               | 725    | 540    | 33                 | 28     | 12     |
| <b>Na bázi Fe</b> |              |        |        |                   |        |        |                    |        |        |
| Haynes 556        | 815          | 645    | 470    | 410               | 240    | 220    | 48                 | 54     | 49     |
| Incoloy 909       | 1 310        | 1 160  | 615    | 1 020             | 945    | 540    | 16                 | 14     | 34     |
| <b>Na bázi Co</b> |              |        |        |                   |        |        |                    |        |        |
| Haynes 188        | 960          | 740    | 635    | 485               | 305    | 290    | 56                 | 70     | 43     |
| MP 159            | 1 895        | 1 565  | -      | 1 825             | 1 495  | -      | 8                  | 8      | -      |

### 3. ROZDĚLENÍ SUPERSLITIN

Podle obsahu klíčového chemického prvku se dělí superslitiny na tři hlavní skupiny:

- slitiny na bázi niklu,
- slitiny na bázi železa a niklu,
- slitiny na bázi kobaltu. [1]

Nikl (Ni) se řadí mezi univerzální a klíčové materiály nejdůležitějších průmyslových odvětví. Je důležitým přísadovým prvkem litin, ocelí a neželezných slitin. Slitin na bázi Ni se nejčastěji využívá při velmi náročných korozních a teplotních aplikacích, dále například k pokovování a v práškové metalurgii. Z hlediska fyzikálních vlastností má Ni atomové číslo 28 v periodické tabulce prvků. Atomová hmotnost je 58,69. Krystalová struktura je krychlová plošně středěná (FCC). Díky malé vzdálenosti mezi atomy a vyšší soudržné síle má Ni vysokou hustotu 8 908 kg/m<sup>3</sup>. Bod tání se rovná 1 453 °C. [1]

Železo (Fe) se řadí mezi prvky přechodných kovů periodické tabulky prvků. Má atomové číslo 26, jeho atomová hmotnost činí 55,85. Hustota Fe je 7 870 kg/m<sup>3</sup>. Bod tání je 1 538 °C. Krystalová struktura Fe je v určitém teplotním intervalu krychlová prostorově středěná či plošně středěná. Při ohřevu materiálu do teploty 911 °C nabývá Fe modifikace  $\alpha$  s BCC mřížkou. Při teplotě 769 °C navíc ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Od teploty 911 °C až 1 394 °C se pak vyskytuje jako modifikace  $\gamma$  s FCC mřížkou. Při překročení této teploty až do teploty tavení 1 538 °C má Fe opět modifikaci  $\alpha$  s BCC mřížkou. Sloučenina železa a uhlíku a jejich fázové přeměny v soustavě Fe-C jsou stavebním kamenem při výrobě ocelí a litin. [3]

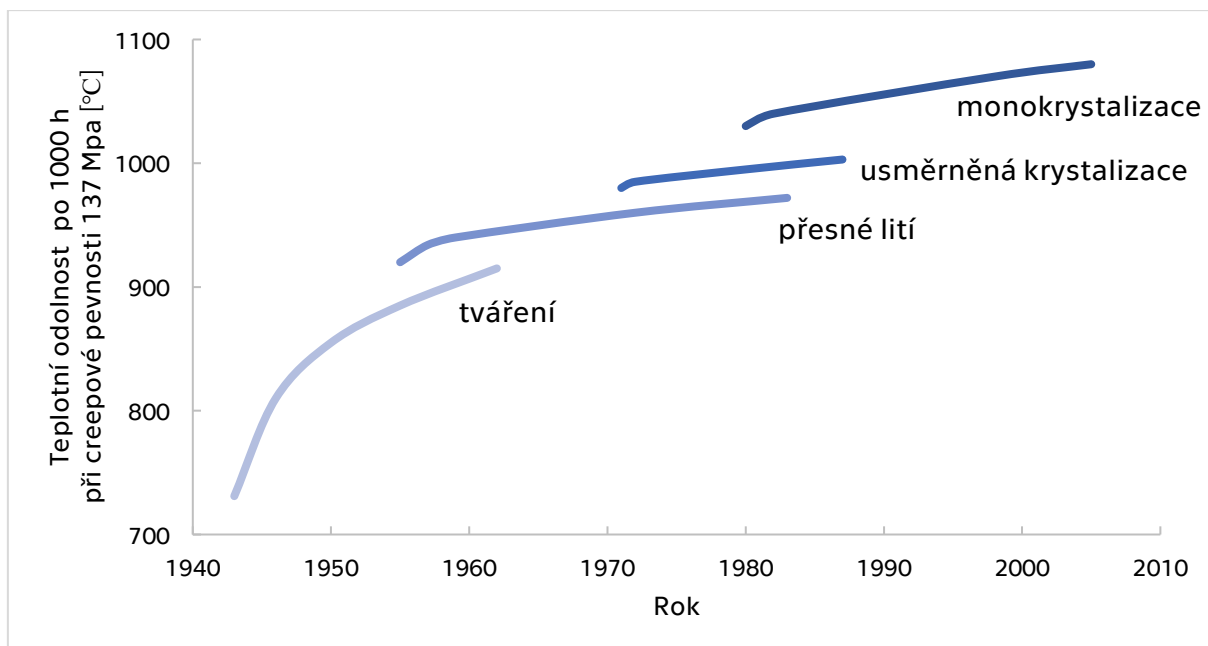
Kobalt (Co) se podobně jako Ni a Fe řadí do skupiny tranzitních kovů. Jeho atomové číslo je 27, atomová hmotnost je rovna 58,93. Hustota tohoto materiálu je 8 900 kg/m<sup>3</sup> a teplota tání 1 493 °C. Disponuje dvěma alotropními modifikacemi. Při nízkých teplotách má hexagonálně těsné uspořádanou krystalovou mřížku (HCP) s modifikací  $\alpha$ . Při překročení teploty 422 °C přechází na modifikaci  $\beta$  s plošně středěnou krystalovou mřížkou. Kobalt vykazuje velmi vysokou teplotou, do které si udržuje feromagnetické vlastnosti, a to 1 121 °C. Díky pevnosti při vyšších teplotách najde uplatnění při výrobě rezných nástrojů,

v práškové metalurgii a povrchových úpravách. Přidává se jako legující prvek do niklových slitin, kde při zvýšení pracovní teploty zpevňuje vytvrzovací fázi  $\gamma'$ , která má tendenci se zpětně rozpouštět. [4] [5]

### 3.1 Superslitiny na bázi niklu

Slitiny na bázi Ni jsou zpevňovány o intermetalickou fázi precipitátu v FCC matici. Pro slitiny na bázi Ni-Ti/Al je zpevňovacím precipitátem fáze  $\gamma'$ . Typickými zástupci jsou například tvářená slitina Udimet (U)-720 nebo litá slitina Inconel 713. Pro slitiny na bázi Ni-Nb je charakteristický precipitát fáze  $\gamma''$ . Příkladem je slitina Inconel 718. Některé slitiny jako Inconel 706 či Inconel 909 jsou schopné při zpevnění kombinovat jak fázi  $\gamma'$  tak i  $\gamma''$ . Dalším způsobem zpevnění u niklových superslitin typu Hastelloy X je pomocí tuhého roztoku, kde může dojít i k dodatečnému zpevnění precipitací karbidů a dalších intermetalických sloučenin. Tyto zpevňovací procesy mají za následek vysokoteplotní pevnost materiálu. [1]

Niklové superslitiny svým zavedením přispěly zejména leteckému průmyslu při aplikacích součástek v proudových motorech, které byly mechanicky namáhány při vysokých teplotách. Za dobu svého používání prošly tyto slitiny určitým vývojem za cenu vyhovění náročnějším požadavkům. Prvně byly používány polykrystalické slitiny, na jejichž hranicích zrn docházelo k tečení. Z tohoto důvodu byly do hranic zrn přidávány karbidy  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , které zlepšovaly pevnost zrn. Později se ujala metoda usměrněného tuhnutí, která v případě výroby lopatek turbín umožňovala po celé délce vznik sloupovité struktury stejnosměrně orientovaných zrn. Rovnoběžný směr zrn k ose lopatky zabraňoval klouzání hranic zrn, a tak došlo i ke zlepšení creepových vlastností. Nakonec bylo vizí vytvořit monokrystalovou strukturu slitin, kde by byly eliminovány hranice zrn. Tato inovace přispěla k daleko lepší odolnosti proti tečení materiálu a oxidaci. Následující graf poukazuje na vývoj niklových superslitin v oblasti zpracování mikrostruktury v závislosti teplotní odolnosti na časovém pokroku. [6]



Obrázek 2: Vývoj creepové odolnosti niklových superslitin [6]

Z hlediska chemické a mechanické odolnosti materiálu při vysokých teplotách lze rozdělit niklové superslitiny na žáruvzdorné a žárupevné. [5]

### 3.1.1 Žáruvzdorné slitiny

Použití těchto slitin se primárně odvíjí od požadavku na odolnost materiálu vůči oxidaci při velmi vysokých teplotách až 1 150 °C. Žáruvzdorné slitiny mají základní složení na bázi Ni-Cr a Ni-Cr-Fe. Nejdůležitější legující prvek je chrom, který má obsah od 15 do 30 %. Podíl železa v ternární hospodárnější variantě slitiny je od 3 do 20 %. Tyto slitiny se skládají z tuhého roztoku s FCC mřížkou zpevněným pouze substitučně, což dostatečně neeliminuje hrozbu případného tečení materiálu při mechanickém zatížení za vyšších pracovních teplot. K významným představitelům žáruvzdorných Ni-Cr slitin patří Hastelloy C-2000 typicky používaný v jaderných reaktorech a čerpadlech. Díky obsahu Cr (23 %), Mo (16 %) a Cu (1,6 %) velmi dobře odolává kyselině sírové, fluorovodíkové a chlorovodíkové. Podobně také Inconel 600 má výbornou odolnost proti vysokoteplotní oxidaci (až 1 093 °C), sulfidickému prostředí a horkým parám. Jedná se o slitinu na bázi Ni-Cr-Fe tvořenou kromě hlavních prvků Ni (72 %) a Cr (14–17 %), také podílem Fe (6–10 %). [1] [5]

### 3.1.2 Žárupevné slitiny

Hlavní vlastností žárupevných slitin je odolnost materiálu provoznímu namáhání za vysokých teplot až 950 °C, kde by mohlo dojít k nežádoucímu tečení. Podobně jako u žáruvzdorných slitin mají žárupevné základ Ni-Cr. Obsah chromu se pohybuje v rozmezí 12,5 až 30 %. Ovšem obsahují i přísadové prvky jako Al (max 6,1 %), Ti (2,4–5 %), které vytvářejí precipitační zpevňovací fázi a karbidy, které se rovněž podílejí na zvýšení pevnosti slitiny. K dalším legujícím prvkům, které zvyšují žárupevnost, patří Mo (do 10 %), Co (do 20 %) nebo Nb (do 5,25 %). Hojně používanou slitinou s vysokou pevností, korozivzdorností a odolností proti tečení až do 700 °C je Inconel 718, který se používá na vysoce namáhané části koster letadel, dílů leteckých motorů a komponentů v jaderném inženýrství. Za zlepšení mechanických vlastností při vysokých teplotách je zde kromě Cr (19 %) zodpovědný také Nb (5,1 %) a Mo (3 %) zvyšující pevnost v tahu. [1] [5]

### 3.2 Superslitiny na bázi niklu a železa

Ve struktuře těchto slitin je kromě niklu také zvýšený podíl obsahu železa, který se obvykle pohybuje mezi 18 až 55 %. Dalším důležitým obsaženým prvkem je Cr (15–23 %). Slitiny jsou zpevňovány intermetalickou sloučeninou precipitátu v FCC matici. Běžnou vytvrzovací fází je  $\gamma'$ . Typickými zástupci jsou tvářené slitiny Incoloy 901 či A-286. Slitina Hastelloy X čerpá svoji pevnost pouze z tuhého roztoku legovaného prvky jako Cr (20,5–23 %), Mo (8–10 %), W (0,2–1 %) a malého zpevnění pomocí karbidů. Disponuje však velmi dobrou pevností a odolností proti oxidaci do teploty 1 200 °C. Jedná se o oblíbený materiál pro výrobu lopatek turbín leteckých motorů. [1]

### 3.3 Superslitiny na bázi kobaltu

Zpevnění superslitin na bázi kobaltu je zajištěno pouze souhrou vytvrzení tuhým roztokem a za pomoci karbidů. Absence precipitačního zpevnění sloučeninami s Ti a Al v kobaltových slitinách je dána nedostatečnou efektivností zpevňovacího mechanismu jako je tomu u Ni a Fe-Ni slitin. Při pracovních teplotách do 800 °C mají tedy superslitiny na bázi Ni zpevněné precipitačně lepší žárupevné vlastnosti než na bázi Co. Při vyšších teplotách se pevnostní výhoda niklových superslitin snižuje v důsledku opětovného rozpouštění fáze  $\gamma'$ . [5]

Většina dodnes používaných kobaltových slitin je odvozena ze systémů Co-Cr-Mo a Co-Cr-W, které byly zkoumány americkým vynálezcem Elwoodem Haynesem na počátku 20. století. Hlavními legujícími prvky v superslitinách na bázi Co jsou Cr (do 30 %) a Ni (do 35 %). Doprovodné prvky jako W (do 20 %), a Mo (do 18 %) mají v těchto slitinách zpevňující charakter. Kobaltové slitiny mají díky své vysoké pevnosti a korozivzdorné povaze široké spektrum použití v nejrůznějších průmyslových aplikacích. O odolnost při vysokých pracovních teplotách se zasazují žárupevné kobaltové slitiny, které se používají v lopatkách turbodmychadel a součástkách spalovacích motorů. Pro aplikace vyžadující vysokou odolnost proti opotřebení, například řezné nástroje, funkční části lopatek turbín se používají slitiny na bázi Co-Cr-W se zvýšeným obsahem C, takzvané Stellity. Pro použití v korozních, zejména vodních prostředích je však kvůli nepříznivému vlivu na odolnost podíl tohoto prvku snižován. Pro zvýšení stupně korozní odolnosti jsou tak upřednostňovány nízkouhlíkové slitiny na bázi Co-Cr-Mo. Tyto slitiny se ukázaly jako výhodný biokompatibilní materiál pro dentální a chirurgické implantáty. Díky možnosti magnetizace se kobaltové slitiny také používají v součástkách elektromotorů a magnetických obvodů. [1] [5] [7]

### **3.3.1 Žárupevné slitiny**

Kobaltové slitiny pro vysokoteplotní aplikace se od počátku zavedení až doposud uplatňují zejména v plynových turbínách a spalovacích komorách, kde je materiál vystaven tečení a oxidaci. Navzdory tomu, že v průmyslu spíše převládá ekonomicky výhodnější použití slitin niklu, zastávají kobaltové slitiny důležitou pozici spojenou s jeho odolností proti sulfidaci, korozi a teplotám, kde dochází k rozpouštění zpevňovacích fází niklových slitin. Typickým zástupcem pro aplikaci v motorech s plynovou turbínou je slitina Haynes 188 schopná odolávat oxidaci a teplotám až do 1 100 °C. Typický je pro ni vyšší obsah Ni (20–24 %), Cr (21–23 %) a W (13–15 %). [1]

### 3.3.2 Korozivzdorné slitiny

Pro aplikace, které vyžadují aktivní ochranu proti koroznímu prostředí se jako ideální volbou ukázaly tvářené vysokoteplotní kobaltové slitiny s homogenní strukturou a nízkým obsahem uhlíku (max 0,8 %). Vlastnosti tvořící odolnost vůči koroznímu prostředí, oděru a vysokou pevnost v sobě komponuje nízkouhlíková slitina Co-Ni-Cr-Mo. Podíl molybdenu zde poskytuje vyšší korozní ochranu ve vodních prostředích. Pro příklad lze uvést slitinu MP35N, která disponuje vysokou pevností a tažností při zachování vysoké korozní odolnosti a nachází použití jak v medicínském, tak i leteckém průmyslu. Hlavními složkovými prvky jsou Ni (35 %), Cr (20 %) a Mo (12 %). [1]

### 3.3.3 Slitiny s vysokou tvrdostí

Stellity, respektive slitiny odolné proti opotřebení, mají pro své použití důležitý obsah prvků zvyšujících tvrdost a rezistivitu vůči abrazi, tedy wolframu a uhlíku. Typ opotřebení, které vykazuje daná aplikace musí být uváženo při výběru konkrétního složení materiálu. Při abrazivním opotřebení dochází k vzájemnému působení dvou těles, kde se měkčí povrch tře o tvrdší. V případě působení tří těles je tření způsobeno částicemi mezi dvěma povrchy. Při adhezivním opotřebení jsou dva povrchy ve styku a při vzájemném posunu stykových ploch dochází k zadírání. Tento jev je umocněn interakcí dvou kovových materiálů stejné povahy a nulovým obsahem mazání. Erozivní opotřebení se projevuje dopadem tvrdých částic na povrch, které jsou unášeny vzduchem, proudem kapaliny či plynu. Celková odolnost vůči abrazi tedy závisí na zpevnění pomocí karbidové fáze a podílu příslušných legur. V praxi většinou obsahují Stellity karbidy typu  $M_7C_3$  bohaté na chrom a  $M_6C$  obsahující wolfram. Složení těchto prvků se liší s druhem slitiny. Slitinou s největší odolností proti oděru je tzv. Stellite 1, která v sobě obsahuje Cr (30 %), W (13 %) a C (do 2,5 %). Uplatnění nachází stellity při výrobě řezných nástrojů, ventilů a funkčních hran turbínových lopatek vystavených kavitaci. [1] [8]

### **3.3.4 Slitiny s elektromagnetickými vlastnostmi**

Z pohledu magnetismu lze kobaltové slitiny rozdělit na magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály. Měkké magnetické materiály mají schopnost zmagnetizovat při působení magnetického pole a při následném odstranění se vrátit do původního nemagnetického stavu. Tyto magnety mají složení na bázi Co-Fe-V a Co-Fe-Cr. Tvrdé magnetické materiály jsou schopny si udržet svou magnetizaci i po odstranění magnetického pole a chovají se jako magnety permanentní. Používají se pro laminace motorů, generátorů a v magnetických obvodech. Zástupcem jsou slitiny Al-Ni-Co vyvinuté ve 40. a 50. letech 20. století a jsou používány dodnes. Postupný rozvoj umožnil aplikaci permanentních magnetů slitin na bázi vzácných zemin a kobaltu. S nástupem výkonné a levné varianty prvku neodymu bylo umožněno použití za vyšších teplot nad 350 °C. [1]

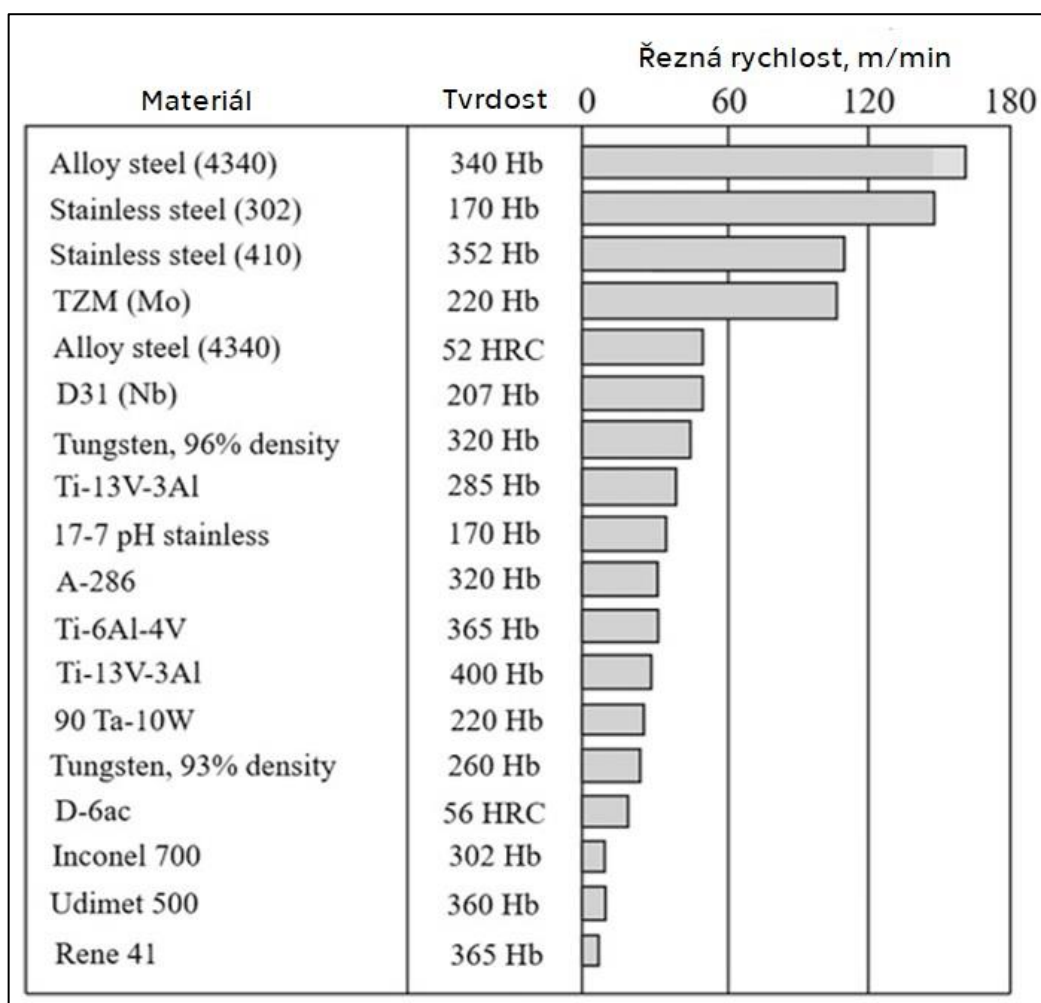
### **3.3.5 Biokompatibilní slitiny**

Biokompatibilní kobaltové slitiny přispívají svým využitím v oblasti výroby chirurgických implantátů, kde je kladen požadavek na pozitivní interakci materiálu a živé tkáně bez rizika toxicity, vzniku alergie a zánětu. Tyto materiály nesou označení Vitallium a jejich použití započalo ve 30. letech 20. století. Aplikace zahrnují protézy srdeční chlopně, dentální implantáty, náhrady kloubů a součástky jako svorky, šrouby a destičky pro fixaci zlomenin. Biomateriály na bázi kobaltu podléhají striktním požadavkům sady norem Americké společnosti pro testování a materiály (ASTM), která je součástí ISO organizací. [1]



## 4. OBRÁBĚNÍ SUPERSLITIN

Obrábění superslitin je vzhledem k rezistivitě materiálu vůči procesu řezání nástrojem velmi problematické. Vysokoteplotní odolnost superslitin má za následek generování velkého nežádoucího množství tepla a namáhání na nástroj. Proto je nutno volit několikanásobně nižší rezné rychlosti než u jiných obvykle používaných materiálů, což má ekonomické následky ve formě snížení výrobní produkce. Schéma demonstruje porovnání obrobitelnosti průmyslově používaných kovů společně se superslitinami. [9]



Obrázek 3: Relativní obrobitelnost superslitin v porovnání s ocelmi a slitinami vybraných kovů [9]

Superslitiny na bázi Ni-Fe jsou zpravidla díky měkčí struktuře lépe obrobitelné než superslitiny na bázi Ni a Co při stejných řezných podmínkách. Ni a Co slitiny v sobě ukrývají několik zásadních faktorů, které mají vliv na výsledné obráběcí vlastnosti. [10]

Při zvýšené teplotě dochází k jejich mechanickému zpevnění. Tento fakt souvisí se schopností superslitin zachovat si pevnost při vysokých pracovních teplotách a má za následek zpevnění při teplotě utváření třísky nástrojem. Daný efekt vzniká při nevhodném řezu nástroje, který vrstvu materiálu před sebou deformačně zpevňuje a je složité ji opakovaně proniknout. K úspěšnému obrábění vedou správně zvolené parametry nástroje a řezných podmínek. Příkladem může být vysoká ostrost řezných hran, odpovídající úhly hřbetu, optimální rychlost posuvu a hloubka řezu, jejichž nastavení by mělo korespondovat s nutností nástroje odstraňovat vrstvu pod povrchem. [1]

Superslitiny dále vykazují abrazivní vlastnosti díky přítomnosti částic karbidů legujících kovů. Slitiny zpevněné precipitačně obsahují abrazivní částice Ti a Al. Tyto velmi tvrdé karbidové vměstky mají za následek otěr nástroje. Navíc nejsou schopny se plasticky deformovat a podílejí se na degradaci materiálu bříty a na zhoršené integritě při odstranění z povrchu obrobku. [9]

Mají nízkou tepelnou vodivost z místa řezu. To souvisí se zpevněním při teplotě utváření třísky, kde dochází k přenosu zvýšeného množství tepla na nástroj. Teplota na špičce nástroje tak může přesáhnout 1 000 °C, což vede k plastické deformaci řezné hrany. [9]

Díky velmi nízké tepelné vodivosti a vysokému tření mezi nástrojem a třískou dochází k nahromadění dlouhých třísek kolem nástroje. V momentě dosažení nestabilního množství nárůstků na bříty je tento přírůstek odstraněn dalším proudem třísky a zároveň dochází k nežádoucímu úběru materiálu nástroje. To vede ke snížení kvality povrchu obrobku a poškození nástroje. [9]

Důležitým faktorem je také snaha o minimalizaci řezných sil, které ovlivňují vznik vibrací. Pro jejich redukci je výhodné použití velkých nástrojových držáků a minimalizace vyložení nástroje. Z pohledu koncepce stroje je třeba volit dostačující výkon a optimální tuhost celé sestavy. [1]

## 5. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Výběr optimálního řezného nástroje má vliv na jeho životnost a výslednou hospodárnost procesu. Musí odpovídat příslušné obráběcí operaci, metalurgickému stavu konkrétní slitiny a dalším faktorům obráběcího procesu (dosažitelné posuvy a rychlosti, řezné kapaliny, tuhost sestavy). Důležitým aspektem je řezná rychlost, která vede k vyšší produktivitě. Ta má ovšem v případě superslitin nežádoucí účinek na životnost nástroje, a tak je třeba volit tvrdé nástrojové materiály jako jsou povlakované slinuté karbidy, kubický nitrid boru, keramika či okrajově speciální rychlořezné oceli. [9] [10]

### 5.1 Rychlořezné oceli (HSS)

Z hlediska vysoké řezné rychlosti, houževnatosti, ostrosti břitu a příznivé ceně jsou nástroje z HSS oblíbenou volbou v nejrůznějších průmyslových aplikacích. V případě obrábění superslitin to ale tak úplně neplatí v důsledku nízké tvrdosti za tepla. Nástroje HSS se spíše používají pro měkčí skupiny slitin na bázi Ni-Cu nebo Ni-Fe, kde poskytují přijatelné výsledky. Aplikace nástrojů z rychlořezných ocelí by měla být uvažována při operacích s přerušovanými řezy, kde je požadavek na vyšší houževnatost a odolnost vůči nárazům. Zde se používají speciální vysoce legované nástroje, které disponují delší životností než běžně používané nástroje. Jedná se o například o třídy T15, M36 a M44 s vyšším podílem wolframu a kobaltu. [9] [10]

### 5.2 Slinuté karbidy

Nástroje ze slinutých karbidů naleznou uplatnění při obrábění žárupevných slitin zpevněných precipitačně. Jejich řezná rychlost se pohybuje od 10 až 30 m/min. V případě povlakovaných nástrojů až 50 m/min. V porovnání s HSS nabízí vyšší odolnost proti oděru a životnost. Jako efektivní se ukázalo použití karbidových nástrojů na bázi wolframu, který nabízí dlouhou trvanlivost, lepší houževnatost a možnost rychlejšího posuvu do řezu. Nejběžněji používanou třídou je C2 s podílem karbidu wolframu nad 90 % a zbylou příměsí kobaltu. Rozhraní mezi karbidem wolframu a kobaltem funguje na principu kompozitu s kovovou maticí, kde kobalt slouží jako pojivo. Jeho infiltrace do prášku zvyšuje odolnost proti opotřebení a houževnatost. Jako aditivum

pro zlepšení tvrdosti se také využívá 0,5–4 % karbidu tantalu. Nástroje na bázi karbidu titanu se v případě obrábění Ni a Co superslitin neuplatňují kvůli jeho rozpustnosti v těchto slitinách. [9] [10]

Povlakované karbidové nástroje disponují vysokou tvrdostí a chemickou stabilitou. Karbidový základ je obvykle potažen vrstvou TiC popřípadě  $\text{Al}_2\text{O}_3$  či TiN. V praxi se využívá povlaků typu PVD a CVD s tloušťkou mezi 5–7  $\mu\text{m}$ . První zmíněný je aplikován při nižších teplotách pro dosažení malé drsnosti povrchu s minimalizací teploty tření a řezných sil. Vysokoteplotní CVD povlak díky možnosti aplikace více vrstev povlaků propůjčuje pozitivní vlastnosti spojené s nižším opotřebením nástroje a zvýšením řezných rychlostí. [7]

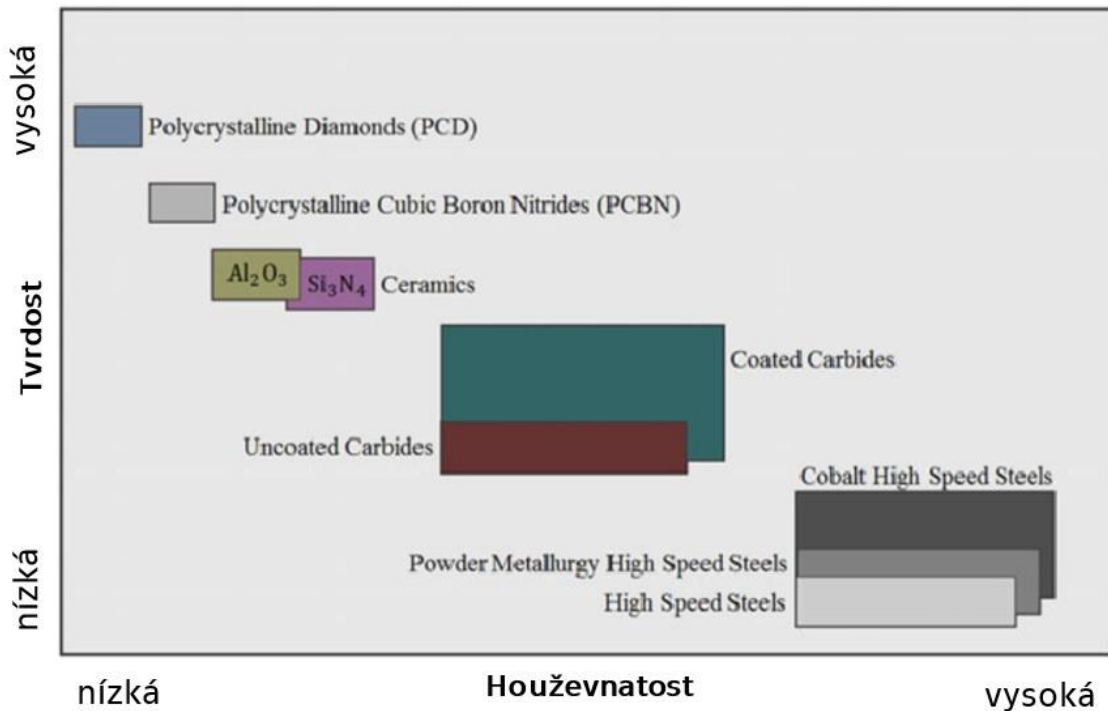
Ze studie Shuha Kosekiho a spol. týkající se obrábění niklové superslitiny Inconel 718 vyšlo najevo, že CVD TiN povlaky disponují nejlepšími řeznými vlastnostmi. Jejich pevná difuzní vazba mezi povlakem a karbidickým substrátem nabízí vysokou stabilitu, minimum opotřebením, odolnost proti plastické deformaci a pro obrábění niklových superslitin představují upřednostňující volbu než PVD povlaky. [11]

### 5.3 Keramika

Důležitou vlastností keramických nástrojů je jejich produktivita spojená s vyšší řeznou rychlostí v rozsahu 150–1 200 m/min navzdory asi o pětinu nižší rychlosti posuvu než v případě karbidů. Keramika má dvě hlavní materiálové skupiny, a to na bázi oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Aluminy) a nitridu křemíku  $\text{SiN}_4$  (Sialony). Aluminy mají vysokou pevnost v tlaku, tvrdost a chemickou stabilitu proti oxidaci a působení tepla. Přísadami oxidu zirkoničitého  $\text{ZrO}_2$  lze navíc zlepšit nedostatečnou houževnatost keramiky a karbidem titanu TiC či nitridem titanu TiN také odolnost proti nárazům. Superslitiny na bázi Ni lze s tímto typem nástrojů obrábět při rychlostech 120–240 m/min. Dalším navýšením řezné rychlosti keramiky z oxidu hlinitého k hodnotám 200–750 m/min je možné dosáhnout jejím zpevněním pomocí whiskerových vláken na bázi karbidu křemíku SiC. Druhou skupinou keramických nástrojů jsou Sialony. Ty svou řeznou rychlostí, houževnatostí, rychlostí posuvu a odolností proti nárazům převyšují vlastnosti oxidické a směsné oxidické keramiky. Výborně se tak hodí pro hrubovací operace. [7] [9]

## 5.4 Kubický nitrid boru (CBN)

V porovnání s ostatními nástrojovými materiály disponuje kubický nitrid boru tvrdostí, kterou převyšuje už jen diamant. Vyrábí se při vysokých teplotách a tlaku. Byl vyvinut pro eliminaci vysoké nestability a špatné houževnatosti diamantových nástrojů. Udrží si vysokou chemickou stabilitu při teplotě 1 000 °C a vykazuje vynikající odolnost proti oxidaci. Díky těmto vlastnostem umožňuje vysokorychlostní obrábění slitin Ni a Cr. Navzdory jeho vysoké ceně je tvrdší než řezná keramika a karbidové nástroje a je schopen pracovat při vyšších řezných rychlostech. Břitové destičky z CBN nachází využití při soustružení řady superslitin na bázi Ni a Co, kde tvrdost obráběného materiálu překračuje hodnotu 340 HV. [7] [9] [12]



Obrázek 4: Vlastnosti řezných materiálů [12]

## 6. MECHANISMY OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE

Nástroje jsou během řezného procesu vystavovány špatnému vedení tepla, mechanickému zpevnění materiálu a dalším aspektům snižujícím životnost nástroje. Okamžik, kdy lze uznat nástroj za opotřebený je jeho neschopnost dosáhnout dalším řezným procesem požadované kvality povrchu. Požadavky na jakost povrchu se liší konkrétní operací. Pro příklad u hrubování s cílem, co největšího úběru budou tyto požadavky nižší než u obrábění na čisto. Chemické a mechanické interakce mezi nástrojem, materiálem a stanovenými podmínkami se podílejí na celkovém opotřebení. Činitelé opotřebení působící na nástroj, které lze při obrábění superslitin pozorovat jsou abrazivní, adhezivní, difúzní, oxidační a lomové. [9] [13]

Abrazivní opotřebení se odvíjí od tvrdosti břitu nástroje. Čím vyšší je podíl tvrdých prvků v materiálové struktuře nástroje, tím lépe odolává působení hrubých částic obráběného materiálu. Abraze je převládajícím způsobem opotřebení a lze u ní předvídat trvanlivosti nástroje. [13] [14]

Při adhezi dochází za působení tlaku ke generování nárůstků třísky na břitu řezného nástroje. Tento jev lze nejčastěji sledovat při nižších teplotách v případě obrábění hliníku, korozivzdorných a nízkouhlíkových ocelí, jejichž tříska snadno přilne k materiálu břitu. [13] [14]

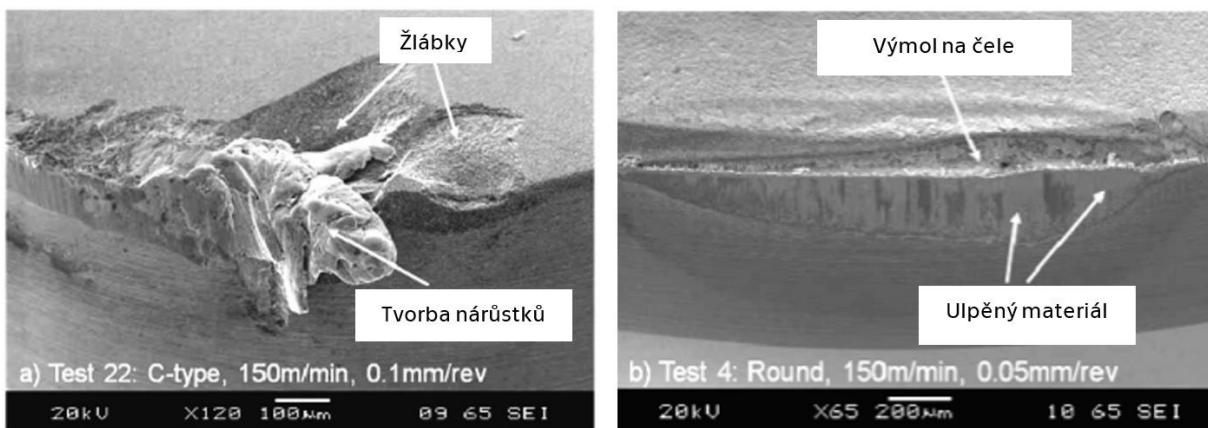
Rozsah difúzního opotřebení koresponduje s chemickým složením materiálu nástroje a obrobku. Difúze mezi těmito dvěma elementy vzniká při vysoké teplotě. Atomy třísky přechází do nástroje a naopak. Tento jev má za následek vznik opotřebení ve tvaru žlábků na čele břitu. [13]

S vysokou teplotou řezu vzniká oxidace, která může mít případný vliv na vznik žlábků v řezném procesu. Míra oxidačního opotřebení souvisí se schopností materiálu vytvořit si ochrannou oxidovou vrstvu. Pro příklad oxidová vrstva wolframu a kobaltu je snadněji eliminována třískou než v případě oxidu hlinitého. [13]

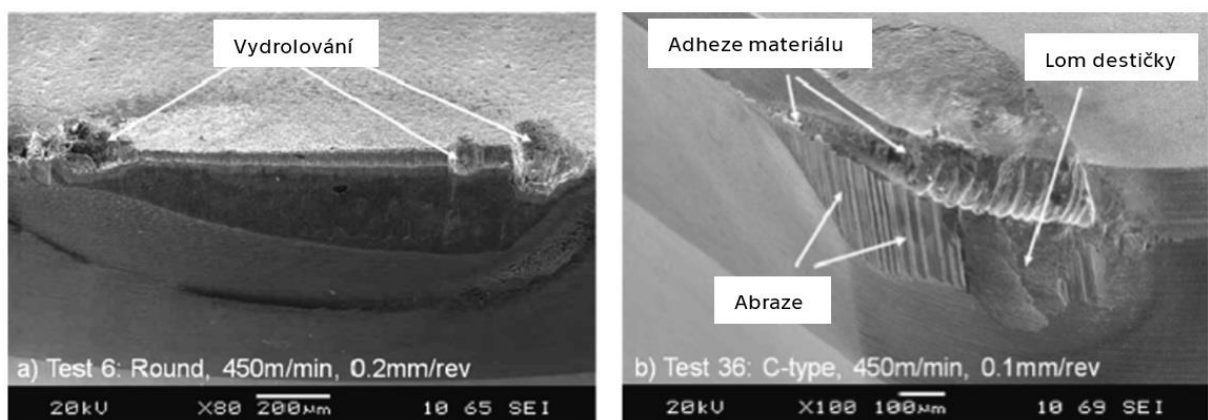
Lom je výsledkem kombinace mechanického zatížení břitu a proměnlivého působení teploty. Vysoké řezné síly ovlivňují pevnost břitu. Za jejich vznikem stojí rezistivita materiálu, vysoké posuvy či hloubka řezu. Lom se může objevit při plastické deformaci geometrie nástroje. [13] [14]

Z hlediska mechanismů opotřebení břitových destiček při obrábění superslitin lze uvést experiment S.A. Khana a kol. Tento pokus spočíval v analýze způsobu opotřebení břitových destiček při soustružení Inconelu 718. Parametry experimentu byly proměnlivá řezná rychlost  $v_c = 150; 300; 450$  m/min, posuv  $f = 0,05; 0,10; 0,20$  mm/ot. a konstantní hloubka řezu  $a_p = 0,2$  mm. Jako řezný nástroj byly použity CBN břitové destičky tvaru R (kulatá) a tvaru C (kosočtvercová). [15]

Z výsledku experimentu vyšlo najevo, že primárním způsobem opotřebení destičky tvaru C při  $v_c = 150$  m/min byl oděr působením abrazivních částic společně s adhezivním opotřebením a tvorbou nárůstků. Při dosažení maximální  $v_c = 450$  m/min došlo ke kritickým lomům. Naproti tomu břitové destičky tvaru R při  $v_c = 150$  m/min vykazovaly až 5x vyšší životnost. Při  $v_c = 300-400$  m/min nebyly pozorovány určité rozdíly v životnosti obou typů nástrojů. [15]



Obrázek 5: Opotřebení břitových destiček tvaru C a R při řezné rychlosti 150 m/min [15]



Obrázek 6: Opotřebení břitových destiček tvaru C a R při řezné rychlosti 450 m/min [15]

## 7. ŘEZNÉ PROSTŘEDÍ

Aplikace řezné kapaliny při procesu obrábění by měla korespondovat se zvýšením kvality, produktivity a ekonomičnosti výrobního procesu. Kapaliny se podle účinku dělí na chladící a mazací. Tyto vlastnosti se odvíjí od příslušné operace spojené s řeznými podmínkami. Úkolem řezných kapalin používaných při obrábění nejen těžkoobrobitelných slitin je:

- chladící účinek (prodloužení trvanlivosti nástroje, lepší kvalita výsledného povrchu),
- mazací účinek (snížení tření, řezných sil a opotřebení nástroje),
- odvod třísky (kontrola nahromadění třísky v pracovním prostoru),
- ochrana proti korozi,
- minimální dopad na životní prostředí,
- cenová dostupnost. [7]

Často používaným druhem řezné kapaliny, zejména při soustružení s vyšší rychlostí úběru kovu, jsou kapaliny na bázi vody. Patří sem emulze a syntetické kapaliny obsahující umělá rozpouštědla. Použití těchto kapalin je možné i při obrábění keramikou. Nicméně v některých případech není keramika imunní vůči teplotním rázům, a proto se řezná kapalina nedoporučuje. Podobně to platí i pro řezné oleje, které mají skvělé mazací účinky, ale nízký bod vzplanutí. [1] [7]

V novodobé problematice týkající se použití řezných kapalin při obrábění a dokončovacích procesech je možné se setkat s metodou kryogenního chlazení. Zavedení přispívá k lepší ekonomice i redukci nežádoucích vlivů na životní prostředí v podobě olejů a emulzí. Chladícím médiem bývá zkapalněný dusík aplikovaný tryskami do místa řezu. Díky prudkému ochlazení je zachována tvrdost nástroje a třísky jsou snadno odlamovány a následně recyklovány. [7]

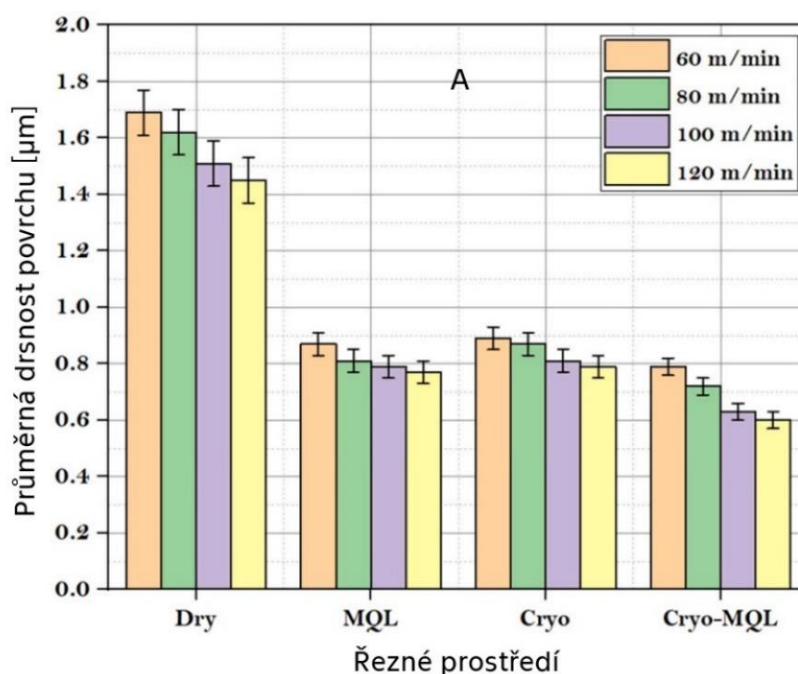
Z ekonomického hlediska lze také uvést metodu s minimálním množstvím mazání (MQL), která spočívá v rozprašování rostlinného oleje či biologicky rozložitelného syntetického esteru v proudu stlačeného vzduchu. Výhodná je malá spotřebě pohybující se v průmyslu mezi 10–100 ml/h. Metoda MQL může rovněž poskytnout vyšší životnost nástroje a kvalitu povrchu obrobku. Je však třeba dbát na řádnou kontrolu směsi, která může způsobit vznik mlhy nebezpečné pro pracovníky. [7]



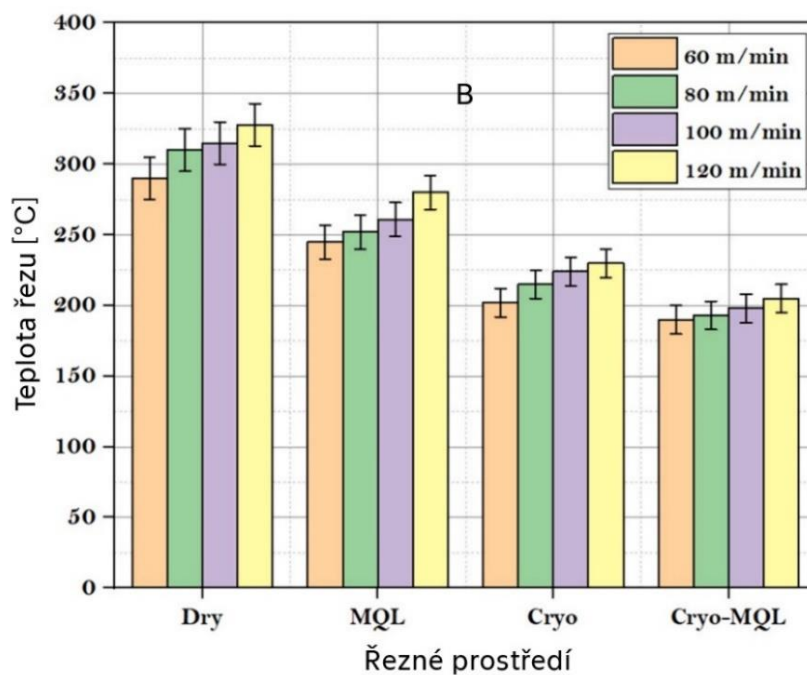
Experiment Mohda Danishe a kol. testoval vliv řezných podmínek společně s chladícími a mazacími kapalinami při soustružení polotovaru z niklové superslitiny Inconel 718. Pro obráběcí proces byla použita proměnlivá řezná rychlost  $v_c = 60; 80; 100$  a  $120$  m/min, konstantní posuv  $f = 0,15$  mm/ot. a hloubka řezu  $a_p = 0,5$  mm. Jako řezný nástroj se zvolila nepovlakovaná wolfram-karbidová destička. Mezi posuzovanými prostředími byly použito:

- soustružení za sucha,
- MQL – rostlinný olej (30 ml/h) ve stlačeném vzduchu (5 bar),
- kryogenní chlazení – tekutý dusík ( $-196$  °C),
- kombinace MQL s kryogenním chlazením, rostlinný olej a tekutý dusík při zachování původní koncepce. [16]

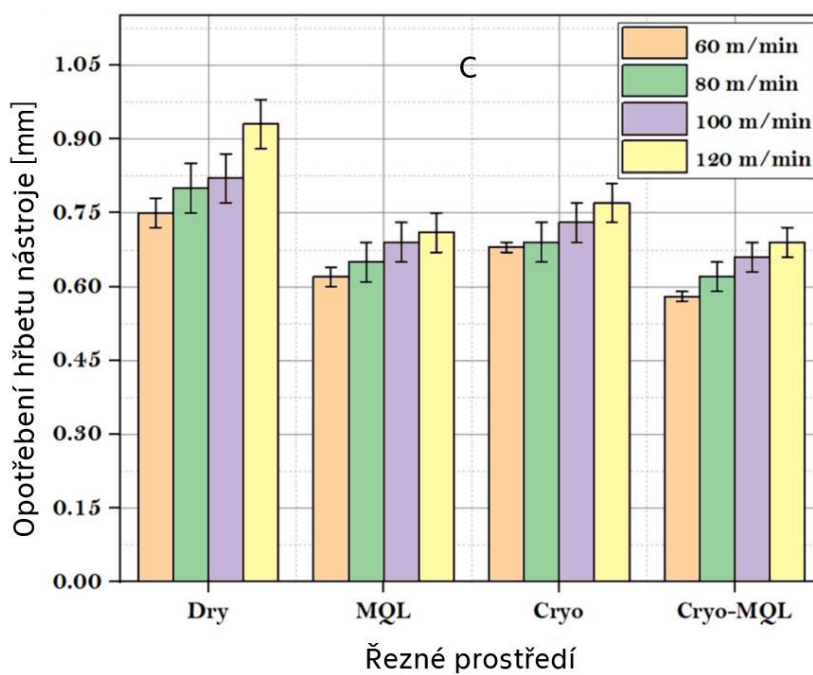
Z výsledků experimentu vyplynulo, že kombinace MQL s kryogenním chlazením vykazuje skvělé chladící a zároveň mazací účinky. Díky tomu dosáhla nejlepší kvality povrchu, snížení řezné teploty a minimálního opotřebení nástroje v porovnání s ostatními prostředími. Oproti konvenčnímu suchému soustružení byla při  $v_c = 100$  m/min drsnost povrchu snížena o 60,3 %, teplota řezu o více jak 37 % a opotřebení nástroje o téměř 20 %. [16]



Obrázek 7: Vliv řezných prostředí na průměrnou drsnost povrchu [16]



Obrázek 8: Vliv řezných prostředí na teplotu řezu [16]



Obrázek 9: Vliv řezných prostředí na opotřebení hřbetu nástroje [16]

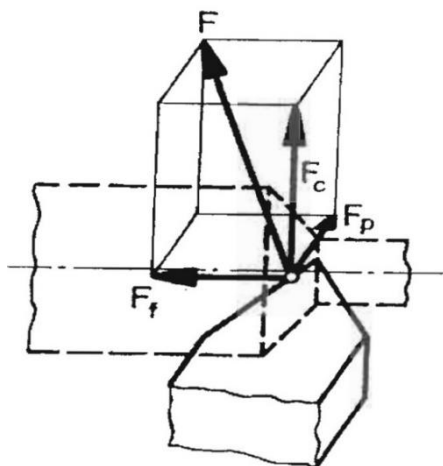
## 8. SÍLY PŘI OBRÁBĚNÍ

Při procesu obrábění vznikají řezné síly, díky kterým dochází k dělení materiálu a tvorbě třísky. Znalost velikosti a působení těchto sil je důležitá pro optimalizaci břitu nástroje a samotného procesu řezání. Měření řezných sil je prováděno pomocí dynamometru z důvodu vysoké přesnosti a spolehlivosti. Během procesu obrábění vznikají síly, které působí v různých směrech. Výsledná řezná síla se v případě vázaného řezání skládá ze tří jednotlivých složek – řezné síly  $F_c$ , posuvové síly  $F_f$  a pasivní síly  $F_p$ . [13] [17]

Řezná síla  $F_c$  vzniká na základě tření mezi nástrojem a obrobkem. Tato síla bývá obvykle největší ze všech složek a má značný podíl (zhruba 99 %) na příkonu stroje. Pro řadu materiálů platí vztah, kdy se zvyšující se řeznou rychlostí klesá velikost řezné síly. Příčinou je vysoká teplota a změkčení materiálu. [13] [17]

Posuvová síla  $F_f$  působí ve směru obrábění polotovaru a posuvu nástroje. Narozdíl od řezné síly se na příkonu stroje podílí minimálně. Její intenzita dosahuje 40 až 50 % velikosti řezné síly. Směřuje ve směru, který je nejvíce ovlivněn tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrodek. Velikost posuvové síly má značný podíl při vrtání, kde dochází k jejímu výraznému nárůstu při zvětšování průměru vrtáku. [13] [17]

Pasivní síla  $F_p$  je kolmá k hlavní řezné síle. Při srovnání činí velikost pasivní síly přibližně 25 % velikosti řezné síly. Narozdíl od posuvové síly působí ve směru nejmenší tuhosti soustavy (S-N-O), čímž způsobuje vznik vibrací, vychylování nástroje a má vliv na kvalitu obráběné plochy. [13] [17]



Obrázek 10: Rozložení sil při podélném soustružení [17]

Významnou veličinou je měrná řezná síla  $k_c$ , která představuje velikost hlavní řezné síly působící na jednotku plochy řezu: [17]

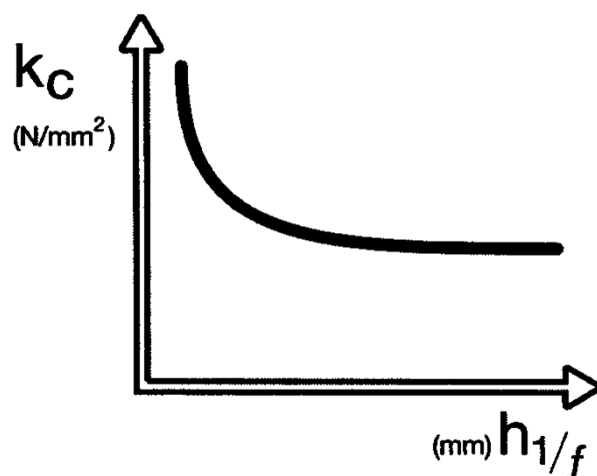
$$k_c = \frac{F_c}{A_D}, \quad (8.1)$$

kde:  $k_c$  – měrná řezná síla [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ],

$F_c$  – hlavní řezná síla [N],

$A_D$  – plocha řezu [ $\text{mm}^2$ ].

Měrná řezná síla je spjata s měrnou energií nutnou k odstranění daného objemu materiálu a souvisí s tloušťkou odřezávané vrstvy a posuvem ( $h_1/f$ ). [13]



Obrázek 11: Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na tloušťce odřezávané vrstvy  $h_1$  a posuvu  $f$  [13]

Při výpočtu měrné řezné síly v závislosti na posuvu platí následující empirický vztah: [17]

$$k_c = \frac{C_{kc}}{f^{u_{kc}}}, \quad (8.2)$$

kde:  $f$  – posuv [mm],

$C_{kc}$ ,  $u_{kc}$  – empirické konstanty.

Exponent  $u_{kc}$  obecně nabývá hodnoty v rozmezí 0,15–0,30. [17]

V rámci výpočtu jednotlivých složek sil popsanych výše lze rovněž použít empirické vztahy mocninového typu: [17]

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad (8.3)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad (8.4)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad (8.5)$$

kde:  $C_{F_c}$ ,  $C_{F_f}$ ,  $C_{F_p}$  – empirické konstanty,

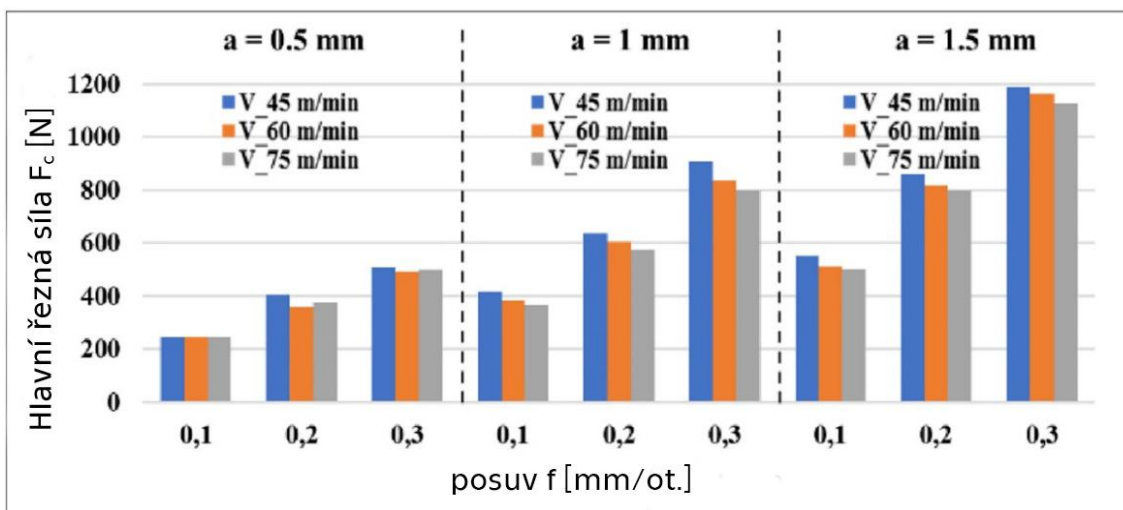
$x_{F_c}$ ,  $x_{F_f}$ ,  $x_{F_p}$ ,  $y_{F_c}$ ,  $y_{F_f}$ ,  $y_{F_p}$  – empirické exponenty.

Pro soustružení obecně platí, že přibližná hodnota exponentu  $x_{F_c}$  se pohybuje kolem 1 a  $y_{F_c}$  kolem 0,75. [17]

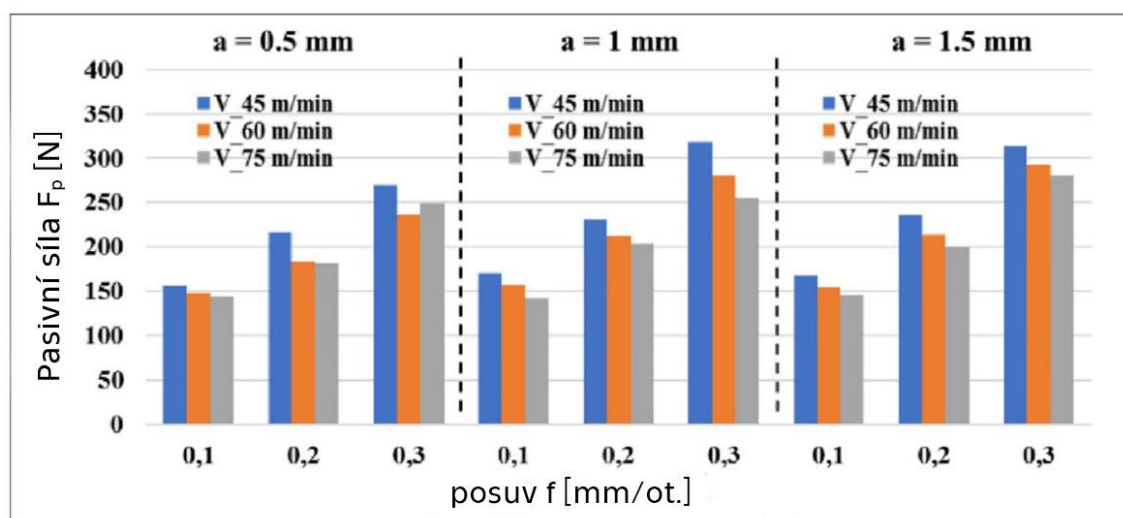
Na velikost a působení jednotlivých složek sil a měrné řezné síly mají pochopitelně vliv další faktory, např. vysoká pevnost, tvrdost a odolnost proti plastické deformaci materiálu obrobku, která má za následek vznik vysokých řezných sil. Důležitým faktorem je také nástrojová geometrie. Například velikost poloměru špičky  $r_\epsilon$ . Menší poloměr špičky břitu nástroje přispívá k redukci pasivní složky síly, která má tendenci způsobovat vychýlení nástroje a vibrace. Velkou roli zde hraje také úhel čela  $\gamma_o$ . Pozitivní úhel čela znamená snížení tření mezi obrobkem a nástrojem a tím také nižší řezné síly. Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa$  působí na směr odchodu třísky. Vyšší úhel nastavení hlavního ostří způsobí nárůst posuvové složky síly a zároveň zmenšení pasivní složky síly. Úhel nastavení vedlejšího ostří  $\kappa_N$  působí na kvalitu povrchu a tření. Úhel hřbetu  $\alpha$  ovlivňuje tření nástroje a obrobku a je nutný pro to, aby ostří efektivně řezalo. Malý úhel v tomto případě zvyšuje tření a teplo. Úhel sklonu ostří  $\lambda_s$  působí na směr odcházení třísky. Kladný úhel sklonu ostří umožňuje efektivní odstraňování třísky směrem od obráběného materiálu. [13]

Experiment Mehmeta Erdiho Korkmaze a kol. studoval chování řezných sil při soustružení niklové superslitiny Nimonic 80A. Jako řezný nástroj byla použita negativní povlakovaná karbidová destička CNGN 120408-MS. Dále zvolena proměnlivá hloubka řezu  $a_p = 0,5; 1, 1,5$  mm, řezná rychlost  $v_c = 45, 60, 75$  m/min a posuv  $f = 0,1; 0,2$  a  $0,3$  mm/ot. Velikosti řezných sil byly zaznamenány dynamometrem od firmy Kistler Type 9257B. [18]

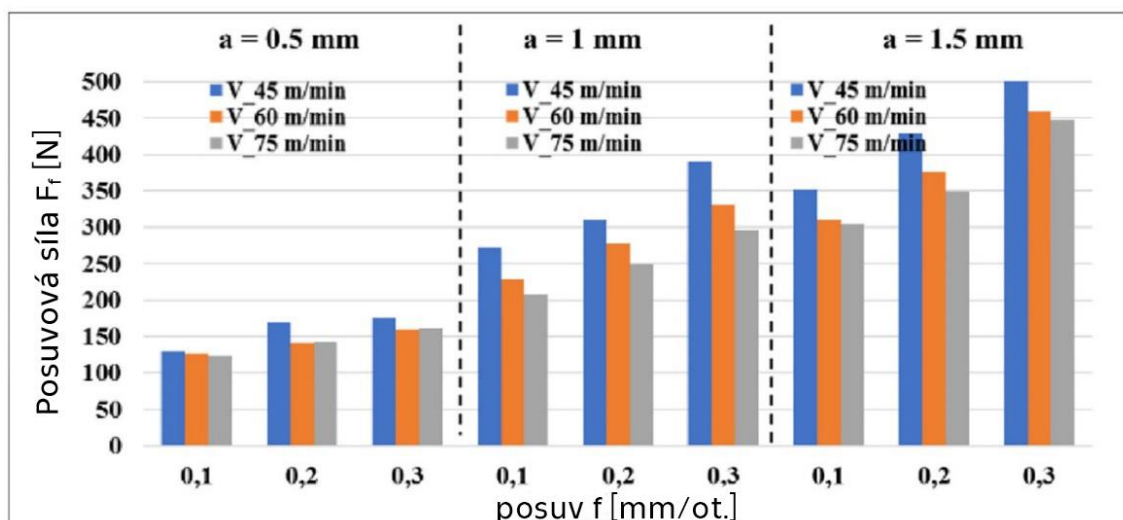
Měření bylo provedeno pro hlavní řeznou sílu ( $F_c$ ), pasivní sílu ( $F_p$ ) a posuvovou sílu ( $F_f$ ). Z naměřených hodnot byl nárůst velikosti jednotlivých silových složek nejvíce ovlivněn změnou  $a_p$  a  $f$ . Naopak při zvyšování  $v_c$  generující teplo docházelo ke změkčení materiálu a úbytku sil. Z grafických výstupů je potvrzen obecný předpoklad pro řeznou sílu  $F_c$ , která vzniká na základě tření mezi obráběným materiálem a nástrojem a je ze všech posuzovaných složek největší. Následující schéma zobrazuje porovnání jednotlivých složek sil při změně výchozích parametrů  $a_p$ ,  $f$  a  $v_c$ . [18]



Obrázek 12: Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$  [18]



Obrázek 13: Závislost pasivní síly  $F_p$  na posuvu  $f$  [18]



Obrázek 14: Závislost posuvové síly  $F_r$  na posuvu  $f$  [18]

## 9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části bakalářské práce je objasněn postup realizace experimentu, jehož hlavním cílem bylo měření silových složek vybraných materiálů a rozbor jejich chování při procesu soustružení.

Přípravné kroky zahrnovaly analýzu parametrů testovaných materiálů, volbu stroje, řezného nástroje, měřících zařízení a stanovení rozsahů řezných podmínek, pro které bylo měření prováděno. S takto definovaným plánem bylo možné naměřit průběhy sil a zaznamenat naměřené hodnoty pro jednotlivé materiály.

V části vyhodnocení bylo z naměřených hodnot provedeno grafické znázornění průběhů jednotlivých složek sil u testovaných materiálů. Detailní pohled byl věnován závislostem hlavní řezné síly na posuvu a hloubce řezu, a zvláště pak závislostem měrné řezné síly na posuvu. Údaje z těchto grafických výstupů posloužily jako podklad pro výpočet empirických vztahů, které umožňují predikovat velikosti daných sil při aplikaci libovolné kombinace řezných podmínek pro daný materiál.

### 9.1 Testované materiály

V tomto experimentu byly použity tři druhy materiálů, konkrétně kobaltová superslitina ASTM F75, niklová superslitina Inconel 713LC a uhlíková ocel 12 050 (označení dle ČSN 41 2050). Ocel 12 050 byla vybrána jako etalonový materiál, u kterého lze předpokládat dobrou obrobitelnost. Díky tomu bude možné tento materiál vhodně porovnat se zmíněnými superslitinami, které při obrábění vykazují potíže v souvislosti s jejich vysokou pevností a tvrdostí.

#### 9.1.1 ASTM F75

Slitina ASTM F75 je slévárenskou slitinou na bázi Co-Cr-Mo, která je dostupná pod řadou obchodních názvů (Vitallium, Protasul-2, Zimaloy). Aplikace nalézá v leteckém průmyslu (palivové trysky, lopatky plynových turbín). Nicméně hlavní oblastí použití je biomedicínský průmysl. Slitina ASTM F75 se řadí do skupiny vysoce koroziivzdorných biomedicínských slitin na bázi Co-Cr, které se používají pro výrobu implantátů, zejména kyčlí, kolenních kloubů a zubních můstků. [19]

Tabulka 3: Chemické složení ASTM F75 [1]

| Ob. prvků | Co           | Cr       | Mo     | W   | Ni  | Mn  | Si  | Fe   | C    | N    | P    | Ti  | S    |
|-----------|--------------|----------|--------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-----|------|
| (hm. %)   | 58,9<br>69,5 | 27<br>30 | 5<br>7 | 0,2 | 2,5 | 1,0 | 1,0 | 0,75 | 0,35 | 0,25 | 0,02 | 0,1 | 0,01 |

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti ASTM F75 [1]

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Mez pevnosti Rm (MPa)    | 655 |
| Mez kluzu Rp0,2 (MPa)    | 450 |
| Tažnost A (%)            | 8   |
| Modul elasticity E (GPa) | 248 |

### 9.1.2 Inconel 713LC

Jedná se o slévárenskou precipitačně zpevněnou slitinu na bázi Ni-Cr, která vykazuje velmi dobrou odolnost proti creepové deformaci a oxidaci při vysokých teplotách. Díky těmto vlastnostem se stává klíčovým materiálem v oblasti leteckého průmyslu, kde nachází uplatnění v různých komponentech leteckých motorů jako jsou lopatky plynových turbín, nízkotlaké profily turbíny, turbínové disky a spalovací komory. [10]

Tabulka 5: Chemické složení Inconel 713LC [20]

| Ob. prvků | Ni | Cr | Mo  | C    | Al  | B    | Ti  | Nb | Zr  |
|-----------|----|----|-----|------|-----|------|-----|----|-----|
| (hm. %)   | 75 | 12 | 4,5 | 0,05 | 5,9 | 0,01 | 0,6 | 2  | 0,1 |

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti Inconel 713LC [20]

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Mez pevnosti Rm (MPa)    | 895 |
| Mez kluzu Rp0,2 (MPa)    | 750 |
| Tažnost A (%)            | 15  |
| Modul elasticity E (GPa) | 195 |

### 9.1.3 Ocel 12 050

Jedná se o univerzální uhlíkovou ocel k zušlechťování a povrchovému kalení. Disponuje střední pevností a velmi dobrou obrobiteľností. V průmyslu nachází široké uplatnění. Používá se u řady strojních součástí jako jsou ozubená kola, šneky, klikové hřídele, ojnice, čepy, torzní tyče. [21]



Tabulka 7: Chemické složení Ocel 12 050 [21]

| Ob. prvků | Fe    | C    | Mn  | P (max.) | S (max.) |
|-----------|-------|------|-----|----------|----------|
| (hm. %)   | 98,51 | 0,42 | 0,6 | 0,04     | 0,05     |
|           | 98,98 | 0,5  | 0,9 |          |          |

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti Ocel 12 050 [21]

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Mez pevnosti (MPa)     | 565 |
| Mez kluzu (MPa)        | 310 |
| Tažnost (%)            | 16  |
| Modul elasticity (GPa) | 200 |

## 9.2 Stroj

Pro obráběcí operace testovaných materiálů byl zvolen hrotový soustruh SU 50/1500 výrobce TOS Lipník jako součást vybavení laboratoře ČVUT Fakulty strojn. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tabulce.



Obrázek 15: Soustruh SU 50/1500

Tabulka 9: Technická specifikace stroje [22]

| <b>Hrotový soustruh TOS SU 50/1500</b> |                    |
|--|--------------------|
| Oběžný průměr nad ložem                | 500 mm             |
| Vzdálenost hrotů                       | 1 500 mm           |
| Oběžný průměr nad suportem             | 250 mm             |
| Vrtání vřetena                         | 56 mm              |
| Šířka lože                             | 420 mm             |
| Průměr lícní desky                     | 500 mm             |
| Průměr sklíčidla                       | 240 mm             |
| Max hmotnost obrobku                   | 1 100 kg           |
| Půdorysná plocha pro hroty             | 1 000 mm           |
| Půdorysná plocha stroje (š x d)        | 1 180 x 3 775 mm   |
| Váha stroje s normálním příslušenstvím | 2 900 kg           |
| <b>Otáčky vřetena:</b>                 |                    |
| Rozsah otáček                          | 11,2–1 400 ot./min |
| <b>Posuvy:</b>                         |                    |
| Podélné                                | 0,027–3,8 mm/ot.   |
| Příčné                                 | 0,013–1,9 mm/ot.   |
| <b>Rychlý posuv suportu:</b>           |                    |
| Podélný                                | 3 m/min            |
| Příčný                                 | 1,5 m/min          |
| <b>Elektromotory na pohon stroje:</b>  |                    |
| počet                                  | 2                  |
| otáčky                                 | 1 400 ot./min      |
| výkon                                  | 2 x 5,5 kW         |

### 9.3 Nástroj

Pro podélné soustružení vnější rotační plochy byl vybrán příslušný soustružnický nůž s výměnnou břitovou destičkou od firmy Dormer Pramet s.r.o. s ISO označením PCLNR 2020 K12. Jeho parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

## PCLN(RL) EXT



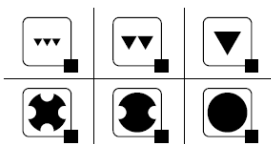
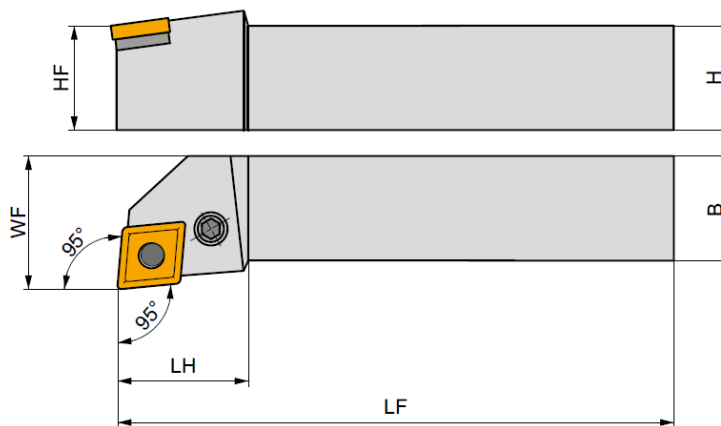
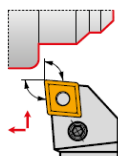
PRAMET

P



### Vnější držák s úhlem nastavení 95° pro destičky CN., Upínané pákou

Vnější držák pravý/levý s upínáním pákou a úhlem nastavení 95°. Vhodný pro podélné soustružení s osazením, čelní soustružení a soustružení kuželů a úkosů negativními destičkami CN.. 12, 16, 19 nebo 25. Kvadrát držáku 20x20 až 50x50 mm, těleso držáku je zeslechtěno pro prodloužení životnosti.

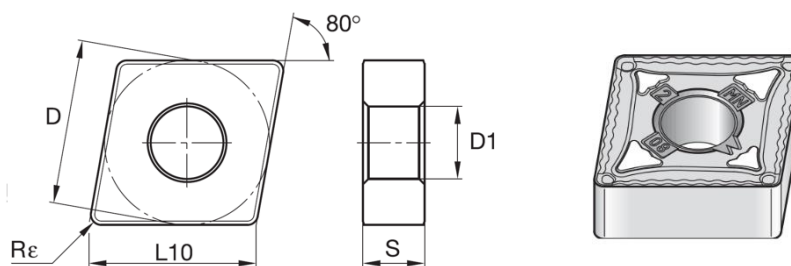


Obrázek 16: Výňatek z katalogu Dormer Pramet s popisem soustružnického nože [23]

Tabulka 10: Parametry soustružnického nože [23]

| PCLNR 2020 K 12            |  |
|----------------------------|--|
| H (výška stopky) = 20 mm   | LF (funkční délka) = 125 mm                  |
| B (šířka stopky) = 20 mm   | LH (délka hlavy) = 36 mm                     |
| HF (funkční výška) = 20 mm | $\lambda_s$ (úhel sklonu ostří) = $-6^\circ$ |
| WF (funkční šířka) = 25 mm | $\gamma_0$ (úhel čela) = $-6^\circ$          |

Pro tento nůž byla zvolena sada karbidových destiček od firmy Kennametal Inc. s ISO označením CNMG 120404MN pro aplikaci středního hrubování. Tyto destičky disponují CVD vícevrstevným povlakem. Další specifikace těchto destiček demonstruje Tabulka 11.



Obrázek 17: Výňatek z katalogu Kennametal se schématem břitové destičky [24]

Tabulka 11: Parametry břitové destičky [24]

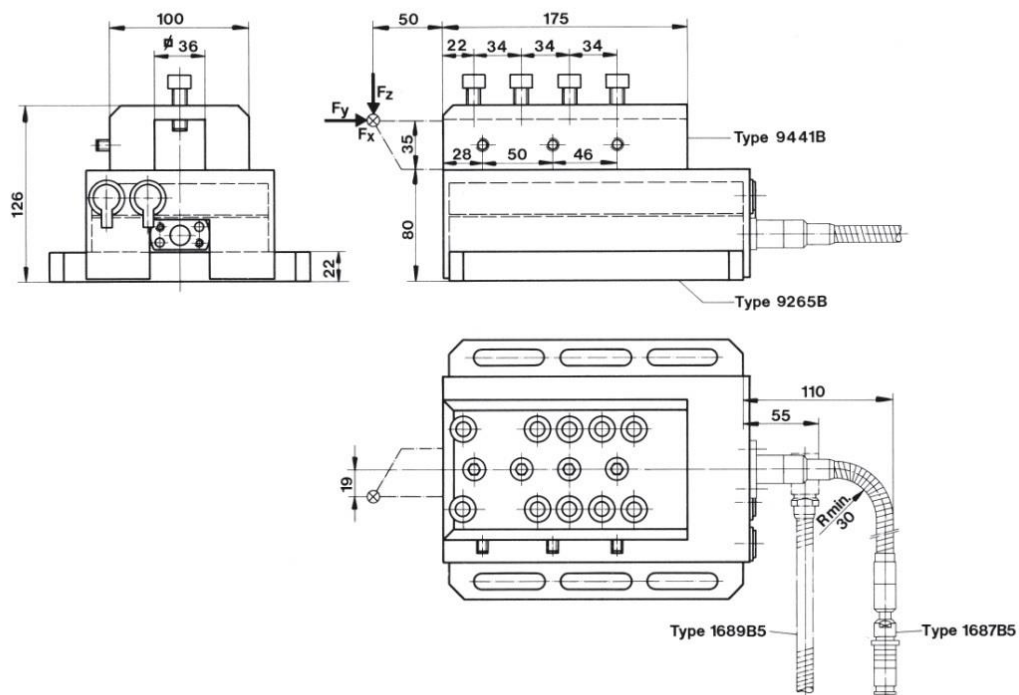
| CNMG 120404MN   |   |
|---|---|
| Povlak: K-MTCVD/TiCN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiCN-TiN | L10 (délka řezné hrany) = 12,90 mm      |
| Stupeň karbidu: KC9125  | S (tloušťka) = 4,76 mm                  |
| D (Ø vepsané kružnice) = 12,70 mm                             | R <sub>ε</sub> (rádius špičky) = 0,4 mm |
| D1 (Ø upevňovacího otvoru) = 5,16 mm                          | α (úhel hřbetu) = 0°                    |

## 9.4 Měřicí přístroje

Pro měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr od firmy Kistler. Tento dynamometr disponuje základní jednotkou Type 9265B, která se skládá ze čtyř 3komponentních silových snímačů, které obsahují tři páry křemenných destiček. Tyto destičky jednotlivě zachycují sílu ve směru x, y, z. Dále se dynamometr skládá z nástrojového držáku Type 9441B určeného pro vykonávání operací soustružení. Součástí vybavení je také nábojový zesilovač Type 5019B, který zesiluje a převádí signály nízkého náboje produkované piezoelektrickými senzory na proporcionální napěťové signály. Ze zesilovače je signál přiveden do propojovací skříně Type 5697-DAQ, která se skládá z 16bitového A/D převodníku, který digitalizuje analogová data. Skříň je pomocí kabelu RS-232C připojena k uživatelskému počítači s nainstalovaným softwarem DynoWare. Ten umožňuje digitálně získaná data analyzovat, popřípadě také konfigurovat měřicí přístroje. [25] [26]



Obrázek 18: Dynamometr Kistler Type 9265B [25]



Obrázek 19: Rozměrové parametry základní jednotky Type 9265B a nástrojového držáku Type 9441B [25]

Pro přesné stanovení řezné rychlosti  $v_c$  byl použit Tachometr HT-3100 výrobce Ono Sokki. Tento přístroj umožňuje přímé měření obvodové rychlosti obrobku pomocí přídatného obvodového kroužku KS-200 přiloženému k rotující ploše obráběného kusu. [27]



Obrázek 20: Tachometr HT-3100 [27]

## 10. VOLBA A NASTAVENÍ PARAMETRŮ MĚŘENÍ

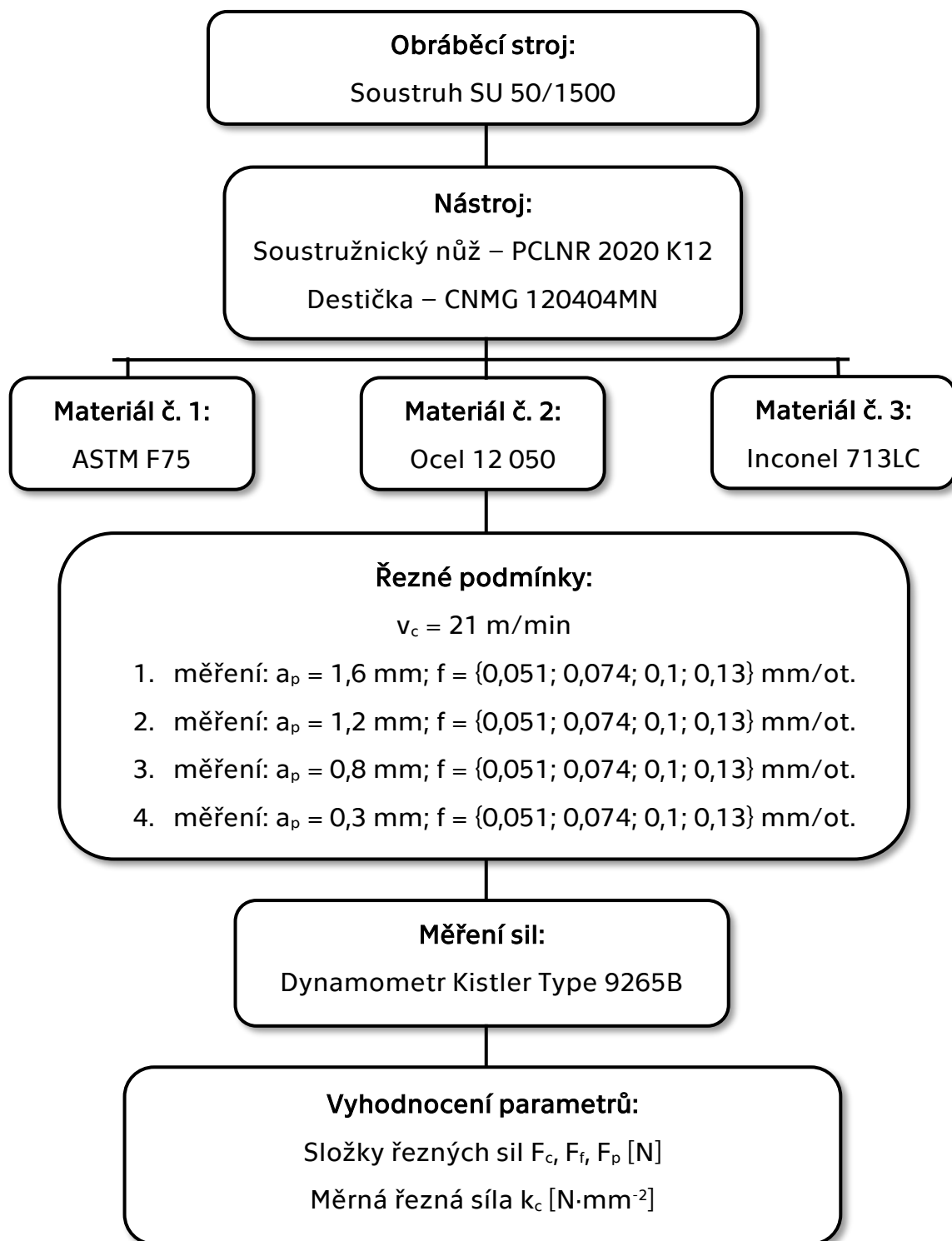
Pro všechny testované materiály byly zvoleny stejné řezné podmínky, aby mohlo být následně provedeno porovnání vývoje jednotlivých sil při soustružení. Pro návrh řezných podmínek bylo potřeba si nejprve definovat konstantní a proměnné parametry, na základě kterých bude pozorován vývoj sil v daném procesu. V rámci tohoto měření byl zvolen proměnný parametr posuv  $f$  a hloubka řezu  $a_p$ . Pro tyto parametry byla provedena analýza závislosti na jednotlivých složkách sil, zejména pak na hlavní řezné síle  $F_c$ , ze které byl určen odhad vývoje velikosti síly pomocí empirického vztahu a dále závislost měrné řezné síly  $k_c$  na posuvu  $f$ , ze které bylo rovněž možné určit odhad vývoje této síly vztažené k danému parametru. Řezná rychlost  $v_c$  byla uvažována jako konstantní pro všechny testované materiály. Měření bylo prováděno s neměnnou geometrií nástroje, strojního vybavení a bez použití procesní kapaliny.

Při volbě intervalů proměnných parametrů byly uváženy informace z rešeršní části, odborných článků s experimentálními výsledky a také konzultací s odborníky. Současně bylo přihlédnuto k dostupnosti nástrojů a strojního vybavení, zejména k jejich technickým parametrům. Tím byla zajištěna proveditelnost experimentu.

S ohledem na rozsah posuvů použitého stroje (viz Tabulka 9) byly navrženy 4 posuzované hodnoty parametru  $f = \{0,051; 0,074; 0,1; 0,13\}$  mm/ot. V případě hloubky řezu byly rovněž zvoleny 4 hodnoty  $a_p = \{0,3; 0,8; 1,2; 1,6\}$  mm. Hodnoty  $a_p$  se v průběhu měření měnily skokově, tzn. že v jednom bloku měření byla pro 4 posuzované hodnoty  $f$  zachována konstantní hodnota  $a_p$ . Hodnota  $v_c$  byla určena na základě optimálních otáček stroje  $n = 71$  ot./min u prvně testovaného materiálu, tedy kobaltové superslitiny ASTM F75. Její hodnota  $v_c = 21$  m/min byla pro zjednodušení a zvýšení přesnosti naměřena dotykovým tachometrem a uvažována i při měření dalších materiálů.

## 11. SCHÉMA NAVRŽENÉHO EXPERIMENTU

Návrh experimentu zahrnujícího zvolené strojní vybavení, testované materiály, řezné podmínky a vyhodnocované veličiny demonstruje následující schéma.



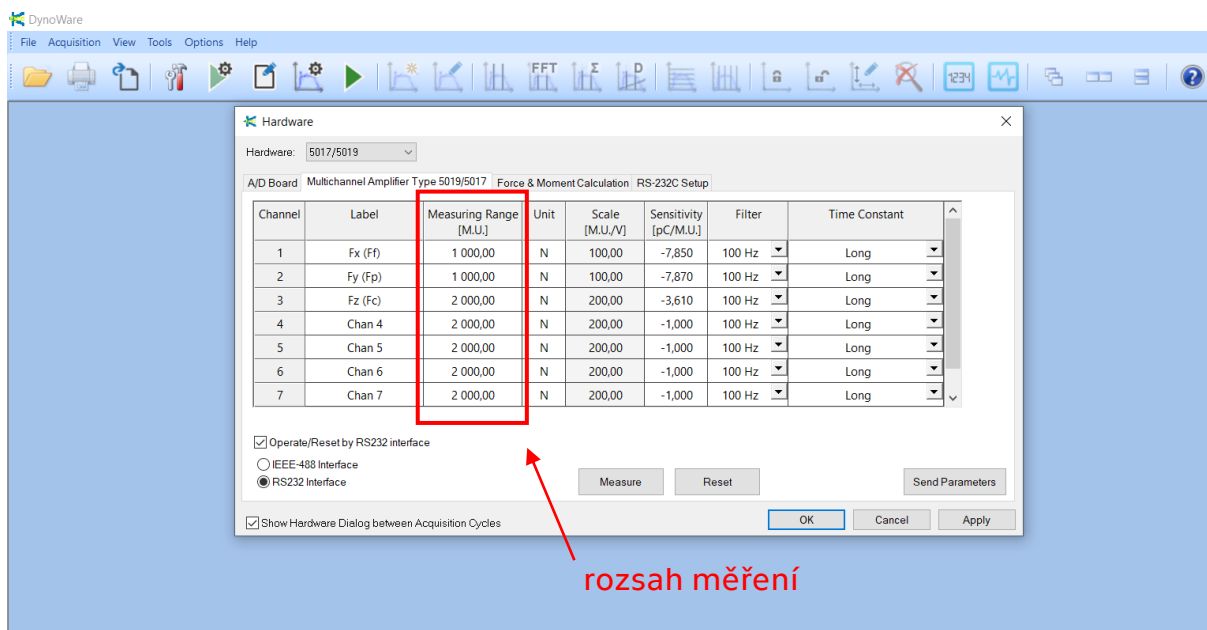
Obrázek 21: Schéma navrženého experimentu

## 12. REALIZACE EXPERIMENTU

Na základě volby příslušného strojního vybavení, řezných podmínek a zkoumaných parametrů bylo možné realizovat experiment. Před samotným měřením však bylo nutné zajistit přípravu pracoviště.

Dynamometr Kistler Type 9265B byl pomocí šroubů připevněn na pracovní stůl a na jeho horní plochu nasazen nástrojový držák Type 9441B. Do tohoto držáku byl připevněn soustružnický nůž PCLNR 2020 K12 s příslušnou vyměnitelnou břitovou destičkou CNMG 120404MN. Soustava dynamometru byla pomocí optického kabelu a konektorů propojena se zesilovačem 5019B pro zesílení signálu, A/D převodníkem Type 5697-DAQ pro digitalizaci analogových dat a uživatelským PC se softwarovým programem DynoWare pro vyhodnocení jednotlivých složek sil.

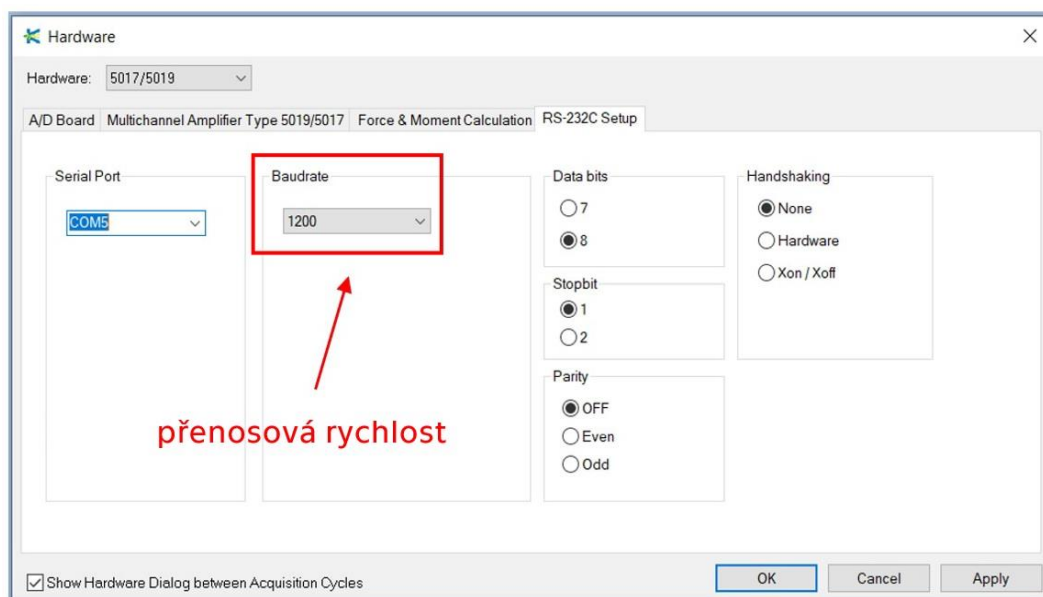
V rámci prostředí Dynoware byla nastavena výchozí konfigurace měřicí soustavy. Nejprve bylo z horního panelu na kartě *Acquisition* spuštěno dialogové okno *Hardware* a dále na záložce *Multichannel Amplifier* nastaveny parametry zesilovače. Důležitost zde představoval sloupec *Measuring Range* pro určení maximální odhadované velikosti jednotlivých měřených sil. Problém by totiž nastal v případě překročení definované hodnoty, kdyby došlo k přetížení kanálů zesilovače a bylo by nutné tento rozsah upravit a provést měření znovu.



Obrázek 22: Konfigurace zesilovače v prostředí DynoWare

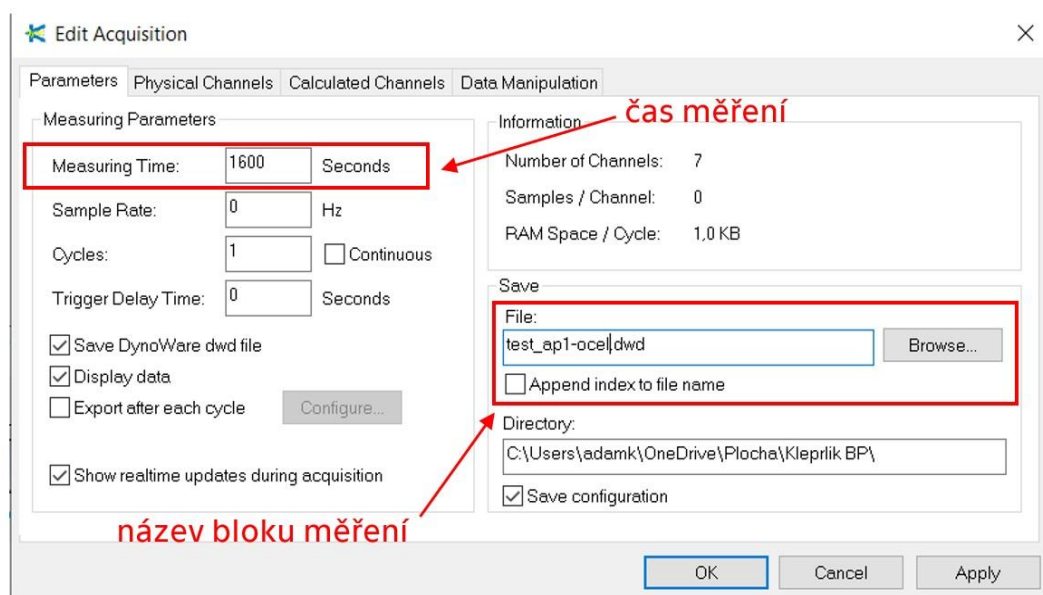


V případě komunikace mezi PC a zesilovačem bylo třeba nastavit typ sériového portu a přenosovou rychlost, která by měla být shodná v programu i na samotném zesilovači. Přenosová rychlost byla stanovena na 1 200 bit/s.



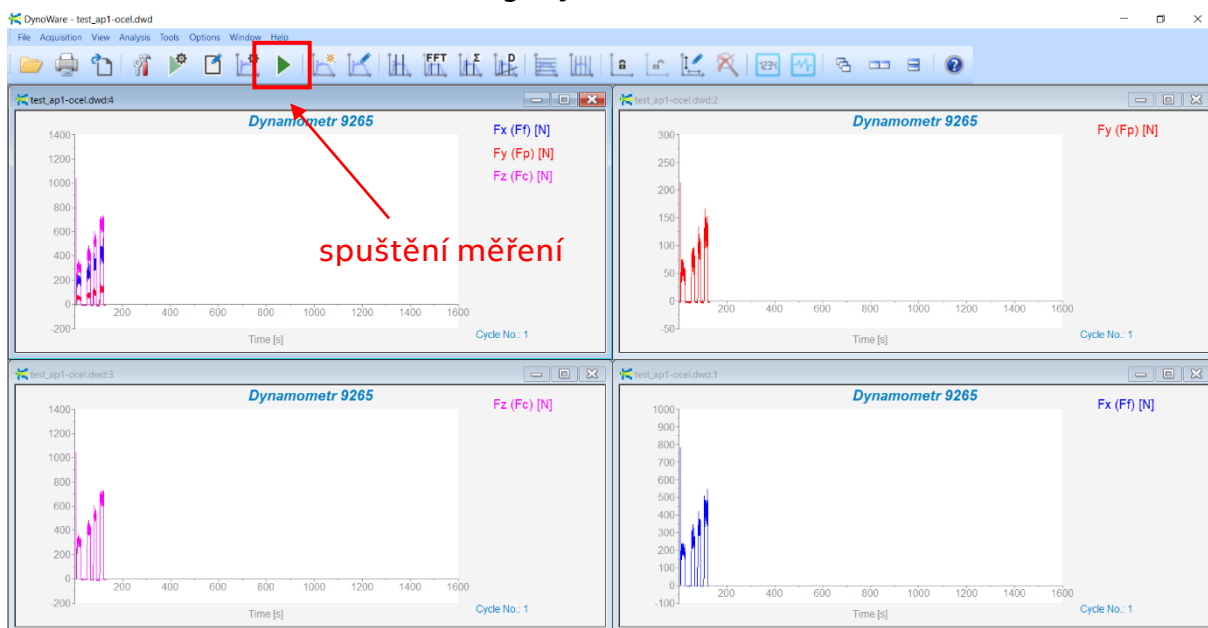
Obrázek 23: Konfigurace sériového portu RS232-C

Z horního panelu na kartě *Acquisition* lze také spravovat parametry získávání dat. Záložka *Parameter* umožňuje nastavení času měření a vytvoření nového souboru s názvem měření. Soubory byly vytvořeny vždy pro jeden blok měření daného materiálu (viz Obrázek 24).



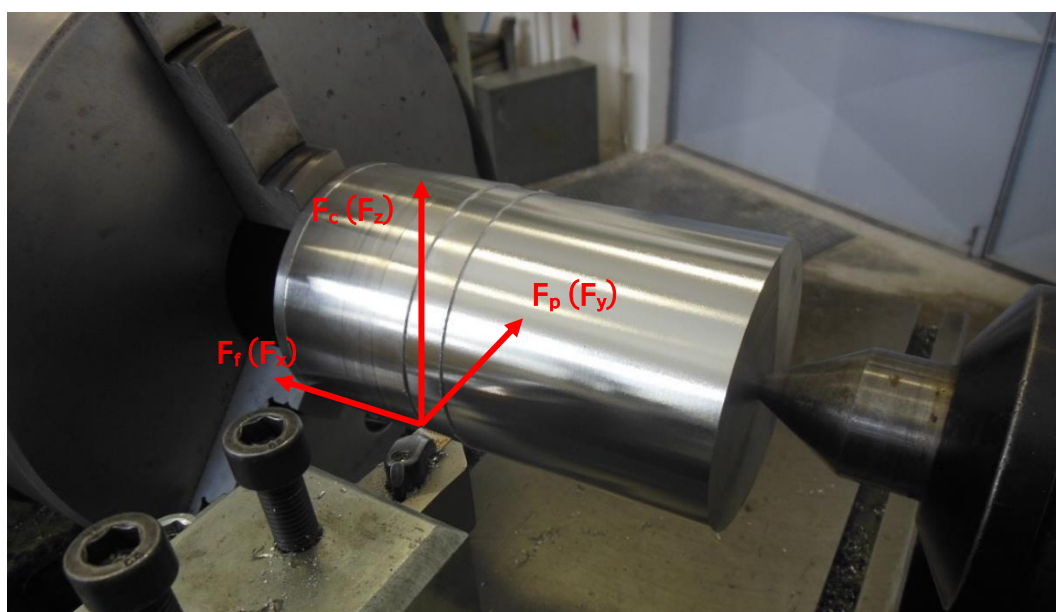
Obrázek 24: Konfigurace parametrů získávaných dat

Pomocí ikony *Start acquisition* v horním panelu programu bylo spuštěno měření se zvoleným přednastavením. Průběh jednotlivých složek sil v čase bylo možné sledovat v aktivních dialogových oknech.



Obrázek 25: Prostředí grafického záznamu dat

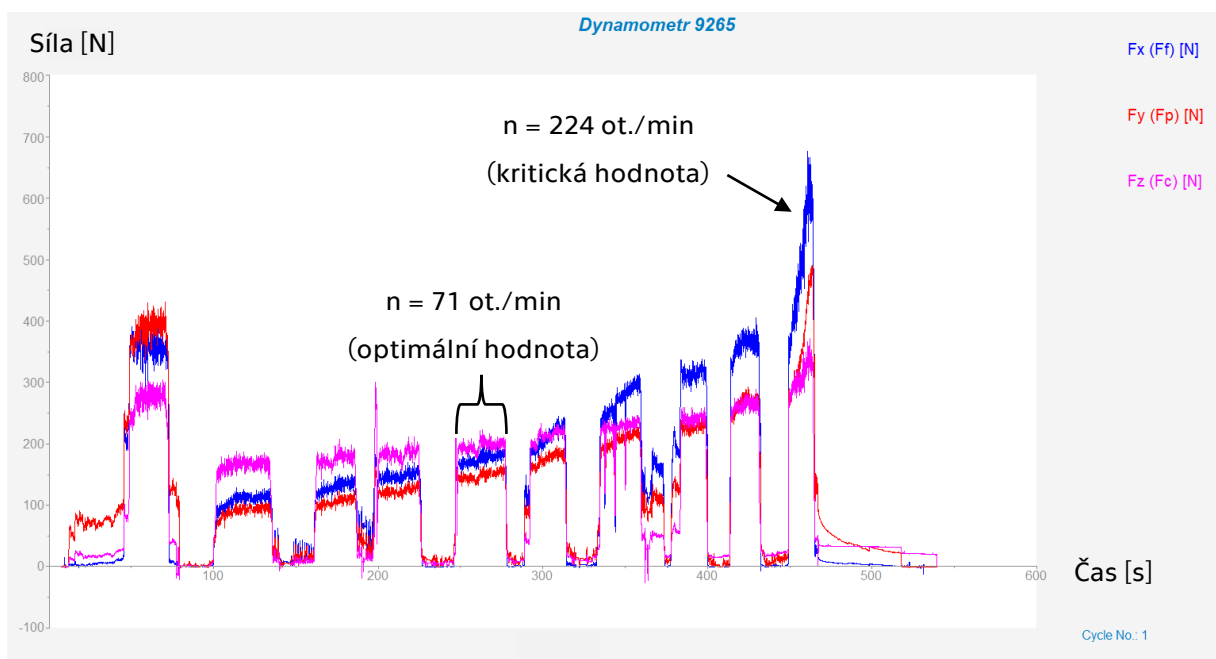
Prvním testovaným materiálem byla kobaltová superslitina ASTM F75, která byla z jedné strany upnuta do sklíčidla a z druhé strany podepřena hrotem koníka. Dynamometr byl podroben manuální kontrole zatížení pro určení směru působení sil, kde  $F_x$  ( $F_f$ ),  $F_y$  ( $F_p$ ),  $F_z$  ( $F_c$ ).



Obrázek 26: Souřadný systém působení jednotlivých složek sil

Pro definování optimální řezné rychlosti byl proveden test při podélném soustružení v rozsahu otáček  $n = \{18; 35; 54; 56; 71; 90; 112; 140; 180; 224\}$  ot./min. Byly použity hodnoty  $f = 0,1$  mm/ot. a  $a_p = 0,5$  mm v rámci rozsahu řezných podmínek definovaných v kapitole 10.

V aktivním dialogovém okně zobrazujícím velikosti jednotlivých složek sil bylo možné sledovat jejich vývoj se změnou otáček stroje. V rámci grafického výstupu bylo potřeba nalézt vyrovnanou hladinu velikosti jednotlivých složek sil, při co nejvyšších otáčkách. Jakýkoliv následný strmý nárůst silových složek v tomto případě indikuje sklon k rychlému opotřebení destičky.



Obrázek 27: Měření sil při různých otáčkách

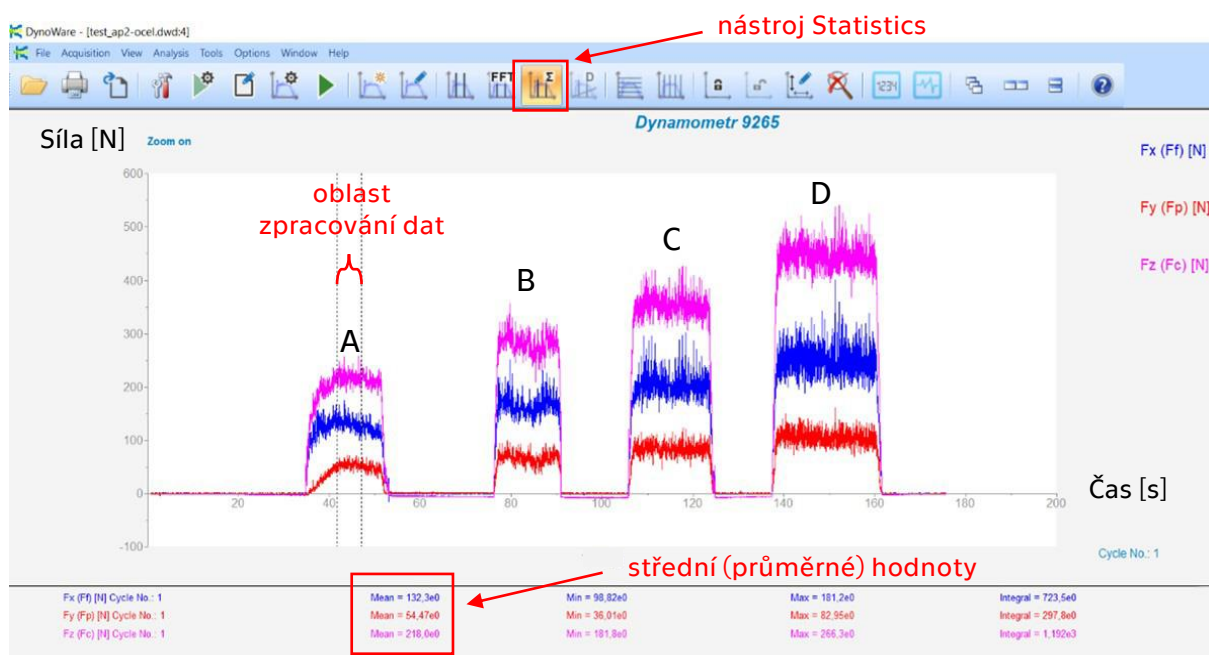
Z analýzy v grafickém okně bylo zřejmé, že ideální zaznamenaná hodnota je  $n = 71$  ot./min. Z těchto otáček byla pomocí dotykového tachometru určena optimální  $v_c = 21$  m/min.

V další fázi mohla proběhnout samotná bloková měření materiálu ASTM F75. Měření probíhalo na zarovnané ploše a při průběžné výměně břitové destičky pro zajištění stejných podmínek měření. Stejný postup byl aplikován i pro ocel 12 050 a Inconel 713LC.

## 13. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Při realizaci experimentu bylo provedeno 48 měření a zaznamenání dostatečného množství dat velikostí jednotlivých složek sil  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ . Analýza naměřených dat byla uskutečněna použitím pomocných nástrojů v dialogovém okně s grafickým záznamem sil. Pro názornost odečtu dat je na následujícím obrázku znázorněn blok měření oceli 12 050 při  $a_p = 1,2$  mm. Oblasti A, B, C, D reprezentují úseky měření při daném  $f = \{0,051; 0,074; 0,1; 0,13\}$  mm/ot. a v tomto návazném pořadí.

Pomocí nástroje *Statistics* byla vybrána oblast s nejméně rozkmitaným ustáleným grafickým záznamem složek sil a program automaticky provedl kalkulaci hodnot jednotlivých sil. Do předem připravené tabulky byly zapisovány střední hodnoty velikostí sil v definovaném rozsahu.



Obrázek 28: Blokové měření působení sil u oceli 12 050 při hloubce  $a_p = 1,2$  mm

Tabulka 12: Naměřené hodnoty pro testované materiály

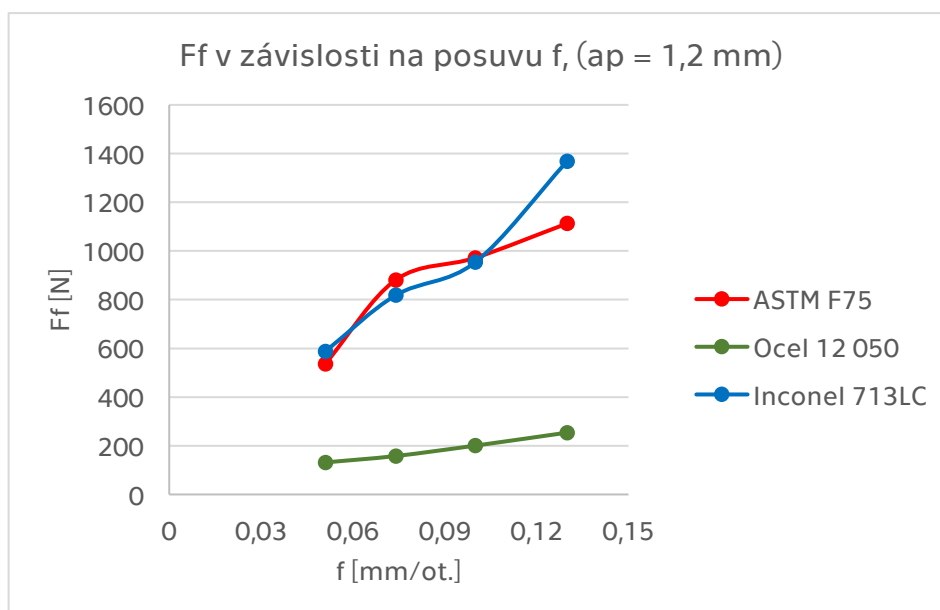
| ASTM F75               |                      |                   |                   |                   |                        |                      |                   |                   |                   |
|------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $a_p = 1,6 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ | $a_p = 0,8 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ |
|                        | 0,051                | 1 639             | 263               | 617               |                        | 0,051                | 310               | 132               | 217               |
|                        | 0,074                | 1 694             | 278               | 765               |                        | 0,074                | 565               | 185               | 325               |
|                        | 0,1                  | 1 709             | 354               | 996               |                        | 0,1                  | 639               | 234               | 390               |
|                        | 0,13                 | 1 879             | 991               | 998               |                        | 0,13                 | 644               | 275               | 448               |
| $a_p = 1,2 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ | $a_p = 0,3 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ |
|                        | 0,051                | 537               | 151               | 322               |                        | 0,051                | 100               | 132               | 90                |
|                        | 0,074                | 881               | 190               | 459               |                        | 0,074                | 122               | 147               | 112               |
|                        | 0,1                  | 972               | 226               | 553               |                        | 0,1                  | 144               | 168               | 135               |
|                        | 0,13                 | 1 113             | 310               | 666               |                        | 0,13                 | 161               | 208               | 171               |
| Ocel 12 050            |                      |                   |                   |                   |                        |                      |                   |                   |                   |
| $a_p = 1,6 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ | $a_p = 0,8 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ |
|                        | 0,051                | 194               | 60                | 316               |                        | 0,051                | 102               | 46                | 165               |
|                        | 0,074                | 253               | 75                | 409               |                        | 0,074                | 116               | 59                | 203               |
|                        | 0,1                  | 326               | 96                | 524               |                        | 0,1                  | 134               | 70                | 245               |
|                        | 0,13                 | 425               | 121               | 669               |                        | 0,13                 | 160               | 83                | 304               |
| $a_p = 1,2 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ | $a_p = 0,3 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ |
|                        | 0,051                | 132               | 55                | 218               |                        | 0,051                | 38                | 44                | 68                |
|                        | 0,074                | 158               | 66                | 282               |                        | 0,074                | 45                | 54                | 87                |
|                        | 0,1                  | 201               | 83                | 348               |                        | 0,1                  | 46                | 57                | 103               |
|                        | 0,13                 | 254               | 107               | 448               |                        | 0,13                 | 49                | 61                | 124               |
| Inconel 713 LC         |                      |                   |                   |                   |                        |                      |                   |                   |                   |
| $a_p = 1,6 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ | $a_p = 0,8 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ |
|                        | 0,051                | 1 017             | 180               | 658               |                        | 0,051                | 437               | 149               | 339               |
|                        | 0,074                | 1 325             | 207               | 888               |                        | 0,074                | 448               | 211               | 427               |
|                        | 0,1                  | 1 725             | 388               | 1 110             |                        | 0,1                  | 466               | 252               | 500               |
|                        | 0,13                 | 1 915             | 465               | 1 273             |                        | 0,13                 | 479               | 270               | 552               |
| $a_p = 1,2 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ | $a_p = 0,3 \text{ mm}$ | $f \text{ [mm/ot.]}$ | $F_r \text{ [N]}$ | $F_p \text{ [N]}$ | $F_c \text{ [N]}$ |
|                        | 0,051                | 588               | 115               | 473               |                        | 0,051                | 131               | 195               | 149               |
|                        | 0,074                | 818               | 174               | 612               |                        | 0,074                | 160               | 263               | 195               |
|                        | 0,1                  | 954               | 253               | 743               |                        | 0,1                  | 182               | 321               | 240               |
|                        | 0,13                 | 1 369             | 299               | 895               |                        | 0,13                 | 181               | 344               | 269               |

## 14. VYHODNOCENÍ

V rámci vyhodnocení proběhlo grafické zpracování naměřených hodnot z tabulek. Vzájemně byly posouzeny závislosti výchozích parametrů řezných podmínek na jednotlivých složkách sil  $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$  a definovány empirické vztahy hlavní řezné síly  $F_c$  a měrné řezné síly  $k_c$  pro jednotlivé materiály.

### 14.1 Posuvová síla $F_f$

Následující schéma popisuje vztah mezi posuvovou silou  $F_f$  a posuvem  $f$  při konstantní hloubce řezu  $a_p = 1,2$  mm pro jednotlivé testované materiály. Zde je patrné, že zaznamenaná velikost posuvové síly je v případě materiálů ASTM F75 a Inconel 713LC několikanásobně vyšší než u testované oceli 12 050. Pro ilustraci u maximálního posuvu  $f = 0,13$  mm/ot. pro materiál Inconel 713LC byla velikost posuvové síly 1369 N, tedy o 1 115 N vyšší než u oceli 12 050, kde bylo naměřeno 254 N. Vysoké hodnoty nabyla také superslitina ASTM F75. Zde byla naměřena síla 1 113 N.



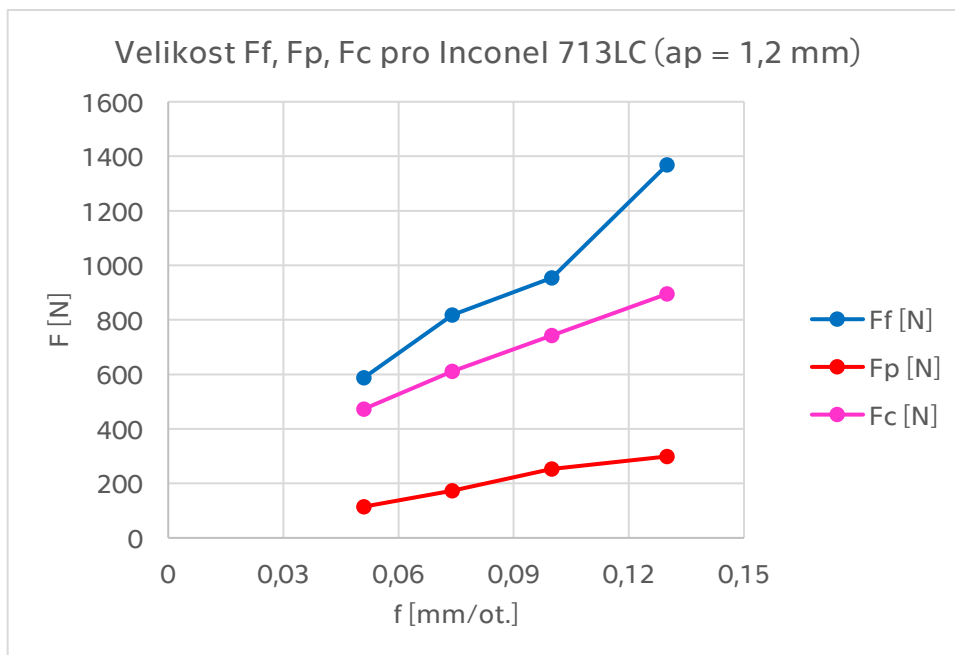
Obrázek 29: Závislost posuvové síly  $F_f$  na posuvu  $f$

Výrazné hodnoty u superslitin jen podtrhuje jejich vysoká tvrdost, pevnost, odpor a sklon k mechanickému zpevnění. Velikost posuvové byla také ovlivněna velikostí posuvu  $f$ , při jehož zvýšení došlo k nárůstu této síly.

Obrázek 30 představuje záznam velikosti posuvové, pasivní a hlavní řezné síly materiálu Inconel 713LC. Na základě poznatků z kapitoly 8 by řezná síla při podélném soustružení měla nabývat nejvyšších hodnot. Pozoruhodným

zjištěním je, že posuvová síla byla naměřena vyšší než řezná a pasivní síla. To znamená, že při obrábění této superslitiny byla vyvíjena největší síla na posouvání nástroje. Posuvová síla byla největší u většiny měření materiálů ASTM F75 a Inconel 713LC při  $a_p = 1,6; 1,2$  a  $0,8$  mm. Tento důsledek lze přisoudit několika faktorům.

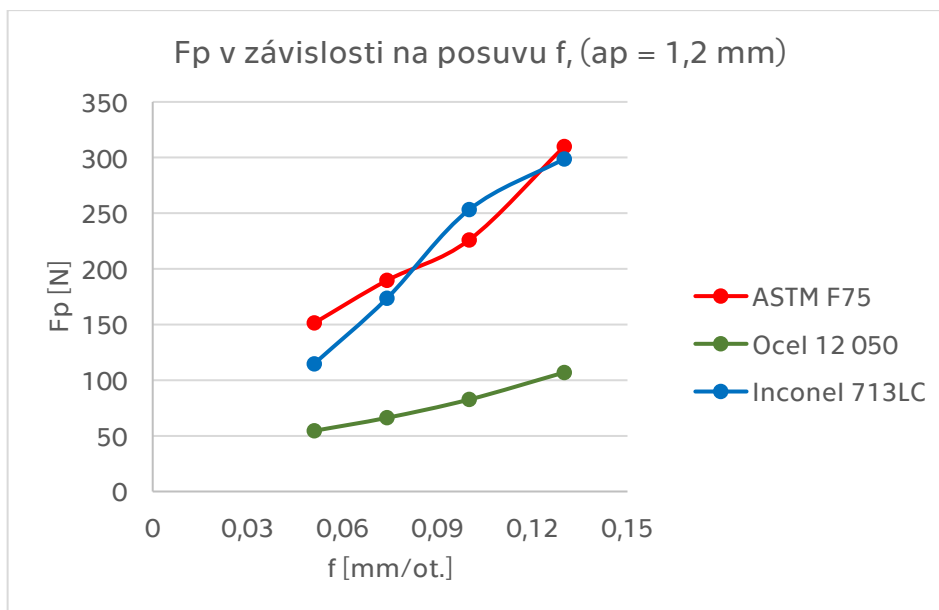
Při provádění měření vykazovaly výše zmíněné materiály výrazný odpor, při kterém kromě zvýšených vibrací došlo v případě konkrétního bloku měření slitiny ASTM F75 dokonce k odtažení koníka a vychýlení nástroje v držáku. S ohledem na kapitolu 8 mohla k vysokým hodnotám posuvové síly přispět také geometrie použitého nástroje. Negativní úhel čela zvyšuje tření a působení řezných sil. Vyšší úhel nastavení zase posuvovou sílu, která má tendenci vychylovat nástroj.



Obrázek 30: Velikosti řezných sil materiálu Inconel 713LC při  $a_p = 1,2$  mm

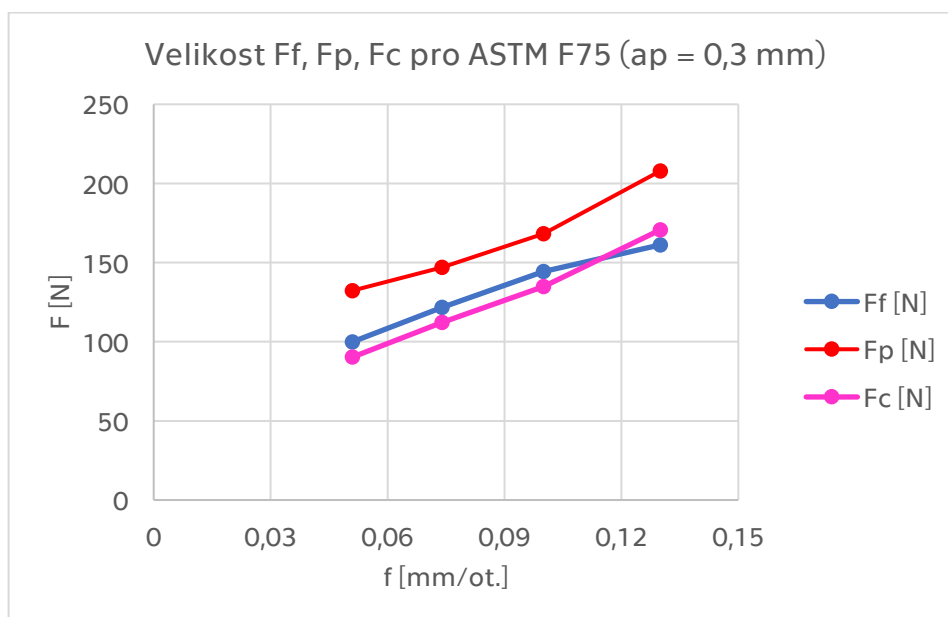
## 14.2 Pasivní síla $F_p$

Obrázek 31 vykresluje porovnání pasivních sil jednotlivých materiálů a podobně jako v případě posuvové síly i pasivní síla u ASTM F75 a Inconelu 713LC vykazovala vyšší hodnoty než ocel 12 050 a stoupající trend při změně posuvu. Vysoké hodnoty velikosti pasivních sil byly doprovázeny vznikem vibrací.



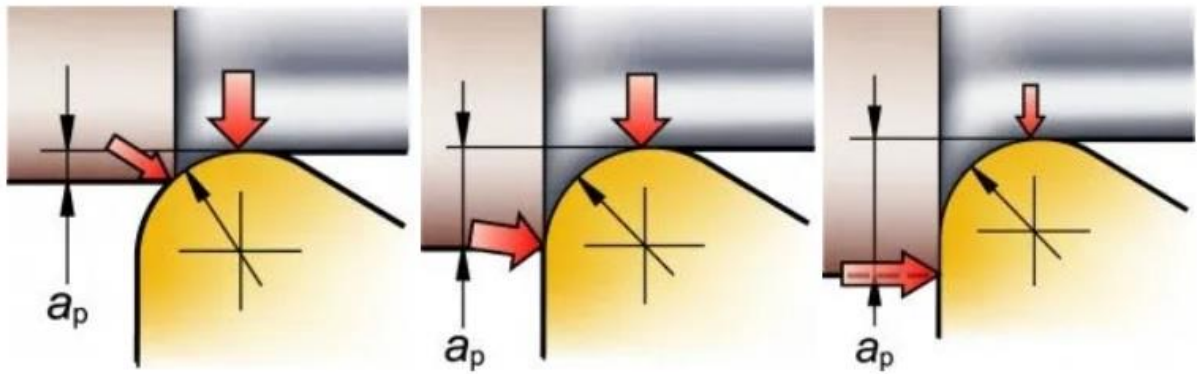
Obrázek 31: Závislost pasivní síly  $F_p$  na posuvu  $f$

Obrázek 32 demonstruje měření ASTM F75 při  $a_p = 0,3$  mm, která je menší než poloměr špičky nástroje  $r_\varepsilon = 0,4$  mm. Zde byla zaznamenána jako nejvyšší pasivní složka síly. Při takto malé hloubce řezu se totiž mění poměry mezi silami. Dochází k vyšší koncentraci pasivních sil působících na malé ploše břitu, což v důsledku vede ke vzniku vibrací a špatné kvalitě povrchu. Z tohoto důvodu je lepší volit hloubku řezu stejnou, respektive vyšší, než je poloměr špičky pro příznivý rozklad části pasivní složky na sílu posuvovou. [28]



Obrázek 32: Velikost řezných sil materiálu ASTM F75 při  $a_p = 0,3$  mm

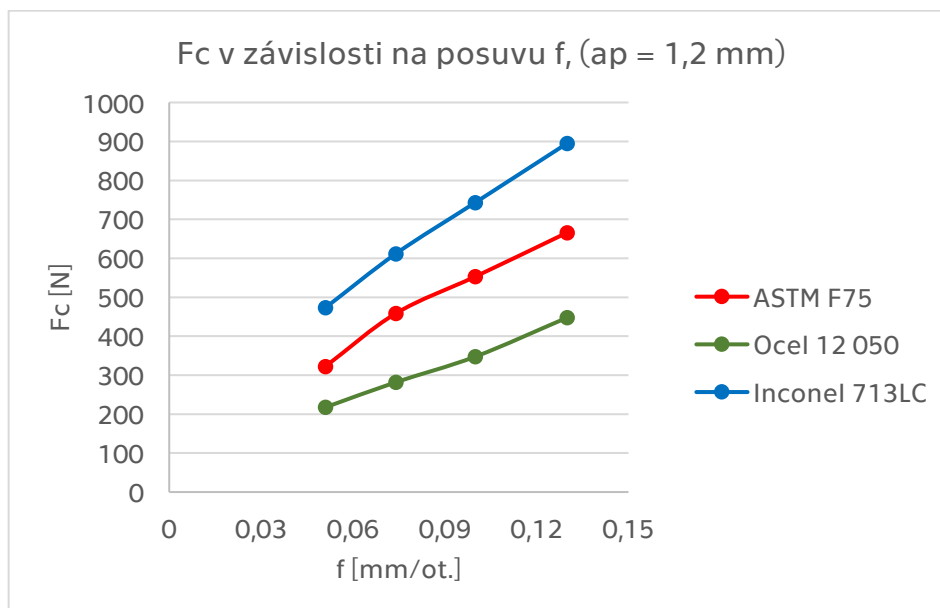




Obrázek 33: Vliv hloubky řezu  $a_p$  na působení sil [28]

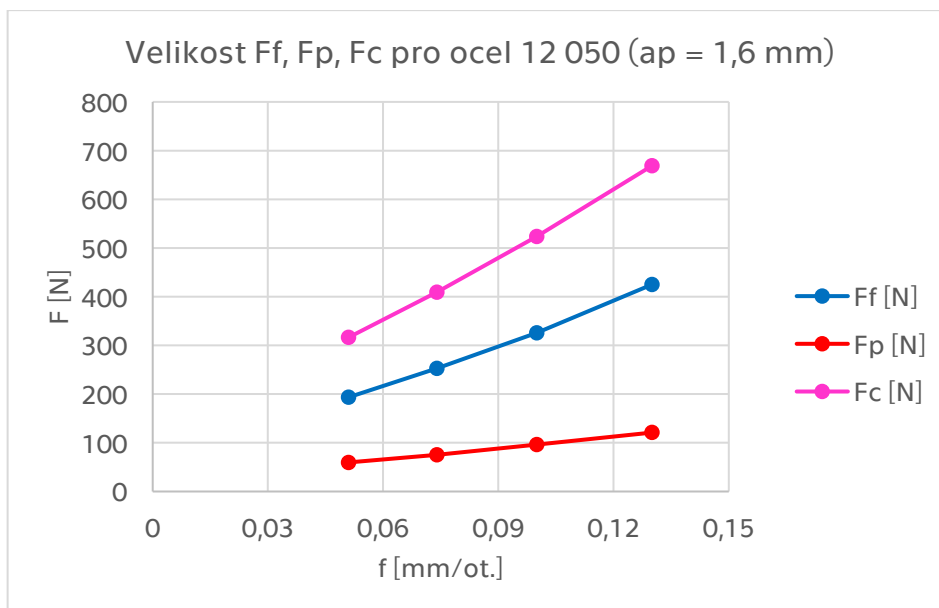
### 14.3 Řezná síla $F_c$

V případě hlavní řezné síly  $F_c$  je podtržen trend v její zvyšující se hodnotě v závislosti na vyšším posuvu  $f$  (viz Obrázek 34). Hodnoty  $F_c$  u superslitin byly v porovnání s ocelí opět rozdílové. Výrazné působení tření při soustružení Inconelu 713LC se podepsalo na zaznamenání nejvyšších velikostí této síly.



Obrázek 34: Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu  $f$

Obrázek 35 popisuje velikosti složek sil při maximální hloubce  $a_p = 1,6$  mm u oceli 12 050. Na rozdíl od superslitin lze u oceli pozorovat vývoj v souladu s odbornými předpoklady nejvyšší řezné síly  $F_c$ . Pro ilustraci poměr mezi jednotlivými silami  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  při hodnotě posuvu  $f = 0,074$  mm/ot. činil 1:0,62:0,18.



Obrázek 35: Velikost řezných sil materiálu ocel 12 050 při  $a_p = 1,6$  mm

## 14.4 Určení empirických vztahů pro ASTM F75

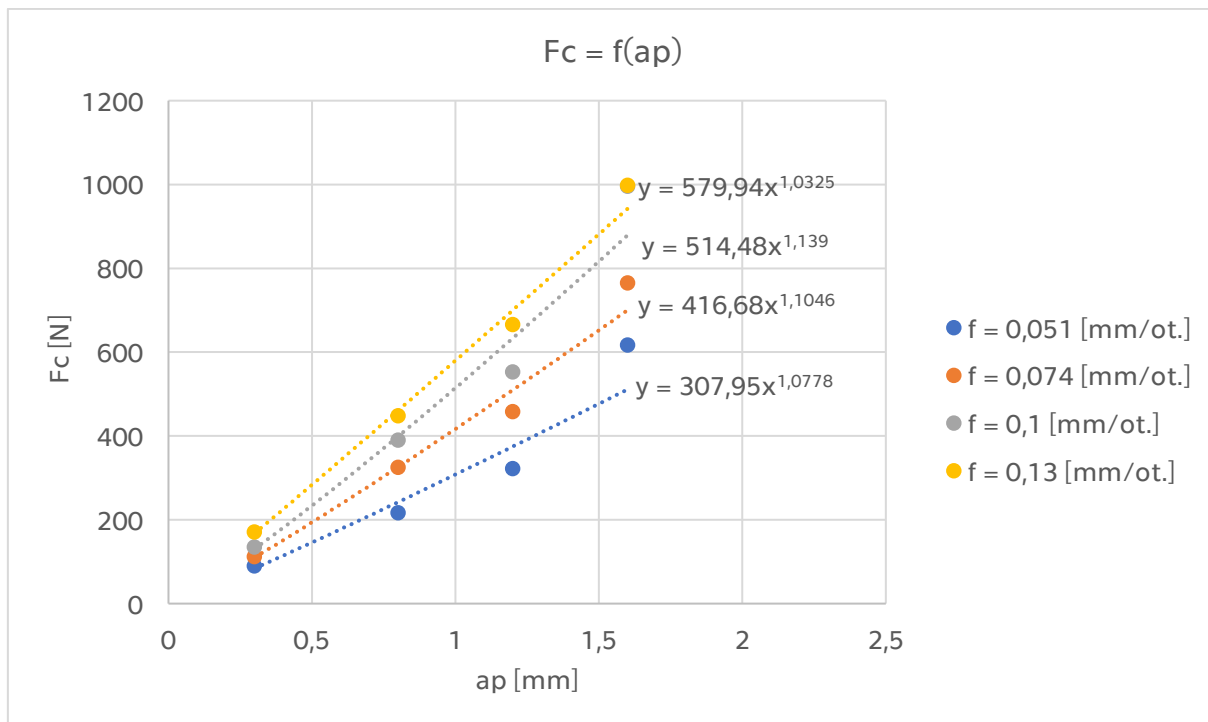
V této kapitole je popsán postup určení empirických vztahů pro hlavní řeznou sílu  $F_c$  a měrnou řeznou sílu  $k_c$  prvního testovaného materiálu ASTM F75. V souladu s tímto postupem měření jsou následně vypracovány empirické vztahy pro ocel 12 050 a Inconel 713LC.

Pro výpočty jsou uvažovány naměřené excelové hodnoty testovaných materiálů, které udává Tabulka 12 a vzorce zmíněné v kapitole 8, díky nimž je možné kvantifikovat a predikovat řezné síly a provádět případné optimalizace obráběcího procesu.

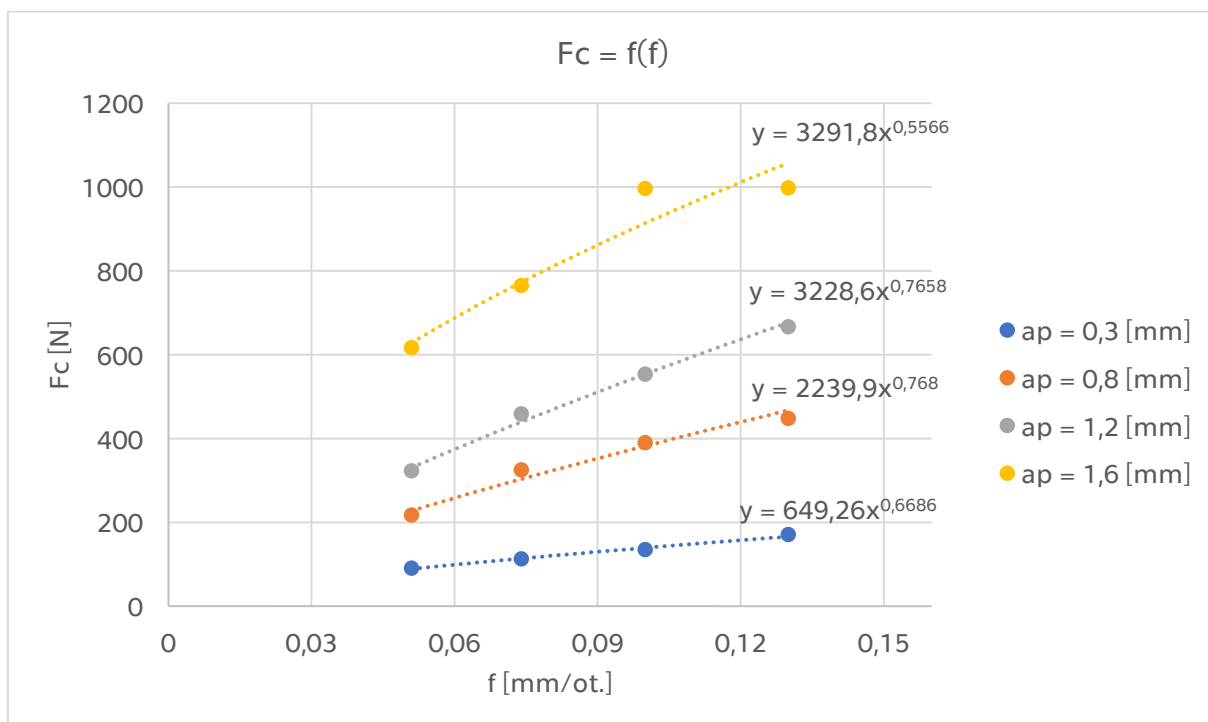
Tabulka 13: Naměřené hodnoty velikosti řezné síly  $F_c$  [N] materiálu ASTM F75

| f [mm/ot.] | $a_p$ [mm] |     |     |     |
|------------|------------|-----|-----|-----|
|            | 0,3        | 0,8 | 1,2 | 1,6 |
| 0,051      | 90         | 217 | 322 | 617 |
| 0,074      | 112        | 325 | 459 | 765 |
| 0,1        | 135        | 390 | 553 | 996 |
| 0,13       | 171        | 448 | 666 | 998 |

Hodnoty z tabulky byly v programu MS Excel vyneseny do grafů závislosti  $F_c = f(a_p)$  a  $F_c = f(f)$  (viz Obrázek 36 a Obrázek 37). Jednotlivé body reprezentující velikost síly  $F_c$  při daných parametrech hloubky řezu  $a_p$  a posuvu  $f$  byly proloženy mocninnou křivkou se zobrazením příslušné rovnice.



Obrázek 36: Závislost  $F_c = f(a_p)$  materiálu ASTM F75



Obrázek 37: Závislost  $F_c = f(f)$  materiálu ASTM F75

Ze sestrojených grafů posuzovaných závislostí je patrné, že mocninné rovnice odpovídají vztahu:

$$y = ax^b, \quad (14.1)$$

kde:  $y$  – závislá proměnná,

$a$  – koeficient,

$x$  – nezávislá proměnná,

$b$  – exponent.

Na základě této rovnice bylo možné určit velikost materiálových konstant  $C_{Fc}$  a exponentů  $x_{Fc}$ ,  $y_{Fc}$  (viz Tabulka 14). Materiálová konstanta  $C_{Fc}$  v tomto případě reprezentuje hodnotu  $a$ . Exponenty  $x_{Fc}$ ,  $y_{Fc}$  zastupují hodnoty exponentu  $b$ , kde  $x_{Fc}$  odpovídá hodnotám závislosti  $F_c = f(a_p)$  a  $y_{Fc}$  závislosti  $F_c = f(f)$ .

Tabulka 14: Hodnoty konstant  $C_{Fc}$  a exponentů  $x_{Fc}$  a  $y_{Fc}$

| $C_{Fc}$  |        |           |         | $x_{Fc}$       |      | $y_{Fc}$       |      |
|-----------|--------|-----------|---------|----------------|------|----------------|------|
| $C_{Fc1}$ | 307,95 | $C_{Fc5}$ | 649,26  | $x_{Fc1}$      | 1,08 | $y_{Fc1}$      | 0,67 |
| $C_{Fc2}$ | 416,68 | $C_{Fc6}$ | 2 239,9 | $x_{Fc2}$      | 1,1  | $y_{Fc2}$      | 0,77 |
| $C_{Fc3}$ | 514,48 | $C_{Fc7}$ | 3 228,6 | $x_{Fc3}$      | 1,14 | $y_{Fc3}$      | 0,77 |
| $C_{Fc4}$ | 579,94 | $C_{Fc8}$ | 3 291,8 | $x_{Fc4}$      | 1,03 | $y_{Fc4}$      | 0,56 |
| –         |        |           |         | $\bar{x}_{Fc}$ | 1,09 | $\bar{y}_{Fc}$ | 0,69 |

Protože je mezi konstantami  $C_{Fc}$  značný nepoměr při získávání průměrné hodnoty je třeba provést konkrétní propočty v závislosti na posuvu  $f$  a hloubce řezu  $a_p$  společně s průměrnými exponenty  $\bar{x}_{Fc}$  a  $\bar{y}_{Fc}$ .

Propočty konstant  $C_{Fc}$  závislosti  $F_c = f(a_p)$ :

$$C_{FcI} = \frac{C_{Fc1}}{f_1^{y_{Fc}}} = \frac{307,95}{0,051^{0,69}} = 2\,398 \quad (14.2)$$

$$C_{FcII} = \frac{C_{Fc2}}{f_2^{y_{Fc}}} = \frac{416,68}{0,074^{0,69}} = 2\,510 \quad (14.3)$$

$$C_{FcIII} = \frac{C_{Fc3}}{f_3^{y_{Fc}}} = \frac{514,68}{0,1^{0,69}} = 2\,518 \quad (14.4)$$

$$C_{FcIV} = \frac{C_{Fc4}}{f_4^{y_{Fc}}} = \frac{579,94}{0,13^{0,69}} = 2\,369 \quad (14.5)$$

Propočty konstant  $C_{Fc}$  závislosti  $F_c = f(f)$ :

$$C_{FcV} = \frac{C_{Fc5}}{a_{p1}^{x_{Fc}}} = \frac{649,26}{0,3^{1,09}} = 2\,407 \quad (14.6)$$

$$C_{FCVI} = \frac{C_{FC6}}{a_{p2}^{x_{Fc}}} = \frac{2\,239,9}{0,8^{1,09}} = 2\,856 \quad (14.7)$$

$$C_{FCVII} = \frac{C_{FC7}}{a_{p3}^{x_{Fc}}} = \frac{3\,228,6}{1,2^{1,09}} = 2\,647 \quad (14.8)$$

$$C_{FCVIII} = \frac{C_{FC8}}{a_{p4}^{x_{Fc}}} = \frac{3\,291,8}{1,6^{1,09}} = 1\,974 \quad (14.9)$$

Výpočet průměrné hodnoty konstanty  $C_{Fc}$ :

$$C_{Fc} = \frac{C_{FCI} + C_{FCII} + C_{FCIII} + C_{FCIV} + C_{FCV} + C_{FCVI} + C_{FCVII} + C_{FCVIII}}{8} \quad (14.10)$$

$$C_{Fc} = \frac{19\,679}{8} \cong 2\,460$$

Výsledný empirický vztah pro řeznou sílu  $F_c$ :

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{\bar{x}_{Fc}} \cdot f^{\bar{y}_{Fc}} \quad (14.11)$$

$$F_c = 2\,460 \cdot a_p^{1,09} \cdot f^{0,69}$$

Z výsledného empirického vztahu je patrný vliv na velikost řezné síly  $F_c$  z konstanty obráběného materiálu  $C_{Fc} = 2\,460$  a exponentů  $x_{Fc} = 1,09$  a  $y_{Fc} = 0,69$  vyjadřujících vliv hloubky řezu  $a_p$ , respektive posuvu  $f$ . U hloubky řezu byla zaznamenána hodnota vyšší než 1, což naznačuje výraznější vliv hloubky řezu  $a_p$  na řeznou sílu  $F_c$ . Navzdory správně provedenému výpočtu má mít na základě obecných empirických vztahů (viz kapitola 8) exponent  $x_{Fc}$  maximální hodnotu spíše do 1 z důvodu fyzikálních a technologických omezení. V rámci optimalizace tohoto parametru by bylo nutné zpětně provést podrobnější kontrolu opotřebení břitové destičky během procesu a prodloužit časové úseky některých měření pro získání přesnější průměrné hodnoty.

Tabulka 15 obsahuje hodnoty řezné síly  $F_c$  získané dosazením do výsledného empirického vztahu a Tabulka 16 porovnává relativní chyby mezi naměřenou hodnotou  $F_c$  a jejím odhadem.

Tabulka 15: Velikosti řezné síly  $F_c$  [N] na základě empirického vztahu

|              | $a_p$ [mm] |     |     |       |
|--------------|------------|-----|-----|-------|
| $f$ [mm/ot.] | 0,3        | 0,8 | 1,2 | 1,6   |
| 0,051        | 85         | 247 | 385 | 527   |
| 0,074        | 110        | 320 | 498 | 681   |
| 0,1          | 135        | 394 | 613 | 838   |
| 0,13         | 162        | 472 | 734 | 1 005 |

Tabulka 16: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou

|                | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|----------------|------------|-------|-------|-------|
| f [mm/ot.]     | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051          | 5,88       | 12,15 | 16,36 | 17,08 |
| 0,074          | 1,82       | 1,56  | 7,83  | 12,33 |
| 0,1            | 0          | 1,02  | 9,79  | 18,85 |
| 0,13           | 5,56       | 5,08  | 9,26  | 0,7   |
| rel. chyba [%] | 7,83       |       |       |       |

Vzhledem k tomu, že výsledný empirický vztah je omezen na hodnoty posuvu  $f$  a hloubky řezu  $a_p$  a všechny ostatní hodnoty považuje za konstantní, nemusí poskytnout úplně přesný výsledek odpovídající skutečnosti. V případě výsledků tohoto měření byly některé hodnoty velmi přesné, například pro posuv  $f = 0,1$  mm/ot. a  $a_p = 0,3$  mm, kde byl rozdíl 0 %. Na druhou stranu méně přesné při posuvu  $f = 0,1$  mm/ot. a  $a_p = 1,6$  mm s rozdílem 18,85 %. Delší časový úsek s ustálenější hodnotou měření by v tomto ohledu mohl přispět k přesnějším výsledkům. Relativní chyba při porovnání výsledných hodnot činila 7,83 %.

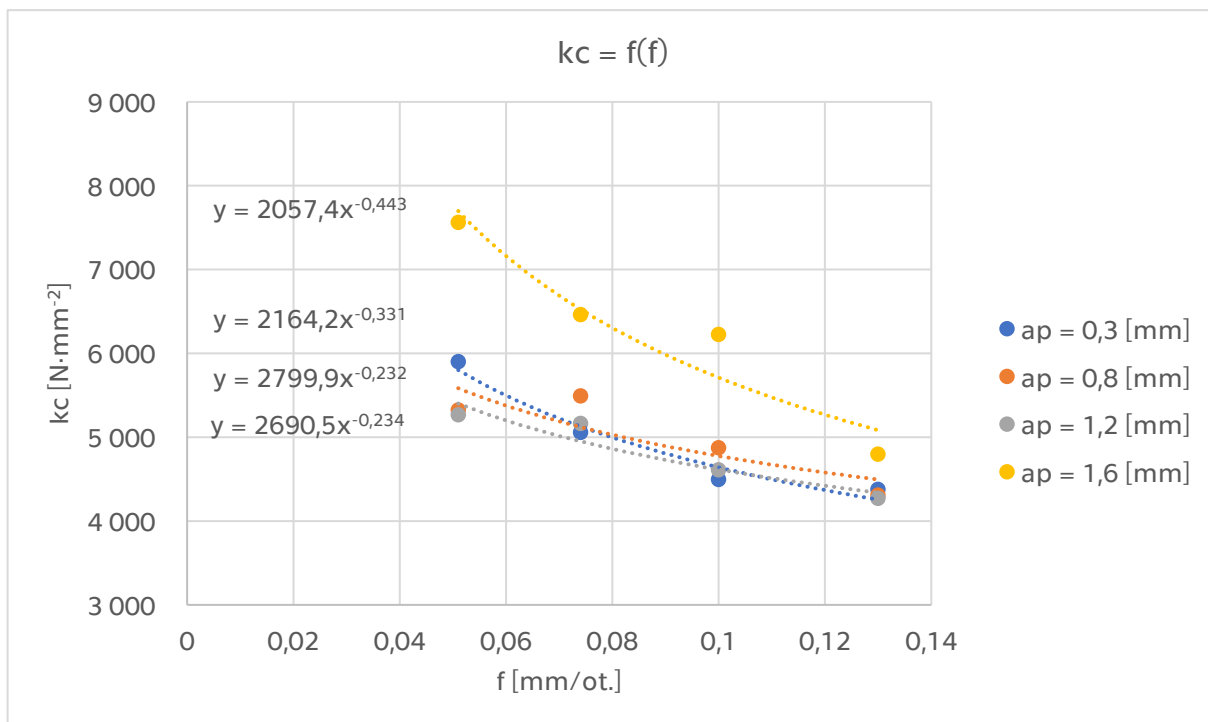
Na základě známých hodnot řezné síly  $F_c$ , hloubky řezu  $a_p$  a posuvu  $f$  a s odkazem na kapitolu 8 bylo možné vyjádřit vztah pro měrnou řeznou sílu  $k_c$ :

$$k_c = \frac{F_c}{a_p \cdot f} \quad (14.12)$$

Tabulka 17: Velikosti měřných řezných síl  $k_c$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ]

|            | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|------------|------------|-------|-------|-------|
| f [mm/ot.] | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051      | 5 902      | 5 324 | 5 268 | 7 561 |
| 0,074      | 5 059      | 5 493 | 5 163 | 6 461 |
| 0,1        | 4 497      | 4 875 | 4 610 | 6 225 |
| 0,13       | 4 377      | 4 308 | 4 269 | 4 798 |

Z tabulky pak podobným způsobem jako u předchozích kroků byl vytvořen graf (viz Obrázek 38) závislosti  $k_c = f(f)$ .



Obrázek 38: Závislost  $k_c = f(f)$  materiálu ASTM F75

Z grafu byly zaznamenány příslušné hodnoty z rovnic (viz Tabulka 18). Z mocninného vztahu představuje koeficient  $a$  materiálovou konstantu  $C_{kc}$ . Exponent  $u_{kc}$  koresponduje s hodnotou  $b$ .

Tabulka 18: Konstanta  $C_{kc}$  a exponent  $u_{kc}$

| $u_{kc}$       |       | $C_{kc}$       |       |
|----------------|-------|----------------|-------|
| $u_{kc1}$      | -0,43 | $C_{kc1}$      | 2 057 |
| $u_{kc2}$      | -0,33 | $C_{kc2}$      | 2 164 |
| $u_{kc3}$      | -0,23 | $C_{kc3}$      | 2 800 |
| $u_{kc4}$      | -0,23 | $C_{kc4}$      | 2 691 |
| $\bar{u}_{kc}$ | -0,31 | $\bar{C}_{kc}$ | 2 428 |

Následně byl určen empirický vztah pro  $k_c$  (14.13), vypočteny jednotlivé hodnoty (Tabulka 19) a porovnány s naměřenými (Tabulka 20).

$$k_c = 2\,428 \cdot f^{-0,31} \quad (14.13)$$

Ze získaného vztahu měrné řezné síly  $k_c$  je patrná velikost materiálové konstanty  $C_{kc} = 2428$ . Hodnoty exponentů  $u_{kc}$  z výše zmíněné tabulky naznačují, že měrná řezná síla klesá exponenciálně s rostoucím posuvem. Drobný výkyv hodnoty  $u_{kc4}$  lze přisoudit částečné nepřesnosti velikosti naměřené síly  $k_c$  při hloubce řezu  $a_p = 1,2$  mm, a to z důvodu strmého stoupání velikosti řezné síly  $F_c$  při zaznamenání dynamometrem. Pro přesnější hodnotu by bylo třeba provést

optimalizaci časového úseku měření s ustálenými hodnotami. Pro výsledný vztah činila průměrná hodnota exponentů  $\bar{u}_{k_c} = -0,31$ .

Tabulka 19: Velikost měrné řezné síly  $k_c$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ] na základě empirického vztahu

|            | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|------------|------------|-------|-------|-------|
| f [mm/ot.] | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051      | 6 108      | 6 108 | 6 108 | 6 108 |
| 0,074      | 5 442      | 5 442 | 5 442 | 5 442 |
| 0,1        | 4 957      | 4 957 | 4 957 | 4 957 |
| 0,13       | 4 570      | 4 570 | 4 570 | 4 570 |

Tabulka 20: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou

|                | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|----------------|------------|-------|-------|-------|
| f [mm/ot.]     | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051          | 3,37       | 12,84 | 13,75 | 23,79 |
| 0,074          | 7,05       | 0,94  | 5,13  | 18,72 |
| 0,1            | 9,29       | 1,66  | 7,01  | 25,57 |
| 0,13           | 4,23       | 5,74  | 6,58  | 4,99  |
| rel. chyba [%] | 9,42       |       |       |       |

Na základě předchozí tabulky je možné upozorovat vyšší relativní chybu (9,42 %) mezi naměřenou a empirickou hodnotou  $k_c$  vlivem strmých nárůstů a výkyvů řezné síly  $F_c$  při soustružení.

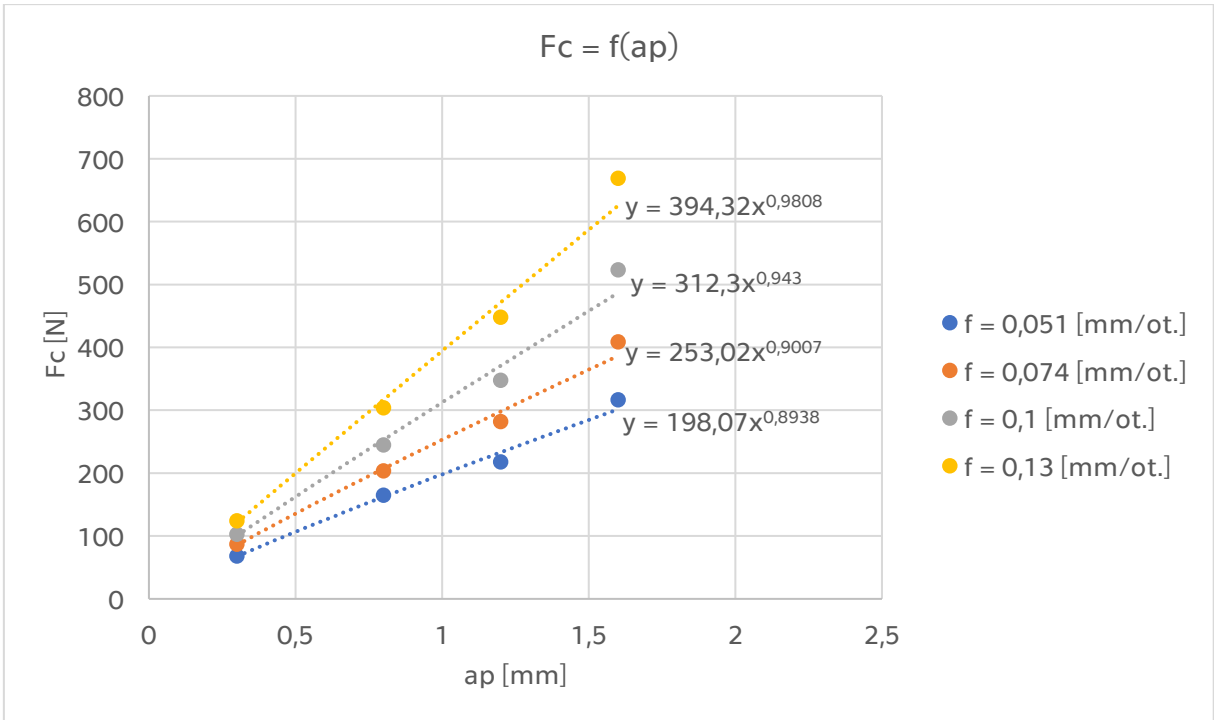
## 14.5 Určení empirických vztahů pro ocel 12 050

Druhým posuzovaným materiálem byla ocel 12 050 a při určování empirických vztahů bylo postupováno stejně jako u materiálu ASTM F75.

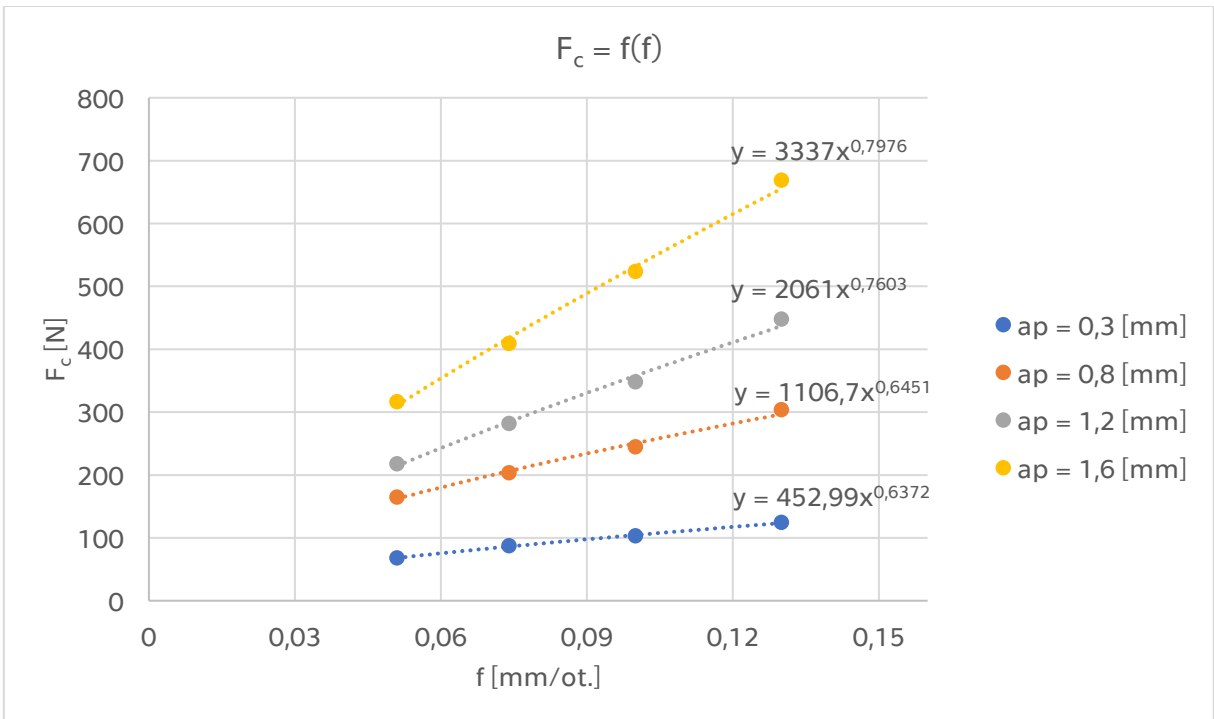
Tabulka 21: Naměřené hodnoty velikosti řezné síly  $F_c$  [N] materiálu ocel 12 050

|            | $a_p$ [mm] |     |     |     |
|------------|------------|-----|-----|-----|
| f [mm/ot.] | 0,3        | 0,8 | 1,2 | 1,6 |
| 0,051      | 68         | 165 | 218 | 316 |
| 0,074      | 87         | 203 | 282 | 409 |
| 0,1        | 103        | 245 | 348 | 524 |
| 0,13       | 124        | 304 | 448 | 669 |





Obrázek 39: Závislost  $F_c = f(a_p)$  materiálu ocel 12 050



Obrázek 40: Závislost  $F_c = f(f)$  materiálu 12 050

Tabulka 22: Hodnoty konstant  $C_{Fc}$  a exponentů  $x_{Fc}$  a  $y_{Fc}$

| $C_{Fc}$  |        |           |         | $x_{Fc}$       |      | $y_{Fc}$       |      |
|-----------|--------|-----------|---------|----------------|------|----------------|------|
| $C_{Fc1}$ | 198,07 | $C_{Fc5}$ | 452,99  | $x_{Fc1}$      | 0,89 | $y_{Fc1}$      | 0,64 |
| $C_{Fc2}$ | 253,02 | $C_{Fc6}$ | 1 106,7 | $x_{Fc2}$      | 0,9  | $y_{Fc2}$      | 0,65 |
| $C_{Fc3}$ | 312,3  | $C_{Fc7}$ | 2 061   | $x_{Fc3}$      | 0,94 | $y_{Fc3}$      | 0,76 |
| $C_{Fc4}$ | 394,32 | $C_{Fc8}$ | 3 337   | $x_{Fc4}$      | 0,98 | $y_{Fc4}$      | 0,8  |
| –         |        |           |         | $\bar{x}_{Fc}$ | 0,93 | $\bar{y}_{Fc}$ | 0,71 |

Propočty konstant  $C_{Fc}$  závislosti  $F_c = f(a_p)$ :

$$C_{FcI} = \frac{C_{Fc1}}{f_1^{y_{Fc}}} = \frac{198,07}{0,051^{0,71}} = 1\,639 \quad (14.14)$$

$$C_{FcII} = \frac{C_{Fc2}}{f_2^{y_{Fc}}} = \frac{253,02}{0,074^{0,71}} = 1\,607 \quad (14.15)$$

$$C_{FcIII} = \frac{C_{Fc3}}{f_3^{y_{Fc}}} = \frac{312,3}{0,1^{0,71}} = 1\,602 \quad (14.16)$$

$$C_{FcIV} = \frac{C_{Fc4}}{f_4^{y_{Fc}}} = \frac{394,32}{0,13^{0,71}} = 1\,679 \quad (14.17)$$

Propočty konstant  $C_{Fc}$  závislosti  $F_c = f(f)$ :

$$C_{FcV} = \frac{C_{Fc5}}{a_{p1}^{x_{Fc}}} = \frac{452,99}{0,3^{0,93}} = 1\,387 \quad (14.18)$$

$$C_{FcVI} = \frac{C_{Fc6}}{a_{p2}^{x_{Fc}}} = \frac{1106,7}{0,8^{0,93}} = 1\,362 \quad (14.19)$$

$$C_{FcVII} = \frac{C_{Fc7}}{a_{p3}^{x_{Fc}}} = \frac{2061}{1,2^{0,93}} = 1\,740 \quad (14.20)$$

$$C_{FcVIII} = \frac{C_{Fc8}}{a_{p4}^{x_{Fc}}} = \frac{3337}{1,6^{0,93}} = 2\,156 \quad (14.21)$$

Výpočet průměrné hodnoty konstanty  $C_{Fc}$ :

$$C_{Fc} = \frac{C_{FcI} + C_{FcII} + C_{FcIII} + C_{FcIV} + C_{FcV} + C_{FcVI} + C_{FcVII} + C_{FcVIII}}{8} \quad (14.22)$$

$$C_{Fc} = \frac{13172}{8} \cong 1\,647$$

Výsledný empirický vztah pro řeznou sílu  $F_c$ :

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{\bar{x}_{Fc}} \cdot f^{\bar{y}_{Fc}} \quad (14.23)$$

$$F_c = 1\,647 \cdot a_p^{0,93} \cdot f^{0,71}$$

V případě posouzení vlivu konstanty obráběného materiálu byla vypočtena hodnota  $C_{Fc} = 1\,647$  a v porovnání s kobaltovou superslitinou ASTM F75 je 1,47krát nižší, což koresponduje s nižší pevností oceli. Oba exponenty nabýly hodnot  $x_{Fc} = 0,93$  a  $y_{Fc} = 0,71$ , z čehož plyne, že vliv hloubky řezu na celkové síle  $F_c$  je výraznější než u posuvu.

Tabulka 23: Velikosti řezné síly  $F_c$  [N] na základě empirického vztahu

|              | $a_p$ [mm] |     |     |     |
|--------------|------------|-----|-----|-----|
| $f$ [mm/ot.] | 0,3        | 0,8 | 1,2 | 1,6 |
| 0,051        | 65         | 162 | 236 | 308 |
| 0,074        | 85         | 211 | 307 | 401 |
| 0,1          | 105        | 261 | 380 | 497 |
| 0,13         | 126        | 314 | 458 | 599 |

Tabulka 24: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou

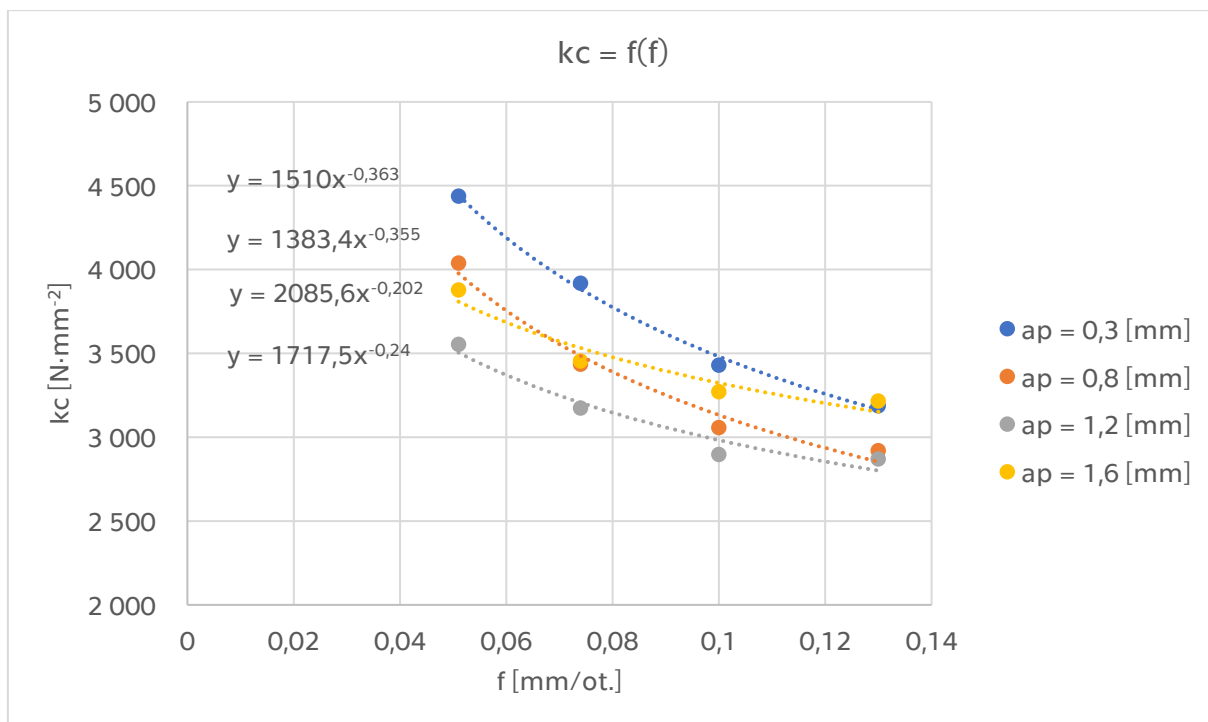
|                | $a_p$ [mm] |      |      |       |
|----------------|------------|------|------|-------|
| $f$ [mm/ot.]   | 0,3        | 0,8  | 1,2  | 1,6   |
| 0,051          | 4,62       | 1,85 | 7,63 | 2,6   |
| 0,074          | 2,35       | 3,79 | 8,14 | 2     |
| 0,1            | 1,9        | 6,13 | 8,42 | 5,43  |
| 0,13           | 1,59       | 3,18 | 2,18 | 11,69 |
| rel. chyba [%] | 4,59       |      |      |       |

Díky ustálenému chování oceli při soustružení a tím pádem i přesnějšimu zaznamenání hodnot je možné zpozorovat menší relativní chybu (4,59 %) mezi naměřenými a empirickými hodnotami než v případě ASTM F75 (7,83 %).

Stejným způsobem jako v případě vztahu (14.12) byly určeny hodnoty měrných řezných sil  $k_c$ .

Tabulka 25: Velikosti měrných řezných sil  $k_c$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ] materiálu ocel 12 050

|              | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|--------------|------------|-------|-------|-------|
| $f$ [mm/ot.] | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051        | 4 438      | 4 039 | 3 554 | 3 877 |
| 0,074        | 3 919      | 3 436 | 3 175 | 3 454 |
| 0,1          | 3 430      | 3 058 | 2 898 | 3 272 |
| 0,13         | 3 187      | 2 920 | 2 871 | 3 216 |



Obrázek 41: Závislost  $k_c = f(f)$  materiálu ocel 12 050

Tabulka 26: Konstanta  $C_{kc}$  a exponent  $u_{kc}$

| $u_{kc}$       |       | $C_{kc}$       |       |
|----------------|-------|----------------|-------|
| $u_{kc1}$      | -0,36 | $C_{kc1}$      | 1 510 |
| $u_{kc2}$      | -0,36 | $C_{kc2}$      | 1 383 |
| $u_{kc3}$      | -0,2  | $C_{kc3}$      | 2 086 |
| $u_{kc4}$      | -0,24 | $C_{kc4}$      | 1 718 |
| $\bar{u}_{kc}$ | -0,29 | $\bar{C}_{kc}$ | 1 674 |

Empirický vztah pro měrnou řeznou sílu  $k_c$ :

$$k_c = 1\,674 \cdot f^{-0,29} \quad (14.24)$$

Pro ocel 12 050 je rovněž patrná nižší hodnota vypočtené konstanty  $C_{kc} = 1\,674$  u měrné řezné síly  $k_c$  než u ASTM F75 a také nižší hodnota exponentu  $u_{kc} = -0,29$ , což naznačuje nižší vliv změny posuvu na velikost měrné řezné síly  $k_c$ .

Tabulka 27: Velikost měrné řezné síly  $k_c$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ] na základě empirického vztahu

| f [mm/ot.] | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|------------|------------|-------|-------|-------|
|            | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051      | 3 968      | 3 968 | 3 968 | 3 968 |
| 0,074      | 3 562      | 3 562 | 3 562 | 3 562 |
| 0,1        | 3 264      | 3 264 | 3 264 | 3 264 |
| 0,13       | 3 025      | 3 025 | 3 025 | 3 025 |

Tabulka 28: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou

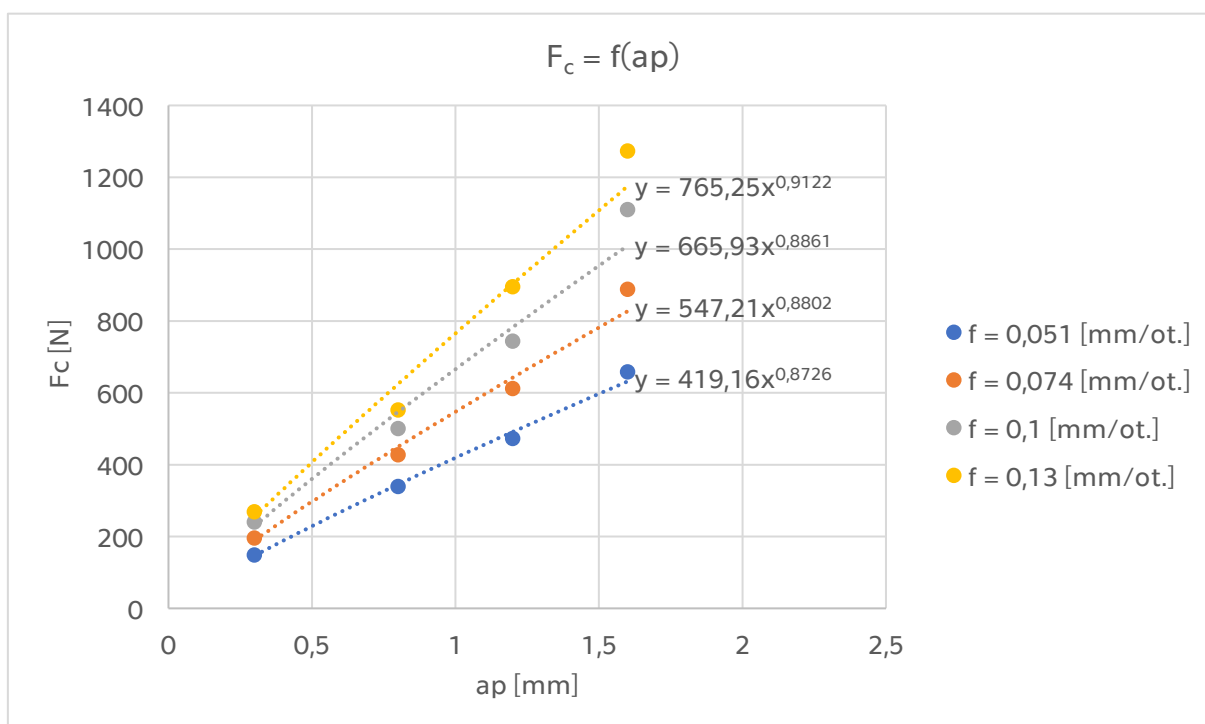
|                | $a_p$ [mm] |      |       |      |
|----------------|------------|------|-------|------|
| $f$ [mm/ot.]   | 0,3        | 0,8  | 1,2   | 1,6  |
| 0,051          | 11,85      | 1,8  | 10,43 | 2,28 |
| 0,074          | 10,02      | 3,54 | 10,87 | 3,04 |
| 0,1            | 5,08       | 6,33 | 11,23 | 0,24 |
| 0,13           | 5,36       | 3,46 | 5,1   | 6,31 |
| rel. chyba [%] | 6,06       |      |       |      |

Tabulka 28 opět potvrzuje nižší vypočtenou relativní chybu mezi naměřenou a empirickou hodnotou u oceli 12 050 (6,06 %) než v případě ASTM F75 (9,42 %).

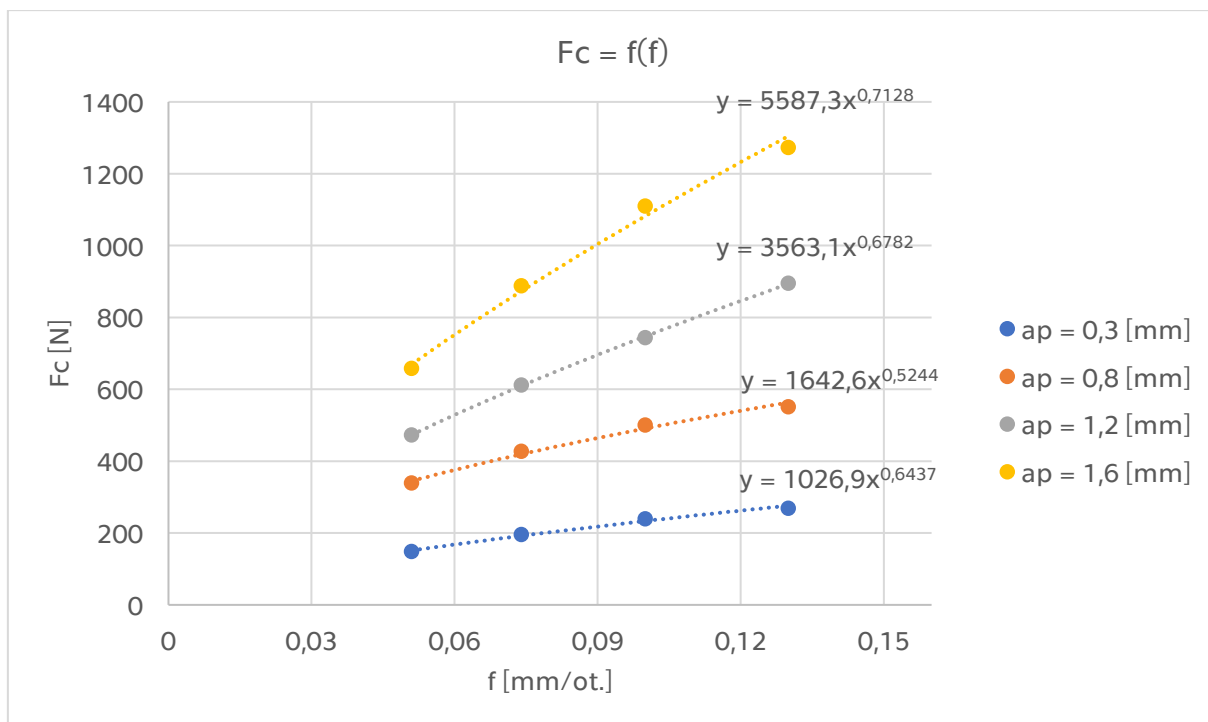
## 14.6 Určení empirických vztahů pro Inconel 713LC

Tabulka 29: Naměřené hodnoty velikosti řezné síly  $F_c$  [N] materiálu Inconel 713LC

|              | $a_p$ [mm] |     |     |       |
|--------------|------------|-----|-----|-------|
| $f$ [mm/ot.] | 0,3        | 0,8 | 1,2 | 1,6   |
| 0,051        | 149        | 339 | 473 | 658   |
| 0,074        | 195        | 427 | 612 | 888   |
| 0,1          | 240        | 500 | 743 | 1 110 |
| 0,13         | 269        | 552 | 895 | 1 273 |



Obrázek 42: Závislost  $F_c = f(a_p)$  materiálu Inconel 713LC



Obrázek 43: Závislost  $F_c = f(f)$  materiálu Inconel 713LC

Tabulka 30: Hodnoty konstant  $C_{Fc}$  a exponentů  $x_{Fc}$  a  $y_{Fc}$

| $C_{Fc}$  |        |           |         | $x_{Fc}$       |      | $y_{Fc}$       |      |
|-----------|--------|-----------|---------|----------------|------|----------------|------|
| $C_{Fc1}$ | 419,61 | $C_{Fc5}$ | 1 026,9 | $x_{Fc1}$      | 0,87 | $y_{Fc1}$      | 0,64 |
| $C_{Fc2}$ | 547,21 | $C_{Fc6}$ | 1 642,6 | $x_{Fc2}$      | 0,88 | $y_{Fc2}$      | 0,52 |
| $C_{Fc3}$ | 665,93 | $C_{Fc7}$ | 3 563,1 | $x_{Fc3}$      | 0,89 | $y_{Fc3}$      | 0,68 |
| $C_{Fc4}$ | 765,25 | $C_{Fc8}$ | 5 587,3 | $x_{Fc4}$      | 0,91 | $y_{Fc4}$      | 0,71 |
| –         |        |           |         | $\bar{x}_{Fc}$ | 0,89 | $\bar{y}_{Fc}$ | 0,64 |

Propočty konstant  $C_{Fc}$  ze závislosti  $F_c = f(a_p)$ :

$$C_{FcI} = \frac{C_{Fc1}}{f_1^{y_{Fc}}} = \frac{419,61}{0,051^{0,64}} = 2\,817 \quad (14.25)$$

$$C_{FcII} = \frac{C_{Fc2}}{f_2^{y_{Fc}}} = \frac{547,21}{0,074^{0,64}} = 2\,895 \quad (14.26)$$

$$C_{FcIII} = \frac{C_{Fc3}}{f_3^{y_{Fc}}} = \frac{665,93}{0,1^{0,64}} = 2\,905 \quad (14.27)$$

$$C_{FcIV} = \frac{C_{Fc4}}{f_4^{y_{Fc}}} = \frac{765,25}{0,13^{0,64}} = 2\,823 \quad (14.28)$$

Propočty konstant  $C_{Fc}$  ze závislosti  $F_c = f(f)$ :

$$C_{FcV} = \frac{C_{Fc5}}{a_{p1}^{x_{Fc}}} = \frac{1\,026,9}{0,3^{0,89}} = 2\,990 \quad (14.29)$$

$$C_{FcVI} = \frac{C_{Fc6}}{a_{p2}^{x_{Fc}}} = \frac{1\,642,6}{0,8^{0,89}} = 2\,002 \quad (14.30)$$

$$C_{FcVII} = \frac{C_{Fc7}}{a_{p3}^{x_{Fc}}} = \frac{3\,563,1}{1,2^{0,89}} = 3\,031 \quad (14.31)$$

$$C_{FcVIII} = \frac{C_{Fc8}}{a_{p4}^{x_{Fc}}} = \frac{5\,587,3}{1,6^{0,89}} = 3\,681 \quad (14.32)$$

Výpočet průměrné hodnoty konstanty  $C_{Fc}$ :

$$C_{Fc} = \frac{C_{FcI} + C_{FcII} + C_{FcIII} + C_{FcIV} + C_{FcV} + C_{FcVI} + C_{FcVII} + C_{FcVIII}}{8} \quad (14.33)$$

$$C_{Fc} = \frac{23\,153}{8} \cong 2\,894$$

Empirický vztah pro řeznou sílu  $F_c$ :

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{\bar{x}_{Fc}} \cdot f^{\bar{y}_{Fc}} \quad (14.34)$$

$$F_c = 2\,894 \cdot a_p^{0,89} \cdot f^{0,64}$$

Z výsledného empirického vztahu pro řeznou sílu  $F_c$  lze usoudit, že hodnota materiálové konstanty  $C_{Fc} = 2\,894$  bude mít na velikost této síly významný vliv. V porovnání s ocelí 12 050 je její hodnota 1,76krát vyšší a s kobaltovou superslitinou ASTM F75 1,18krát vyšší. Velikosti exponentů  $x_{Fc} = 0,89$  a  $y_{Fc} = 0,64$  jsou při posouzení s exponenty ostatních materiálů nejnižší.

Tabulka 31: Velikosti řezné síly  $F_c$  [N] na základě empirického vztahu

|            | $a_p$ [mm] |     |     |       |
|------------|------------|-----|-----|-------|
| f [mm/ot.] | 0,3        | 0,8 | 1,2 | 1,6   |
| 0,051      | 148        | 353 | 507 | 654   |
| 0,074      | 187        | 448 | 643 | 830   |
| 0,1        | 227        | 543 | 780 | 1 007 |
| 0,13       | 268        | 643 | 922 | 1 191 |

Tabulka 32: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou

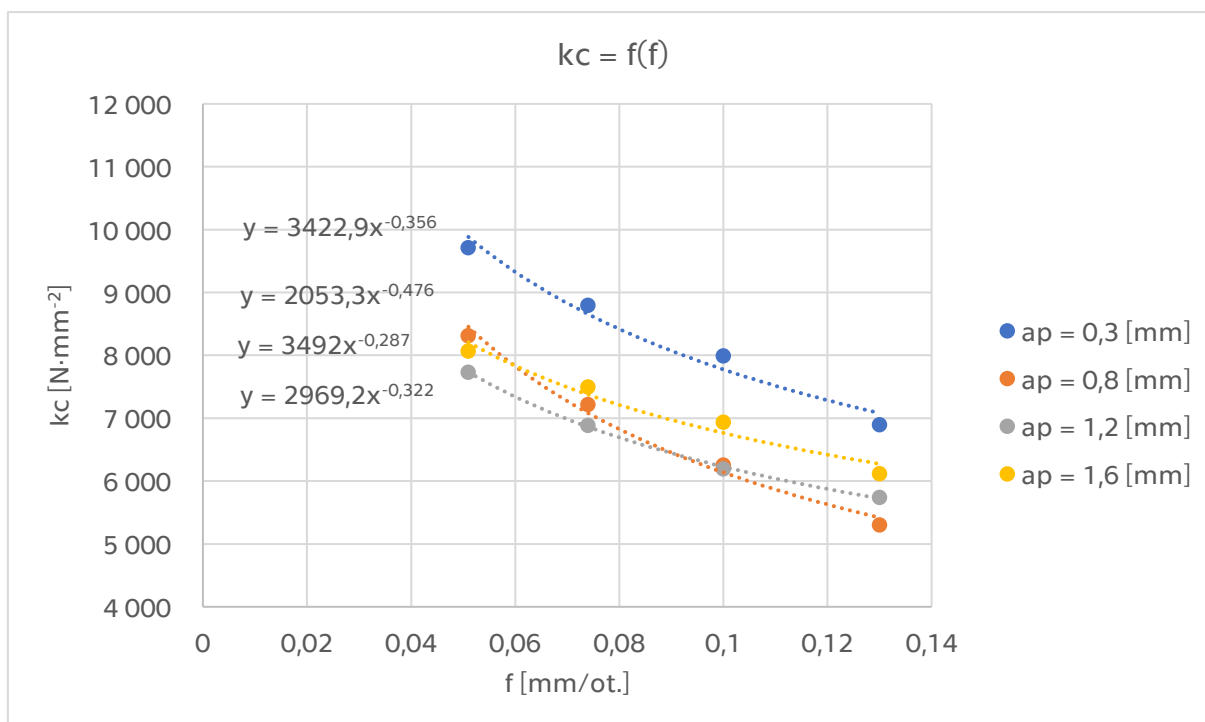
|                | $a_p$ [mm] |       |      |       |
|----------------|------------|-------|------|-------|
| f [mm/ot.]     | 0,3        | 0,8   | 1,2  | 1,6   |
| 0,051          | 0,68       | 3,97  | 6,71 | 0,61  |
| 0,074          | 4,28       | 4,69  | 4,82 | 6,99  |
| 0,1            | 5,73       | 7,92  | 4,74 | 10,23 |
| 0,13           | 0,37       | 14,15 | 2,93 | 6,88  |
| rel. chyba [%] | 5,36       |       |      |       |

Vyšší relativní chyba (5,36 %) mezi naměřenou a empirickou hodnotou (viz Tabulka 32) opět poukazuje na zmíněné neustálené chování řezné síly  $F_c$  při soustružení.

Pro stanovení hodnot měrných řezných sil  $k_c$  byl použit stejný přístup jako v případě vztahu (14.12).

Tabulka 33: Velikosti měrných řezných sil  $k_c$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ] materiálu Inconel 713LC

|              | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|--------------|------------|-------|-------|-------|
| $f$ [mm/ot.] | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051        | 9 712      | 8 314 | 7 730 | 8 069 |
| 0,074        | 8 797      | 7 220 | 6 889 | 7 499 |
| 0,1          | 7 993      | 6 254 | 6 194 | 6 938 |
| 0,13         | 6 897      | 5 305 | 5 739 | 6 120 |



Obrázek 44: Závislost  $k_c = f(f)$  materiálu Inconel 713LC

Tabulka 34: Konstanta  $C_{kc}$  a exponent  $u_{kc}$

| $u_{kc}$       |       | $C_{kc}$       |       |
|----------------|-------|----------------|-------|
| $u_{kc1}$      | -0,36 | $C_{kc1}$      | 3 423 |
| $u_{kc2}$      | -0,48 | $C_{kc2}$      | 2 053 |
| $u_{kc3}$      | -0,29 | $C_{kc3}$      | 3 492 |
| $u_{kc4}$      | -0,32 | $C_{kc4}$      | 2 969 |
| $\bar{u}_{kc}$ | -0,36 | $\bar{C}_{kc}$ | 2 984 |



Empirický vztah pro měrnou řeznou sílu:

$$k_c = 2\,984 \cdot f^{-0,36} \quad (14.35)$$

Pro Inconel 713LC je zjevné, že hodnota vypočtené konstanty  $C_{kc} = 2\,984$  měrné řezné síly  $k_c$  je nejvyšší ze všech získaných vztahů. Vysoká hodnota exponentu  $u_{kc} = -0,36$  indikuje vyšší vliv změny posuvu na celkovou měrnou řeznou sílu  $k_c$ .

Tabulka 35: Velikost měrné řezné síly  $k_c$  [ $N \cdot mm^{-2}$ ] na základě empirického vztahu

|            | $a_p$ [mm] |       |       |       |
|------------|------------|-------|-------|-------|
| f [mm/ot.] | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6   |
| 0,051      | 8 711      | 8 711 | 8 711 | 8 711 |
| 0,074      | 7 619      | 7 619 | 7 619 | 7 619 |
| 0,1        | 6 836      | 6 836 | 6 836 | 6 836 |
| 0,13       | 6 220      | 6 220 | 6 220 | 6 220 |

Tabulka 36: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou

|                | $a_p$ [mm] |       |       |      |
|----------------|------------|-------|-------|------|
| f [mm/ot.]     | 0,3        | 0,8   | 1,2   | 1,6  |
| 0,051          | 11,49      | 4,56  | 11,26 | 7,38 |
| 0,074          | 15,47      | 5,24  | 9,58  | 1,57 |
| 0,1            | 16,93      | 8,52  | 9,39  | 1,49 |
| 0,13           | 10,89      | 14,71 | 7,73  | 1,60 |
| rel. chyba [%] | 8,61       |       |       |      |

Relativní chyba (8,61 %) mezi naměřenou a empirickou hodnotou Inconelu 713LC znovu poukazuje na vliv zaznamenané velikosti složky síly  $F_c$  a v porovnání s ocelí 12 050 (6,06 %) a ASTM F75 (9,42 %) nabývá druhé nejvyšší hodnoty.

## 15. ZÁVĚR

Bakalářská práce s názvem „Soustružení niklových a CoCr slitin“ se podrobně zabývala analýzou chování těchto progresivních materiálů při procesu soustružení.

S odkazem na odbornou literaturu bylo cílem této práce prozkoumat mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti niklových a kobaltových superslitin. V návaznosti bylo třeba zpracovat doporučené nástrojové materiály a řezné podmínky při soustružení těchto materiálů. Všechny poznatky byly systematicky vypracovány v rešeršní části práce.

Praktická část práce spočívala v provedení technologických zkoušek obrobitelnosti, které se zaměřily na měření řezných sil při soustružení Co-Cr superslitiny ASTM F75, niklové superslitiny Inconel 713LC a uhlíkové oceli 12 050. Měření bylo provedeno v rámci laboratoří ČVUT Fakulty strojní na soustruhu SU 50/1500 se soustružnickým nožem PCLNR 2020 K12 a příslušnou břitovou destičkou CNMG 120404MN. K měření sil byl využit piezoelektrický dynamometr Type 9265B. Dále byl proveden grafický rozbor vývoje jednotlivých složek sil materiálů v programu Dynoware společně s exportem naměřených dat do Excelu.

Při měření byl potvrzen předpoklad, že při soustružení superslitin vznikají daleko vyšší síly než v případě běžně používané uhlíkové oceli. Kromě vlastností materiálu byly popsány další vlivy jako geometrie nástroje, která se na velikosti jednotlivých složek sil také významně podílela. Zajímavým poznatkem, který se lišil od předpokladů literatury byla velikost posuvové složky síly  $F_f$ , která v řadě měření přesahovala velikost hlavní řezné síly  $F_c$ . Tato skutečnost byla způsobena vysokým odporem materiálu vůči nástroji a vznikem vibrací. Z hlediska geometrie nástroje přispěly k nárůstu velikosti síly také vyšší úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa$  a negativní úhel čela  $\gamma_0$ . Vysokou hodnotu posuvové síly  $F_f$  je tedy třeba vzít v úvahu v případě vrtání těchto slitin, kde má na proveditelnost a kvalitu tohoto procesu zásadní vliv právě tato složka síly.

V další části práce byly vypracovány empirické vztahy testovaných materiálů, které nám umožnily vytvořit odhad pro velikost hlavní řezné síly  $F_c$  a měrné řezné síly  $k_c$  při změně vstupních parametrů hloubky řezu  $a_p$  a posuvu  $f$ .

V případě empirických vztahů pro hlavní řeznou sílu bylo určeno  $F_c = 2\,460 \cdot a_p^{1,09} \cdot f^{0,69}$  (ASTM F75),  $F_c = 1\,647 \cdot a_p^{0,93} \cdot f^{0,71}$  (ocel 12 050) a  $F_c = 2\,894 \cdot a_p^{0,89} \cdot f^{0,64}$  (Inconel 713LC). Pro empirické vztahy měrné řezné síly bylo stanoveno  $k_c = 2\,428 \cdot f^{-0,31}$  (ASTM F75),  $k_c = 1\,674 \cdot f^{-0,29}$  (ocel 12 050) a  $k_c = 2\,984 \cdot f^{-0,36}$  (Inconel 713LC). Výsledky demonstrovaly, jaký vliv mají jednotlivé parametry na velikost hlavní řezné síly  $F_c$  a měrné řezné síly  $k_c$ . Vysoké hodnoty materiálových konstant  $C_{F_c} = (2\,460; 2\,894)$  a  $C_{k_c} = (2\,428; 2\,984)$  superslitin ASTM F75 a Inconelu 713LC poukazovaly na značné rozdíly v porovnání s uhlíkovou ocelí 12 050, kde bylo stanoveno  $C_{F_c} = 1\,647$  a  $C_{k_c} = 1\,674$ . Pro testované superslitiny tak bylo potvrzeno, že jejich pevnost, tvrdost a odolnost proti deformaci má na velikost řezných sil výrazný vliv.

Pro případ návaznosti a rozšíření problematiky této práce by bylo vhodné provést další měření při změně vstupních parametrů a při delších časových úsecích záznamu silových složek z důvodu získání přesných hodnot a eliminace odchylek. V rámci vyhodnocení by bylo možné rovněž určit odhad pro velikosti složek síly  $F_f$  a  $F_p$ . Nakonec by byla provedena analýza mechanismů opotřebení břitových destiček.

Stanovené cíle této bakalářské práce byly v souladu se zadáním splněny. V teoretické části práce byla popsána problematika týkající se vlastností niklových a kobaltových superslitin a jejich obrobitelnosti. V experimentální části byla řada těchto předpokladů prakticky ověřena.

## Bibliografie

- [1] DAVIS, J. R. *ASM speciality handbook: Nickel, cobalt, and their alloys*. Materials Park: ASM International, 2000. ISBN 08-717-0685-7.
- [2] REED, Roger C. *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-052-1859-042.
- [3] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [4] CARDARELLI, Francois. *Materials handbook: a concise desktop reference*. 2nd ed. London: Springer, 2008. ISBN 978-184-6286-681.
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-720-4130-4.
- [6] BAKER, Ian. *Fifty Materials That Make the World*. Imprint: Springer, 2018. ISBN 978-331-9787-640.
- [7] YOUSSEF, Helmi A. *Machining of stainless steels and super alloys: traditional and nontraditional techniques*. Hoboken: John Wiley, 2015. ISBN 978-111-8919-460.
- [8] LI, X. Continuum Micromechanics and Molecular Dynamics Simulation. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 27-59 [cit. 2023-03-14]. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01102-X
- [9] KISHAWY, Hossam a Ali HOSSEINI. *Machining Difficult-to-Cut Materials: Basic Principles and Challenges*. Imprint: Springer, 2019. Materials Forming, Machining and Tribology. ISBN 978-331-9959-658.
- [10] DONACHIE, Matthew a Stephen DONACHIE. *Superalloys: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2002. ISBN 978-087-1707-499.
- [11] KOSEKI, Shuho, Kenichi INOUE, Shigekazu MORITO, Takuya OHBA a Hiroshi USUKI. Comparison of TiN-coated tools using CVD and PVD processes during continuous cutting of Ni-based superalloys. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2015, **283**, 353-363 [cit. 2023-03-14]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2015.10.071

- [12] PAULO DAVIM, J. *Machining of Titanium Alloys*. Heidelberg: Springer Berlin, 2014. ISBN 9783662439012.
- [13] KUDELA, Miroslav. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [14] Opotřebení břitu. In: *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2012 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>
- [15] KHAN, S.A., S.L. SOO, D.K. ASPINWALL, C. SAGE, P. HARDEN, M. FLEMING, A. WHITE a R. M'SAOUBI. Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling. *Procedia CIRP* [online]. 2012, **1**, 283-288 [cit. 2023-03-15]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2012.04.051
- [16] DANISH, Mohd, Munish GUPTA, Saeed RUBAIEE, Anas AHMED a Mehmet KORKMAZ. Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718. *Tribology International* [online]. 2021, **163** [cit. 2023-03-15]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2021.107178
- [17] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2091-6.
- [18] KORKMAZ, Mehmet, Nafiz YAŞAR a Mustafa GÜNAY. Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2020, **23**(3), 664-673 [cit. 2023-03-15]. ISSN 22150986. Dostupné z: doi:10.1016/j.jestch.2020.02.001
- [19] TANZI, Maria, Silvia FARÈ a Gabriele CANDIANI. *Foundations of Biomaterials Engineering*. London: Elsevier Science & Technology, 2019. ISBN 9780081010341.
- [20] HIGH-TEMPERATURE HIGH-STRENGTH NICKEL-BASE ALLOYS: A PRACTICAL GUIDE TO THE USE OF NICKEL-CONTAINING ALLOYS NO 393. In: *Nickel Institute* [online]. Toronto: Nickel Institute, 2020 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z:

[https://nickelinstitute.org/media/8d93486143182f5/nickel\\_\\_incopub393\\_\\_updated-june-2021.pdf](https://nickelinstitute.org/media/8d93486143182f5/nickel__incopub393__updated-june-2021.pdf)

- [21] AISI 1045 Carbon Steel. In: *Fushun Special Steel* [online]. Changsha City: Fushun Special Steel Co., Ltd., c1998-2022 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://www.fushunspecialsteel.com/aisi-1045-carbon-steel/>
- [22] #15856. In: *Stroje Svoboda s.r.o.* [online]. Blansko: Stroje Svoboda s.r.o. [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://www.strojesvoboda.cz/katalog.php?page=DETAIL&katalog=Stroje/Soustruh&key=&id=15856&ids=15876&o=1>
- [23] SOUSTRUŽENÍ 2021 – 2022. In: *Domovská stránka - Dormer Pramet* [online]. Šumperk: Dormer Pramet, 2021 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://5wyuco84ao39w9tsgkkmnm.blob.core.windows.net/cms/DORMER-PRAMET-Turning-Catalogue-2021-CZ.pdf>
- [24] Kennametal Turning Catalog 8010. In: *Productivity Inc* [online]. Latrobe: Kennametal, 2008 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://productivity.com/wp-content/uploads/pdfs/Kennametal%20Turning%20Catalog%208010.pdf>
- [25] Data sheet, Type 9265B, 9441B, 9443B. In: *HELMAR Jacek A. Dobrowiecki* [online]. Warszawa: HELMAR Jacek A. Dobrowiecki, c2005-2013 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: [http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/9265b\\_\\_nn3842.pdf](http://www.helmar.com.pl/helmar/plik/9265b__nn3842.pdf)
- [26] Data acquisition System (DAQ) for cutting force, test and measurement applications, with up to 28 channels / 5697A. In: *Kistler: Measurement systems and sensors* [online]. Winterthur: Kistler Group, 2023 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/cp/data-acquisition-system-5697a/P0000374>
- [27] HT-3100. In: *Ono Sokki* [online]. Addison (Chicago): Ono Sokki Technology, 2018 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://onosokki.net/Product/Detail/HT-3100>
- [28] How to choose correct turning insert. In: *Sandvik Coromant* [online]. Sandviken: Sandvik AB, c2000-2018 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z:

<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general-turning/how-to-choose-correct-turning-insert>

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1: Podíl prvků obsažených v superslitinách [1].....   | 14 |
| Tabulka 2: Mechanické vlastnosti komerčně používaných superslitin [1].....                            | 17 |
| Tabulka 3: Chemické složení ASTM F75 [1] .....  | 40 |
| Tabulka 4: Mechanické vlastnosti ASTM F75 [1] .....   | 40 |
| Tabulka 5: Chemické složení Inconel 713LC [20].....   | 40 |
| Tabulka 6: Mechanické vlastnosti Inconel 713LC [20] .....   | 40 |
| Tabulka 7: Chemické složení Ocel 12 050 [21].....   | 41 |
| Tabulka 8: Mechanické vlastnosti Ocel 12 050 [21].....  | 41 |
| Tabulka 9: Technická specifikace stroje [22].....   | 42 |
| Tabulka 10: Parametry soustružnického nože [23] .....   | 43 |
| Tabulka 11: Parametry břitové destičky [24].....  | 44 |
| Tabulka 12: Naměřené hodnoty pro testované materiály.....   | 53 |
| Tabulka 13: Naměřené hodnoty velikosti řezné síly $F_c$ [N] materiálu ASTM F75 ..                     | 58 |
| Tabulka 14: Hodnoty konstant $C_{F_c}$ a exponentů $x_{F_c}$ a $y_{F_c}$ .....                        | 60 |
| Tabulka 15: Velikosti řezné síly $F_c$ [N] na základě empirického vztahu .....                        | 61 |
| Tabulka 16: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou.....                                 | 62 |
| Tabulka 17: Velikosti měrných řezných sí $k_c$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ].....                             | 62 |
| Tabulka 18: Konstanta $C_{k_c}$ a exponent $u_{k_c}$ .....  | 63 |
| Tabulka 19: Velikost měrné řezné síly $k_c$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ] na základě empirického vztahu ..... | 64 |
| Tabulka 20: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou.....                                 | 64 |
| Tabulka 21: Naměřené hodnoty velikosti řezné síly $F_c$ [N] materiálu ocel 12 050                     | 64 |
| Tabulka 22: Hodnoty konstant $C_{F_c}$ a exponentů $x_{F_c}$ a $y_{F_c}$ .....                        | 66 |
| Tabulka 23: Velikosti řezné síly $F_c$ [N] na základě empirického vztahu .....                        | 67 |
| Tabulka 24: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou.....                                 | 67 |
| Tabulka 25: Velikosti měrných řezných sí $k_c$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ] materiálu ocel 12 050 .....      | 67 |
| Tabulka 26: Konstanta $C_{k_c}$ a exponent $u_{k_c}$ .....  | 68 |
| Tabulka 27: Velikost měrné řezné síly $k_c$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ] na základě empirického vztahu ..... | 68 |
| Tabulka 28: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou.....                                 | 69 |



|  |    |
|--|----|
| Tabulka 29: Naměřené hodnoty velikosti řezné síly $F_c$ [N] materiálu Inconel 713LC<br>.....             | 69 |
| Tabulka 30: Hodnoty konstant $C_{F_c}$ a exponentů $x_{F_c}$ a $y_{F_c}$ .....                           | 70 |
| Tabulka 31: Velikosti řezné síly $F_c$ [N] na základě empirického vztahu .....                           | 71 |
| Tabulka 32: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou.....                                    | 71 |
| Tabulka 33: Velikosti měrných řezných sí $k_c$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ] materiálu Inconel 713LC..           | 72 |
| Tabulka 34: Konstanta $C_{k_c}$ a exponent $u_{k_c}$ .....   | 72 |
| Tabulka 35: Velikost měrné řezné síly $k_c$ [ $N \cdot mm^{-2}$ ] na základě empirického vztahu<br>..... | 73 |
| Tabulka 36: Relativní chyby mezi naměřenou a empirickou hodnotou.....                                    | 73 |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Pevnostní charakteristika v závislosti na teplotě pro superslitiny na bázi Ni, Fe a Co [1] ..... | 16 |
| Obrázek 2: Vývoj creepové odolnosti niklových superslitin [6] .....   | 20 |
| Obrázek 3: Relativní obrobiteľnosť superslitin v porovnaní s ocelami a slitinami vybraných kovů [9] .....   | 25 |
| Obrázek 4: Vlastnosti řezných materiálů [12] .....  | 29 |
| Obrázek 5: Opotřebenění břitových destiček tvaru C a R při řezné rychlosti 150 m/min [15] .....             | 31 |
| Obrázek 6: Opotřebenění břitových destiček tvaru C a R při řezné rychlosti 450 m/min [15] .....             | 31 |
| Obrázek 7: Vliv řezných prostředí na průměrnou drsnost povrchu [16] .....                                   | 33 |
| Obrázek 8: Vliv řezných prostředí na teplotu řezu [16] .....  | 34 |
| Obrázek 9: Vliv řezných prostředí na opotřebenění hřbetu nástroje [16] .....                                | 34 |
| Obrázek 10: Rozložení sil při podélném soustružení [17] .....   | 35 |
| Obrázek 11: Závislost měrné řezné síly $k_c$ na tloušťce odřezávané vrstvy $h_1$ a posuvu $f$ [13] .....    | 36 |
| Obrázek 12: Závislost řezné síly $F_c$ na posuvu $f$ [18] .....   | 38 |
| Obrázek 13: Závislost pasivní síly $F_p$ na posuvu $f$ [18] .....   | 38 |
| Obrázek 14: Závislost posuvové síly $F_f$ na posuvu $f$ [18] .....  | 38 |
| Obrázek 15: Soustruh SU 50/1500 .....   | 41 |
| Obrázek 16: Výňatek z katalogu Dormer Pramet s popisem soustružnického nože [23] .....                      | 43 |
| Obrázek 17: Výňatek z katalogu Kennametal se schématem břitové destičky [24] .....                          | 43 |
| Obrázek 18: Dynamometr Kistler Type 9265B [25] .....  | 44 |
| Obrázek 19: Rozměrové parametry základní jednotky Type 9265B a nástrojového držáku Type 9441B [25] .....    | 45 |
| Obrázek 20: Tachometr HT-3100 [27] .....  | 45 |
| Obrázek 21: Schéma navrženého experimentu .....   | 47 |
| Obrázek 22: Konfigurace zesilovače v prostředí DynoWare .....   | 48 |
| Obrázek 23: Konfigurace sériového portu RS232-C .....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 24: Konfigurace parametrů získávaných dat.....                                       | 49 |
| Obrázek 25: Prostředí grafického záznamu dat.....  | 50 |
| Obrázek 26: Souřadný systém působení jednotlivých složek sil .....                           | 50 |
| Obrázek 27: Měření sil při různých otáčkách .....  | 51 |
| Obrázek 28: Blokované měření působení sil u oceli 12 050 při hloubce $a_p = 1,2$ mm<br>..... | 52 |
| Obrázek 29: Závislost posuvové síly $F_f$ na posuvu $f$ .....                                | 54 |
| Obrázek 30: Velikosti řezných sil materiálu Inconel 713LC při $a_p = 1,2$ mm.....            | 55 |
| Obrázek 31: Závislost pasivní síly $F_p$ na posuvu $f$ .....                                 | 56 |
| Obrázek 32: Velikost řezných sil materiálu ASTM F75 při $a_p = 0,3$ mm .....                 | 56 |
| Obrázek 33: Vliv hloubky řezu $a_p$ na působení sil [28] .....                               | 57 |
| Obrázek 34: Závislost řezné síly $F_c$ na posuvu $f$ .....                                   | 57 |
| Obrázek 35: Velikost řezných sil materiálu ocel 12 050 při $a_p = 1,6$ mm.....               | 58 |
| Obrázek 36: Závislost $F_c = f(a_p)$ materiálu ASTM F75 .....                                | 59 |
| Obrázek 37: Závislost $F_c = f(f)$ materiálu ASTM F75 .....                                  | 59 |
| Obrázek 38: Závislost $k_c = f(f)$ materiálu ASTM F75 .....                                  | 63 |
| Obrázek 39: Závislost $F_c = f(a_p)$ materiálu ocel 12 050.....                              | 65 |
| Obrázek 40: Závislost $F_c = f(f)$ materiálu 12 050.....                                     | 65 |
| Obrázek 41: Závislost $k_c = f(f)$ materiálu ocel 12 050 .....                               | 68 |
| Obrázek 42: Závislost $F_c = f(a_p)$ materiálu Inconel 713LC .....                           | 69 |
| Obrázek 43: Závislost $F_c = f(f)$ materiálu Inconel 713LC.....                              | 70 |
| Obrázek 44: Závislost $k_c = f(f)$ materiálu Inconel 713LC.....                              | 72 |