

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv geometrie nástroje na silové zatížení při obrábění slitiny Nimonic 80A

Autor: **Bc. Josef NAROVEC**  
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

# OFICIÁLNÍ ZADÁNÍ

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Autorská práva**

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při řešení experimentální části, za cenné připomínky a podněty poskytnuté během vypracovávání zvoleného tématu.

Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu SGS-2010-083.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení NAROVEC	Jméno Josef	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie-technologie obrábění		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. ZETEK, Ph.D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv geometrie nástroje na silové zatížení při obrábění slitiny Nimonic 80A		

<b>FAKULTA</b>	Strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	64	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	64	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Tato diplomová práce měla za úkol zjistit, jaký je vliv geometrie nástroje na silové zatížení při obrábění slitiny Nimonic 80A. Byly testovány nástroje od 4 výrobců. Cílem bylo zjistit, jaká geometrie nástroje se nejlépe hodí pro obrábění Nimonicu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Nimonic 80A, řezná síla, geometrie nástroje

## SUMMARY OF DIPLOMA WORK

<b>AUTHOR</b>	Surname NAROVEC	Name Josef	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Department of Machining Technology		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. ZETEK, Ph.D.	Name Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Influence of the cutting tool geometry on power stress when machining superalloy 80A		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	64	<b>TEXT PART</b>	64	<b>GRAPHICAL PART</b>	-
<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	This diploma work was tasked to find out what influence of the cutting tool geometry on power stress when machining superalloy 80A is. Were tested tools from 4 producers. The objective was to find out, what geometry is best suited for machining Nimonic.				
<b>KEY WORDS</b>	Nimonic 80A, cutting force, cutting tool geometry				

## Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>7</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Rozbor současného stavu</b> .....	<b>11</b>
1.1. Nimonic 80A [1,2] .....	11
1.1.1. Niklové superslitiny [1,2,4] .....	11
1.1.2. Obrobitelnost niklových slitin [1,2] .....	12
1.1.3. Charakteristika Nimonicu 80A [1,2,4] .....	13
1.1.4. Použití Nimonicu 80A [2,3,4] .....	15
1.2. Nástrojové úhly a jejich vliv na velikost řezných sil [6] .....	16
<b>2. Návrh a provedení vlastních experimentů</b> .....	<b>17</b>
2.1. Strojní vybavení a pomůcky .....	17
2.1.1. Vertikální obráběcí centrum MCV 750A .....	17
2.1.2. Rotační dynamometr Kistler .....	18
2.1.3. Mikroskop .....	18
2.1.4. Tvrdoměr .....	19
2.1.5. InfiniteFocus .....	19
2.1.6. Labview .....	20
2.1.7. Obráběný materiál .....	20
2.1.8. Testované nástroje .....	21
2.2. Volba řezných podmínek .....	22
2.3. Postup měření .....	23
<b>3. Analýza získaných výsledků</b> .....	<b>25</b>
3.1. Materiál po odlití – samostatné nástroje .....	25
3.1.1. Nástroje B .....	26
3.1.2. Nástroje C .....	27
3.1.3. Nástroje D .....	29
3.2. Materiál protvářený – samostatné nástroje .....	31
3.2.1. Nástroje A .....	31
3.2.2. Nástroje B .....	33
3.2.3. Nástroje C .....	34
3.3. Materiál po odlití – porovnání .....	36

3.3.1.	Úhel hřbetu na obvodě.....	37
3.3.2.	Poloměr zaoblení řezné hrany.....	40
3.3.3.	Úhel čela .....	41
3.4.	Materiál protvářený – porovnání .....	43
3.4.1.	Úhel hřbetu na obvodě.....	43
3.4.2.	Poloměr zaoblení řezné hrany.....	46
3.4.3.	Úhel čela .....	47
3.5.	Sumární grafy – materiál po odlití .....	49
3.5.1.	Složka řezné síly $F_x$ .....	49
3.5.2.	Složka řezné síly $F_y$ .....	50
3.6.	Sumární grafy – materiál protvářený.....	51
3.6.1.	Složka řezné síly $F_x$ .....	51
3.6.2.	Složka řezné síly $F_y$ .....	52
3.7.	Hodnocení tvrdosti .....	53
3.7.1.	Materiál po odlití .....	53
3.7.2.	Materiál protvářený .....	54
<b>4.</b>	<b>Technicko-ekonomické hodnocení .....</b>	<b>55</b>
4.1.	Shrnutí výsledků.....	57
<b>5.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>64</b>



## Seznam použitých zkratk a symbolů

SK	-	slinutý karbid	
VBD	-	vyměnitelná břitová destička	
$\alpha$	-	úhel hřbetu	[°]
$\beta$	-	úhel břitu	[°]
$\gamma$	-	úhel čela	[°]
$R_m$	-	mez pevnosti	[MPa]
$V_C$	-	řezná rychlost	[m/min]
$f_z$	-	posuv na zub	[mm/zub]
$a_p$	-	hloubka řezu	[mm]
$a_e$	-	šířka řezu	[mm]
$F_x$	-	řezná síla ve směru X	[N]
$F_y$	-	řezná síla ve směru Y	[N]
obr.	-	obrázek	
apod.	-	a podobně	

## Úvod

Slitina Nimonic 80A patří do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. Tyto materiály představují i v dnešní pokročilé době velkou výzvu pro obrábění. Díky jejich struktuře a chemickému složení je obrábění velmi obtížné. Mezi jejich hlavní vlastnosti patří nízká tepelná vodivost, která má za následek vznik vysokých teplot v místě řezu a tudíž vznik nárůstku na řezné hraně. Další nevýhodou je zpevňování za studena. Toto lze částečně eliminovat volbou vyšší řezné rychlosti, která ale způsobuje rychlé opotřebení nástroje.

Náplní diplomové práce je zjistit, jak velký vliv má geometrie nástroje na řezné síly při obrábění slitiny Nimonic 80A. Jako obráběcí metoda bylo zvoleno čelní frézování dvoubřítými monolitními nástroji ze slinutých karbidů. K dispozici pro testování jsou čtyři typy nástrojů. Každý byl volen s rozdílnou geometrií řezné části.

V závěru se práce zabývá vyhodnocením nejlepší geometrie pro obrábění Nimonicu, dalšími vlivy na řezné síly a také doporučeními pro další testování.

## 1. Rozbor současného stavu

### 1.1. Nimonic 80A [1,2]

Slitina Nimonic 80A se řadí do kategorie superslitin. S tímto pojmem se poprvé setkáváme krátce po 2. světové válce a jsou tak označovány materiály vhodné pro použití za zvýšených teplot. Za zvýšené jsou v tomto případě považovány teploty nad 650°C, což je mezní teplota pro využití žárovevých ocelí. Charakteristickými vlastnostmi superslitin jsou odolnost proti oxidaci, výborné creepové vlastnosti a odolnost proti oxidaci za zvýšených teplot. Z hlediska chemického složení se jedná o komplexně legované slitiny na bázi železa, kobaltu nebo niklu.

Mezi hlavní legující prvky patří především Cr, Mo, W, Ti, Ta, Al. Společným znakem všech těchto materiálů je kubická plošně centrovaná krystalová struktura („austenitická“).

#### 1.1.1. Niklové superslitiny [1,2,4]

Zvýšení pevnostních vlastností superslitin na bázi niklu je dosaženo třemi základními zpevňujícími efekty a jejich vzájemnou kombinací.

- **Karbidické zpevnění** – precipitace karbidů na hranicích zrn.
- **Substituční zpevnění tuhého roztoku** – základní matrice je zpevněna prvky Cr, W, Mo, Ta, Co a Fe.
- **Precipitační vytvrzení matrice** – superslitina je legována Al, Ti, Nb.

Tyto slitiny se rozdělují podle použití na žáruvzdorné a žárovevné. Z pohledu technologie výroby je pak rozdělujeme na superslitiny odlévané a tvářené.

WASPALOY										
prvek	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C
obsah [%]	19,5	57	13,5	4,3	-	-	3	1,4	2	0,07
NIMONIC 80A										
prvek	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C
obsah [%]	19,5	73	1	-	-	-	2,25	1,4	1,5	0,05
INCONEL 713LC										
prvek	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C
obsah [%]	12	75	-	4,5	-	4	0,6	6	-	0,05

Tab.1 Typy niklových slitin

### 1.1.2. Obrobitelnost niklových slitin [1,2]

#### ➤ Opotřebení nástroje

Při obrábění niklových slitin dochází k největšímu opotřebení na hřbetě vyměnitelné břitové destičky. Dále také dochází k opotřebení ve tvaru žlábků na čele destičky. Řezná rychlost a posuv mají na opotřebení větší vliv než hloubka řezu. Na velikost opotřebení ve tvaru žlábků na čele destičky má největší vliv obsah nitridů křemíku v obráběném materiálu.

Na kvalitu obrobeného povrchu má největší vliv řezná rychlost. Opotřebení špičky nástroje a posuv už takový vliv nemají.

#### ➤ Obrábění a procesní kapaliny

Pro zlepšení obrábění niklových slitin se používají různé druhy maziv a chladicích kapalin. Také lze použít chlazení pouze vzduchem. Velmi často se používají sirné minerální oleje. Síra totiž zlepšuje kluzné vlastnosti a také se podílí na lepším tvarování třísky.

Pokud se vlivem obrábění zahřeje obrobek a olej na vysokou teplotu, může docházet ke vzniku hnědých skvrn na obrobku. Ty lze pak odstranit speciálními čisticími prostředky. Síra při obrábění způsobuje křehnutí obrobku. Proto se nemohou používat sirné minerální oleje při obrábění nástrojem z SK.

Pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi se používají chladicí kapaliny na bázi vody (různé emulze a speciální chemické sloučeniny). Tyto kapaliny mají lepší chladicí efekt než sirné minerální oleje.

Pro obrábění nižšími řeznými rychlostmi jsou vhodná maziva s vysokou hustotou. Při vrtání a řezání závitů malých průměrů, kde je omezený prostor na odvod třísky pomocí maziva, se používají speciální roztoky, které odvod třísky usnadňují. Další možností je chlazení pomocí sprejové mlhy. Tohoto typu chlazení se využívá při jednoduchých soustružnických operacích.

#### ➤ Zpevňování za studena

Typickou vlastností, kterou se vyznačují niklové slitiny je zpevňování za studena a také nízká tepelná vodivost. Z tohoto důvodu odchází téměř veškeré teplo do nástroje.

Jednou z možností, jak omezit zpevnění materiálu během obrábění, je zpevňování materiálu už při nízkoteplotním zpracování.

Další možností omezení zpevnění materiálu za studena je použití nástroje s výrazně kladným úhlem nastavení hlavního ostří. Tímto dosáhneme plynulého procesu tvorby třísky a omezení kolísání řezných sil.

#### ➤ **Niklové slitiny a geometrie nástroje**

U nikových slitin je nutné zajistit, aby k odebrání materiálu docházelo odřezáváním a ne odtlačováním. Toho dosáhneme kladným úhlem nastavení hlavního ostří, který nám zajistí i dobrý odvod třísek z místa řezu.

Při příliš malém úhlu nastavení hlavního ostří by docházelo ke tření třísky s obrobkem již při mírném opotřebením nástroje. Tento jev by způsoboval nežádoucí efekty, jako například zpevňování materiálu za studena, špatnou kvalitu povrchu a vznik nárůstu.

Naopak při příliš velkém úhlu nastavení hlavního ostří by enormně narůstaly řezné síly a docházelo by ke zničení nástroje ještě před jeho opotřebením.

Důležitým faktorem, který má význam při obrábění niklových slitin je velikost zaoblení špičky nástroje. Při správné volbě napomáhá rozptylovat teplo, které při obrábění vzniká a také zlepšit kvalitu obrobené plochy. Z různých experimentů je patrné, že čím větší je hloubka řezu, tím větší by měl být rádius špičky nástroje. Příliš velký rádius na druhou stranu může způsobit vibrace nástroje, které napomáhají zpevňování povrchu.

### **1.1.3. Charakteristika Nimonicu 80A [1,2,4]**

#### ➤ **Vznik slitiny Nimonic 80A**

Dříve se pro vysokoteplotní aplikace používali hlavně chromniklové austenitické oceli. Postupně se jejich mechanické vlastnosti staly pro tyto aplikace nedostatečnými. Počátkem 2. světové války se ve Velké Británii objevila první niklová slitina s označením Nimonic 80A, která byla precipitačně zpevněna fází  $\gamma'$  (uspořádaný tuhý roztok, krystalizující v FCC mřížce).

Nimonic 80A je chrom-niklová slitina s přídavkem titanu a hliníku. Je tvářena a zušlechtěna, vytvrzena přidáním titanu, hliníku a uhlíku a je vyvinuta do provozní teploty

815°C. Je vytvořena vysoko frekvenčním tavením, odléváním do forem a vytvrzena na vzduchu.

### ➤ Chemické složení slitiny NIMONIC 80A

V tabulce jsou uvedeny procentuální hodnoty prvků, které slitina NIMONIC 80A obsahuje. Je uvedené vždy minimální a maximální množství prvku ve slitině. V tomto rozmezí se pak pohybují výrobci slitiny a do jisté míry tak mohou ovlivnit její vlastnosti i cenu.

NIMONIC 80A							
Prvek	Ni	Cr	Ti	Al	C	Si	B
Max. obsah [%]	-	21	2,7	1,8	0,1	1	0,008
Min. obsah [%]	65	18	1,8	1	-	-	
Prvek	Fe	Mn	Co	Cu	P	S	Zr
Max. obsah [%]	1,5	1	1	0,2	0,02	0,015	0,15
Min. obsah [%]	-	-	-	-	-	-	

Tab.2 Složení slitiny Nimonic 80A

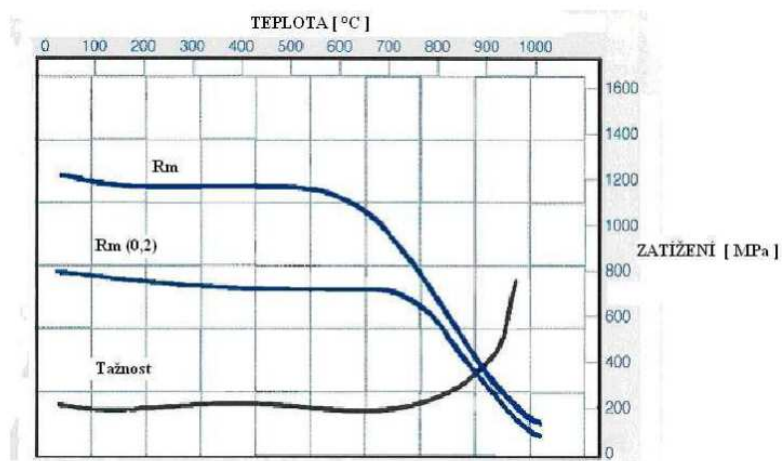
### ➤ Mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny NIMONIC 80A

Mez pevnosti: 595°C ..... 650MPa  
 650°C ..... 500MPa  
 705°C ..... 350MPa  
 760°C ..... 220MPa  
 815°C ..... 110MPa

Hustota: ..... 8,19 Mg/m<sup>3</sup>

Teplota tání: ..... 1320 – 1365°C

Tepelná vodivost: ..... 11,2 W/m\*°C



Obr. 1 Závislost zatížení na teplotě

#### 1.1.4. Použití Nimonicu 80A [2,3,4]

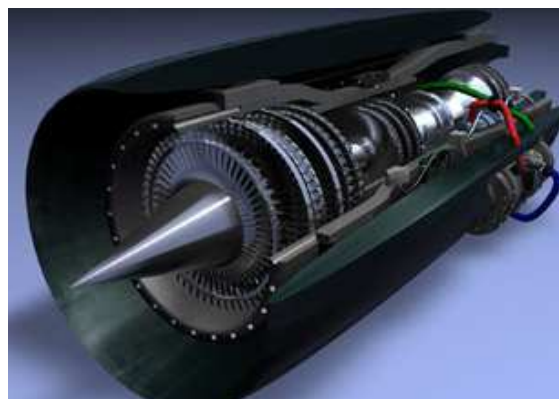
Nimonic 80A je slitina s vysokou pevností a korozní odolností i za vysokých teplot. Z tohoto důvodu se nejčastěji používá pro vysoce silově a tepelně namáhané součásti v automobilovém, leteckém a energetickém průmyslu.

V automobilovém průmyslu nachází součástky z Nimonicu uplatnění kvůli požadavkům na snížení znečišťování ovzduší. Vyrábí se z nich například zapalovací jednotky, výfukové systémy, ventily apod.



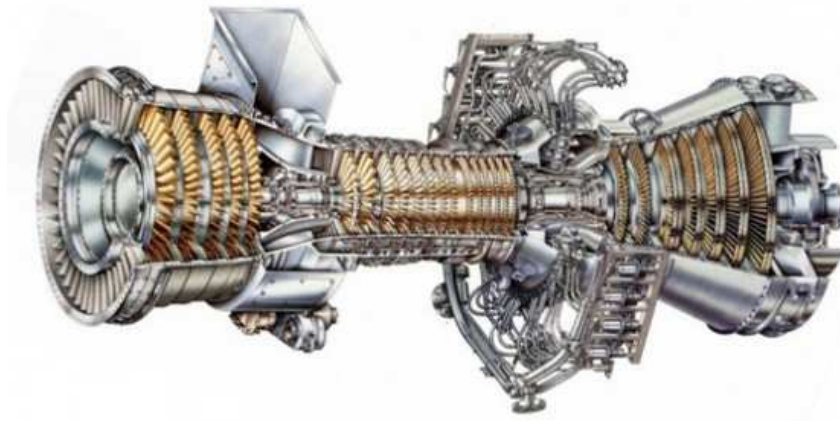
Obr. 2 Součástky výfukového potrubí

Výrobu proudových motorů umožnily právě slitiny typu Nimonic. V dnešní době je jejich použití velmi rozsáhlé. Součástky z Nimonicu se používají pro civilní i vojenská letadla a setkáme se s nimi i v kosmických programech. Letecké motory General Electrics tvoří špičku ve svém oboru díky vyšší efektivitě a čistotě, jednodušší konstrukci i montáži a demontáži. Toho dosahují nejen modifikovanou konstrukcí lopatek, ale také zvýšením teploty ve spalovacím prostoru. Z tohoto důvodu je nutné využívat součástky z niklových slitin, protože v dnešní době pouze tyto splňují tak vysoké nároky na tepelnou a mechanickou odolnost.



Obr. 3 Proudový motor

V průmyslu energetickém se setkáváme se součástkami z Nimonicu velmi často právě díky jejich korozní odolnosti a pevnosti za vysokých teplot. Součástky z Nimonicu se pak stávají součástmi plynových turbín, přehříváků páry atd.



Obr. 4 Parní turbína

## 1.2. Nástrojové úhly a jejich vliv na velikost řezných sil [6]

Nástrojové úhly mají veliký vliv na velikost řezných sil. V této kapitole je popsáno, jak jednotlivé úhly ovlivňují řezné síly. Toto bude pak porovnáno s praktickými experimenty.

- **Nástrojový úhel hřbetu  $\alpha$** 
  - Ovlivňuje podmínky tření na hřbetě nástroje a tuhost břitu
  - menší  $\alpha \Rightarrow$  větší  $\beta \Rightarrow$  vyšší tuhost
  - Hodnoty  $\alpha$  se běžně pohybují v rozsahu  $8^\circ \div 12^\circ$
  - Větší hodnoty  $\alpha$  jsou doporučovány pro pevnější obráběné materiály, malou tloušťku třísky, nízké posuvy a vyšší řezné rychlosti.
  - Extremně vysoké hodnoty  $\alpha$  jsou určeny pro obrábění slitin hliníku.
- **Nástrojový úhel čela  $\gamma$** 
  - Ovlivňuje mechanismus tvorby třísky a její odchod z místa řezu
  - Ovlivňuje řezné síly (menší  $\gamma \Rightarrow$  intenzivnější pěchování třísky  $\Rightarrow$  zvětšení  $F$ )
  - Ovlivňuje tuhost břitu (menší  $\gamma \Rightarrow$  větší  $\beta \Rightarrow$  vyšší tuhost)
  - Hodnoty  $\gamma$  se běžně pohybují v rozsahu  $-8^\circ \div +8^\circ$
  - Pro materiály s pevností v tahu  $R_m \leq 850$  MPa se volí  $\gamma \geq 0^\circ$ , pro materiály  $R_m > 850$  MPa se volí  $\gamma < 0^\circ$



## 2. Návrh a provedení vlastních experimentů

Cílem této diplomové práce je analyzovat vliv geometrie nástroje na silové zatížení při obrábění slitiny Nimonic 80A.

Aby bylo možné porovnat řezné síly při obrábění různými typy nástrojů, je nutné všechny nástroje otestovat. Testování spočívá ve frézování materiálu, při kterém jsou zaznamenávány řezné síly pomocí rotačního dynamometru.

Testované nástroje jsou dvoubřité monolitní frézy ze slinutého karbidu o průměru 8 mm. K dispozici jsou tři typy, každý od jiného výrobce. Liší se od sebe geometrií, která byla změřena na přístroji InfiniteFocus od firmy Alicona. Nástroje jsou navrženy pro obrábění niklových slitin a jsou k nim stanoveny jednotlivými výrobcí řezné podmínky. Tyto se od sebe lišily jen velmi málo, a proto byly zvoleny následovně – řezná rychlost 46 m/min, posuv 0,085 mm/zub, axiální hloubka řezu 2 mm a radiální šířka řezu 0,5 mm. Řezné podmínky byly po celou dobu testování konstantní.

### 2.1. Strojní vybavení a pomůcky

#### 2.1.1. Vertikální obráběcí centrum MCV 750A

Testování probíhalo v halových laboratořích KTO na obráběcím centru MCV 750A. Výrobce vertikálního obráběcího centra MCV 750A je KOVOSVIT, a.s., Sezimovo Ústí. Vyznačuje se především zvýšenou dynamikou a stabilitou řezného procesu, vysokými otáčkami vřetena, dokonalým odvodem třísek z pracovního prostoru, vysokou spolehlivostí a produktivitou.



Obr. 5 Obráběcí centrum MCV 750A

Obráběcí centrum MCV 750A je určeno pro náročné práce v kusové i sériové výrobě. Provádí operace vrtání, vystružování, frézování a řezání závitů.

### 2.1.2. Rotační dynamometr Kistler

Řezné síly při obrábění byly zaznamenávány pomocí rotačního dynamometru od firmy Kistler.



Obr. 6 Rotační dynamometr Kistler

### 2.1.3. Mikroskop

Pro sledování opotřebení se používal dílenský mikroskop firmy Güehring Machinebau GMBH se zvětšením 5x-75x. Samotné měření opotřebení je založené na převedení digitalizovaného snímku frézy na monitor počítače a odměření na monitoru. Přenesení snímku na monitor se realizovalo pomocí CCD kamery a softwaru umožňujícího přenos v reálném čase.



Obr. 7 Dílenský mikroskop

#### 2.1.4. Tvrdoměr

K měření tvrdosti povrchu byl použit tvrdoměr Wilson Wolpert.



Obr. 8 Tvrdoměr

#### 2.1.5. InfiniteFocus

Na změření zaoblení řezné hrany byl použit přístroj InfiniteFocus od firmy Alicona.



Obr. 9 Optický přístroj InfiniteFocus

InfiniteFocus je optický přístroj pro 3D měření povrchu. Kombinuje malou hloubku ostrosti optického systému s vertikálním skenováním topografické a barevné informace přes změnu zaostření. Nové a jedinečné algoritmy měří tyto data v jednotlivých 3D datových

sítích s přesnou topografickou informací. Vysledované kalibrační standardy dovolují ověření výsledku měření. Vertikální rozlišení do 10 nm. Přístroj může být nasazený v laboratorním i výrobním prostředí.

### 2.1.6. Labview

K zaznamenávání a vyhodnocování řezných sil byl použit software Labview 8.2 od firmy National Instruments.

### 2.1.7. Obráběný materiál

Obráběný materiál v první fázi testování byl NIMONIC 80A po odlití v základním stavu, tedy bez dalšího tepelného a mechanického zpracování. Ve druhé fázi byl tento materiál protvářen (překován).



Obr. 11 Surový ingot Nimonic 80A



Obr. 10 Materiál po odlití



Obr. 12 Materiál protvářený

### 2.1.8. Testované nástroje

Frézy od čtyř různých výrobců, průměr 8 mm, 2 břity. Každý výrobce je označen jedním písmenem (A,B,C,D) a každý nástroj od jednotlivých výrobců číslem (1,2,3,4).

Nástroje byly monolitní frézy ze slinutého karbidu opatřeny v řezné části speciální tenkou vrstvou.



Obr. 13 Nástroje A



Obr. 14 Nástroje B



Obr. 15 Nástroje C



Obr. 16 Nástroje D

## 2.2. Volba řezných podmínek

Testované nástroje byly určeny pro obrábění niklových superslitin. Každý nástroj měl od výrobce doporučené řezné podmínky. Zvolené řezné podmínky odpovídají podmínkám doporučeným. Ty byly po celou dobu obrábění konstantní.

řezná rychlost:  $v_c = 46 \text{ m/min}$

posuv na zub:  $f_z = 0,085 \text{ mm/zub}$

axiální hloubka řezu:  $a_p = 2 \text{ mm}$

radiální šířka řezu:  $a_e = 0,5 \text{ mm}$

řezné prostředí: procesní kapalina CimTECH501, koncentrace 6,2%

### 2.3. Postup měření

Experimenty probíhaly v halových laboratořích KTO na obráběcím centru MCV ve dvou fázích. Nejprve byl materiál obráběn ve stavu po odlití, poté ve stavu protvářeném (kovaném).

Materiál byl v obou případech testování upnut do pneumatického svěráku, který byl připevněn na stůl obráběcího centra pomocí upínek. Bohužel nebylo možné použít vnitřní chlazení a tak bylo nutné použít trysky okolo vřetena a také přídatnou pistoli, která napomáhala odvodu třísek z místa řezu.



Obr. 17 Pracovní prostor pro první fázi testování



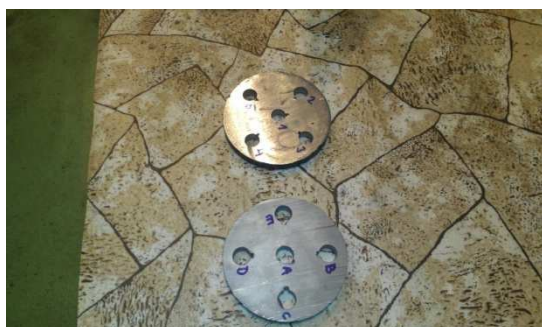
Obr. 18 Pracovní prostor pro druhou fázi testování

Materiál po odlití měl průměr 164 mm. Délka frézovaného válce byla 85 mm.



Obr. 19 Materiál po odlití

Pro druhé testování byl materiál nejprve překován na válec o průměru 100 mm a z tohoto válce byly odříznuty dva vzorky tloušťky 10 mm. Z těchto vzorků bylo dále odebráno celkem 10 vzorků o průměru 10 mm. Na nich byl proveden metalografický výbrus a zkouška makrotvrdosti. Poté byl materiál obroben do tvaru čtverce o velikosti 70 x 70 mm a délky 300 mm.



Obr. 20 Vzorky z protvářeného materiálu



Obr. 21 Protvářený materiál

Podmínky testování byly pro oba typy materiálů stejné. Pro první testování byly k dispozici nástroje od výrobců B, C a D, pro druhé testování byly dodány nástroje od výrobců A, B a C. Výrobce nástrojů D nebyl schopen dodat nástroje včas a tak byly chybějící nástroje nahrazeny nástroji od výrobce A.

Obrábění bylo prováděno tak dlouho, dokud u nástroje nedošlo k limitnímu opotřebení břitu, které bylo stanoveno na 150  $\mu\text{m}$ .



### 3. Analýza získaných výsledků

Tato část diplomové práce je zaměřena především na analýzu grafů velikostí řezných sil. Grafy byly vytvořeny z naměřených hodnot, které byly změřeny pomocí rotačního dynamometru. Nejprve je ukázán průběh řezných sil jednotlivých nástrojů, poté porovnávání geometrie jednotlivých nástrojů a jejího vlivu na velikost řezných sil. V závěru je uvedeno srovnání trvanlivosti jednotlivých nástrojů.

Značení složek řezných sil přímo koresponduje s označením složek řezných sil na dynamometru.

Nástroje byly pokaždé upnuty tak, že zuby směřovali do směru  $F_x$ . Upnutí nebylo pokaždé úplně přesně stejné, ale rozdíly byly velmi malé a na měření neměli velký vliv.



Obr. 22 Řezné síly na dynamometru

#### 3.1. Materiál po odlití – samostatné nástroje

V hutích, kde byl materiál odlit, byl proveden chemický rozbor dvou válcových odlitků o průměru 170 mm.

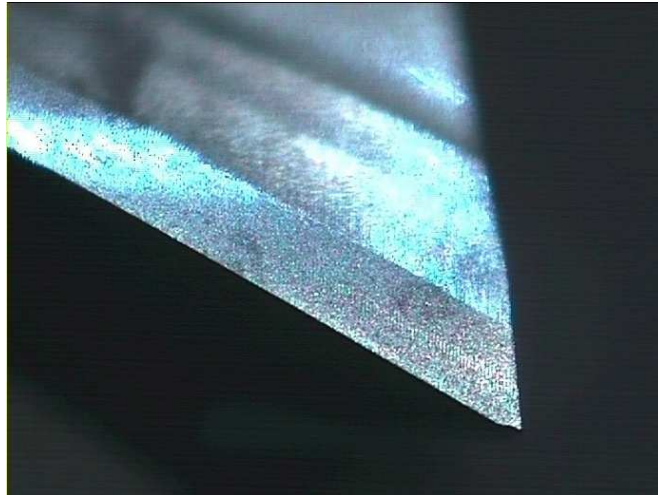
Prvek	Ni	Cr	Ti	Al	Fe	Mn	Si	Cu	Co	C
A2	Zbytek	19,28	2,17	1,13	1,75	0,81	0,66	0,014	-	0,06
B2	Zbytek	19,12	2,32	0,95	2,00	0,88	0,70	0,019	-	0,04
Norma	Zbytek	18 21	1,8 2,7	1,0 1,8	max.3,0	max.1,0	max.1,0	max.0,2	max.2,0	max.0,1

Tab.3 Složení slitiny Nimonic 80A po odlití

Výsledky ukázaly, že oba odlitky byly dobře nalegovány a odpovídají normě pro tuto slitinu.

### 3.1.1. Nástroje B

Nástroje B mají délku 60 mm a délku řezné části 16 mm. Průměr je stejný jako u ostatních nástrojů a to 8 mm.



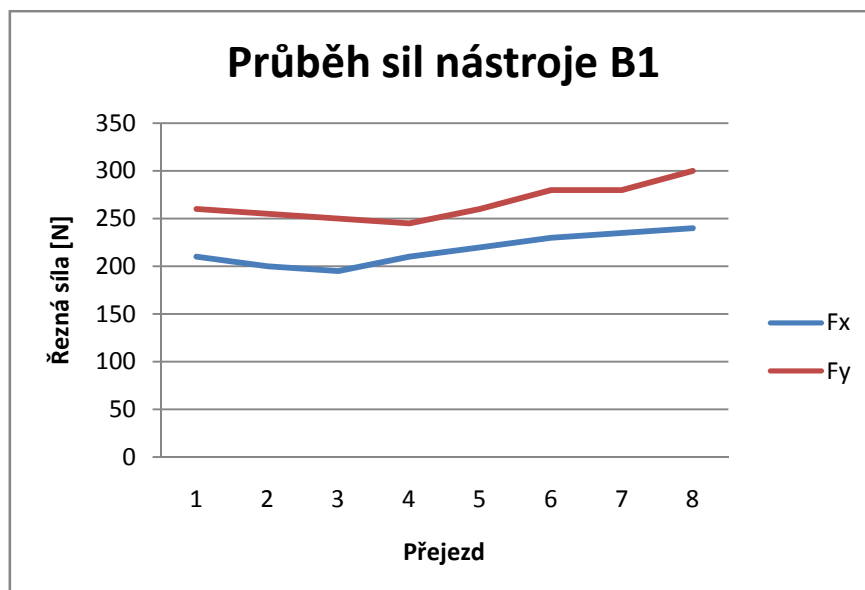
Obr. 23 Břit nástroje B

#### Geometrie nástroje B

Úhel čela v drážce	8 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	14 [°]
Poloměr zaoblení břitu	1,85 [μm]

Tab.4 Geometrie nástroje B

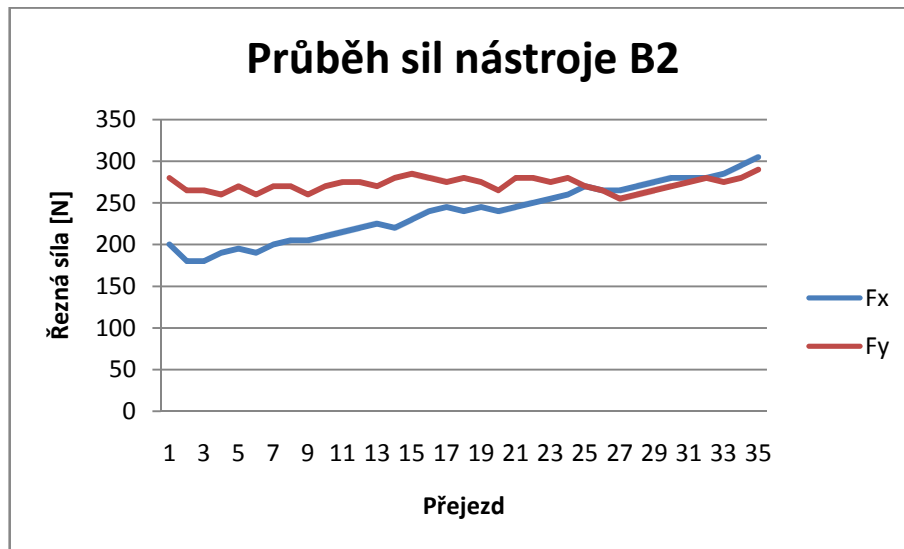
- Nástroj B1



Graf 1 Průběh sil nástroje B1

Při obrábění tímto nástrojem bylo provedeno jen 8 přejezdů, což odpovídá času 4,56 minuty. Došlo totiž k vylomení břitu nástroje. Analýza tohoto grafu nemá význam.

- **Nástroj B2**

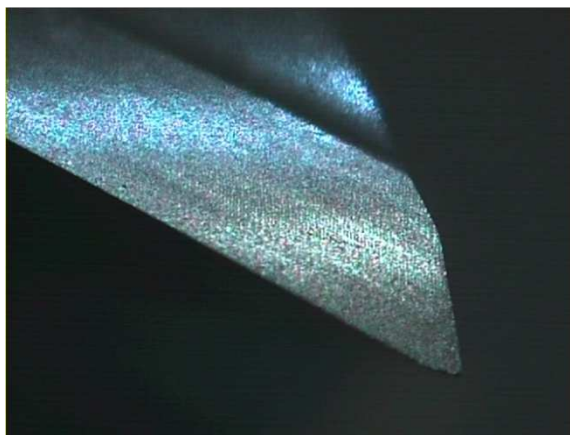


Graf 2 Průběh sil nástroje B2

Tento nástroj vydržel do limitního opotřebení 35 přejezdů. To odpovídá času 20,56 minuty. Velikost sil má stoupající tendenci, což je způsobeno postupným otupováním břitu. Při 24 přejezdu začala síla  $F_y$  chvíli klesat. To může být způsobeno uvolněním nárůstku, který v tu chvíli přestal nástroj odtlačovat od materiálu.

### 3.1.2. Nástroje C

Nástroje C mají délku 63 mm a délku řezné části 16 mm. Průměr je stejný jako u ostatních nástrojů a to 8 mm.



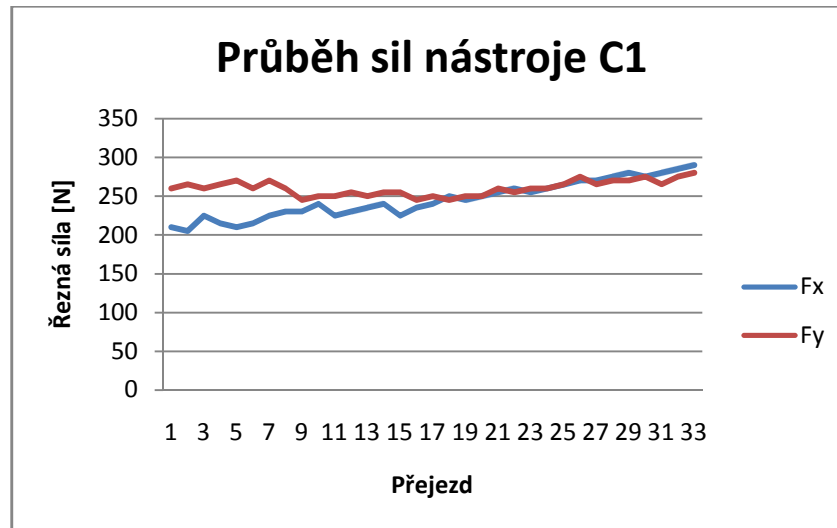
Obr. 24 Břit nástroje C

**Geometrie nástroje C**

Úhel čela v drážce	11,5 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	9,5 [°]
Poloměr zaoblení břitu	2,05 [ $\mu\text{m}$ ]

Tab.5 Geometrie nástroje C

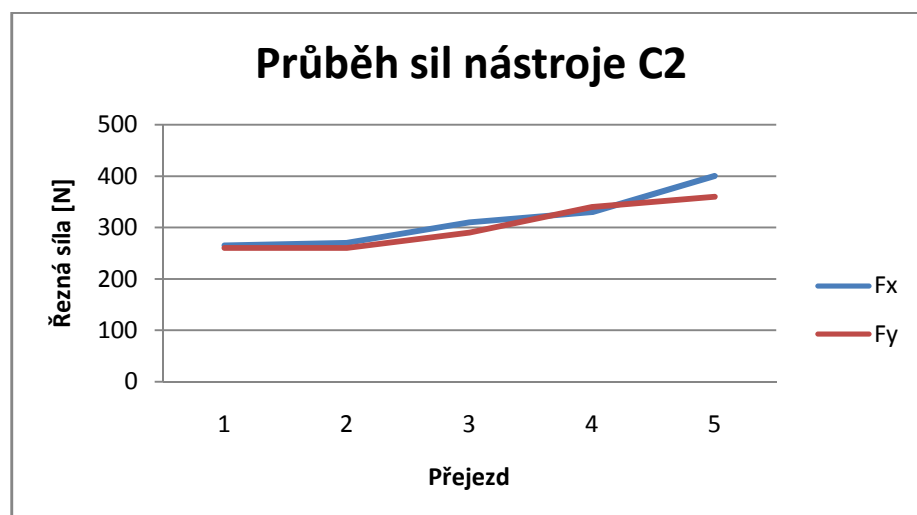
- **Nástroj C1**



Graf 3 Průběh sil nástroje C1

Nástroj C1 vydržel do limitního opotřebení 15,78 minuty, což odpovídá 33 přejezdům. Síly mají stoupající tendenci a nejsou viditelné výrazné výkyvy.

- **Nástroj C2**

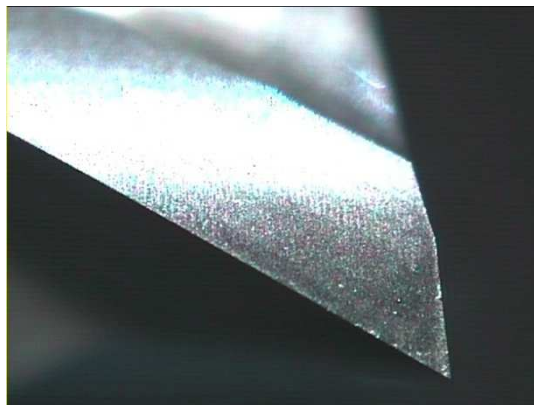


Graf 4 Průběh sil nástroje C2

Břit nástroje C2 se vylomil velmi brzy, a tudíž analýza průběhu sil ztrácí význam.

### 3.1.3. Nástroje D

Nástroje D mají délku 60 mm a délku řezné části 19 mm. Průměr je stejný jako u ostatních nástrojů a to 8 mm.



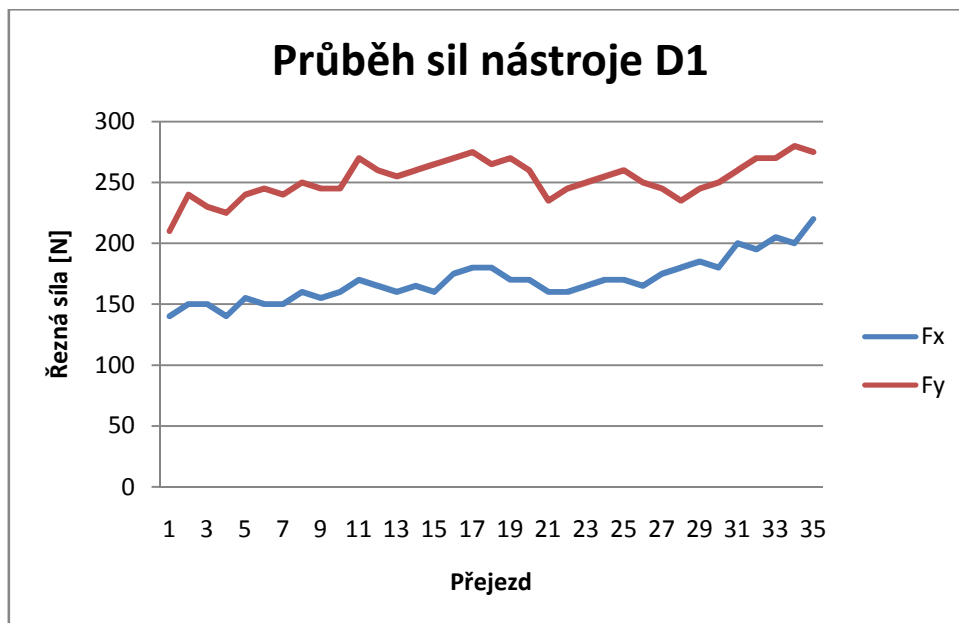
Obr. 25 Břit nástroje D

#### Geometrie nástroje D

Úhel čela v drážce	7 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	9,5 [°]
Poloměr zaoblění břitu	3,50 [μm]

Tab.6 Geometrie nástroje D

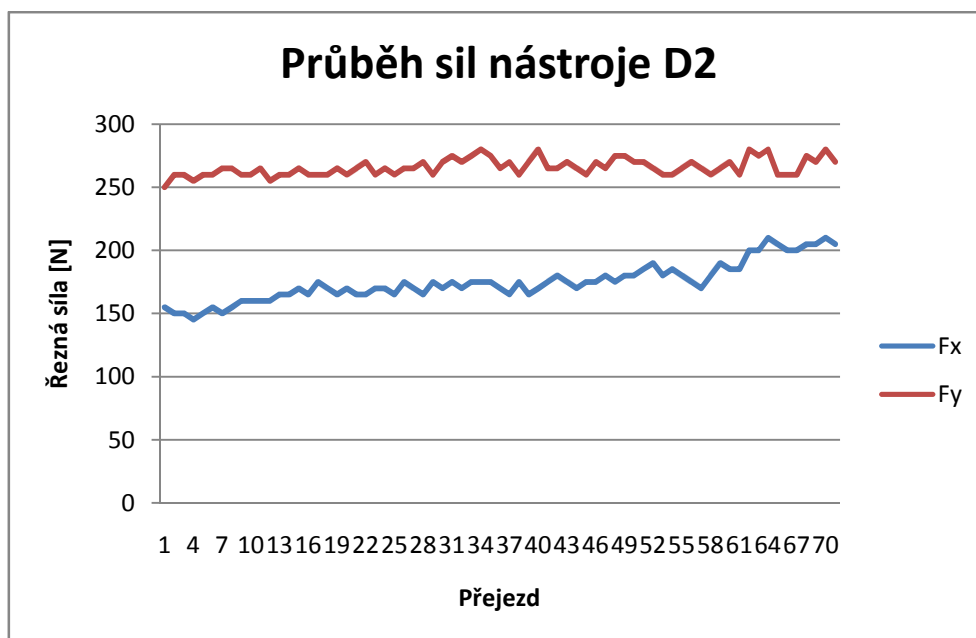
- Nástroj D1



Graf 5 Průběh sil nástroje D1

U nástroje D1 registrujeme 35 přejezdů a trvanlivost 18,24 minuty se stoupající tendencí sil. Výraznějších výkyvů dosahuje síla  $F_y$ . To je pravděpodobně způsobeno uvolňováním a opětovným tvořením nárůstku na břitu nástroje.

- **Nástroj D2**



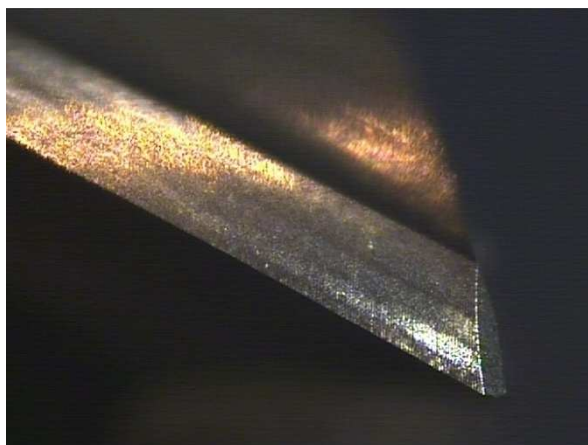
Graf 6 Průběh sil nástroje D2

Nástroj D2 vydržel ze všech nástrojů nejdelší dobu. A to 70 přejezdů, tedy 42,10 minuty. Tendence sil je opět stoupající a větší výkyv nastal pouze u přejezdu 62 a to u síly  $F_y$ . Tato velká výdrž nástroje je způsobena frézováním části materiálu, která pravděpodobně neobsahovala vměstky a podobné útvary v materiálu, které napomáhají vylamování břitu a rychlejšímu otupování.

### 3.2. Materiál protvářený – samostatné nástroje

Protvářený materiál vzniknul překováním původního válce o průměru 164 mm na válec o průměru 100 mm.

#### 3.2.1. Nástroje A



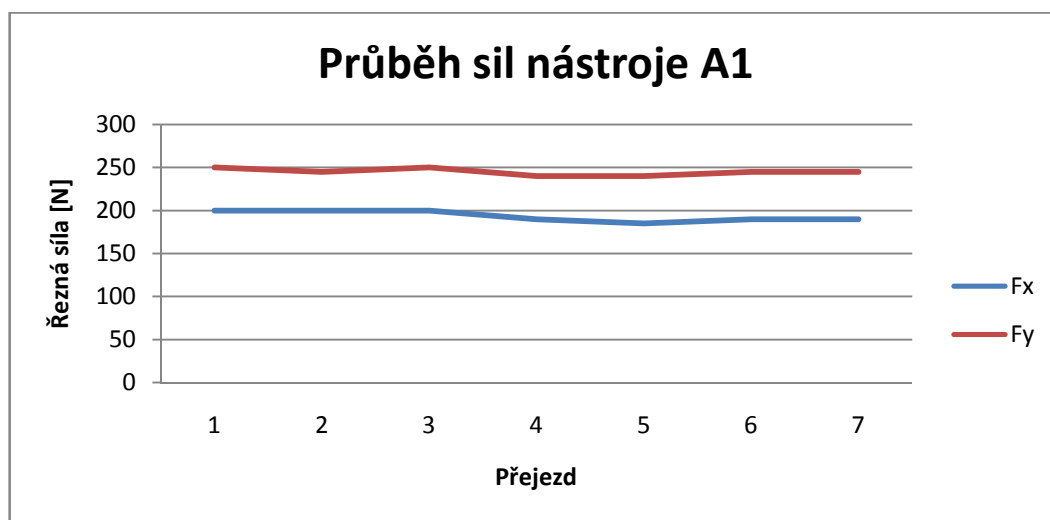
Obr. 26 Břit nástroje A

#### Geometrie nástroje A

Úhel čela v drážce	10,5 [°]
Úhel hřbetu na obvodě	10,5 [°]
Poloměr zaoblění břitu	4,85 [ μm ]

Tab.7 Geometrie nástroje A

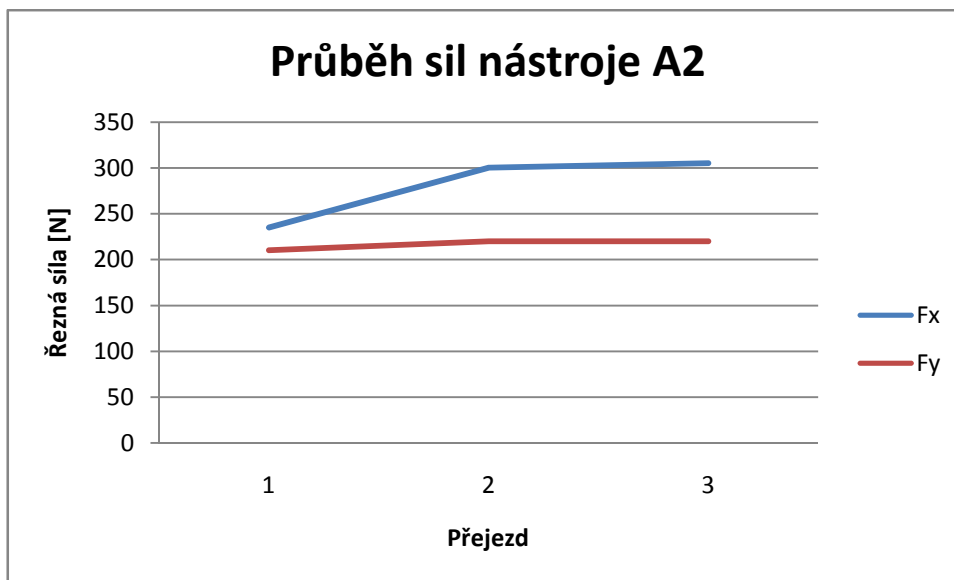
- Nástroj A1



Graf 7 Průběh sil nástroje A1

Při obrábění nástrojem A1 byly řezné síly pořád konstantní. Testování skončilo při opotřebení 50  $\mu\text{m}$ , což bylo požadavkem výrobce. Tohoto opotřebení bylo dosaženo po čase 5,53 minuty.

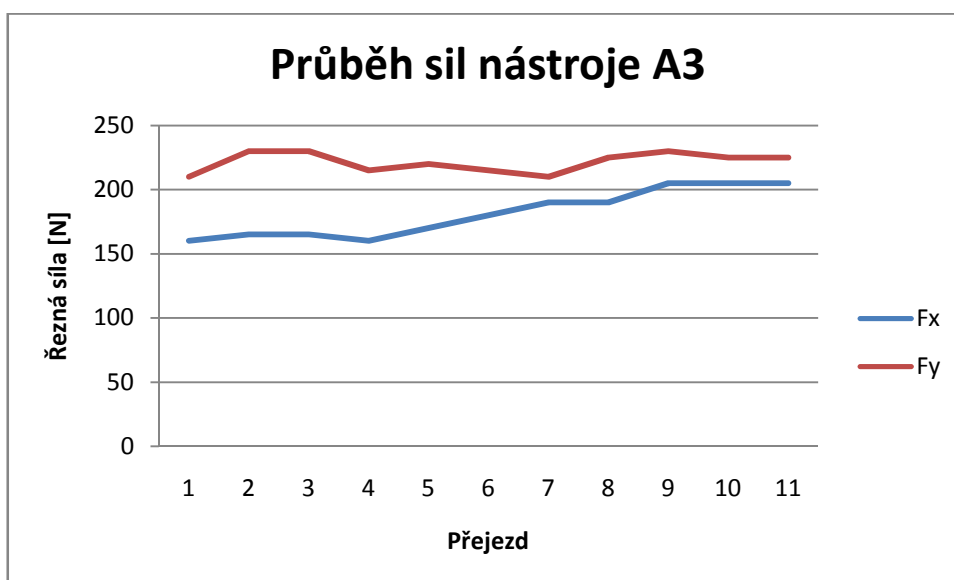
- **Nástroj A2**



Graf 8 Průběh sil nástroje A2

U nástroje A2 došlo k vylomení břitu, a tudíž bylo dosaženo limitního opotřebení již při třetím přejezdu.

- **Nástroj A3**

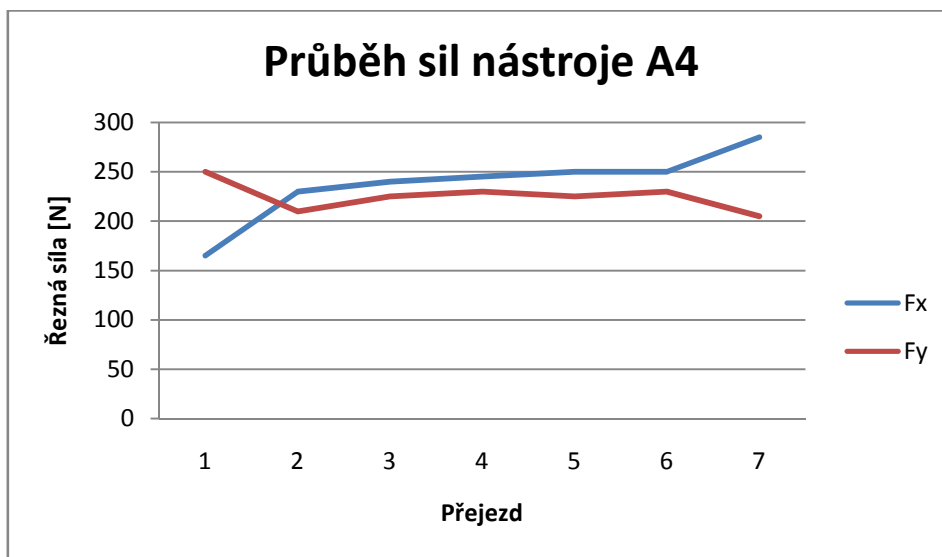


Graf 9 Průběh sil nástroje A3

Nástroj A3 vydržel 11 přejezdů, což odpovídá času 8,69 minuty a jsou zde patrné výkyvy. Tendence je lehce stoupající.



- **Nástroj A4**



Graf 10 Průběh sil nástroje A4

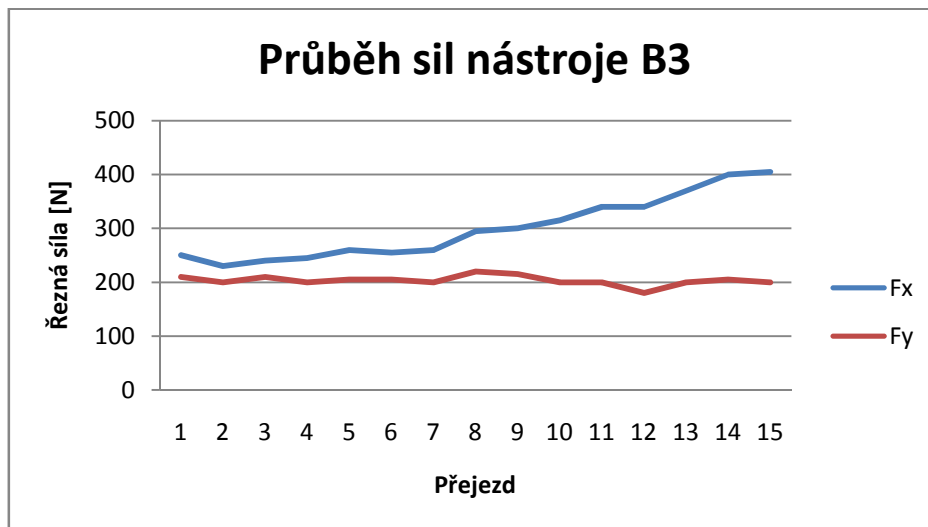
Také malý počet přejezdů, konkrétně 7, vydržel nástroj A4. Čas výdrže byl 5,53 minuty. Velikost sil opět stoupá v závislosti na opotřebení nástroje.

### 3.2.2. Nástroje B

Nástroje B mají délku 60 mm a délku řezné části 16 mm. Průměr je stejný jako u ostatních nástrojů a to 8 mm.

Nástroj B1 již při vybalení měl vylomený břit a nástroj B2 vydržel pouze 1 přejezd a poté se vylomil břit.

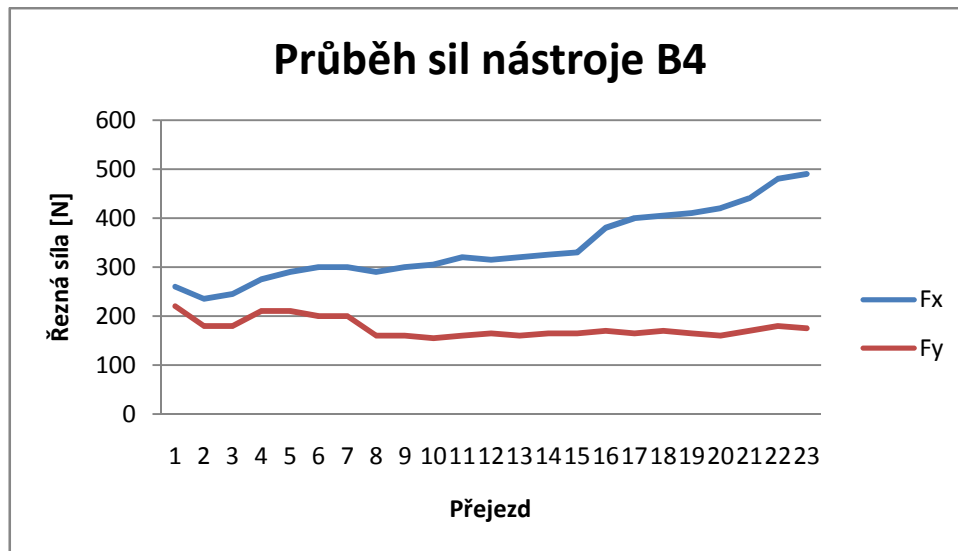
- **Nástroj B3**



Graf 11 Průběh sil nástroje B3

Nástroj B3 se choval podle předpokladů. Síla  $F_x$  se zvyšuje v závislosti na otupování břitu a síla  $F_y$  je konstantní. Z toho vyplývá, že nedocházelo k výraznému vzniku nárůstku. Trvanlivost nástroje byla 11,85 minuty.

- **Nástroj B4**



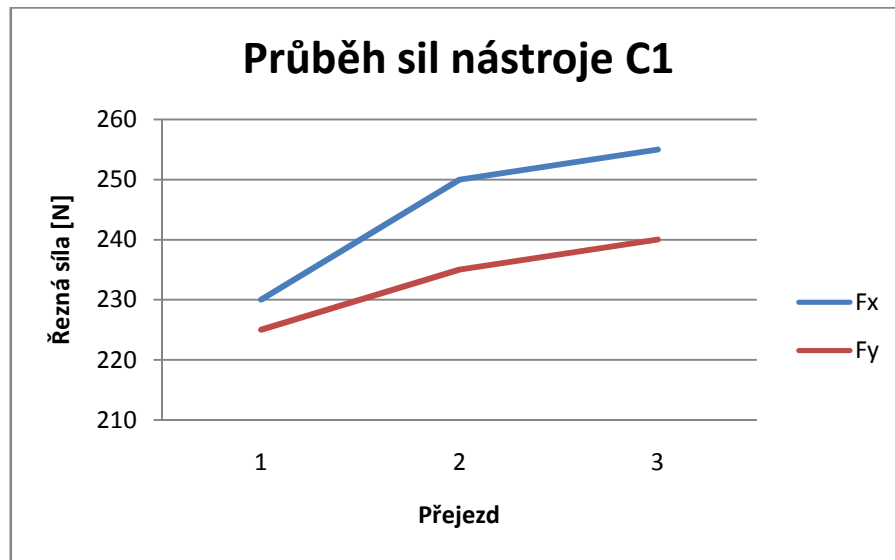
Graf 12 Průběh sil nástroje B4

U tohoto nástroje pozorujeme stejný průběh jako u předchozího s opětovným téměř konstantním průběhem složky  $F_y$ . Díky tomuto poznání lze předpokládat, že nástroje od výrobce B nejsou tak náchylné k tvorbě nárůstku. Je to způsobeno pravděpodobně geometrií nástroje, na kterou je práce zaměřena později. Výdrž nástroje je 23 přejezdů, tedy 18,17 minuty.

### 3.2.3. Nástroje C

Nástroje C mají délku 63 mm a délku řezné části 16 mm. Průměr je stejný jako u ostatních nástrojů a to 8 mm.

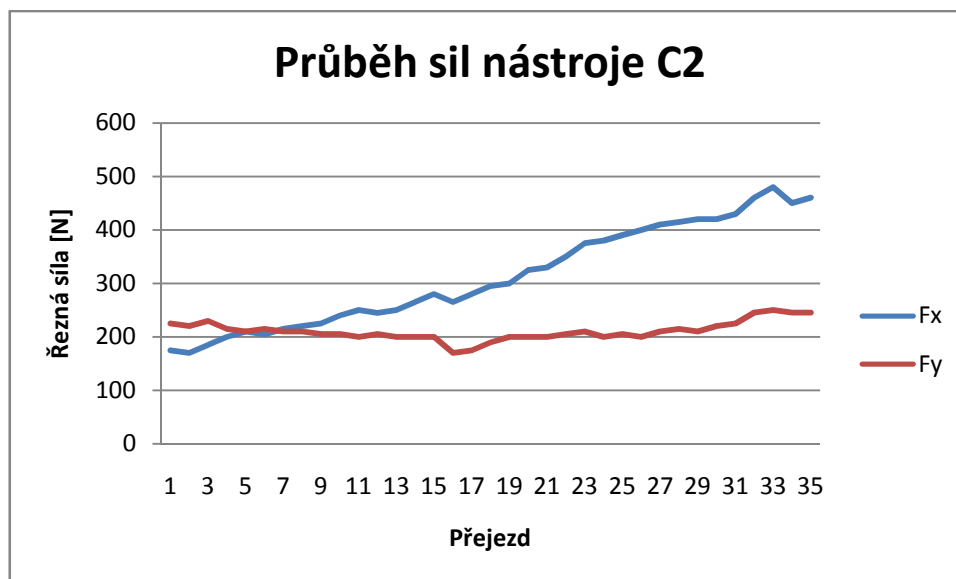
- **Nástroj C1**



Graf 13 Průběh sil nástroje C1

Nástroj C1 vydržel pouze 3 přejezdy, takže analýza by neměla význam.

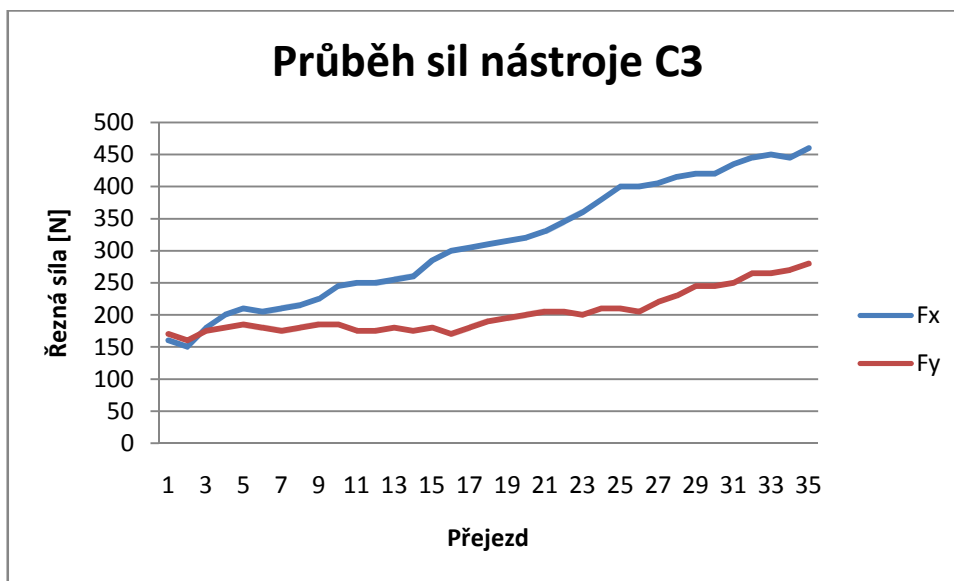
- **Nástroj C2**



Graf 14 Průběh sil nástroje C2

Obrábění nástrojem C2 trvalo 35 přejezdů. To odpovídá času 27,26 minuty. Průběh sil je téměř ideální bez větších výkyvů. Tendence stoupající v závislosti na zvyšujícím se opotřebení břitu nástroje.

- **Nástroj C3**



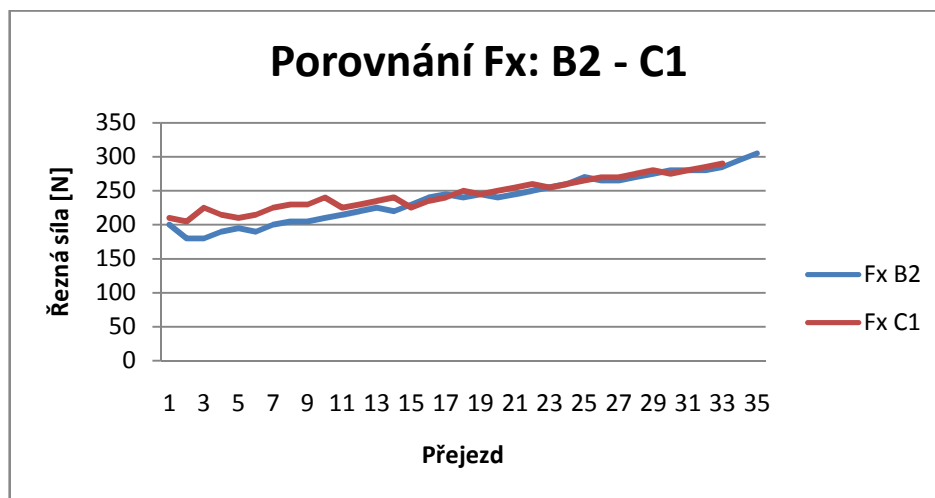
Graf 15 Průběh sil nástroje C3

Nástroj C3 má téměř totožný průběh řezných sil jako nástroj C2. Z toho je vidět, že měření má velkou vypovídací hodnotu, protože při dvou po sobě jdoucích měření bylo dosaženo stejných výsledků. Trvanlivost nástroje byla také 27,26 minuty.

### 3.3. Materiál po odlití – porovnání

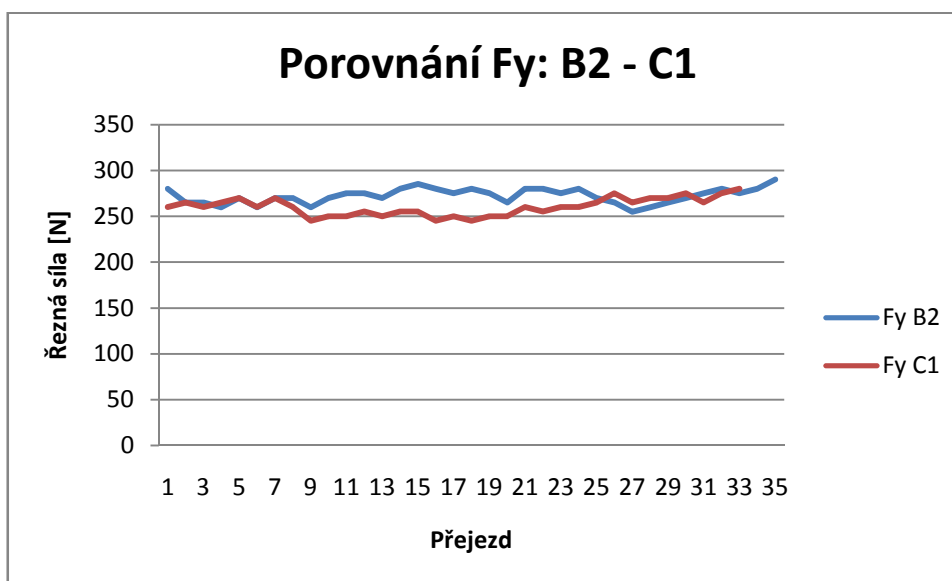
Tato kapitola se zabývá porovnáváním velikostí řezných sil při obrábění odlitého materiálu jednotlivými nástroji a vlivu jejich geometrie na tyto síly. Dvojice nástrojů pro porovnání jsou voleny tak, aby analýza měla smysl.

### 3.3.1. Úhel hřbetu na obvodě



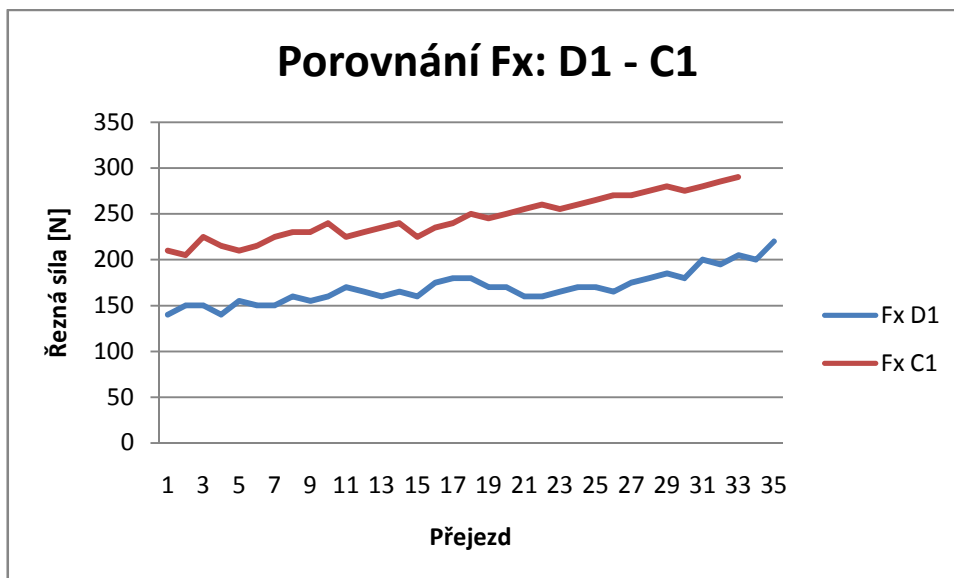
Graf 16 Porovnání Fx: B2-C1

Složka řezné síly  $F_x$  u nástrojů B2 a C1 je téměř totožná. Větší trvanlivost má nástroj B2 a to o cca 5 minut. Nástroj B2 má o téměř  $5^\circ$  větší úhel hřbetu na obvodě a tudíž větší pevnost. Proto je trvanlivost vyšší.



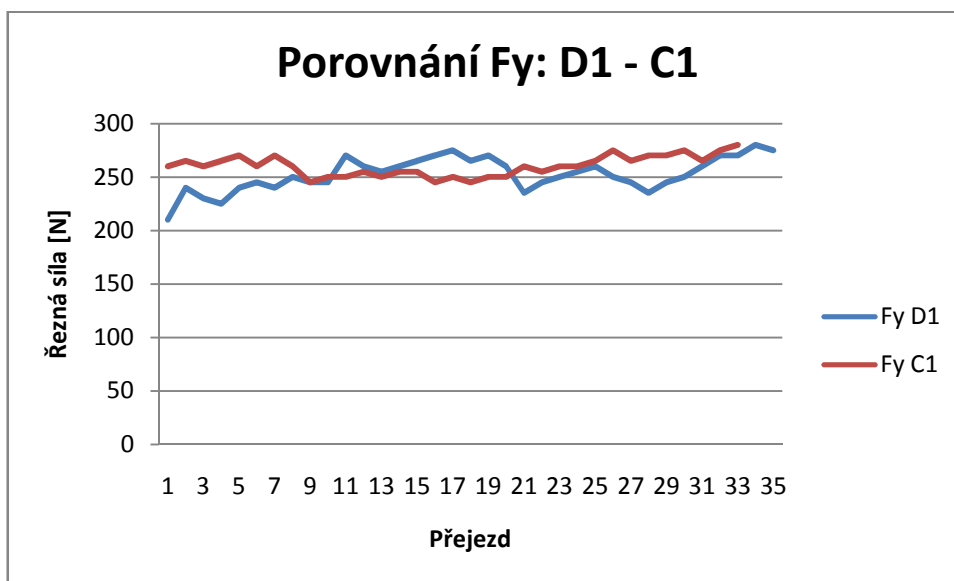
Graf 17 Porovnání Fy: B2-C1

Složky  $F_y$  nástrojů B2 a C1 jsou opět velice podobné. K tvorbě nárůstku nedocházelo tak výrazně, protože síly nevykazují velké výkyvy.



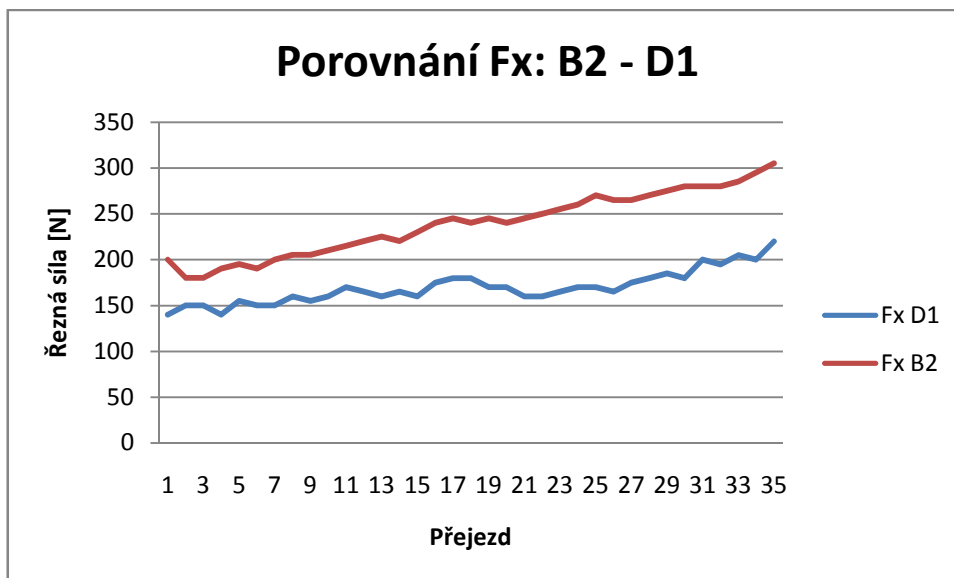
Graf 18 Porovnání Fx: D1-C1

Nástroje D1 a C1 mají totožný úhel hřbetu na obvodě. Řezná síla  $F_x$  se přesto výrazně liší. Z toho je patrné, že vliv úhlu hřbetu v tomto případě na velikost řezných sil není velký a rozdíl bude tvořit jiný úhel. Trvanlivost byla u obou nástrojů podobná.



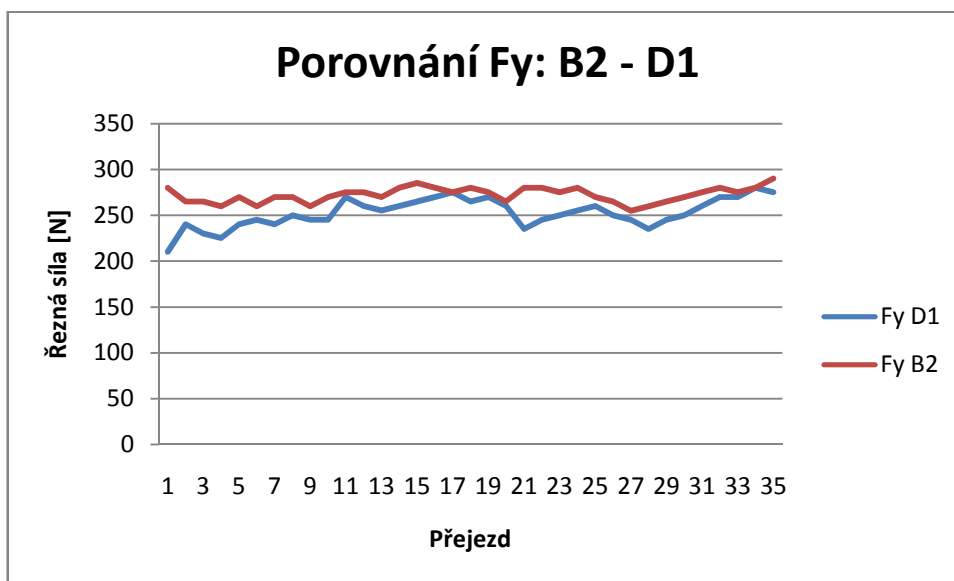
Graf 19 Porovnání Fy: D1-C1

Při porovnání složek  $F_y$  je vidět větší kolísání u nástroje D1. Z toho lze usoudit, že je náchylnější k tvorbě nárůstku než nástroj C1.



Graf 20 Porovnání Fx: B2-D1

Rozdíl ve velikosti úhlu hřbetu u nástrojů B2 a D1 je cca  $4,5^\circ$ . Nástroj B2 má úhel větší a také větší řezné síly. Tendence sil je v obou případech stoupající, což je důsledek postupného opotřebovávání bříty.

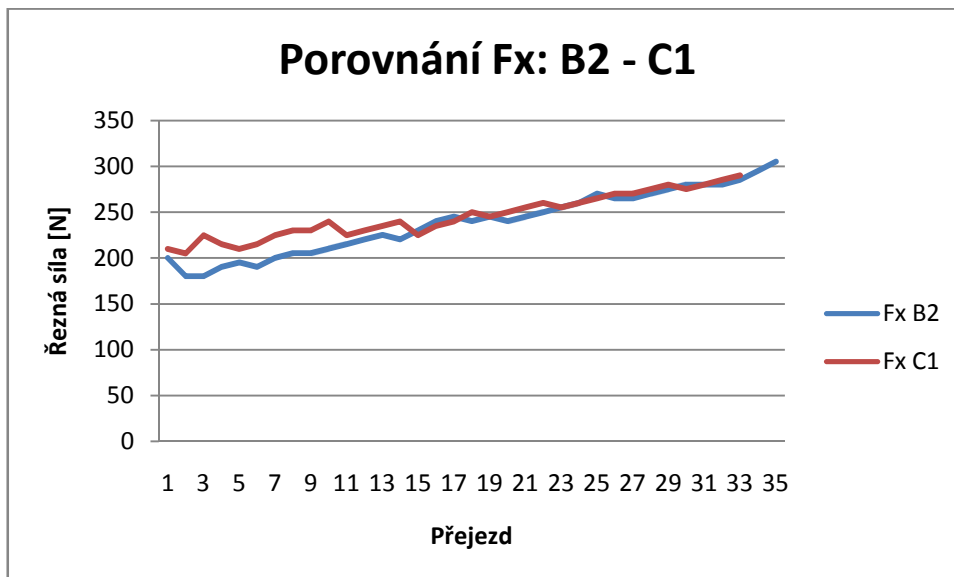


Graf 21 Porovnání Fy: B2-D1

Téměř konstantní průběh mají složky  $F_y$ . Nástroj B2 má opět lepší průběh z hlediska tvorby nárůstku.

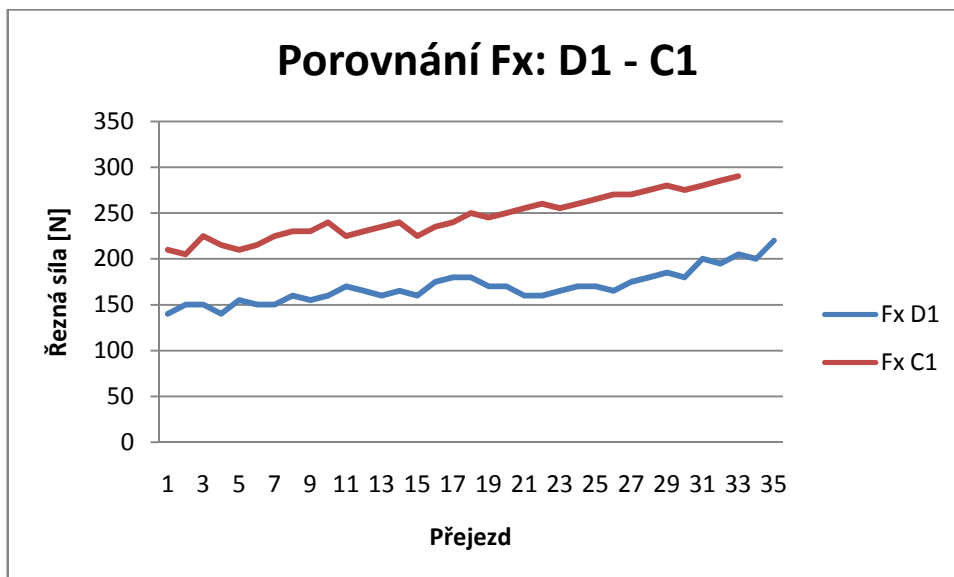
### 3.3.2. Poloměr zaoblení řezné hrany

Při analýze vlivu poloměru zaoblení břitu na řezné síly je brána v úvahu pouze složka  $F_x$ . Složka  $F_y$  je výrazně ovlivněna tvorbou nárůstku, a tudíž jsou výsledky zkresleny. To platí i pro hodnocení vlivu úhlu čela.



Graf 22 Porovnání Fx: B2-C1

Nástroje B2 a C1 se liší v poloměru zaoblení řezné hrany jen velmi málo, o 0,2  $\mu\text{m}$ . Rozdíl ve velikosti sil je také téměř zanedbatelný a i trvanlivost je podobná.

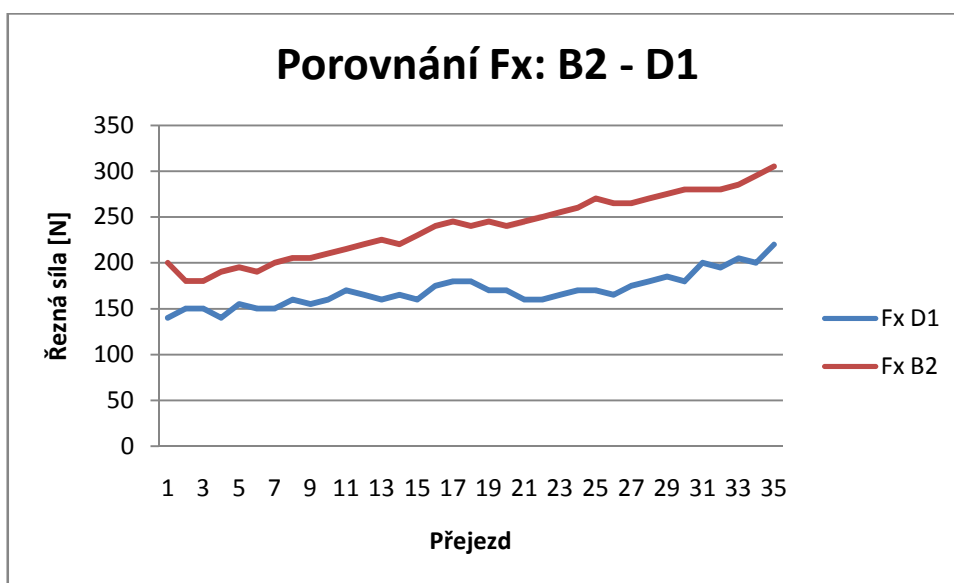


Graf 23 Porovnání Fx: D1-C1

Nástroj D1 má o 1,45  $\mu\text{m}$  větší poloměr zaoblení řezné hrany. Síly jsou přesto výrazně menší. I když by se dalo předpokládat, že menší poloměr zaoblení bude dovolovat snadnější zařezávání nástroje do materiálu, v tomto případě tomu tak není. Rozdíly ve velikosti



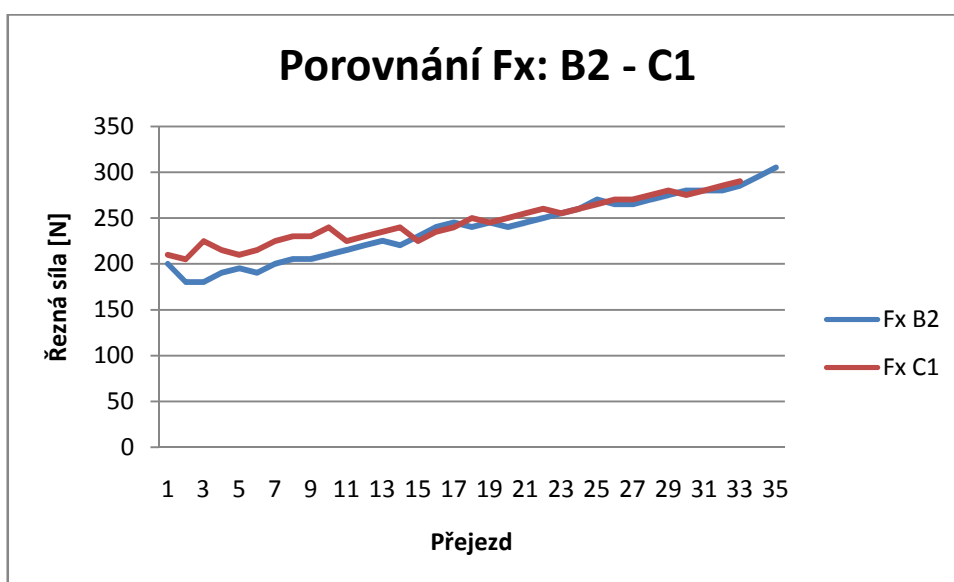
poloměru jsou celkově velmi malé a tak ostatní geometrické parametry ovlivňují velikost řezných sil mnohem více.



Graf 24 Porovnání Fx: B2-D1

Stejný závěr lze vyvodit i z porovnání nástrojů B2 a D1. Rozdíl ve velikosti poloměru zaoblení řezné hrany je  $1,65 \mu\text{m}$ . Nástroj D1 má opět výrazně menší řezné síly a tak se vliv poloměru zaoblení řezné hrany smazává.

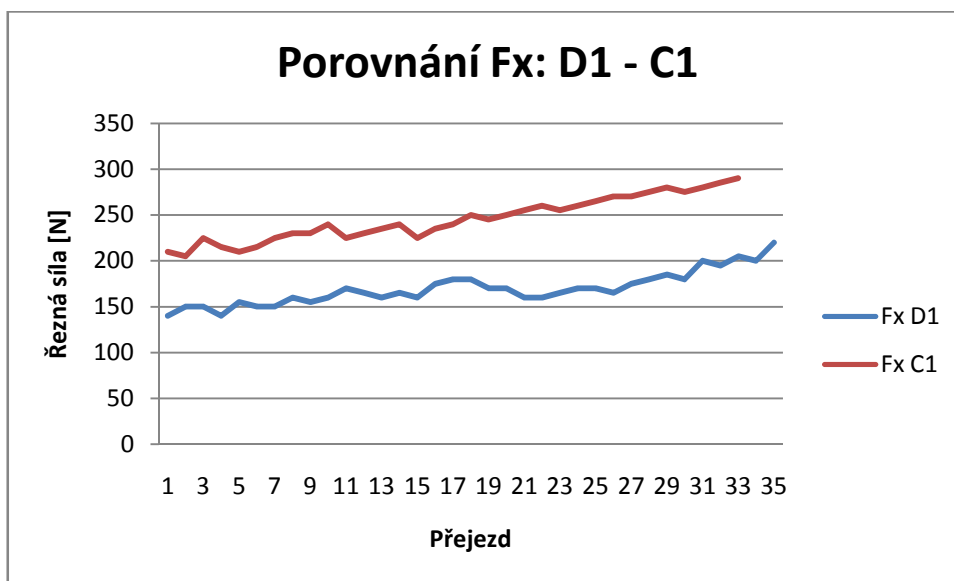
### 3.3.3. Úhel čela



Graf 25 Porovnání Fx: B2-C1

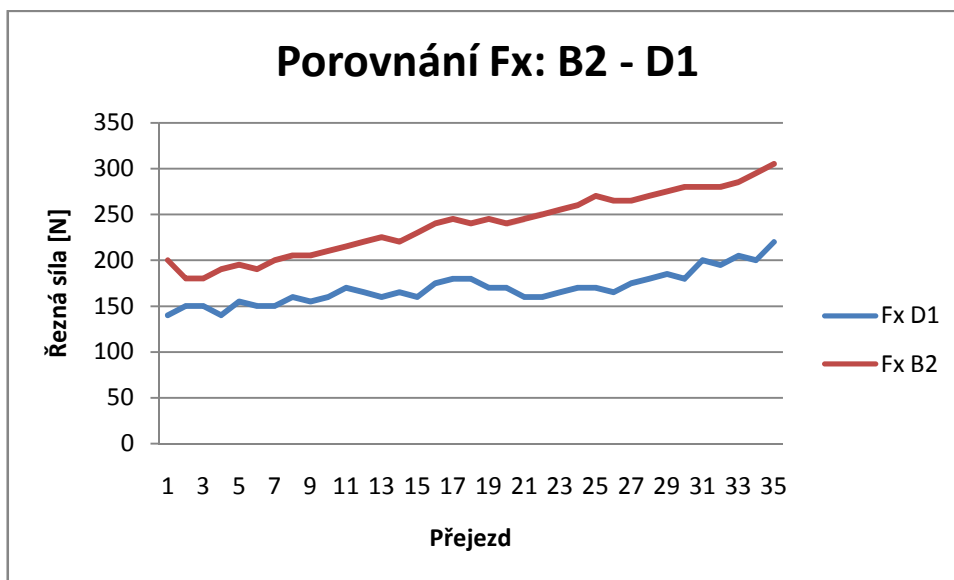
I přesto, že podle teorie by měl menší úhel čela znamenat větší řezné síly, tak v tomto případě tomu tak není. Rozdíl mezi velikostmi úhlů jednotlivých nástrojů je  $3,5^\circ$  a řezné síly

jsou přesto téměř totožné. To je pravděpodobně způsobeno různorodostí materiálu, který má v sobě po odlití různé útvary, jako jsou staženiny, vměstky, řediny apod.



Graf 26 Porovnání Fx: D1-C1

Opět je vidět, že i když má nástroj D1 výrazně menší úhel čela tak velikost sil je menší než v případě nástroje C1. To je pravděpodobně opět způsobeno vlivem materiálu a také celkovou lepší konstrukcí nástrojů od výrobce D.



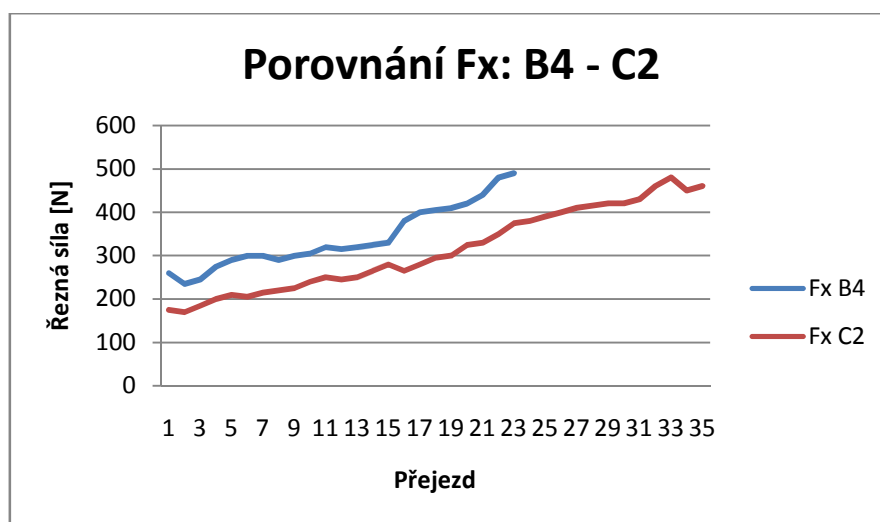
Graf 27 Porovnání Fx: B2-D1

Nástroj D1 i v tomto případě vychází z porovnání s nástrojem B2 lépe. Úhel čela se v tomto případě liší o jeden stupeň. Průběh sil je stoupající, bez větších výkyvů, což je důsledek postupného a rovnoměrného otupování bříty.

### 3.4. Materiál protvářený – porovnání

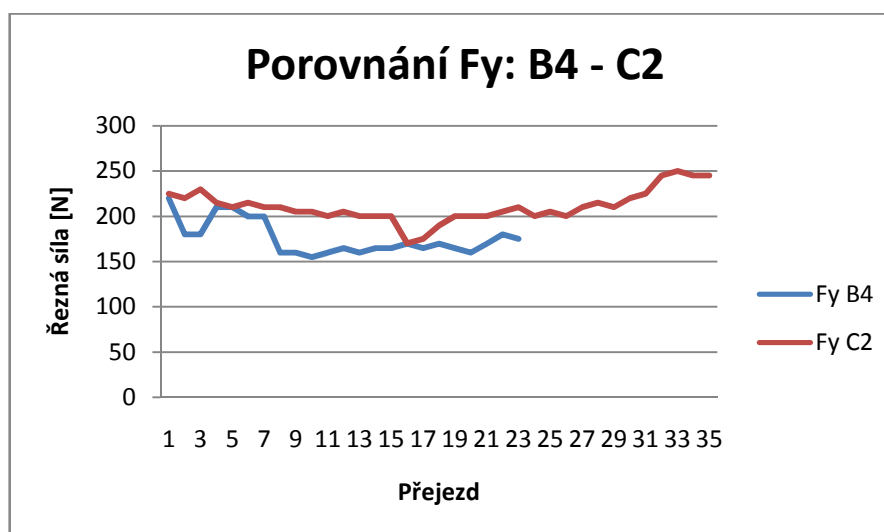
V této kapitole je práce zaměřena na porovnávání velikostí řezných sil jednotlivých nástrojů při obrábění protvářeného materiálu.

#### 3.4.1. Úhel hřbetu na obvodě



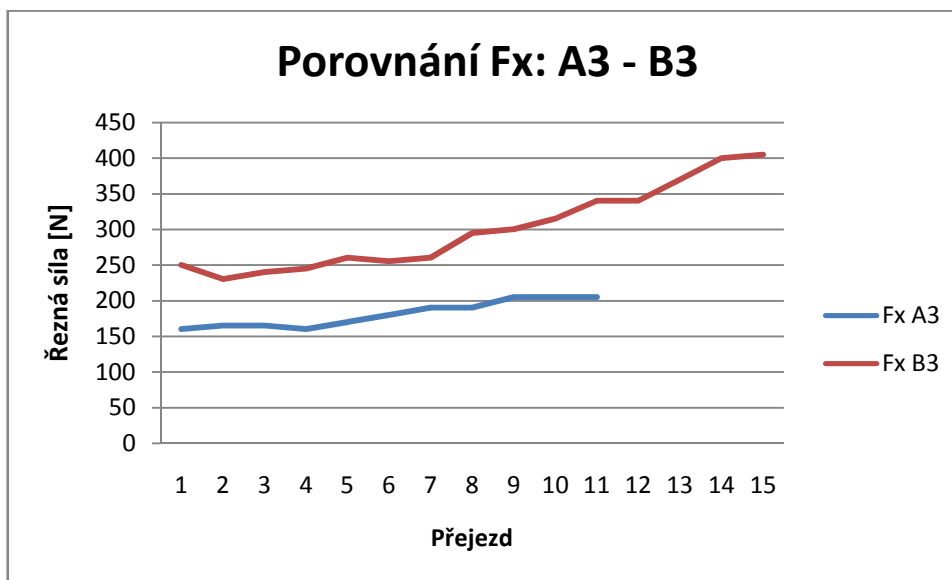
Graf 28 Porovnání Fx: B4-C2

V tomto grafu je vidět porovnání složky Fx řezné síly při obrábění nástrojem B4 a C2. Nástroj B4 má úhel hřbetu na obvodě  $14^\circ$  a nástroj C2 má tento úhel  $9,5^\circ$ . Je patrné, že při obrábění nástrojem C2 vznikají menší řezné síly a je zde provedeno více přejezdů do limitního opotřebení. Břit nástroje C2 má totiž větší tuhost, právě díky menšímu úhlu hřbetu. Proto má břit nástroje C2 delší trvanlivost. Velikost sil je samozřejmě ovlivněna i dalšími úhly. Jejich analýza bude následovat později.

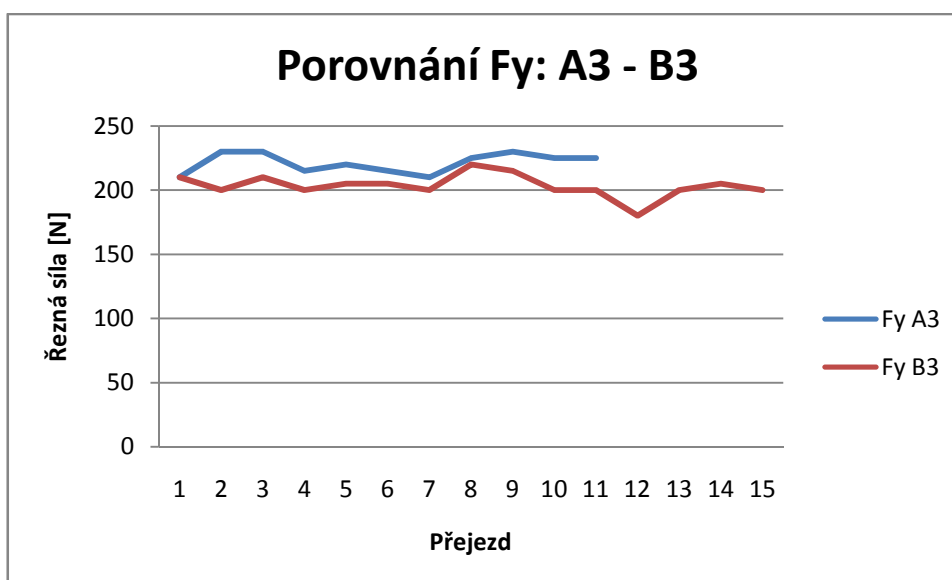


Graf 29 Porovnání Fy: B4-C2

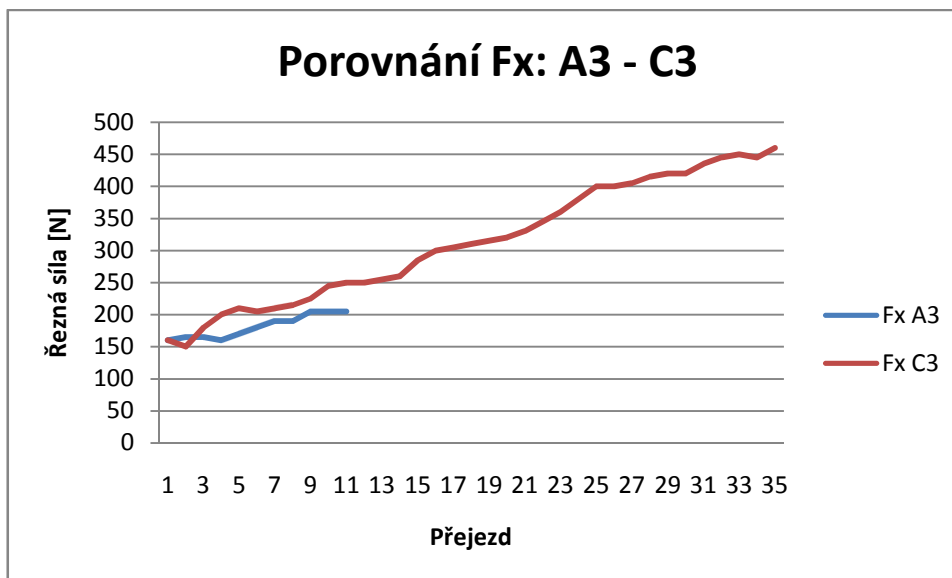
Složka řezné síly  $F_y$  dosahuje opačných výsledků než složka  $F_x$ . Nástroj C2 i přes menší úhel hřbetu vykazuje větší řezné síly než nástroj B4. Pravděpodobně je to způsobeno nárůstkem na břitě nástroje. Ten mění svoji velikost a z toho důvodu různě velkou silou odtlačuje nástroj od obrobku a způsobuje výkyvy v průběhu řezné síly  $F_y$ .

Graf 30 Porovnání  $F_x$ : A3-B3

Tento graf potvrzuje předchozí úvahu. Nástroj B3 má větší úhel hřbetu na obvodě a tudíž menší tuhost a větší řezné síly. V tomto případě má nástroj A3 menší trvanlivost, což je nejspíše způsobeno celkovou menší trvanlivostí skupiny nástrojů od výrobce A.

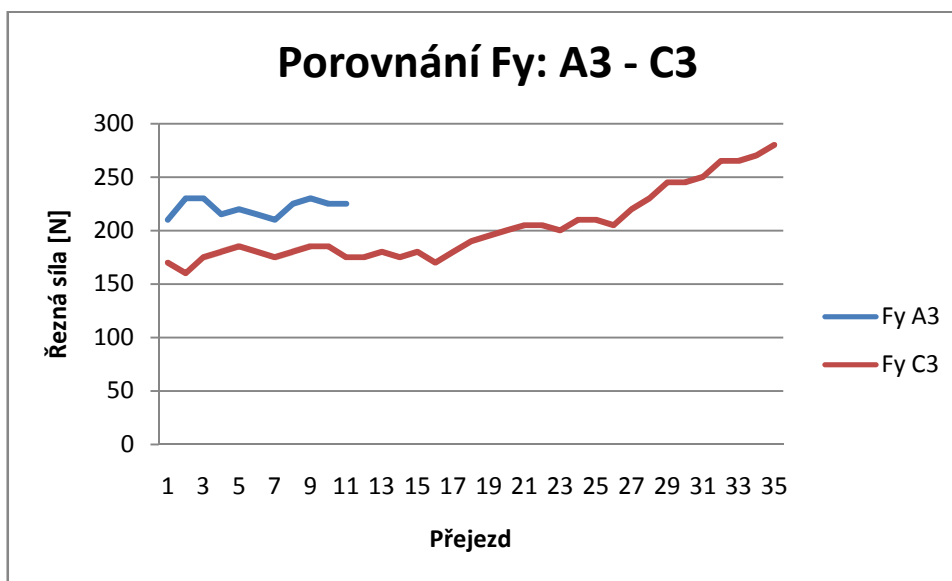
Graf 31 Porovnání  $F_y$ : A3-B3

Složka řezné síly  $F_y$  se opět chová podle předpokladu. Nástroj A3 vykazuje nepatrně vyšší hodnoty při menší trvanlivosti. Toto lze opětovně přisoudit vlivu nárůstku.



Graf 32 Porovnání Fx: A3-C3

Nástroje A3 a C3 se liší v hodnotě úhlu hřbetu na obvodě pouze o  $1^\circ$ . Rozdíly ve složce Fx proto nejsou tak velké jako v předchozích případech, kdy byl rozdíl v úhlech větší. Nástroj A3 vydržel o poznání kratší dobu. To je způsobeno celkovou lepší konstrukcí nástroje C3.

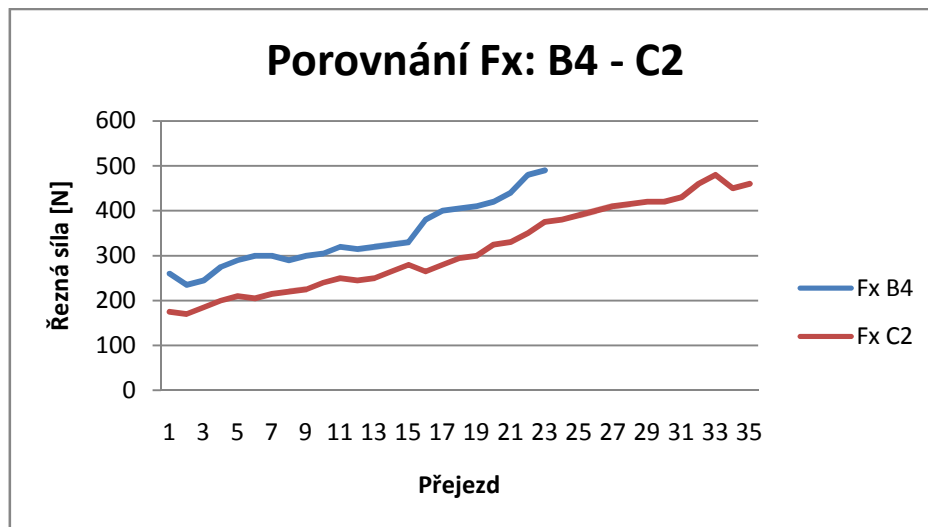


Graf 33 Porovnání Fy: A3-C3

U složky Fy došlo opět k opačnému trendu ve vývoji sil. Je vidět, že vliv nárůstu je znatelný a nástroje od výrobce A jsou k jeho tvorbě velmi náchylné.

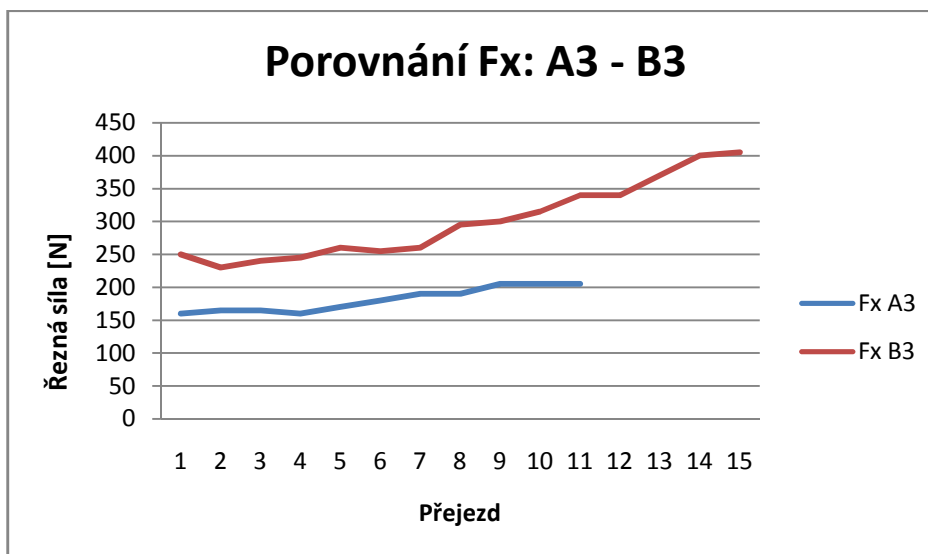
### 3.4.2. Poloměr zaoblení řezné hrany

I u protvářeného materiálu budou další analýzy, stejně jako u materiálu odlitého, probíhat pouze se složkou řezné síly  $F_x$ .



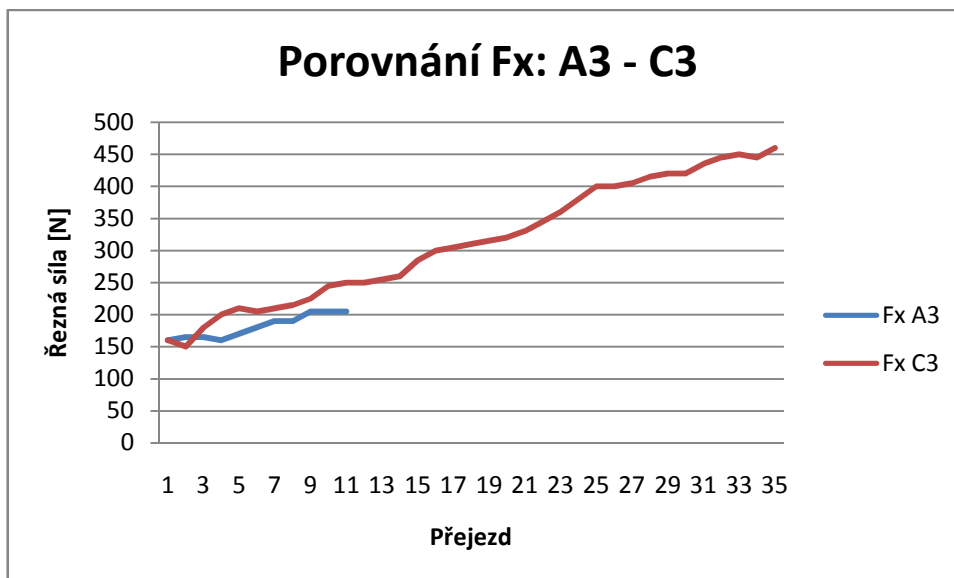
Graf 34 Porovnání  $F_x$ : B4-C2

V případě protvářeného materiálu vykazuje poměr sil v závislosti na poloměru zaoblení řezné hrany stejné vlastnosti jako materiálu odlitého. V tomto případě je rozdíl ve velikosti poloměru zanedbatelný. Řezné síly se přesto výrazně liší. To je způsobeno vlivem jiného geometrického parametru nástroje.



Graf 35 Porovnání  $F_x$ : A3-B3

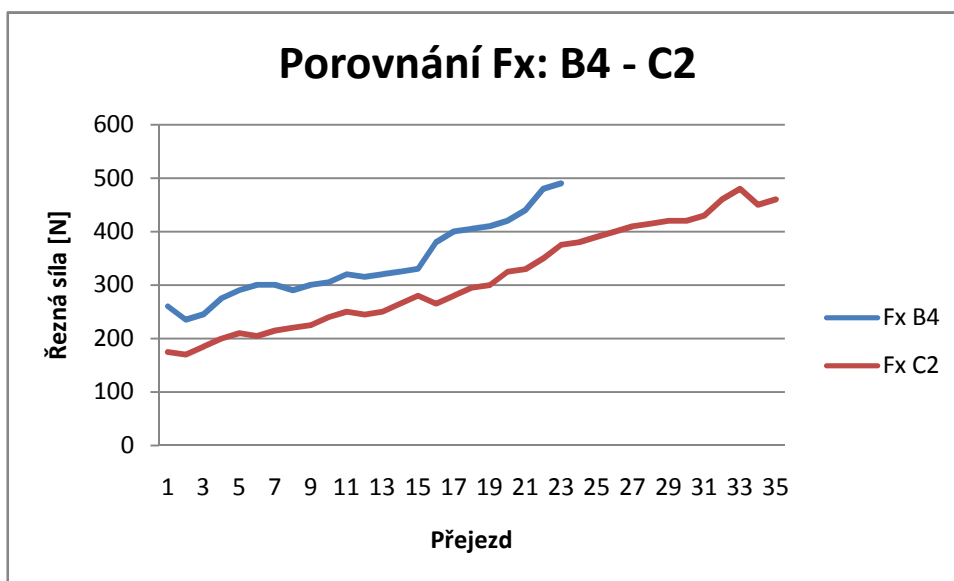
Nástroje od výrobce A mají největší poloměr zaoblení řezné hrany ze všech nástrojů. Přesto je velikost řezných sil při obrábění těmito nástroji menší. Opět se potvrzuje, že vliv poloměru zaoblení řezné hrany je v porovnání s ostatními parametry zanedbatelný.



Graf 36 Porovnání Fx: A3-C3

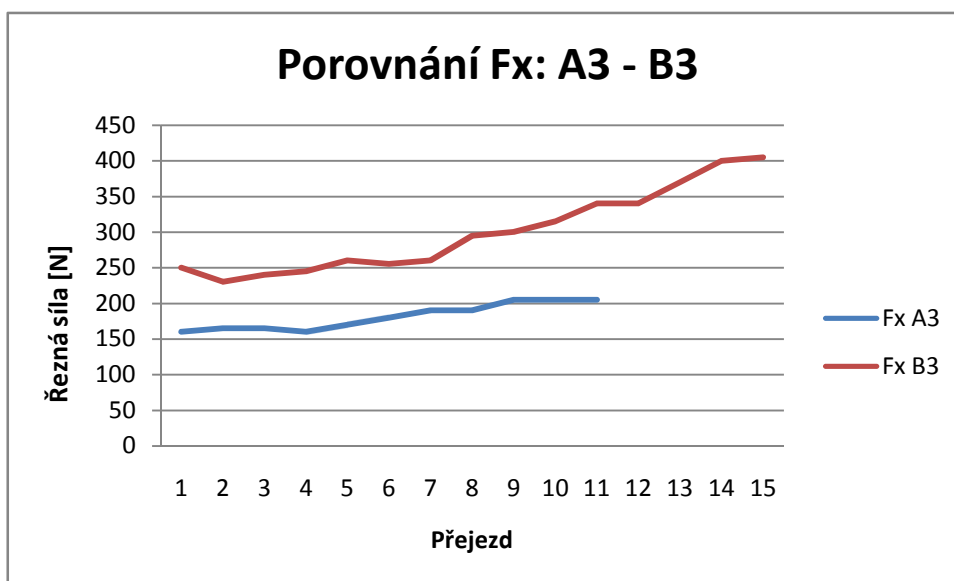
Tento graf opět potvrzuje skutečnost, že poloměr zaoblení řezné hrany nemá velký vliv na řezné síly. Rozdíl ve velikosti činí 1,80  $\mu\text{m}$  a velikost řezných sil je velice podobná.

### 3.4.3. Úhel čela



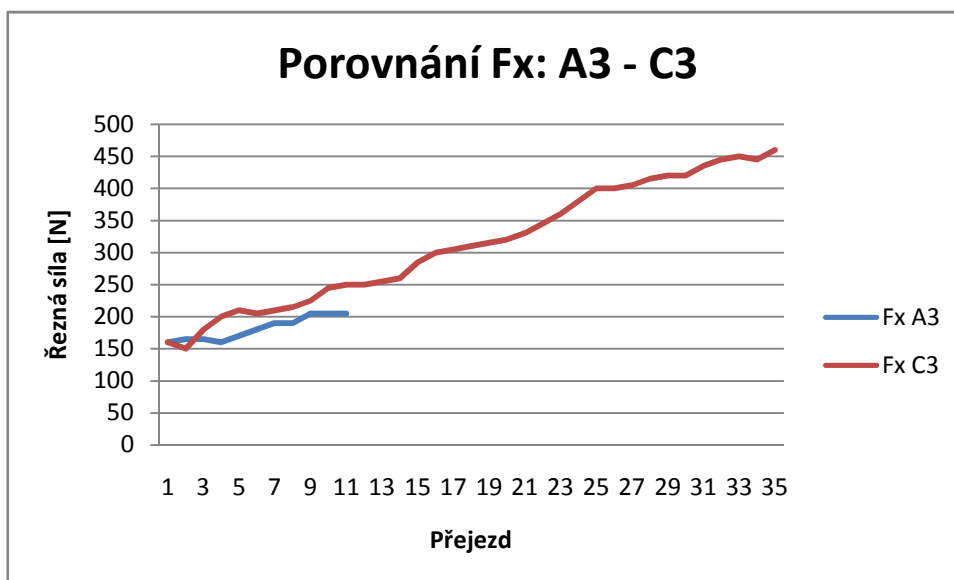
Graf 37 Porovnání Fx: B4-C2

Z teorie o řezných úhlech vyplývá, že čím menší je úhel čela, tím větší řezné síly jsou. Tento graf teorii potvrzuje. Nástroj B4 má úhel čela 8° a větší řezné síly než nástroj C2, který má úhel čela 11,5°.



Graf 38 Porovnání Fx: A3-B3

Porovnání sil při obrábění nástroji A3 a B3 ukazuje, že menší úhel čela má opravdu za následek větší řezné síly. Nástroj A3 má úhel čela  $10,5^\circ$ , zatímco úhel čela nástroje B3 má hodnotu  $8^\circ$ . I přes výrazně větší řezné síly má nástroj B3 větší trvanlivost. To je opět způsobeno celkovou horší konstrukcí nástrojů od výrobce A.



Graf 39 Porovnání Fx: A3-C3

Nástroje A3 a C3 se liší v úhlu čela opět pouze o  $1^\circ$  a tak je rozdíl ve velikosti řezných sil téměř zanedbatelný. Trvanlivost nástrojů se liší velmi výrazně a tak hlubší analýza nemá význam.

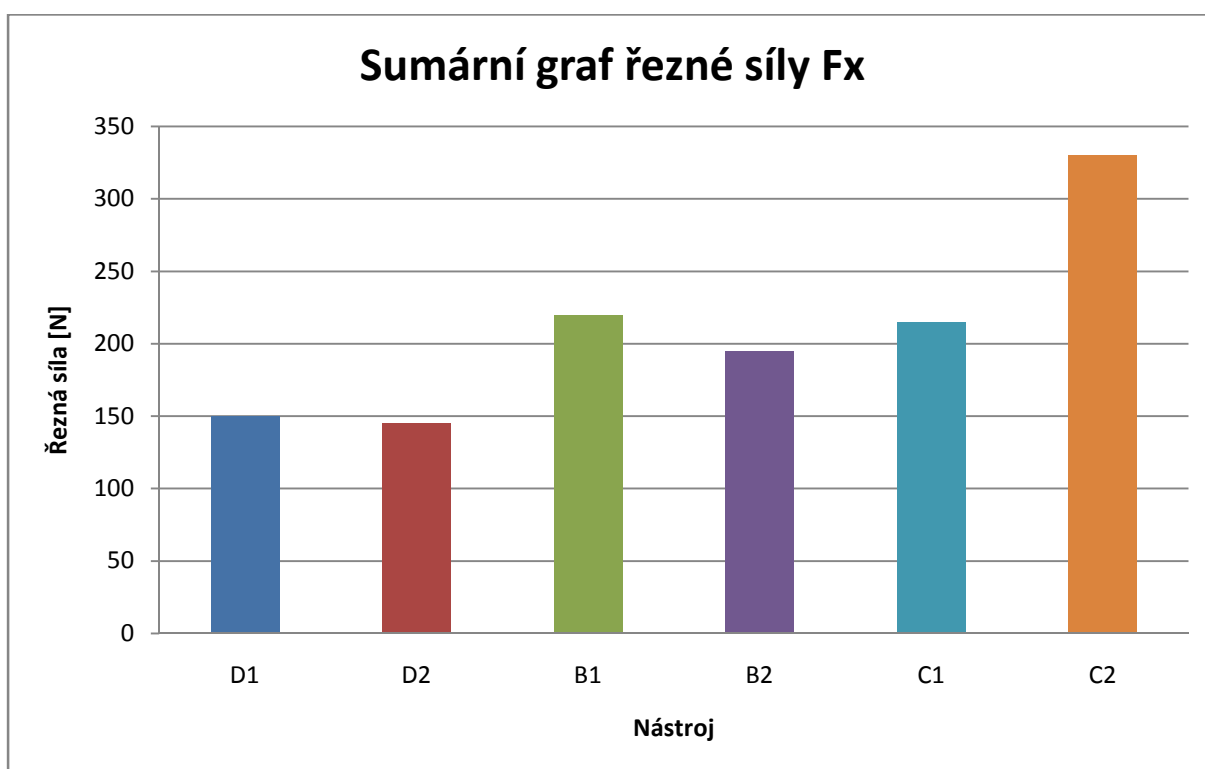


### 3.5. Sumární grafy – materiál po odlití

Tato část diplomové práce je zaměřena na porovnání velikosti řezných sil všech nástrojů najednou. U materiálu odlitého měly přejezdy různou dobu trvání a tak byla vzata hodnota řezné síly v čase 2,37 minuty, což odpovídá třem přejezdům při obrábění materiálu protvářeného.

Společná analýza řezných sil po třetím přejezdu byla zvolena ze dvou důvodů. Zaprvé už bylo obrábění materiálu stabilní a zadruhé ještě nebylo tak velké opotřebení břitu nástroje, aby se projevilo do velikosti řezných sil.

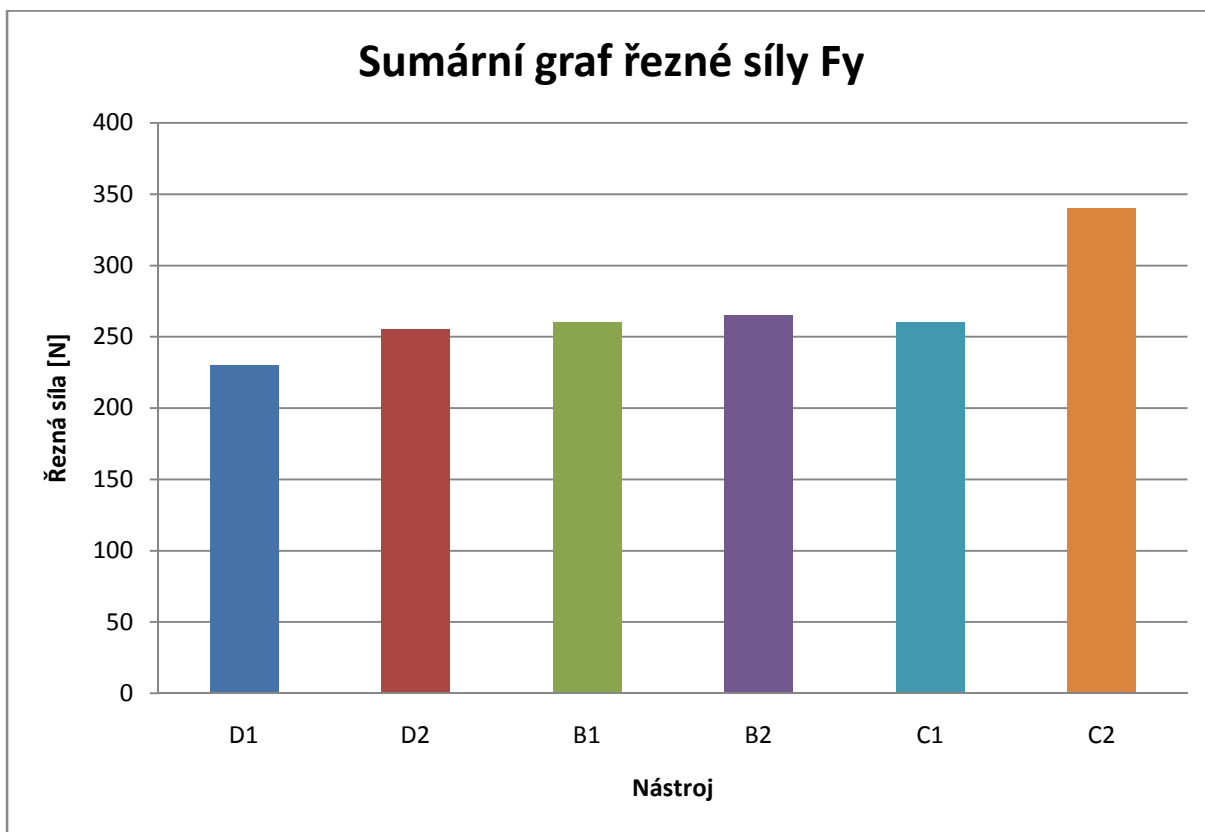
#### 3.5.1. Složka řezné síly $F_x$



Graf 40 Sumární graf řezné síly  $F_x$

Z grafu je patrné, že nejmenších řezných sil, a to téměř totožných, dosahují nástroje od výrobce D. Jejich trvanlivost byla také zároveň nejvyšší. Naopak nejhoršího výsledků dosáhl nástroj C2. U toho je to ale způsobeno vylomením břitu po velmi krátkém čase. Geometrie a celková konstrukce nástrojů od výrobce D je tedy pro obrábění odlitého Nimonicu 80A nejvýhodnější.

### 3.5.2. Složka řezné síly $F_y$



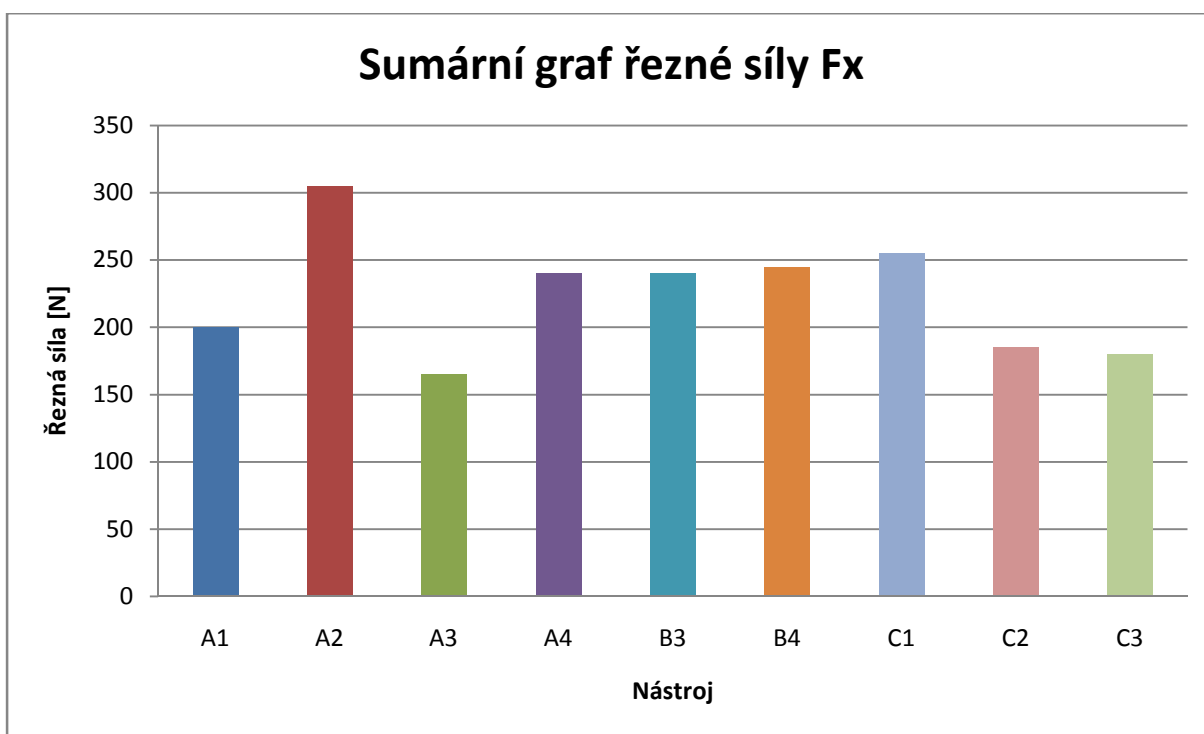
Graf 41 Sumární graf řezné síly  $F_y$

U složky řezné síly  $F_y$  jsou ve velikostech sil jen malé rozdíly. Opět vybočuje nástroj C2, který se vylomil. Vliv nárůstku, který výrazně ovlivňuje velikost a průběh složky  $F_y$  se po třech přejezd ještě neprojevil, proto jsou rozdíly zanedbatelné.

### 3.6. Sumární grafy – materiál protvářený

Pro protvářený materiál byla zvolena analýza po třetím přejezdu materiálu. Přejezdy měly stejnou délku a tak nebylo nutné přepočítávání na čas, jako u materiálu odlitého.

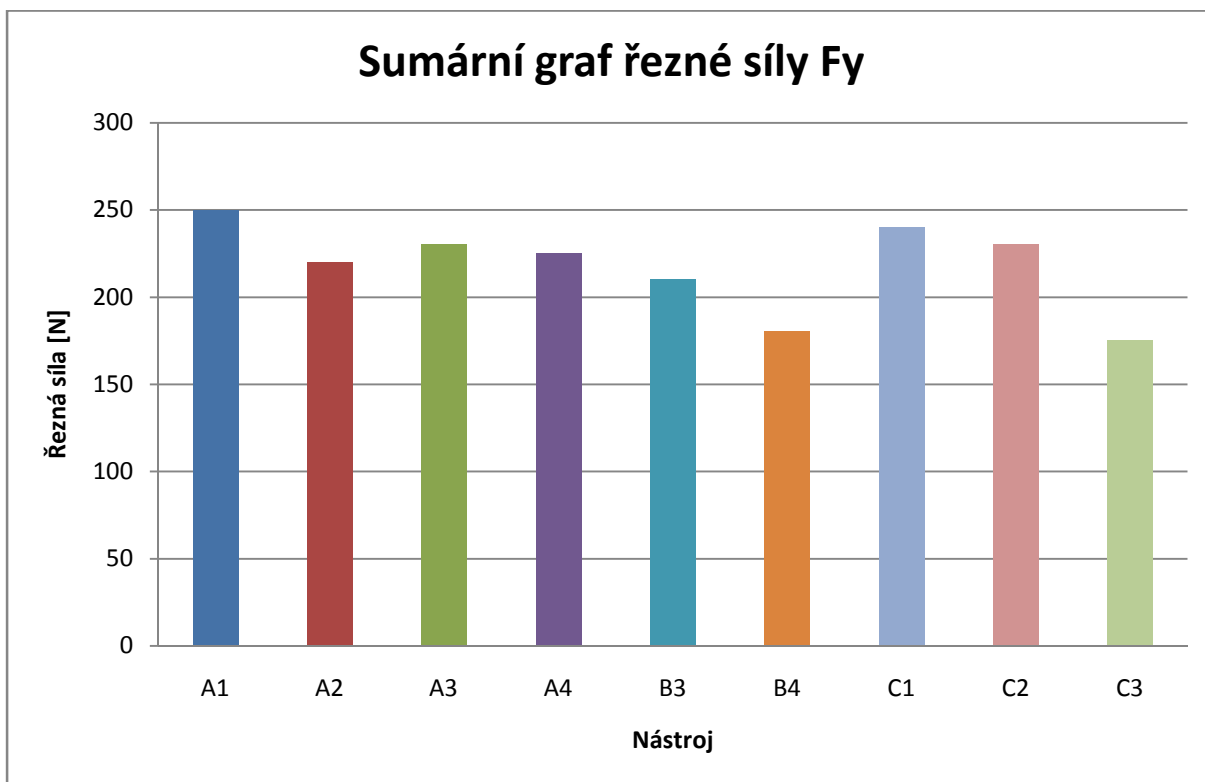
#### 3.6.1. Složka řezné síly $F_x$



Graf 42 Sumární graf řezné síly  $F_x$

Nejmenších řezných sil po třech přejezdech dosahovali nástroje C2, C3 a A3. Nástroj C1 vydržel pouze 3 přejezdy a tak je velikost síly zkreslena. Nástroj A2 se také vylomil po třetím přejezdu a z toho důvodu je jeho síla největší. Nástroje C2 a C3 dosáhli největší trvanlivosti a tak se jejich geometrie a konstrukce dá považovat za nejvýhodnější pro obrábění protvářeného Nimonicu.

### 3.6.2. Složka řezné síly $F_y$



Graf 43 Sumární graf řezné síly  $F_y$

V porovnání se sumárním grafem  $F_y$  u odlitého materiálu jsou zde patrnější větší výkyvy ve velikosti sil. To je důsledek intenzivnější tvorby nárůstku již po několika málo přejezdech. Nejmenší řeznou sílu zaznamenal nástroj C3.

### 3.7. Hodnocení tvrdosti

Jedním z požadavků zadání diplomové práce bylo měření a hodnocení tvrdosti materiálu před a po obrobení. Měření bylo provedeno pomocí tvrdoměru Wilson Wolpert.

#### 3.7.1. Materiál po odlití

Tvrdost materiálu byla naměřena na pěti náhodných místech na neobrobeném povrchu materiálu. Z nich byla udělaná průměrná hodnota. Po provedení testů byla změřena tvrdost na obrobeném povrchu. Výsledkem měření je tvrdost v HV.

Neobrobený povrch	Obrobený povrch	
282	256	
295	282	
280	258	
275	256	
295	250	
285	255	průměrná hodnota

hodnoty jsou tvrdosti v HV

Tab.8 Hodnoty tvrdosti odlitého materiálu

Při měření tvrdosti na obrobeném povrchu se hodnota druhého měření příliš lišila a tak nebyla pro průměrnou hodnotu brána v potaz.

Z výsledků je vidět, že tvrdost po obrobení povrchu nepatrně klesla. To je způsobeno tím, že z odlitku byl vyfrézován zkušební materiál pomocí nástroje s VBD. Tento nástroj a geometrie destiček způsobily zvýšení tvrdosti povrchu obrobené vrstvy. Testované nástroje svojí geometrií nezpůsobují tak velké zvýšení tvrdosti povrchu jako VBD.

### 3.7.2. Materiál protvářený

Pro materiál protvářený bylo provedeno 10 měření opět pro obrobený a neobrobený povrch.

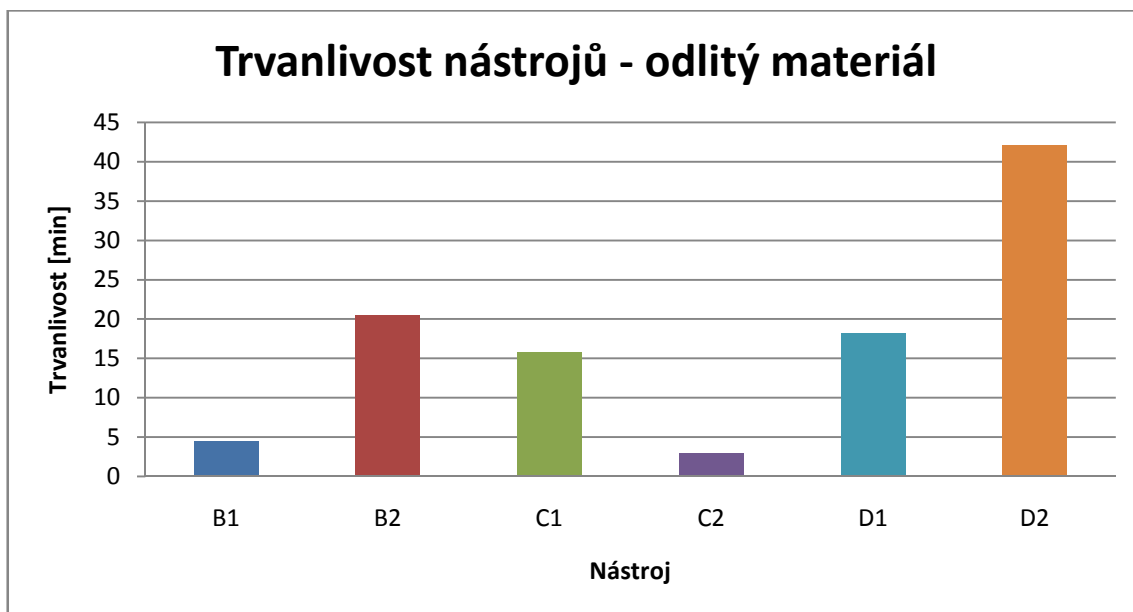
Neobrobený povrch	Obrobený povrch	
288	327	
294	313	
296	327	
303	337	
317	325	
311	328	
326	330	
296	315	
303	325	
326	334	
306	326	průměrná hodnota

hodnoty jsou tvrdosti v HV

**Tab.9 Hodnoty tvrdosti protvářeného materiálu**

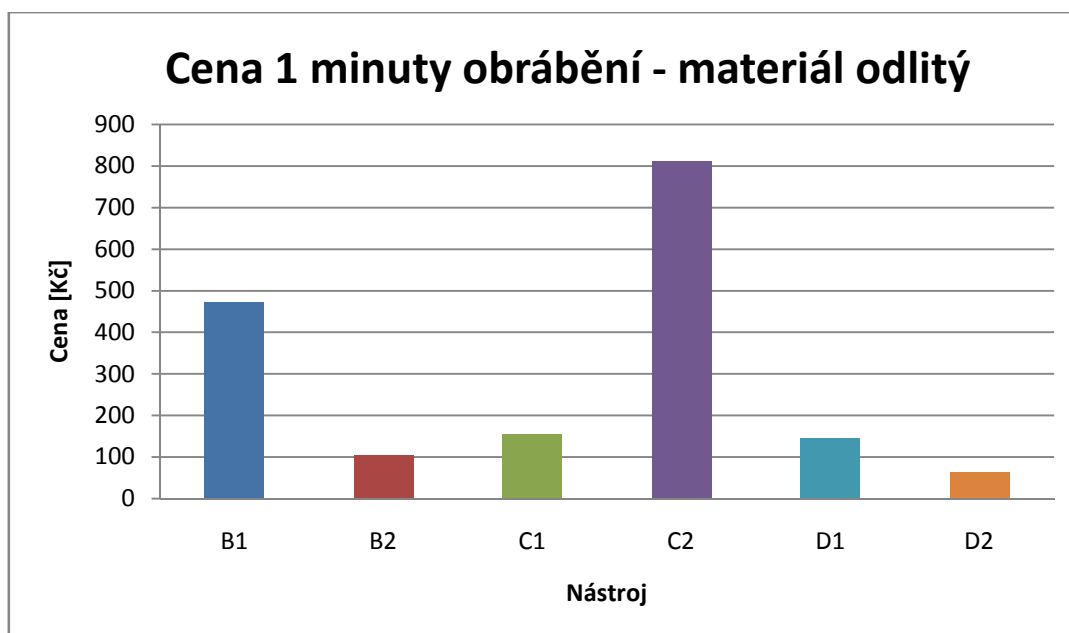
V případě protvářeného materiálu tvrdost obrobeného povrchu stoupla. Na rozdíl od materiálu odlitého byl materiál po protváření odříznut pomocí vodního paprsku. Ten má daleko menší vliv na stav povrchu než nástroj s VBD i než testované nástroje. Proto je tvrdost po testování vyšší.

#### 4. Technicko-ekonomické hodnocení



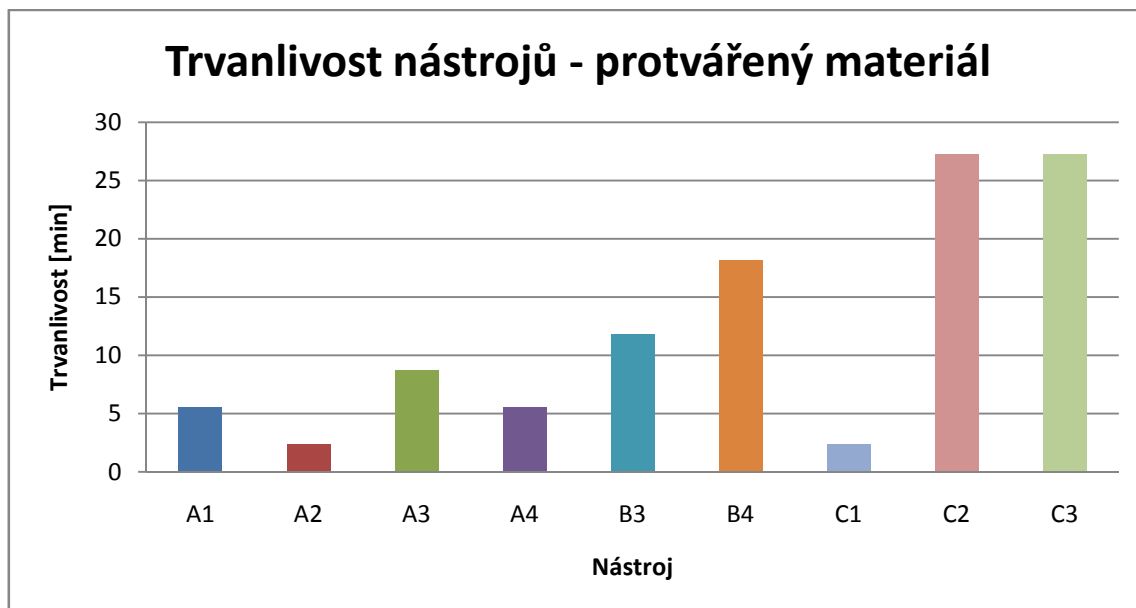
Graf 44 Trvanlivost nástrojů - odlitý materiál

Z grafu trvanlivostí nástrojů pro odlitý materiál je patrné, že největší trvanlivosti dosáhl nástroj D2. Nástroje B1 a C2 se vylomily velmi brzy a tak nemá význam je do analýzy zahrnovat. Ostatní nástroje mají podobnou dobu trvanlivosti.



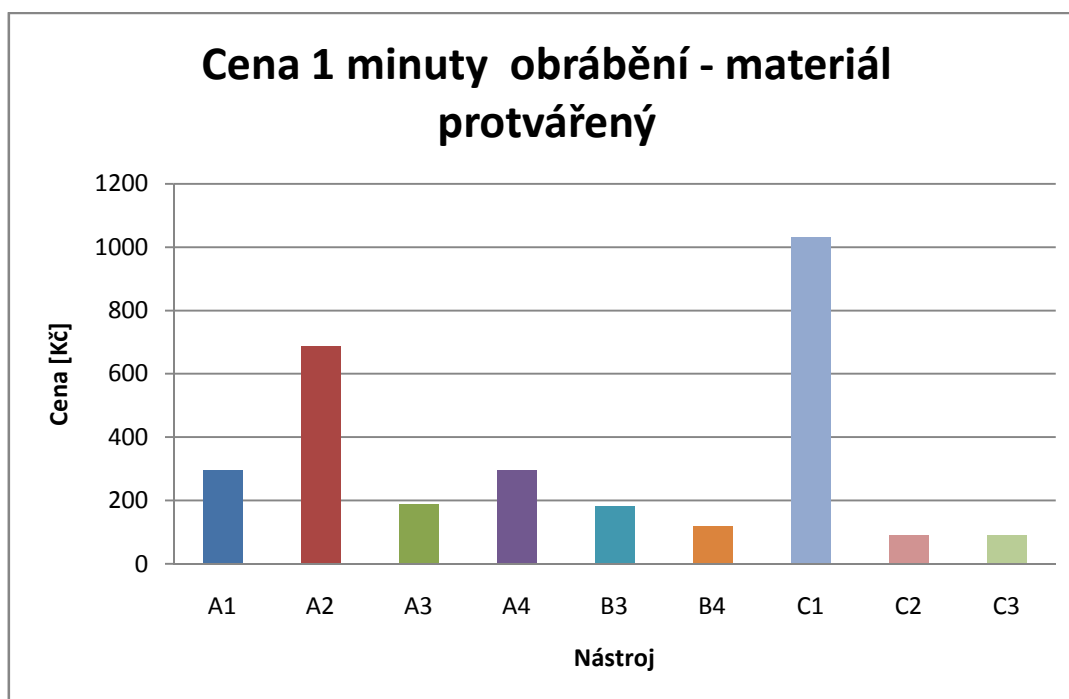
Graf 45 Cena 1 minuty obrábění – materiál odlitý

V porovnání ceny 1 minuty obrábění je vidět, že nejlépe vyhovují obrábění odlitého materiálu nástroje D2 a B2. Cena nástrojů B1 a C2 je zkreslena krátkou trvanlivostí způsobenou vylomením břitu.



Graf 46 Trvanlivost nástrojů - protvářený materiál

U protvářeného materiálu dosáhly největší trvanlivosti nástroje C2 a C3. Nástroje od výrobce A mají jednoznačně nejhorší trvanlivost. U nástroje C1 došlo k vylomení břitu.



Graf 47 Cena 1 minuty obrábění - materiál protvářený

Pro protvářený materiál se nejlépe hodí nástroje B4, C2 a C3. Minuta obrábění s nimi vychází nejlevněji. Nástroj C1 je zkreslen vylomení břitu.



#### **4.1. Shrnutí výsledků**

Protože slitina Nimonic 80A je pro obrábění velmi specifická, je pro její obrábění zapotřebí speciálních nástrojů. Jejich cena je výrazně vyšší než cena nástrojů klasických, např. nástrojů z rychlořezné oceli.

Z ekonomického hodnocení jednotlivých nástrojů je patrné, že i když je nástroj nejdražší, nemusí být nutně z ekonomického hlediska nejhorší. To je vidět u nástrojů od výrobce C při obrábění protvářeného materiálu. Nástroje C jsou o 40% dražší než nástroje A. I přesto je pro obrábění výhodnější použít nástroje C, protože minuta obrábění s nimi je 4x levnější. Navíc se sníží mezioperační časy, protože nástroje C není nutné tak často měnit.

U materiálu odlitého nejsou výsledky tak rozdílné, protože materiál samotný není tak náročný na obrábění jako materiál protvářený. I přesto se jeví nástroje D jako nejlepší varianta, i když jejich cena je vyšší v porovnání s ostatními nástroji.

## 5. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá možností zlepšení obrábění superslitiny Nimonic 80A. V dnešní době je tato slitina hojně využívaná v oblastech plynových turbín, letectví, kosmonautice, ale i v běžném provozu, například v průmyslu automobilovém.

Jak z experimentů a analýz vyplývá, tak geometrie nástroje má na velikost řezných sil značný vliv. Rozdíly se více projevíly při obrábění materiálu protvářeného, který je hůře obrobitelný a rychleji otupuje nástroj. Proto pro případnou další analýzu by bylo dobré testovat jen materiál protvářený.

Pro obrábění niklových slitin je vhodné volit menší hodnoty úhlu hřbetu na obvodě a to v rozmezí 9°-11°. Velikost úhlu čela by měla být v rozmezí 10°-12°. Teorie, že menší úhel čela znamená větší řezné síly, se potvrdila hlavně při obrábění materiálu protvářeného. Materiál odlitý v základním stavu díky svým vlastnostem smazává vliv geometrie nástroje na řezné síly. Poloměr zaoblení řezné hrany byl při analýze vcelku zanedbatelný. Jeho vliv by se projevil tehdy, kdyby se nástroje lišily pouze v tomto parametru. Další analýza by proto byla více než užitečná.

Řezné síly jsou samozřejmě ovlivňovány i dalšími parametry, jako jsou například materiál nástroje, stav povrchu nástroje, úhel stoupání šroubovice a šířka fazety. Právě z tohoto důvodu některé srovnávací grafy neodpovídaly teorii.

Velkým problémem při obrábění niklových slitin je tvorba nárůstku. Toto lze pozorovat i u každého grafu řezné síly  $F_y$ . Pro zlepšení obrábění by bylo třeba se velmi výrazně zaměřit na tuto oblast.

Nevýhodou druhého testování bylo, že výrobce nástroje D nedodal nástroje včas a tak testování probíhalo s jiným nástrojem. Nástroj D byl pro obrábění odlitého materiálu nejlepší a tak by bylo zajímavé sledovat jeho chování při obrábění materiálu protvářeného.

Za proměnlivý parametr by se dalo považovat nestejně upnutí nástroje do dynamometru. Při testování bylo upínání a ustavení nástroje prováděno ručně. Zuby nástroje směřovaly do osy X na dynamometru. Tento problém by bylo třeba vyřešit formou přípravku, který by zajistil pokaždé naprosto stejné upnutí.

Další věci, na kterou by bylo vhodné se při dalším případném testování zaměřit, jsou řezné podmínky. Rozdíly ve velikosti řezných sil nejsou velké a tak by bylo vhodné řezné podmínky navýšit. Rozdíly by se pak zvětšily a analýza by byla snazší.

Z ekonomického hlediska není rozhodující pořizovací cena nástroje ale cena 1 minuty obrábění. Analýza ukázala, že nejdražší nástroj má nejnižší cenu 1 minuty obrábění jak při obrábění materiálu odlitého, tak materiálu provářeného. Celkovou cenu ovlivňuje také trvanlivost. Čím je větší, tím méně často se musí nástroj měnit. Tím se ušetří náklady na výměnu nástroje, sníží se mezioperační časy a časy na přípravu nástrojů.

Závěrem lze říci, že obrábění materiálu Nimonic 80A je velmi náročné a je proto nutné dále hledat přesné nastavení parametrů nástroje tak, aby se obrábění co nejvíce usnadnilo a zlevnilo.

## Seznam použité literatury

- [1] DONACHIE, M.J. a DONACHIE, S.J. SUPERALLOYS A Technical guide. second edition. ASM INTERNATIONAL, 2002. 438 s. ISBN 087170-749-7.
- [2] KUDRNA, Miloš. *Obrábění součástí ze slitiny Ni80TiAl*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie a průmyslový management“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2009. 65s.
- [3] WIKIPEDIE. Otevřená encyklopedie. <http://cs.wikipedia.org/wiki/>
- [4] SPECIALMETALS Nimonic alloy 80A.  
<http://www.specialmetals.com/documents/Nimonic%20alloy%2080A.pdf>
- [5] HOFMANN P.: Výukové materiály KTO
- [6] HUMÁR, Anton. Technologie I. Technologie obrábění - 1.část. Studijní opory pro magisterskou formu studia VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie 2003, 138 s.
- [7] Přednášky z předmětu STO a TO
- [8] Přednášky z předmětu EMO
- [9] Přednášky z předmětu DM
- [10] Staněk, Jiří, Němejc, Jiří, : Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací / 1. vyd.. Plzeň : 2005. ISBN 80-7043-363-9.
- [11] Forejt, Milan Píška, Miroslav, : Teorie obrábění, tváření a nástroje / Vyd. 1.. Brno : 2006. ISBN 80-214-2374-9.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Závislost zatížení na teplotě .....	14
Obr. 2 Součástky výfukového potrubí .....	15
Obr. 3 Proudový motor.....	15
Obr. 4 Parní turbína .....	16
Obr. 5 Obráběcí centrum MCV 750A.....	17
Obr. 6 Rotační dynamometr Kistler .....	18
Obr. 7 Dílenský mikroskop.....	18
Obr. 8 Tvrdoměr .....	19
Obr. 9 Optický přístroj InfiniteFocus .....	19
Obr. 10 Materiál po odlití .....	20
Obr. 11 Surový ingot Nimonic 80A .....	20
Obr. 12 Materiál protvářený .....	20
Obr. 13 Nástroje A .....	21
Obr. 14 Nástroje B .....	21
Obr. 15 Nástroje C .....	22
Obr. 16 Nástroje D .....	22
Obr. 17 Pracovní prostor pro první fázi testování .....	23
Obr. 18 Pracovní prostor pro druhou fázi testování .....	23
Obr. 19 Materiál po odlití .....	24
Obr. 20 Vzorky z protvářeného materiálu .....	24
Obr. 21 Protvářený materiál.....	24
Obr. 22 Řezné síly na dynamomteru .....	25
Obr. 23 Břit nástroje B .....	26
Obr. 24 Břit nástroje C .....	27
Obr. 25 Břit nástroje D.....	29
Obr. 26 Břit nástroje A.....	31

## Seznam grafů

Graf 1 Průběh sil nástroje B1 .....	26
Graf 2 Průběh sil nástroje B2 .....	27
Graf 3 Průběh sil nástroje C1 .....	28
Graf 4 Průběh sil nástroje C2 .....	28
Graf 5 Průběh sil nástroje D1.....	29
Graf 6 Průběh sil nástroje D2.....	30
Graf 7 Průběh sil nástroje A1.....	31
Graf 8 Průběh sil nástroje A2.....	32
Graf 9 Průběh sil nástroje A3.....	32
Graf 10 Průběh sil nástroje A4.....	33
Graf 11 Průběh sil nástroje B3.....	33
Graf 12 Průběh sil nástroje B4.....	34
Graf 13 Průběh sil nástroje C1.....	35
Graf 14 Průběh sil nástroje C2.....	35
Graf 15 Průběh sil nástroje C3.....	36
Graf 16 Porovnání Fx: B2-C1.....	37
Graf 17 Porovnání Fy: B2-C1.....	37
Graf 18 Porovnání Fx: D1-C1 .....	38
Graf 19 Porovnání Fy: D1-C1 .....	38
Graf 20 Porovnání Fx: B2-D1 .....	39
Graf 21 Porovnání Fy: B2-D1 .....	39
Graf 22 Porovnání Fx: B2-C1.....	40
Graf 23 Porovnání Fx: D1-C1 .....	40
Graf 24 Porovnání Fx: B2-D1 .....	41
Graf 25 Porovnání Fx: B2-C1.....	41
Graf 26 Porovnání Fx: D1-C1 .....	42
Graf 27 Porovnání Fx: B2-D1 .....	42
Graf 28 Porovnání Fx: B4-C2.....	43
Graf 29 Porovnání Fy: B4-C2.....	43

Graf 30 Porovnání Fx: A3-B3 .....	44
Graf 31 Porovnání Fy: A3-B3 .....	44
Graf 32 Porovnání Fx: A3-C3.....	45
Graf 33 Porovnání Fy: A3-C3 .....	45
Graf 34 Porovnání Fx: B4-C2.....	46
Graf 35 Porovnání Fx: A3-B3 .....	46
Graf 36 Porovnání Fx: A3-C3.....	47
Graf 37 Porovnání Fx: B4-C2.....	47
Graf 38 Porovnání Fx: A3-B3 .....	48
Graf 39 Porovnání Fx: A3-C3.....	48
Graf 40 Sumární graf řezné síly Fx.....	49
Graf 41 Sumární graf řezné síly Fy.....	50
Graf 42 Sumární graf řezné síly Fx.....	51
Graf 43 Sumární graf řezné síly Fy.....	52
Graf 44 Trvanlivost nástrojů - odlitý materiál .....	55
Graf 45 Cena 1 minuty obrábění – materiál odlitý.....	55
Graf 46 Trvanlivost nástrojů - protvářený materiál.....	56
Graf 47 Cena 1 minuty obrábění - materiál protvářený.....	56

## Seznam tabulek

Tab.1 Typy niklových slitin.....	11
Tab.2 Složení slitiny Nimonic 80A.....	14
Tab.3 Složení slitiny Nimonic 80A po odlití .....	25
Tab.4 Geometrie nástroje B .....	26
Tab.5 Geometrie nástroje C .....	28
Tab.6 Geometrie nástroje D .....	29
Tab.7 Geometrie nástroje A .....	31
Tab.8 Hodnoty tvrdosti odlitého materiálu.....	53
Tab.9 Hodnoty tvrdosti protvářeného materiálu.....	54