

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Studijní specializace: Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků II.

Autor: Bc. Ondřej PEKÁREK
Vedoucí práce: doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Pekárek
Osobní číslo:	S19N0101P
Studijní program:	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Studijní obor:	Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Téma práce:	Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků II.
Zadávací katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky
2. Současný stav obrábění vybraných žárových nástřiků
3. Řezné síly při obrábění lineární řeznou hranou
4. Návrh a realizace experimentu obrábění lineární řeznou hranou se zaměřením na řezné síly
5. Technicko – ekonomické hodnocení
6. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
2. CIRP ANNALS - Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
3. Spektrum, MM Průmyslové dostupné z www.mmspektrum.com
4. SANDVIK Coromant, Sandviken: Technická příručka obrábění, dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/>

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Ing. Ondřej Maršálek**
Regionální technologický institut
Datum zadání diplomové práce: **21. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 21. října 2021

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

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za cenné rady a dobrý přístup při tvorbě této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřeji Maršálkovi za velice nápomocné poradenství během tvorby této diplomové práce. Stejně tak velké díky patří i všem pracovníkům ZČU, kteří mi pomáhali se získáváním informací a dat, v neposlední řadě mému kolegovi a dlouholetému kamarádovi Bc. Tomášovi Malému.

V neposlední řadě bych rád poděkoval celé mé rodině, všem mým přátelům, spolužákům a kamarádům, dále i mé přítelkyni za podporu během studia, trpělivost a vytvoření zázemí.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Pekárek	Jméno Ondřej		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan		
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Progressivní technologie obrábění žárových nástřiků II.			

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	72	TEXTOVÁ ČÁST	65	GRAFICKÁ ČÁST	7
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Tato diplomová práce se zabývá obráběním žárového nástřiku NiCrBSi za využití lineární řezné hrany se zaměřením na řezné síly. Dále je zpracován současný stav obrábění žárových nástřiků. Na úvod je zpracována teoretická část. Následuje návrh a realizace experimentu. Poté je provedeno vyhodnocení experimentu. Na konci je provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení.
KLÍČOVÁ SLOVA	Žárové nástřiky, NiCrBSi, soustružení, lineární řezná hrana, řezné síly, drsnost, úhel naklopení ostří, řezné podmínky

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Pekárek	Name Ondřej	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technologies and quality assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Progressive technology of thermal spraying machining II		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of machining	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	72	TEXT PART	65	GRAPHICAL PART	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with the NiCrBSi hot spray machining using a linear cutting edge with a focus on cutting forces. Furthermore, the current state of hot spray machining is elaborated. At the beginning, there is a theoretical part. This is followed by the design and implementation of the experiment. Then, the evaluation of the experiment is carried out. Finally, a technical-economic evaluation is carried out.
KEY WORDS	Thermal spraying, NiCrBSi, turning, linear cutting edge, cutting forces, roughness, cutting edge tilt angle, cutting conditions.

Obsah

Poděkování	5
Přehled použitých zkratk	10
Seznam použitých symbolů.....	11
Seznam obrázků:	12
Seznam tabulek	13
Seznam grafů.....	13
1. Úvod	14
1.1 Cíle diplomové práce	14
Teoretická část.....	15
2. Žárové nástřiky	15
2.1 Hlavní procesní parametry.....	16
2.2 Základní rozdělení žárových nástřiků	17
2.2.1 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)	17
2.3 Žárové nástřiky na bázi Ni.....	19
2.4 Žárový nástřik NiCrBSi.....	19
3. Aktuální stav obrábění žárových nástřiků	21
3.1 Broušení.....	21
3.2 Soustružení	21
3.2.1 Řezné podmínky	22
3.3. Soustružení lineární řeznou hranou	22
4. Řezné síly	25
4.1 Řezné síly při soustružení.....	26
4.2 Měření řezných sil při soustružení.....	27
4.2.1 Měření řezných sil nepřímou metodou.....	27
4.2.2 Měření řezných sil přímou metodou	28
4.3 Rozdělení dynamometrů.....	29
4.3.1 Elektrické dynamometry	29
4.3.2 Piezoelektrické dynamometry	29
4.3.2.1 Podélný jev	30
4.3.2.2 Střížný jev	30
4.3.3 Piezoelektrické materiály	31
4.3.4 Třísložkové dynamometry.....	31
5 Princip kalkulace	32
Praktická část.....	34
6 Návrh experimentu	34

6.1	Popis a plán experimentu.....	34
6.2	Soustava S-N-O-P.....	35
6.2.1	Stroj.....	35
6.2.2	Nástroj.....	37
6.2.3	Obrobek.....	38
6.3	Měřicí zařízení.....	38
6.3.1	Měření řezných sil.....	38
6.3.1.1	Zesilovač KISTLER.....	39
6.3.1.2	Digitalizační karta.....	39
6.3.1.3	Piezoelektrický dynamometr KISTLER.....	40
7.	Vyhodnocení experimentu.....	42
7.1	Pre-experiment.....	43
7.2	Statistické vyhodnocení.....	44
7.2.1	Průběhy složek sil při hrubování.....	44
7.2.1.1	Vyhodnocení složky F_c	45
7.2.1.2	Vyhodnocení složky F_p	46
7.2.1.3	Vyhodnocení složky F_f	47
7.2.2	Průběhy složek sil při dokončování.....	48
7.2.2.1	Vyhodnocení složky F_c	48
7.2.2.2	Vyhodnocení složky F_p	50
7.2.2.3	Vyhodnocení složky F_f	52
7.2.3	Shrnutí vyhodnocení dokončování.....	53
7.2.4	Vyhodnocení drsnosti povrchu.....	54
7.2.5	Závislost povrchu na řezných silách.....	57
7.	Technicko-ekonomické vyhodnocení experimentu.....	60
8.	Závěr.....	63
	Seznam použité literatury.....	64
	Příloha č.1.....	66
	Příloha č.2.....	68
	Příloha č.3.....	70

Přehled použitých zkratk

NiCrBSi	Nikl-Chrom-Bor-Křemík
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel
CBN	Cubic boron nitride
S-N-O-P	Stroj-Nástroj-Obrobek-Přípravek
VBD	Vyměnitelná břitová destička
spol.	Společně/společnost
s.r.o.	S ručením omezeným
Atd.	A tak dále
Např.	Například
Obr.	Obrázek
CNC	Computer Numerical Control
SiO ₂	oxid křemičitý
PEM	piezoelektrické materiály
ZČU	Západočeská univerzita
MHz	Megahertz
PC	Personal computer
Q25	Kvartil 25
Q75	Kvartil 75
N	Newton
č.	číslo
NN	Náklady na nástroje
PMa	Přímý materiál
ZN	Zpracovací náklady
VNV	Vlastní náklady výroby
Kč	Koruna česká
m	metr
Ks	kusy/kus
cm ²	centimetr čtvereční
μm	mikrometr

Seznam použitých symbolů

λ_s	[°]	úhel naklopení ostří
F_c	[N]	hlavní složka řezné síly
F_p	[N]	radiální složka řezné síly
F_f	[N]	axiální složka řezné síly
a_p	[mm]	hloubka řezu
v_c	[m/min]	řezná rychlost
$R_{p0,2}$	[MPa]	mez kluzu
Z	[%]	kontrakce
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A_5	[%]	tažnost
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_z	[μm]	výška nerovnosti

Seznam obrázků:

Obrázek 1:Princip tvorby žárových nástřiků [2].....	15
Obrázek 2:Schéma procesu tvorby žárového nástřiku [2]	16
Obrázek 3:Příklad trajektorie letících částic [2]	16
Obrázek 4:Základní rozdělení technologií žárových nástřiků (4).....	17
Obrázek 5:Schéma HVOF nástřiku (6).....	18
Obrázek 6:Charakteristiky povlaků HVOF a standardních povlaků plazmového procesu (5).....	18
Obrázek 7:Složení nástřiku NiCrBSi (12)	20
Obrázek 8:Axiální (podélné) obvodové broušení (15)	21
Obrázek 9:Základní pohyby při podélném soustružení (17).....	22
Obrázek 10:Soustružení bezšpičkovým nástrojem (19)	23
Obrázek 11:Přímé řezání (a) a inverzní řezání (b) (18)	24
Obrázek 12:Ovlivnění řezných sil úhlem náklonu ostří λ_s (20).....	25
Obrázek 13:Vliv řezných podmínek na řezné síly (23)	26
Obrázek 14:Řezné síly při soustružení (21).....	27
Obrázek 15:Závislost velikosti el. náboje na deformaci krystalu (24).	29
Obrázek 16:Krystalové disky v sérii (24)	30
Obrázek 17:Podélný a příčný jev při zatížení (26)	31
Obrázek 18:3- složkový a 4- složkový piezoelektrický dynamometr (28)	32
Obrázek 19:Typový kalkulační vzorec	33
Obrázek 20:Stroj Emco MAXXTURN 25na ZČU [27]	36
Obrázek 21:Nástroj bez VBD	37
Obrázek 22:Detail destičky (vlevo) a krabička s VBD (vpravo).....	37
Obrázek 23:Výkres obrobku	38
Obrázek 24:Osmikanálový zesilovač KISTLER (26).....	39
Obrázek 25:Digitalizační karta [24].....	40
Obrázek 26:Měřicí soustava pro řezné síly od firmy KISTLER (29).....	40
Obrázek 27:Dynamometr s nástrojem s VBD	41
Obrázek 28:Zobrazení rozdílnosti souřadnicových systémů dynamometru a nástroje (30).....	41
Obrázek 29:Ukázka nastavení Hardware DynoWare	42
Obrázek 30:Ukázka měření v DynoWare	43
Obrázek 31:Obrobený zkušební vzorek.....	44
Obrázek 32:Výsledek měření drsnosti pro pokus 1 v místě 1	55
Obrázek 33:Výsledek měření drsnosti pro pokus 6 v místě 1	55
Obrázek 34:Snímek pokusu 1 po obrobení.....	56
Obrázek 35:Snímek pokusu 6 po obrobení.....	57
Obrázek 36:Kalkulační vzorec experimentu.....	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Plán experimentu-řezné podmínky	35
Tabulka 2: parametry stroje Emco MAXXTURN 25 - pokračuje na druhou stranu	36
Tabulka 3: Chemické složení základního materiálu [11]	38
Tabulka 4: Parametry materiálu po tahové zkoušce (12)	38
Tabulka 5: Základní parametry zesilovače KISTLER (26)	39
Tabulka 6: Hodnoty zvolené pro pre-experiment	43
Tabulka 7: Průměrné hodnoty sil a jejich pořadí	53
Tabulka 8: Průměrné hodnoty drsností a jejich pořadí	54
Tabulka 9: Sloučené pořadí sil a drsností	57

Seznam grafů

Graf 1: Výsledný průběh F_c pro pokusy 1-6 při hrubování	45
Graf 2: Výsledný průběh F_c pro pokusy 7-12 při hrubování	45
Graf 3: Výsledný průběh F_p pro pokusy 1-6 při hrubování	46
Graf 4: Výsledný průběh F_p pro pokusy 7-12 při hrubování	46
Graf 5: Výsledný průběh F_f pro pokusy 1-6 při hrubování	47
Graf 6: Výsledný průběh F_f pro pokusy 7-12 při hrubování	47
Graf 7: Výsledný průběh F_c při dokončování	48
Graf 8: Výsledný průběh F_c pro $\lambda_s = 55^\circ$ při dokončování	49
Graf 9: Výsledný průběh F_c pro $\lambda_s = 60^\circ$ při dokončování	50
Graf 10: Výsledný průběh F_p při dokončování	51
Graf 11: Výsledný průběh F_p pro pokusy 1 a 3 při dokončování	51
Graf 12: Výsledný průběh F_p pro pokusy 2 a 4 při dokončování	52
Graf 13: Výsledný průběh F_f při dokončování	53
Graf 14: Závislost R_a na F_c , F_p a F_f	58
Graf 15: Závislost R_z na F_c , F_p a F_f	59

1. Úvod

Na spoustu výrobků v odvětví strojního průmyslu jsou kladeny velmi přísné nároky, zejména na jejich trvanlivost (životnost), vylepšení funkčních vlastností, ekonomickou stránku a v neposlední řadě i stránku ekologickou. Všechny tyto nároky se musí brát v potaz při volbě technologie a značně ovlivňují výrobu. Vzhledem k veliké konkurenci by každá firma v odvětví povrchových úprav a jejich zpracování měla disponovat výše zmíněnými aspekty a v co nejvyšší míře je uplatnit v praxi.

Žárové nástřiky se díky svým vlastnostem dostaly do podvědomí firem a v dnešní době se jich hojně využívá, nejvíce v leteckém a automobilovém průmyslu za účelem zvýšení životnosti a spolehlivosti součástí a celkovému zlepšení mechanických vlastností. Standardní dokončovací metodou pro žárové nástřiky je broušení, avšak díky progresivním technologiím, možnostem strojů, neustálým vývojem nástrojů a jejich geometrii, dochází k jeho nahrazování.

1.1 Cíle diplomové práce

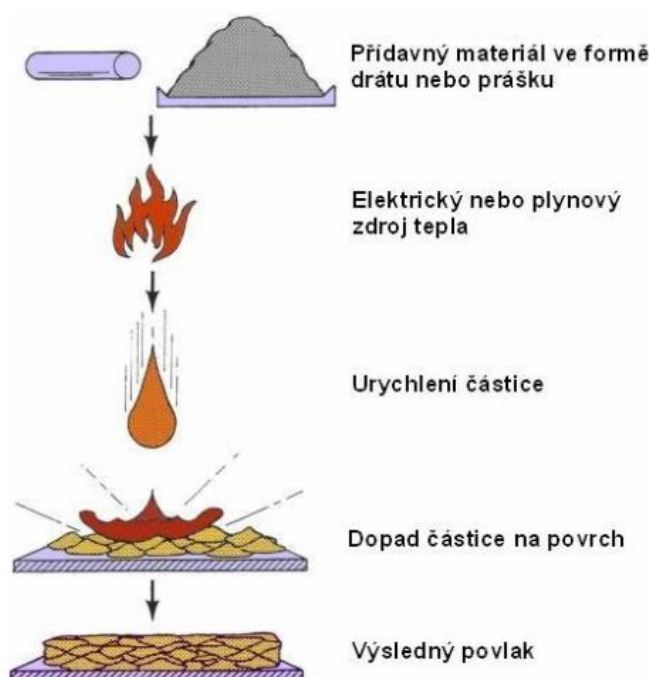
Tato diplomová práce se zabývá problematikou žárových nástřiků na bázi niklu, konkrétně nástřiky NiCrBSi nanášené metodou HVOF (vysokorychlostní nástřik plamenem), a jejich současným stavem. Dále se zabývá řeznými silami, které při obrábění vznikají, v tomto případě se zaměřením na obrábění lineární řeznou hranou. V experimentální části je vypracován návrh a realizace experimentu obrábění lineární řeznou hranou se zaměřením na jednotlivé složky řezné síly. Výsledné zpracování sil je do největší míry prozkoumáno, vyhodnoceno a zpracováno pro výstup. Dále je zpracována drsnost obrobeneho povrchu v závislosti na řezných silách. V neposlední řadě je provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení experimentu.

Teoretická část

2. Žárové nástřiky

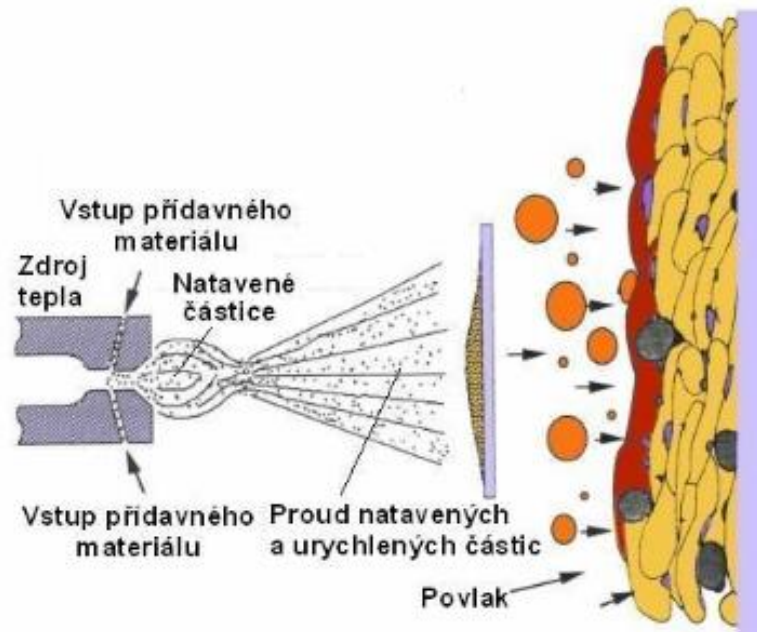
Žárové stříkání je skupina procesů, při nichž se na připravený podklad nanášejí jemně rozdělené kovové a nekovové materiály v roztaveném nebo nataveném stavu. Zdrojem tepla je spalovací plamen, plazmový proud nebo oblouk vznikající mezi dvěma spotřebními dráty. Žárový nástřik se provádí pomocí tepelného paprsku. Při tomto procesu lze substrát udržovat na relativně nízké teplotě pomocí specifických chladících zařízení [1].

Většina technologií, které se využívají na tvorbu povlaků, jsou založené na depozici jednotlivých atomů nebo iontů. Při žárovém stříkání však dopadají na povrch celé roztavené nebo natavené částice daného materiálu. Tyto částice se pak zachytávají na povrchu, který se nachází ve dráze roztavených částic [2].



Obrázek 1: Princip tvorby žárových nástřiků [2]

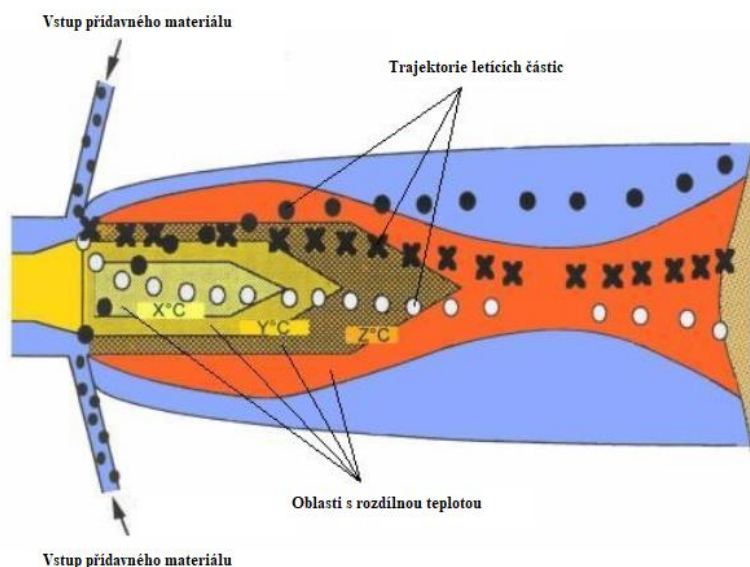
U některých druhů kovů (a jejich slitin) nebo keramik nedochází k tzv. rozpadu pod bodem tání. Právě z těchto druhů je technologie žárových nástřiků schopna vytvářet povlaky, a to prakticky na všechny druhy podkladových materiálů, kam je nástřik aplikován. Pojem, který to umožňuje, se nazývá mechanické zakotvení povlaku, který přilne na zdrsňený povrch substrátu. Technologický proces zaručuje teploty nanášené součásti hluboko pod teplotou fázově-strukturních přeměn (cca 80-120 °C), a to také brání nežádoucím deformacím součásti [2].



Obrázek 2: Schéma procesu tvorby žárového nástřiku [2]

2.1 Hlavní procesní parametry

Trajektorie, rychlost a teplota nastříkaných částic závisí na vlastnostech plazmatu, podmínkách vstřikování materiálu a velikosti vstupní suroviny. Na podkladu se částice rozprostřou a výsledný tvar závisí na teplotě, směru a rychlosti částic. Tání a opětovné tuhnutí substrátu silně závisí na teplotě dopadající kapky, teplotě substrátu a jeho termo-fyzikálních vlastnostech. V dalším kroku dochází k nukleaci a tuhnutí částic. Výsledná mikrostruktura závisí na teplotním gradientu a rychlosti chlazení. Superpozice mnoha částic vede k vytvoření kompletního povlaku s definovanými vlastnostmi. Zbytková napětí uvnitř povlaku jsou ovlivněna tepelně-mechanickými účinky během ohřevu a ochlazování povlaku.

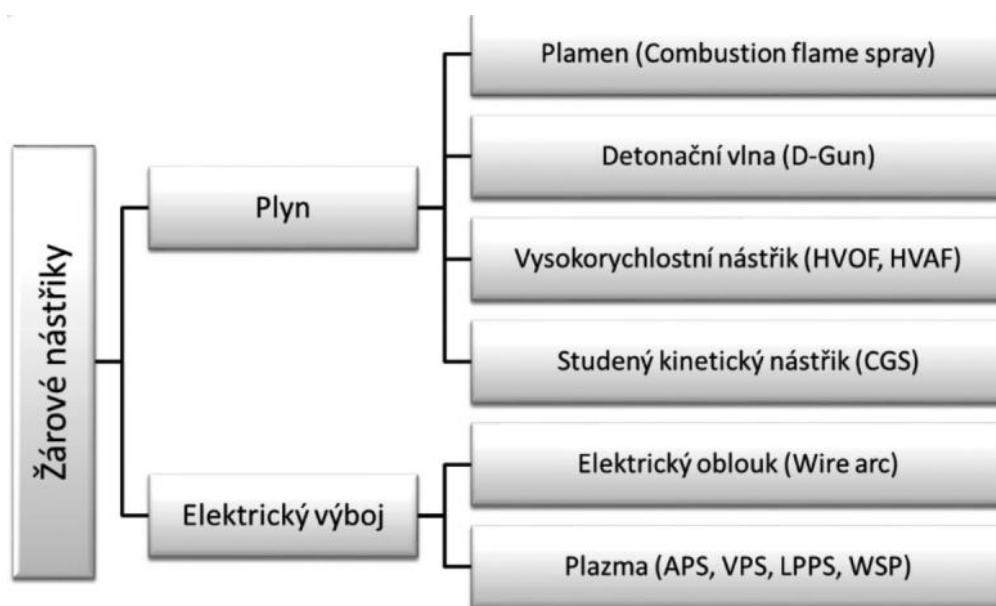


Obrázek 3: Příklad trajektorie letících částic [2]

U plazmatických a spalovacích systémů hraje značnou roli čas, po který se nanášená částice přídatného materiálu nachází v plameni, jehož teplota překračuje teplotu tavení částice. Rozdíl doby lze určit jak u jednotlivých procesů, tak i u jednoho procesu v závislosti na trajektorii konkrétní částice [3].

2.2 Základní rozdělení žárových nástřiků

V zásadě lze rozčlenit žárové nástřiky na dva druhy, a to na spalovací za účasti plynu, nebo na elektrické využívající elektrický výboj. V následující kapitole jsou představeny oba typy a jejich zástupci. Nejbližší popsána je metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem (HVOF). Právě tato metoda je aplikována na součást v praktické části této práce.



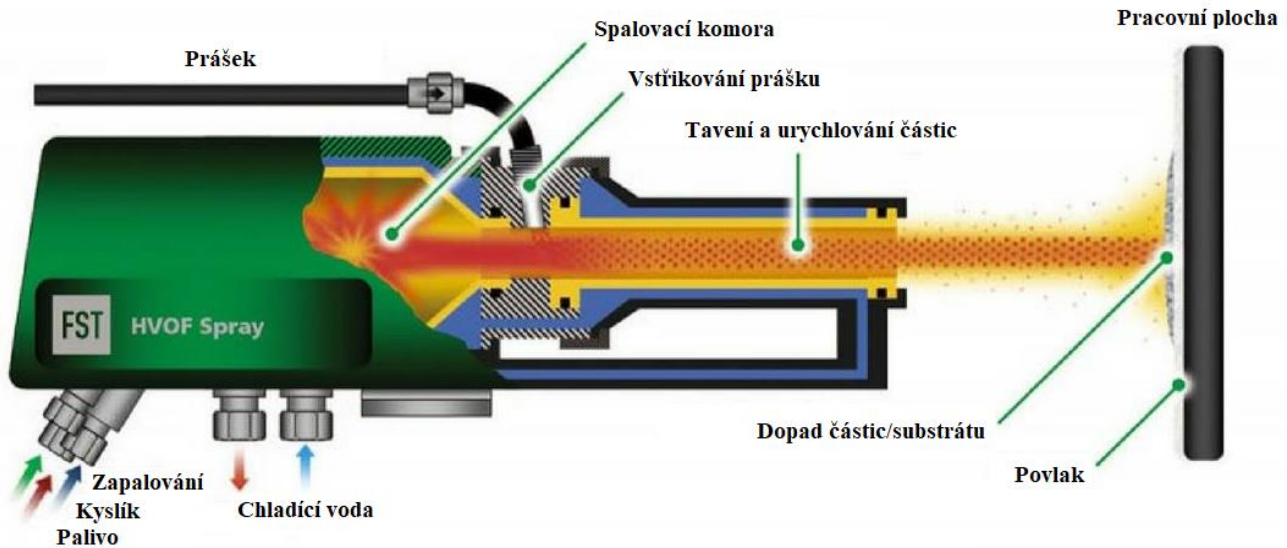
Obrázek 4: Základní rozdělení technologií žárových nástřiků [4]

2.2.1 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

Z procesů tepelného stříkání se v mnoha průmyslových odvětvích, díky své flexibilitě a nákladové efektivitě, rozšířilo vysokorychlostní kyslíko-palivové stříkání (HVOF).

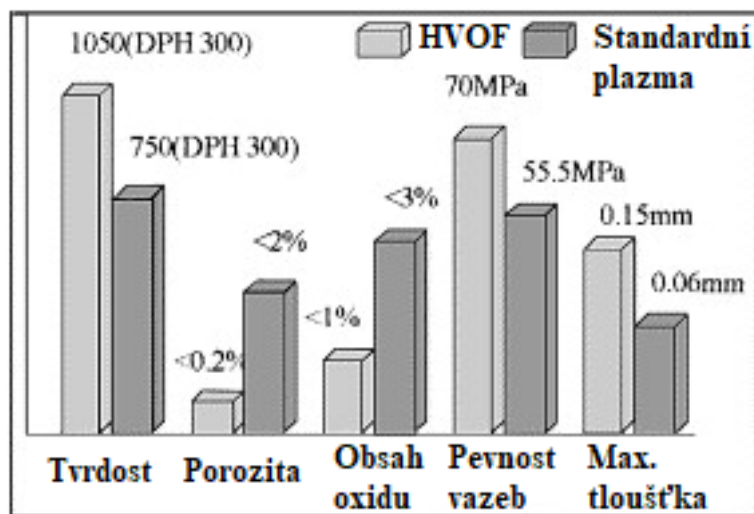
Vysokorychlostní kyslíko-palivový proces je založen na kombinaci přenosu tepelné a kinetické energie, tj. tavení a urychlování částic prášku, za účelem nanášení požadovaných povlaků. Práškové částice požadovaného nanášeného materiálu se axiálně přivádějí do proudu horkého plynu, poté do stříkací pistole, roztaví se a jsou poháněny k povrchu obrobku, který má být opatřen nátěrem. Jako palivové plyny se používají plyny ve složení uhlík-vodík (propan, propylen, acetylen) nebo čistý vodík a teplota plynu závisí na volbě palivového plynu.

Pistole se skládá ze tří částí: směšovací zóny, spalovací zóny a trysky. Během provozu je tělo pistole chlazeno vzduchem nebo vodou. Palivo a kyslík se mísí pomocí sousých trysek a jsou vedeny do spalovací zóny, kde pilotní plamen nebo externí zapalovač iniciuje spalování. Během hoření se plyn rozpíná v trysce, kde se urychluje. Prášek je urychlován nosným plynem a vstřikován do plamene. Prášek má stejný směr proudění jako okolní expandovaný plyn. Při vstupu do spalovací zóny tryskou se částice prášku zahřívají a dále urychlují [5].



Obrázek 5: Schéma HVOF nástřiku [6]

Díky vysoké rychlosti a velkému nárazu nastříkaného prášku je vytvořený povlak méně porézní a má vyšší pevnost spoje než povlak vytvořený jinými metodami. Na obrázku (Obrázek 5) jsou uvedeny charakteristiky povlaků HVOF ve srovnání s povlaky vyrobenými standardním plazmovým nástřikem [5].



Obrázek 6: Charakteristiky povlaků HVOF a standardních povlaků plazmového procesu [5]

Tepelně stříkané součásti HVOF obsahují zbytková napětí, která vznikají v důsledku smršťování během chlazení a tuhnutí. Velikost těchto napětí se liší v závislosti na procesních parametrech použitých při stříkání povlaku. Povlakovaný materiál praskne, pokud velikost jeho tahových zbytkových napětí překročí jeho adhezni pevnost k podkladu. Metody, které se obecně používají ke snížení zbytkových napětí v povlacích, zahrnují: rozšíření substrátu před nástřikem přehřátím, výběr povlakového materiálu s vlastnostmi odpovídajícími substrátu a makrohrobování povrchu substrátu [7].

2.3 Žárové nástřiky na bázi Ni

Slitiny niklu se nejčastěji používají v náročných průmyslových odvětvích, jako je letectví, energetika, petrochemie a biomedicína. Tyto vysoce technické slitiny nabízejí jedinečnou kombinaci tepelné odolnosti, odolnosti proti korozi, houževnatosti, vysoké provozní teploty a poměru pevnosti a hmotnosti. Jsou označovány jako "obtížně obrobitelné materiály", protože mají nízký stupeň obrobitelnosti. Obtížně obrobitelné jsou kvůli vlastnostem, jako je nízká tepelná vodivost, vysoká pevnost při zvýšených teplotách a vysoká chemická reaktivita. Obrábění slitin na bázi niklu způsobuje problémy s integritou povrchu a výběrem materiálů řezných nástrojů, které jsou pro výrobce vždy výzvou [8].

Pro lepší výkon je rozhodující výběr chladicí kapaliny a správných podmínek pro obrábění. Problémy s běžnou chladicí kapalinou spočívají v selhání mazání při vyšším úběru kovu a dále způsobují znečištění životního prostředí. Teplo vznikající v řezné zóně může zkrátit životnost nástroje, což vede k rozměrové nepřesnosti [9].

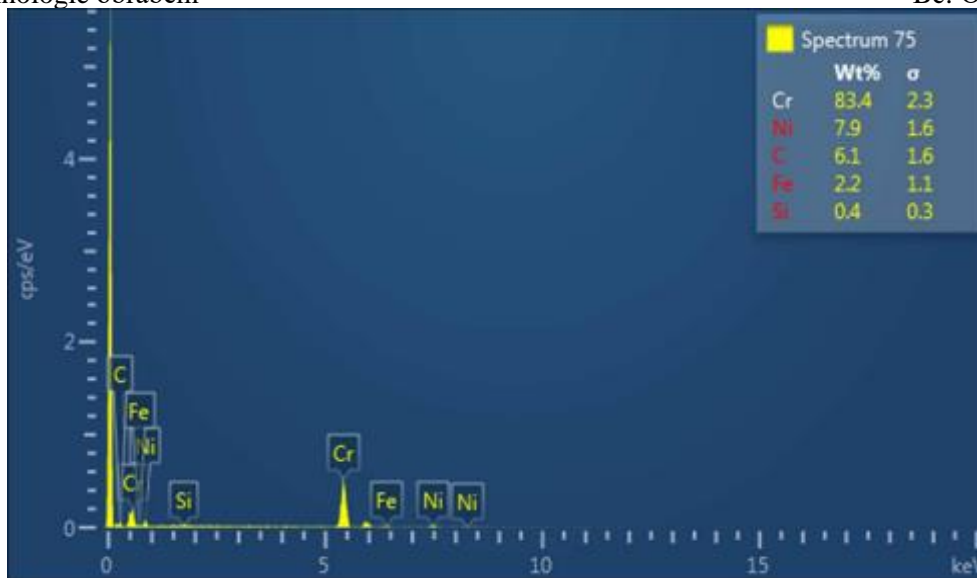
Obrobitelnost slitin na bázi niklu je vzhledem k jejich metalurgické povaze špatná. Krystalická struktura materiálu je austenitická a podobně jako u nerezové oceli dochází při obrábění k rychlému zpevnění. Toto zpevnění snižuje obrobitelnost pro další obráběcí operace a někdy může způsobit deformace povrchu obrobku. Přítomnost tvrdých fází, jako jsou karbidy, nitridy, oxidy, křemičitany, dále sklon ke spékání s materiálem nástroje a velké množství tepla vznikajícího při obrábění jsou dalšími příčinami špatné obrobitelnosti. Niklové slitiny mají navíc nízkou tepelnou difuzivitu a teploty v oblasti řezu jsou vysoké. Za účelem zlepšení obrobitelnosti slitin na bázi Niklu bylo již v minulosti provedeno několik výzkumných akcí, konkrétně použití nových nástrojových materiálů, zlepšení povlaků, optimalizace geometrie nástroje nebo nekonvenční obráběcí postupy [10].

Nejběžnějšími nástrojovými materiály pro obrábění slitin na bázi niklu jsou povlakované karbidy, CBN a keramika vyztužená whiskery. Srovnání keramických nástrojů a nástrojů z CBN pro vysokorychlostní obrábění slitin na bázi niklu provedli Coelho a spol. v roce 2004 [11].

2.4 Žárový nástřik NiCrBSi

Slitina na bázi Niklu, která je použita pro tuto diplomovou práci je slitina NiCrBSi (nikl-chróm-bór-křemík). Povlaky NiCrBSi byly vyvinuty pro aplikace vyžadující vynikající odolnost proti opotřebení a korozi při provozních teplotách až 850 °C. V současné době představuje vysokoteplotní koroze závažný problém v oblasti konstrukce energetických zařízení. V "boji" proti vysokoteplotní korozi se používá několik různých opatření. Lze však konstatovat, že většina z nich buď vysokoteplotní korozi zabraňuje, nebo ji omezuje pouze částečně a dočasně. Aplikace ochranných povlaků vytvořených technologií HVOF se proto jeví jako jedna z nejúčinnějších možností ochrany součástí před tímto napadením. V minulosti bylo provedeno mnoho výzkumných studií, které se zabývaly povlaky NiCrBSi vytvořenými technikou HVOF. Většina z nich se zaměřuje na studium mikrostruktury NiCrBSi, tvrdosti podle Vickerse, tření a opotřebení, jako tomu bylo např. Planche a spol [12] [13].

Pro každou slitinu je hodnota jednotlivých prvků rozdílná podle toho, jaké vlastnosti jsou od slitiny vyžadovány. Konkrétní složení slitiny NiCrBSi použité v této práci lze vidět na obrázku níže (Obrázek 7) [12]. Konkrétní soustava S-N-O-P je popsána v praktické části.



Obrázek 7: Složení nástřiku NiCrBSi [12]

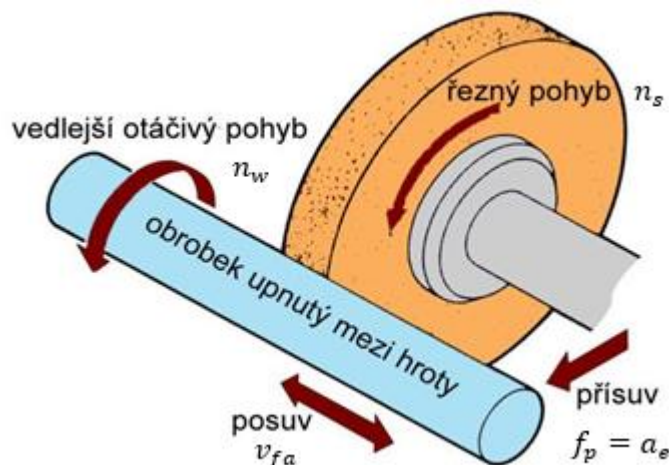
Největší podíl ve slitině má Chrom s 83,4 procenty. Další je zastoupení prvků Nikl 7,9 %, Uhlík 6,1 %, železo 2,2 % a nejmenší podíl má Křemík s obsahem 0,4 %.

3. Aktuální stav obrábění žárových nástřiků

V dnešní době se k obrábění žárových nástřiků nanesených na válcovité součásti využívá nejčastěji operací soustružení a broušení. Tyto dvě technologie tvoří požadovaný tvar obrobku s danými rozměry a tolerancemi, potřebnou drsností a jakostí obrobené plochy. Materiál, který je takto obroben, odchází ve formě třísky, což je deformovaná vrstva odřezávaného materiálu z obrobku. V následující kapitole jsou zmíněny dvě metody. Broušení, které je popsáno v následující kapitole, avšak detailněji je rozebrána metoda soustružení, ke které je přidána kapitola se zaměřením na lineární řeznou hranu.

3.1 Broušení

Tradičně nepoužívanějším procesem obrábění pro dokončování materiálů s vysokou tvrdostí je broušení. Jedná se o obrábění s nedefinovanou geometrií břitu. Své uplatnění nachází nejčastěji při dokončovacích operacích za získáním co největší kvality obráběných povrchů. Jde o vytváření požadovaných rozměrů obráběných ploch za použití brusných kotoučů, tedy rotačních ploch. Kotouče jsou tvořeny drobnými zrny, která mají různé materiály, tvar a velikost. Zrna jsou mezi sebou spojena pojivem. Obrobek a kotouč se vzájemně pohybují podle toho, jakou metodou a jakou plochu kotouč obrábí. Níže na obrázku (Obrázek 8) je znázorněn příklad axiálního obvodového broušení, které se využívá při broušení válcových ploch. Upnutý obrobek vykonává točivý pohyb n_w okolo vlastní osy podle otáček stroje. Ve stejném směru se točí i brusný kotouč pohybem n_s . Posuv v ose může vykonávat, jak obrobek po vlastní ose, tak i kotouč, který kopíruje osu obrobku v_{fa} . Po každém přejezdu se změní hloubka broušené vrstvy $f_p = a_e$ [14].

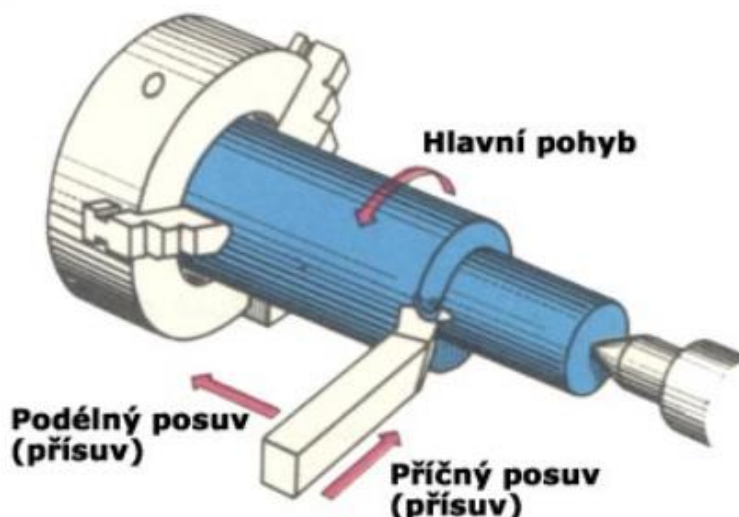


Obrázek 8: Axiální (podélné) obvodové broušení [15]

3.2 Soustružení

Typickou metodou u třískového obrábění je soustružení. Nejčastěji je využíváno k výrobě součástí, které mají rotační tvar, a to za pomoci různorodých jednobřitých nástrojů nesoucí název soustružnické nože. Ty mají podle požadavků definovanou geometrii. Díky jeho jednoduchosti a efektivitě je (s 30–40 % z celkového obrábění) nepoužívanější metodou obrábění. Velkou výhodou soustružení je fakt, že se při něm dají soustružit polotovary od několika tun, až po miligramové součásti [16]. Při soustružení má každá obráběná součást přídavek neboli přebytečnou vrstvu, která je odřezávána řeznou částí nástroje. Odřezávaný materiál odchází v podobě třísky. Pro správné oddělení třísky od obrobku musí být řezná část nástroje tvrdší než obrobek. Obráběním polotovaru vznikají

požadované rozměry, tvar součásti a kvalita povrchu. Každá metoda obrábění musí mít stanovené řezné podmínky, které by měly být dodržovány za účelem splnění požadavků na obrobek [16]. Pohyb obrobku je rotační okolo osy Z a je nazýván hlavní řezný pohyb v_c . Vedlejší pohyb v_f , který vykonává nástroj v často přímočarém směru, vykonává nástroj. Při tomto pohybu nůž postupně odřezává požadovanou třísku zvoleného průřezu [16].



Obrázek 9: Základní pohyby při podélném soustružení [17]

3.2.1 Řezné podmínky

Správná volba řezných podmínek je klíčová pro všechny typy obrábění. Lze jimi ovlivňovat výkon (množství obrobeného materiálu za jednotku času), velikost řezných sil, trvanlivost řezné části nástroje, strojní příkon, kvalitu obráběné plochy atd. Patří mezi ně řezná rychlost v_c , posuv f_{ot} a hloubka odřezávané vrstvy a_p . Za optimální řezné podmínky považujeme ty, které dosahují nejmenších výrobních nákladů, při požadované drsnosti a za co nejkratší výrobní čas.

Volba řezných podmínek je nejvíce ovlivněna následujícími faktory:

- materiálem obrobku
- materiálem nástroje
- geometrií řezné části
- výrobním strojem
- nároky na přesnost a drsnost

Při volbě řezných podmínek je zapotřebí dodržovat hledisko požadované přesnosti přiblížení se k optimálnímu stavu řezných podmínek a dále nesmí být opomenuty náklady vynaložené na tuto operaci. Tato hlediska jdou samozřejmě proti sobě, čím vyšší požadovaná přesnost, tedy přesnost určení řezných podmínek vede k větším nákladům a stejně tak i reverzně.

3.3. Soustružení lineární řeznou hranou

Dnešním trendem je zvyšování kvality obrábění a zvyšování produkce. Při tom by však měla být zachována požadovaná jakost povrchu obráběného materiálu. Tyto dva aspekty jsou klíčová kritéria pro současnou konstrukci a výrobu dílů, dále jsou neméně důležitá pro konkurenceschopnost firem.

Nástroje, které nemají řeznou špičku, vytvářejí relativně hladké povrchy při řezání rychlostí podstatně

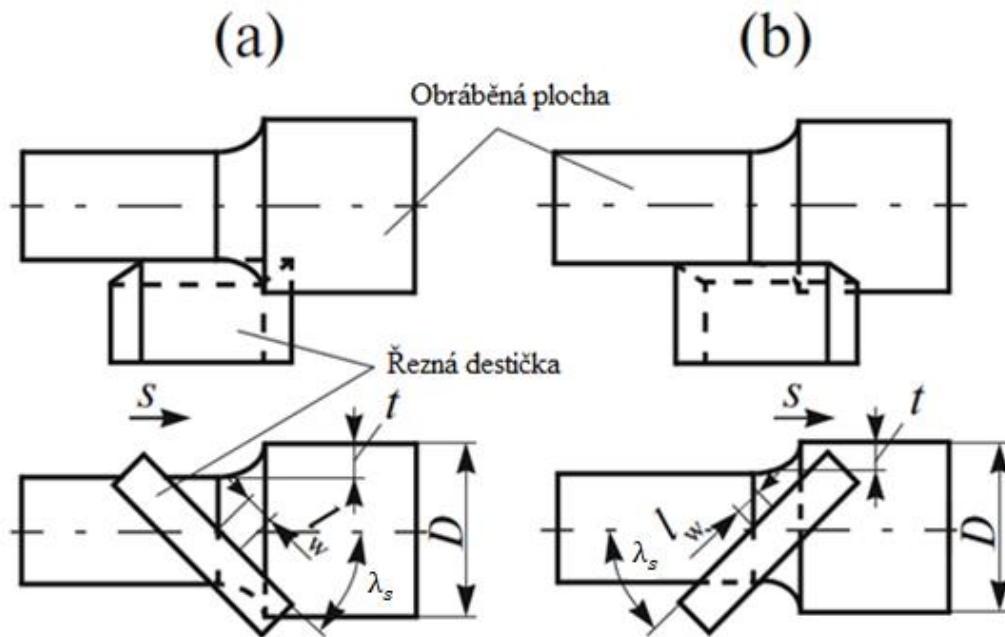
vyšší než u běžných nástrojů. Současně je průmyslové využití nástrojů, které nemají řeznou špičku, omezeno nedostatky, jakými jsou vibrace, které provázejí řezání a v případě tohoto experimentu i prostorem potřebným pro vyjmutí nástroje. Vibrace lze eliminovat volbou optimálních řezných podmínek, dále vhodnou volbou geometrie a konfigurací nástroje. To obnáší stanovení vlivu těchto faktorů na řezný proces a řezné síly. Teoretická analýza soustružení bezšpičkovými nástroji s lineárními a zakřivenými břity ukazuje, že základní parametry, které určují tvarování těmito nástroji, jsou následující: řezná rychlost, hloubka řezu, posuv nástroje a úhel naklopení ostří [18].

Nástroje, které nevyužívají k obrábění špičku nástroje, ale část nebo celou lineární řeznou hranu, se také dají přeložit z anglického tipless jako bezšpičkové. Toto slovo je použito v celé této práci právě pro nástroj s lineární řeznou hranou.



Obrázek 10: Soustružení bezšpičkovým nástrojem [19]

V roce 2016 se Filippov a spol. [18] zabývali experimentem, při němž byl zkoumán vliv výše zmíněných parametrů na síly při soustružení bezšpičkovými nástroji. Vliv řezné rychlosti při soustružení bezšpičkovými nástroji však nebyl doposud důkladně studován. Proto byl ve zprávě v experimentu předložen předběžný popis toho, jak řezná rychlost ovlivňuje složky řezné síly F_c (F_z) a F_p (F_y) u bezšpičkových nástrojů s lineárními břity, dále pak i se zakřivenými břity na zadní ploše. Při experimentu byly uvažovány dvě konfigurace řezání. Přímé řezání, při kterém je pracovní část nože l_w pod osou otáčení obrobku (Obrázek 11 a) a inverzní řezání, při kterém je pracovní část nože l_w nad osou otáčení obrobku (Obrázek 11 b) [18].



Obrázek 11: Přímé řezání (a) a inverzní řezání (b) [18]

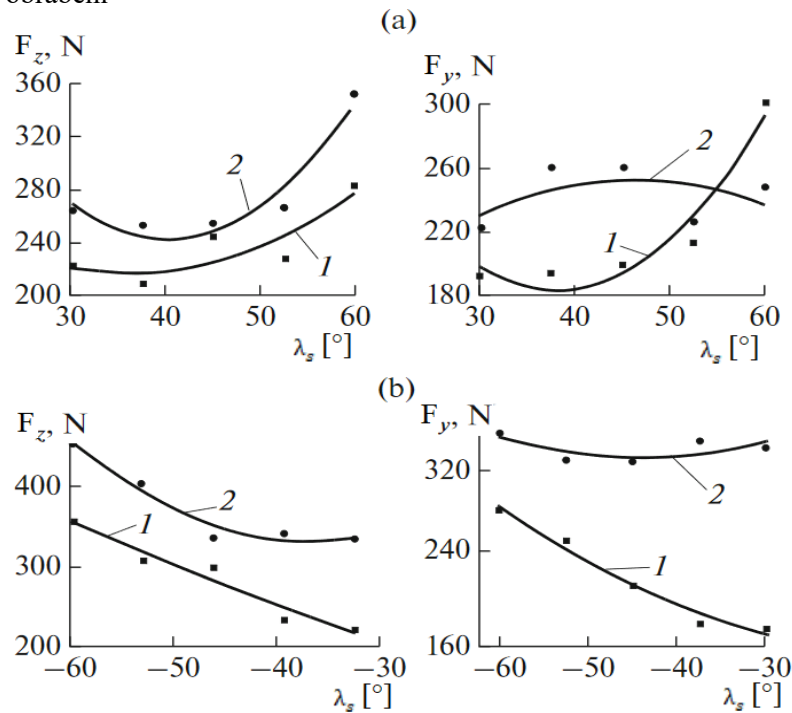
Z výše zmíněného výzkumu je vhodné použít bezšpičkové nože s lineární řeznou hranou pro menší koncentraci napětí na špičce nástroje. Pro obrábění se používá speciálních nástrojů. Při soustružení nástroji bez špiček se při určité kombinaci geometrie VBD, jejího upevnění v nástroji a řezných podmínek pro přímou (Obrázek 11a)) nebo inverzní (Obrázek 11 b)) konfiguraci pozoruje negativní úhel VBD. Podle požadavků se určí negativní úhel tak, aby nástroj pracoval bez omezení v daném rozsahu posuvu nástroje, hloubky řezu a sklonu nástroje pro daný průměr obrobku, a to na základě metody uvedené Filippovem a spol [20].

Filippov a spol. [20] zjistili, že při použití zakřivené řezné hrany je výsledná síla F_z přibližně o 35 % vyšší než u přímé řezné hrany.

Dalším velmi důležitým poznatkem je, že F_z je v případě přímého řezání o 10-30 % vyšší než při inverzním řezání [20].

Lineární složka F_y se zvyšuje s nárustem λ_s (úhel sklonu ostří), a to při obou typech řezání. To je s největší pravděpodobností způsobeno změnou parametrů odřezávané vrstvy, konkrétně její tloušťkou. Zároveň podíl F_y při různých řezných podmínkách není obecně větší, než 30–40 N [20].

Obrázek níže (Obrázek 12) je rozdělen na dvě části: a) pro přímé řezání a b) pro inverzní řezání. Pro ukázkou je dále každý z grafů rozdělen na větev 1) pro přímé řezné hrany a větev 2) pro zakřivené řezné hrany.



Obrázek 12: Ovlivnění řezných sil úhlem náklonu ostří λ_s [20]

4. Řezné síly

Řezné síly limitují celkovou obrobiteľnosť obrobku a mají dopad na celkovou spotřebu energie během jakéhokoli typu obrábění. Důležitou roli hraje hospodárnost procesu. Ve své podstatě jsou požadovány tak velké řezné síly, aby se docílilo požadované kvality povrchu, ale zároveň nedošlo ke ztrátě tuhosti S-N-O-P a poškození jednoho z prvků soustavy [21].

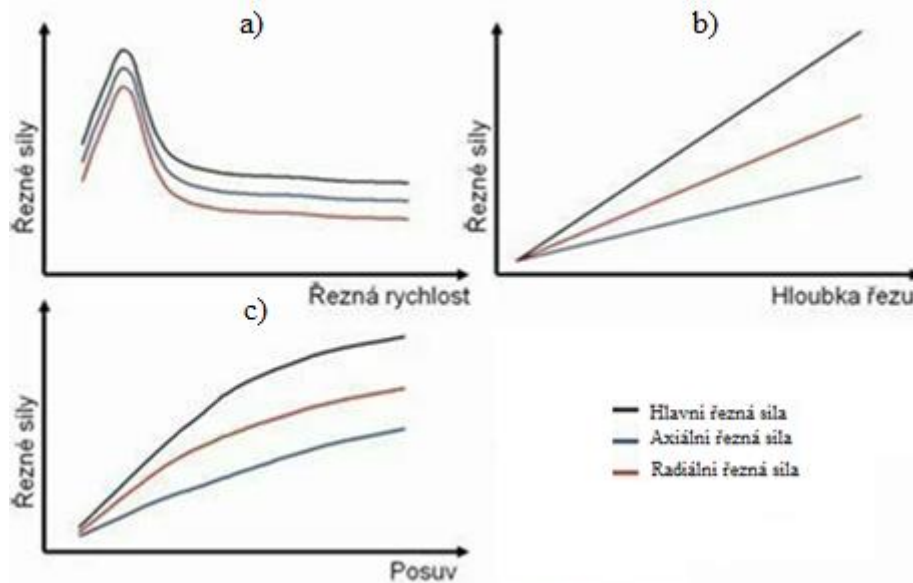
Veškeré řezné procesy jsou provázány působením řezných sil. Řezné síly zásadně ovlivňují řezný proces. Je důležité si uvědomit, že velikost i směr řezných sil se mění v závislosti na celé řadě faktorů. Velikosti řezných sil jsou ovlivněny především třemi faktory, a to materiálem, ze kterého je obrobek (povlak) zhotoven, geometrií zvoleného nástroje a volbou řezných podmínek. Větší tvrdost materiálu, tedy jeho odolnost vůči deformaci, zapříčiňuje zvětšení řezných sil. S rostoucí ostroťou řezné hrany výsledné řezné síly klesají. Neméně důležitým aspektem je úhel naklonění ostří λ_s vůči obráběné ploše. Pozitivnější úhel čela, tedy ostřejší řezná hrana, ve výsledku snižuje řezné síly, avšak až moc ostrá hrana (pozitivní úhel čela) způsobuje křehkost a často vede k ulomení řezné hrany [21].

Důležitým prvkem je obrobiteľnosť. Ta vyjadřuje, jak efektivní může být obrábění při nízkých nákladech a za daných technologických podmínek. Obrobiteľnosť ovlivňují a určují řezné síly, teplo a teplota v řezu, formování třísky, opotřebenění a životnost nástroje, a také integrita povrchu obroběné plochy. Všechny tyto faktory významně ovlivňují řezný proces a mohou snížit obrobiteľnosť. Řezné síly jsou limitujícím prvkem obrobiteľnosti, které ovlivňují spotřebu energie během procesu. Vysoké řezné síly znamenají vysoký výkon a použitelný výkon je vždy omezen. Vysoké řezné síly způsobí větší deformace řezných nástrojů a obrobků, což může mít za následek vibrace a deformace obrobku. [21].

Vztah mezi jednotlivými řeznými silami a řeznými podmínkami popisují vědci Kienzl a Victor [22].

Na obrázku 13 (Obrázek 13) jsou popsány tři závislosti řezných sil, a to na:

- a) řezné rychlosti
- b) hloubce řezu
- c) posuvu



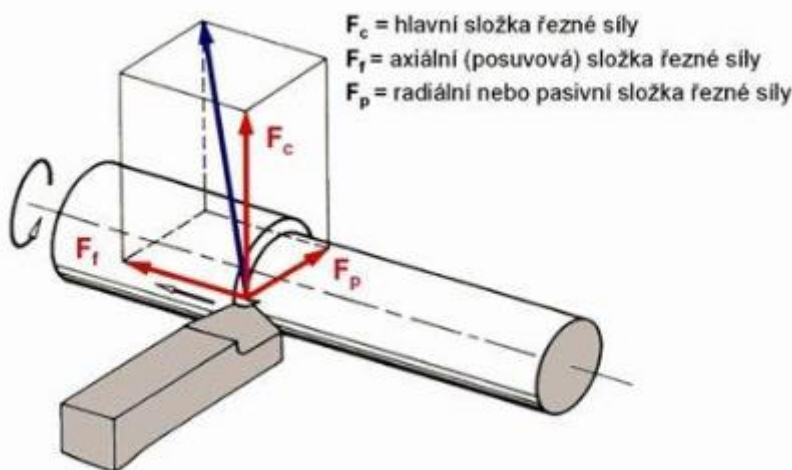
Obrázek 13: Vliv řezných podmínek na řezné síly [23]

Volba správných pracovních podmínek, jež udržují správný poměr mezi hospodárností výroby a nízkými řeznými silami, je v při obrábění kovů tím hlavním úkolem. Řezné síly se dají měřit dvěma způsoby, a to přímou a nepřímou metodou [21].

4.1 Řezné síly při soustružení

Při operaci soustružení se obrobek opracovává řezným nástrojem. Ten je do materiálu vtlačován silou, což zapříčiňuje vznik třísky. Jak bylo zmíněno výše, řezné síly jsou z největší části ovlivněny materiálem, geometrií nástroje a řeznými podmínkami. V základě je řezná síla rozdělena do třech k sobě kolmých složek sil. Hlavní složka řezné síly se značí F_c a je kolmá na sílu posuvovou F_f působící ve směru posuvu a na sílu pasivní F_p , která působí v normálovém směru k řezné ploše. Znázornění a rozložení řezných sil lze vidět na obrázku níže [23].

V kartézském souřadnicovém systému lze sílu F_c značit jako F_z (tangenciální složka), sílu F_f jako F_x (axiální složka) a sílu F_p jako F_y (radiální složka) [16].



Obrázek 14: Řezné síly při soustružení [21]

4.2 Měření řezných sil při soustružení

Ve své podstatě lze při měření řezných sil provést dva typy měření, a to přímou a nepřímou metodou. Při použití nepřímé metody se měří jiná veličina, než jsou samotné řezné síly. Z té se dále pomocí výpočtu určí velikost sil. Nevýhodou nepřímé metody je, že s ní lze vypočítat pouze tangenciální složku řezné síly (její velikost), nikoli však směr síly. Oproti tomu přímé metody se dokážou měřit všechny složky řezných sil. Důležitým prvkem při měření sil je jejich zaznamenávání pro následné zpracování a vyhodnocení. K tomu se používají dynamometry nebo tenzometrické měřicí sestavy [24].

Pro experimentální část této práce je použito přímé měření sil, které je založeno na měření deformací v soustavě S-N-O při obrábění za pomoci dynamometrů. Ten zaručuje nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech stroje.

4.2.1 Měření řezných sil nepřímou metodou

Pro určení sil nepřímou metodou je často používán výkon elektromotoru daného obráběcího stroje. Při výpočtu je použit vztah pro výpočet užitečného výkonu při obrábění [24]:

$$P_{už} = F_c * v_c \quad (1)$$

Jak bylo zmíněno výše, z tohoto vztahu lze vypočítat pouze tangenciální složku řezné síly. Za účelem zjištění výkonu stroje se používají wattmetry, které jako jedna z mnoha možností udávají přímou hodnotu výkonu ze střídavého proudu. Jako hlavní se zde jeví užitečný výkon, který je potřebný k samotnému řezání. Prvně se změří hodnota výkonu stroje v nezátíženém stavu, tj. výkon naprázdno, poté se změří samotný výkon obráběcího stroje při řezání. Jejich rozdílem je dán užitečný výkon. Ten je vyvolán tangenciální složkou řezné síly F_c [24].

$$F_c = P_c - P_o \quad (2)$$

Vyjádření tangenciální složky řezné síly je vyjádřeno jako:

$$F_c = \frac{P_{u\check{z}}}{v_c} \quad (3)$$

Kde:

F_c = řezná síla

$P_{u\check{z}}$ = užitečný výkon

v_c = řezná rychlost

P_c = výkon stroje při řezání

P_o = výkon stroje v nezatíženém stavu

Výše zmíněná metoda patří mezi jednoduché a pro její zhotovení není třeba žádných speciálních pomůcek. Její nevýhodou je nepřesnost, jelikož nejsou započítány vlivy ostatních složek řezné síly a také proto, že při chodu naprázdno je účinnost stroje rozdílná s účinností stroje při zatížení. V dnešní době je zcela běžné, že softwary zabudované v CNC centrech poskytují možnost sledovat aktuální stav zatížení motoru. V souvislosti s okamžitou zátěží lze neprodleně zasáhnout do procesu obrábění a měnit jednotlivé veličiny podle potřeby [24].

Další možnou metodou při nepřímém měření tangenciální složky je pomocí změření točivého momentu. To se však nejčastěji používá při vrtání, proto zde tato metoda nebude blíže popsána.

4.2.2 Měření řezných sil přímou metodou

Druhou zmiňovanou metodou je přímé měření řezných sil. Probíhá při něm měření deformací v soustavě S-N-O-P při obrábění, a to za pomoci dynamometrů. Při jeho správném chodu musí dynamometr zaručit, aby měřicí veličina byla nezávislá na provozních vlastnostech přístroje. Dalším požadavkem na dynamometr je měření požadované veličiny v daném rozsahu s co největší přesností. V neposlední řadě musí být dodržen požadavek na stálost naměřených hodnot za daný čas, a to i s reprodukovatelností. Z těchto charakteristik vychází určité požadavky, které jsou na dynamometry kladeny. Zatěžující síla F způsobuje deformaci Y . Tvar a provedení deformačního prvku udávají velikost deformace. Právě výše zmíněná tuhost je stěžejní při dynamickém měření. Souvislost citlivosti dynamometrů je úzce spojena s použitou měřicí metodou, zároveň také s tuhostí konstrukce dynamometru. Mezi další velmi důležité prvky zajišťující správné měření, patří reprodukovatelnost údajů, setrvačnost a konstrukce dynamometrů [25].

Měřicí sada je nejčastěji rozdělena na 3 hlavní komponenty. Prvním z nich je pružný člen, který přebírá vnější zatížení a přechází přes různé změny, jako jsou deformace, změny poloh aj. Druhým je snímač přeměňující vstupní (mechanickou) veličinu pružného členu na analogickou hodnotu aparatury. Posledním je přijímač, který zesiluje a následně zpracovává signál ze snímače, popř. zapisuje velikost zatížení [25].

4.3 Rozdělení dynamometrů

- podle počtu měřených složek řezných sil – jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro kroutící moment
- podle použité měřicí metody (přenos z deformačního členu na indikační člen) – mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické, optické atd.)
- podle obráběcí metody (pro soustružení, frézování atd.)

V následující části jsou popsány pouze elektrické (piezoelektrické) dynamometry. Právě tento typ je využit v praktické části.

4.3.1 Elektrické dynamometry

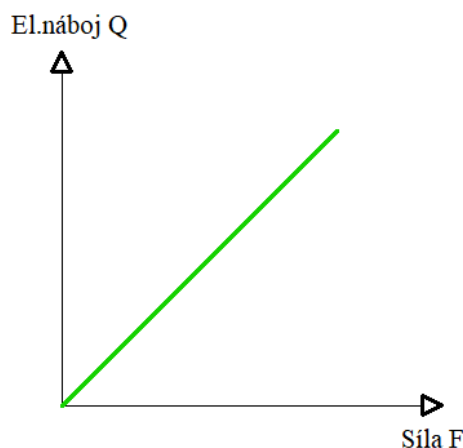
Tento druh dynamometrů patří mezi nejpoužívanější a nejvíce rozšířený. Největší výhodou je jednoduchost přenosu signálu, který lze mnoha způsoby upravovat, velmi malé rozměry a schopnost snímat signál u rotačních a pohybujících se součástí. Principiálně funguje na přeměně mechanické energie na elektrickou energii. Podle toho lze elektrické dynamometry rozdělit na:

- parametrické, jejichž princip je založen na změně nějakého z parametrů elektrického obvodu. Lze je dále dělit na indukční, kapacitní a odporové.
- generátorové, jejichž princip je založen na vzniku napětí vyvolaného deformací elementu

4.3.2 Piezoelektrické dynamometry

Principiálně nejpoužívanějším typem dynamometru jsou piezoelektrické dynamometry. Pro jejich funkčnost je využit piezoelektrický jev. Ten se vyznačuje vznikem elektrického náboje za pomoci mechanického zatížení přesně broušených krystalů. Elektrický náboj vzniká díky deformaci mřížky, která obsahuje kladné a záporné částice. Ty vlivem mechanického zatížení změny svou polohu a vzniká tak elektrický dipól. Na obrázku (Obrázek 15) je vidět závislost velikosti elektrického náboje na deformaci krystalu [24].

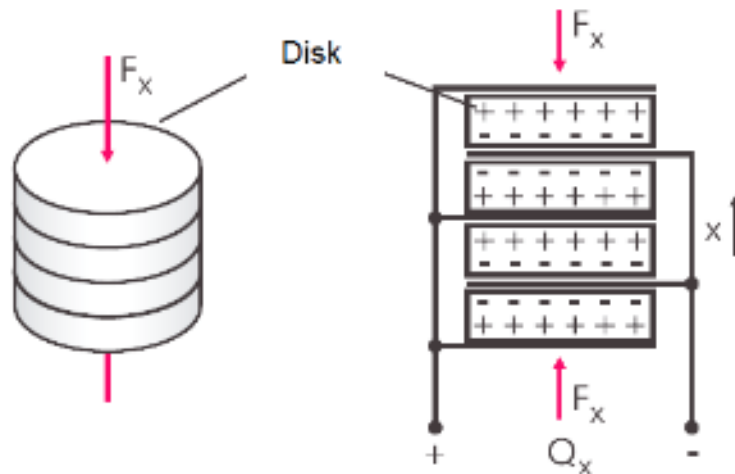
Směr působení mechanického zatížení na krystal určuje dva typy jevu, podélný a střížný jev.



Obrázek 15: Závislost velikosti el. náboje na deformaci krystalu [24].

4.3.2.1 Podélný jev

Při tomto jevu se změřitelný náboj tvoří na povrchu krystalového disku. Elektrický náboj není v tomto případě závislý na velikosti disku, ale pouze na velikosti mechanického zatížení. Sestavením více disků v sérii a jejich vzájemné paralelní propojení je jedinou cestou, jak zvětšit generovaný elektrický náboj (viz Obrázek 16).



Obrázek 16: Krystalové disky v sérii [24]

Elektrický náboj je dán vztahem:

$$Q_x = d_{11} * F_x * n_d \quad (4)$$

Kde:

- d_{11} = piezoelektrický koeficient,
- F_x = zatěžovací síla
- n_d = počet krystalových disků

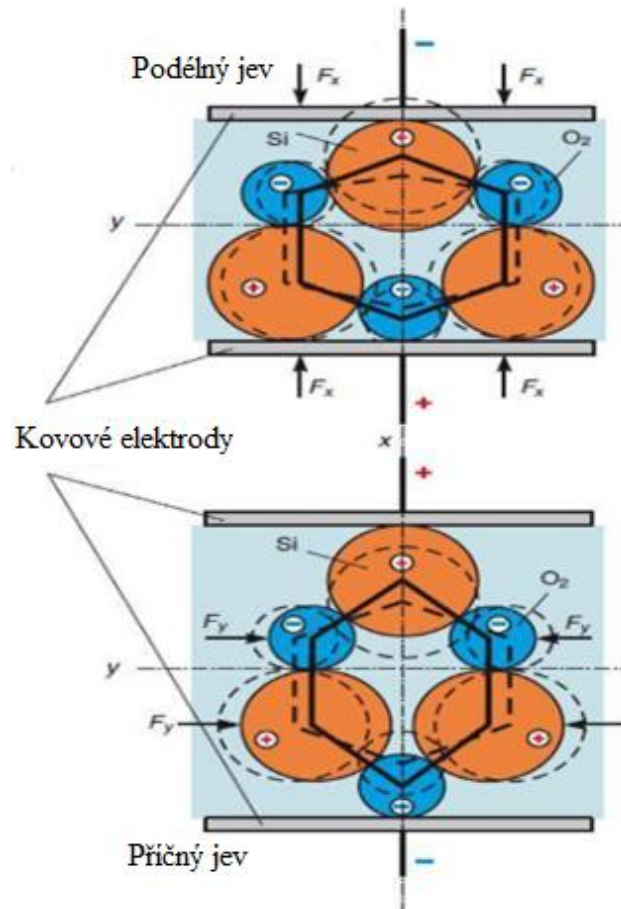
Parametr d_{11} závisí na směru a určuje velikost citlivosti v daném směru. Vlastnosti a použití určuje způsob, jakým se provede řez krystalu. Jednotlivé vyříznuté segmenty jsou náchylné na tlak, z tohoto důvodu se využívají u velkých a konstrukčně jednoduchých senzorů.

4.3.2.2 Střížný jev

I při tomto jevu není elektrický náboj závislý na velikosti disku, ale pouze na velikosti mechanického zatížení. Při zatížení v ose X mechanicky sériově spojených prvků n , které jsou elektricky zapojeny paralelně, bude konečný elektrický náboj roven [24]:

$$Q_x = 2 * d_{11} * F_x * n_d \quad (5)$$

Tento jev je využíván u senzorů při měření střížné síly, točivého momentu a velikosti napětí. Využití nachází převážně u teplotně neovlivnitelných senzorů, kde teplota neovlivňuje výkon senzorů, a to kvůli změnám teploty, které zapříčiňují změnu napětí působící kolmo na osu měřeného zatížení. Střížný jev je uveden společně s podélným jevem na obrázku (Obrázek 17) [24].



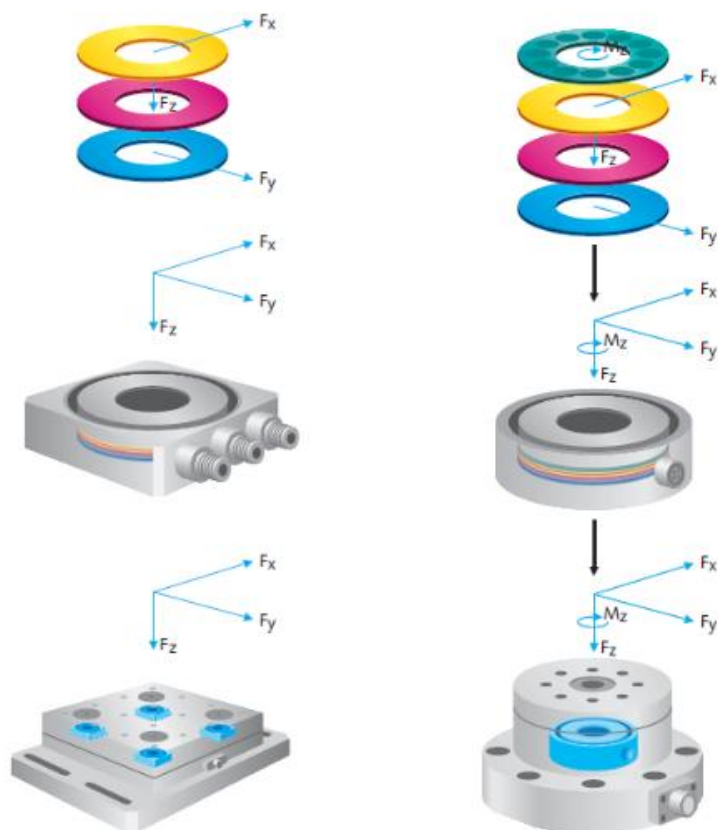
Obrázek 17: Podélný a příčný jev při zatížení [26]

4.3.3 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály mohou být přírodní nebo umělé. Přírodní PEM jsou krystalické materiály jako křemen (SiO_2), rochelleova sůl, topaz, minerály turmalínové skupiny a některé organické látky jako hedvábí, dřevo, sklovina, dentin, kost, vlasy, guma. Člověkem vyrobené piezoelektrické materiály jsou krystaly, které jsou analogy křemene, keramika, polymery a kompozity. Pro přípravu piezoelektrické keramiky se smíchají jemné prášky složkových oxidů kovů ve specifických poměrech a poté se zahřívají, aby vznikl homogenní prášek. Prášek se smíchá s organickým pojivem a vytvaruje se do konstrukčních prvků požadovaného tvaru (disky, tyče, desky atd.). Prvky se následně vypalují podle specifického časového a teplotního programu, během něhož se částice prášku spékají a materiál získává hustou krystalickou strukturu. Prvky se ochladí, poté se vytvarují nebo upraví podle specifikací a na příslušné povrchy se nanesou elektrody [27].

4.3.4 Třísložkové dynamometry

Je složen z velmi tuhého pláště, dále je tvořen držákem nože a článků pro měření, pro jejichž funkčnost je nutná účast tenzometrických snímačů. Vnitřek tvoří elektrická část a jako ochrana od třísek slouží pevný kryt. Tyto dynamometry jsou schopny měřit tři složky řezné síly [25].



Obrázek 18:3- složkový a 4- složkový piezoelektrický dynamometr [28]

5 Princip kalkulace

Pro splnění zadání této práce je nutné zpracování problematiky pro výstup v podobě technicko-ekonomického hodnocení. Při jakékoli výrobě je důležitou složkou kalkulace jednotlivých výkonů. Firmami jsou tvořeny různé kalkulační systémy. Každá z položek nákladů je členěna na přímé náklady (jednicové) a nepřímé (režijní). Jejich součet daný podle vybraného kalkulačního vzorce, činí úplné náklady na kalkulační jednici. Jedním z běžně používaných vzorců je typový kalkulační vzorec. Ten zahrnuje úplné náklady jednotlivých položek.

	přímý materiál
+	přímé mzdy
+	ostatní přímé náklady
+	výrobní režie
<hr/>	
=	vlastní náklady výroby
+	správní režie
<hr/>	
=	vlastní náklady výkonu
+	odbytová režie
<hr/>	
=	úplné vlastní náklady

Obrázek 19: Typový kalkulační vzorec

Na základě tohoto typového vzorce je vyhodnocena ekonomická stránka experimentu. Toto vyhodnocení se nachází na konci práce před závěrem.

Praktická část

Hlavním cílem této diplomové práce je obrábění žárového nástřiku NiCrBSi se zaměřením na řezné síly. Stěžejním kritériem pro obrábění je využití lineární řezné hrany nástroje. Nanášenou plochou je rotační součást, na kterou je rovnoměrně nanášen nástřik. Proto je zde předložen návrh a následně provedena realizace experimentu. Tato práce dále obsahuje rozšíření znalostí v problematice žárových nástřiků a s nimi spojených řezných sil. Tyto znalosti budou v budoucnosti aplikovány v praxi. Také jsou v této práci vyhodnoceny řezné síly v závislosti na opotřebením VBD a drsnosti obrobené plochy. V neposlední řadě je porovnáno zpracování řezných sil u slitiny NiCrBSi se slitinou Stellite 6.

6 Návrh experimentu

Tato část slouží pro seznámení s experimentem a jeho souvislostmi. Nejdříve jsou popsány zásady a princip experimentu, dále jeho podmínky a v neposlední řadě je přiblížena soustava S-N-O-P.

6.1 Popis a plán experimentu

Nástřik NiCrBSi je nanesen firmou Plasmametal, spol. s.r.o. na 10 vzorků za účelem obrobení a zjištění řezných sil. Na základní materiál je nanášena rovnoměrná vrstva nástřiku, která činí 2 mm. Bližší informace k obrobku jsou popsány v kapitole 5.2.3.

Před začátkem experimentu je vždy nutné stanovit jeho postup a naplánovat tak jeho průběh. Proto je nutné určit, které faktory budou proměnné a které stálé. Jelikož se jedná o měření řezných sil, které jsou ovlivněny řeznými podmínkami Viz. kapitola 3.2.1, jsou do plánu experimentu zahrnuty proměnné řezné podmínky, a to hloubka odřezávané vrstvy a_p , řezná rychlost v_c , posuv f a úhel naklopení řezné hrany λ_s . Všechny tyto podmínky se během provádění experimentu mění pro získání více informací o řezných silách. Značně totiž ovlivňují průběhy řezných sil, některé více a některé méně. Detailní změny v průběhu experimentu jsou zmíněny a popsány níže.

Konstantními parametry jsou v tomto případě řezné prostředí a materiál obrobku. Celý experiment proběhl ve stejném prostředí bez použití řezné kapaliny. Co se týče materiálu, i ten je brán jako konstantní parametr. Je tomu tak proto, že materiál je jednolitý, a tedy pro všechny vzorky stejný.

Určitý časový úsek před experimentem je vyhrazen jako zkušební pro zjištění základních parametrů, aby navrhované řezné podmínky vedly k předpokládaným výsledkům. Hlavním předpokladem je drsnost povrchu, která je znatelná již pouhým okem, dalším z předpokladů je např. doba trvání. Je totiž možné zvolit dlouhou dobu obrábění, to ale zamezuje efektivitě výroby, která je jedním z klíčových aspektů výroby. Proto na základech zkušeností a výše zmíněných pre-experimentech byly zvoleny řezné podmínky zapsané v tabulce 1 (Tabulka 1).

Tabulka 1: Plán experimentu-řezné podmínky

Vzorek	λ [°]	a_p [mm]	v_c [m/min]	f [mm/to]
zkušební	70	0,15	200	0,2
	70	0,15	200	0,2
1	70	0,15	200	0,2
	55	0,05	500	0,45
2	70	0,15	200	0,2
	65	0,05	500	0,45
3	70	0,15	200	0,2
	55	0,05	500	0,95
4	70	0,15	200	0,2
	65	0,05	500	0,95
5	70	0,15	200	0,2
	60	0,05	500	0,2
6	70	0,15	200	0,2
	60	0,05	500	1,2
7	70	0,15	200	0,2
	50	0,05	500	0,7
8	70	0,15	200	0,2
	70	0,05	500	0,7
9	70	0,15	200	0,2
	60	0,05	500	0,7
10	70	0,15	200	0,2
	60	0,05	500	0,7
11	70	0,15	200	0,2
	60	0,05	500	0,7
12	70	0,15	200	0,2
	60	0,05	500	0,7

První řádek u každého vzorku označuje hrubování. To je ve všech případech stejné a slouží pro zarovnání nástřiku na stejnou hodnotu. Druhý řádek u každého vzorku značí proměnnou dokončovací operaci. Je zapotřebí 12-ti vzorků, jednoho zkušební vzorku a několika náhradních v případě, že by došlo ke zničení nástroje nebo jakémukoli jinému problému, a tím by došlo k opakování měření.

6.2 Soustava S-N-O-P

6.2.1 Stroj

V tomto experimentu byl využit horizontální CNC soustruh Emco MAXXTURN 25 zobrazen na obrázku (Obrázek 19). Stroj je vybaven řízením ve třech osách. Pro tento experiment byl kvůli svým vlastnostem zvolen právě tento stroj vybavený hlavním a opěrným vřetenem, dále stroj

disponuje revolverovou hlavou čítající dvanáct poloh. Jeho velikost je pro obráběné vzorky zcela dostačující. Je vhodný spíše pro komplexní obrobení menších součástí, při soustružení lze upnout do sklíčidla obrobek s \varnothing 85 mm. Jeho menší konstrukce umožňuje široký rozsah rychlostí, vysoké zrychlení a vysokou přesnost obrábění.

Hlavním z důvodů výběru tohoto stroje je možnost připojení dynamometru, který lze snadno připojit do soustavy. Z předešlých let je zdokumentováno hned několik experimentů, které proběhly na fakultě strojní ZČU zabývajících se reznými silami. V tabulce níže (Viz. tabulka 2) je základní popis parametrů stroje Emco MAXXTURN 25. Stroj byl na bázi těchto parametrů zvolen vhodným pro požadovaný experiment.



Obrázek 20: Stroj Emco MAXXTURN 25 na ZČU [27]

Tabulka 2: parametry stroje Emco MAXXTURN 25 - pokračuje na druhou stranu

Pracovní oblast	
Posuv v X/Y/Z	100 / +20 / -15 / 320 mm
Max. průchod vřetena	25,4 mm
Max. průměr soustružení	114 mm
Vzdálenost mezi vřeteny	485 mm
Hlavní vřeteno	
Max. otáčky	8000 ot/min
Max. výkon pohonu	6,5 kW
Max. točivý moment	30 Nm
Protivřeteno	
Max. výkon pohonu	3,5 kW
Max. točivý moment	20 Nm
Obecné údaje	
Rozměry (D x Š x V)	2180 x 1425 x 1870 mm
Hmotnost stroje	2100 kg

6.2.2 Nástroj

Navrženým nástrojem pro tento experiment je soustružnický nůž s VBD. Která je vyrobena z materiálu kubický nitrid bóru sloužící pro obrábění velice tvrdých materiálů. Nástroj je geometricky navrhnout a zkonstruován tak, aby mohlo být k dynamometru připojeno příslušenství a zároveň, aby si zachoval svoji tuhost. U nástroje je možné měnit úhel naklonění ostří po pěti stupních. Konkrétně jsou to úhly $50^\circ/55^\circ/60^\circ/65^\circ/70^\circ$.



Obrázek 21: Nástroj bez VBD

Destičky označení SCMW 120404 TFF byly vyrobené na základě požadavků týmu ze ZČU firmou Bonar a.s. Destičky jsou čtyřhranné, resp. se čtyřmi lineárními řeznými hranami a disponují fazetkou 0,2mm a úhlem úkosu paty 7° . Označení materiálu je v tomto případě CBN BBW65, jejíž přesné složení výrobce neuvádí.



Obrázek 22: Detail destičky (vlevo) a krabička s VBD (vpravo)

Čísla na destičce označují číslo řezné hrany. Pokud je pod číslem vypáleno na laseru písmeno X znamená to, že s řeznou hranou se obrábělo. Proběhlo totiž také měření opotřebení řezných hran, které je zpracováno dále v praktické části.

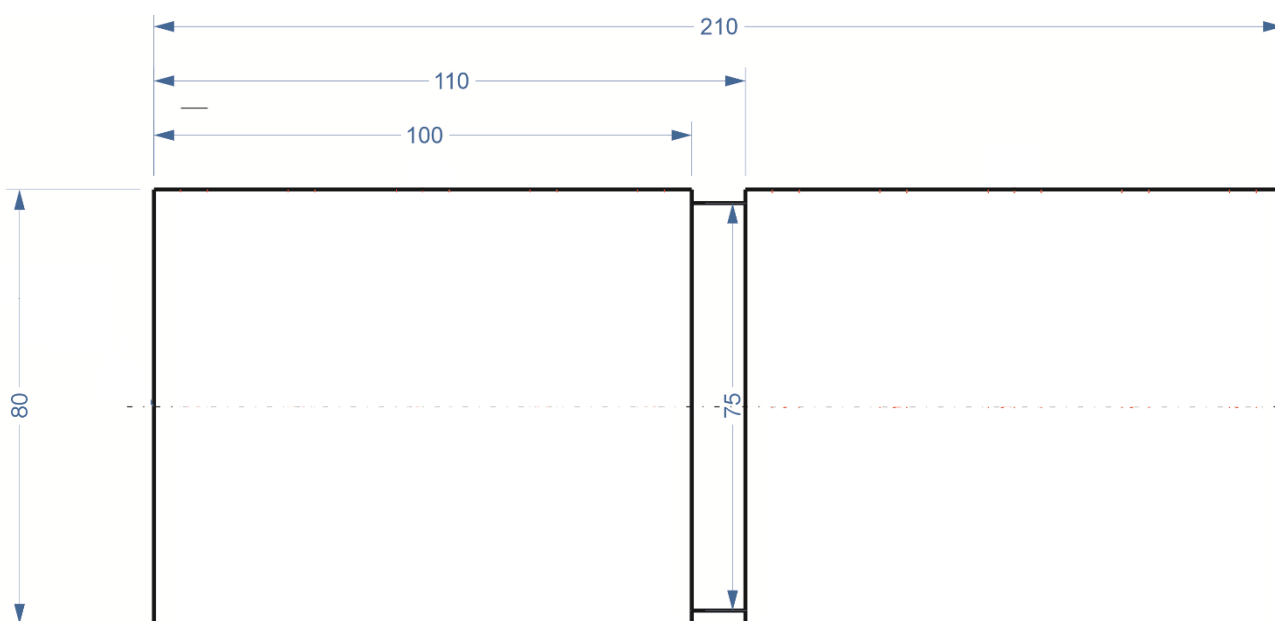
6.2.3 Obrobek

Obrobek je složen ze dvou materiálů. Žárový nástřik je nanesen na základní materiál. Jako základní materiál je zvolena kruhová ocel dle EN 10060 (34CrNiMo6). Ta se používá pro vysoce namáhané strojní součásti s důrazem na požadovanou houževnatost, pevnost a tvrdost materiálu podle Vickerse [12].

Metoda nanášení a materiál nástřiku je popsán v této práci v kapitole 2.4 na straně 18. Konkrétní chemické složení základního materiálu je uvedeno v tabulce (Tabulka 3) níže.

Tabulka 3: Chemické složení základního materiálu [11]

	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Sn
%	0,340	0,360	0,580	0,010	1,620	0,290	1,630	0,060	0,005



Obrázek 23: Výkres obrobku

V tabulce (Tabulka 3) jsou uvedeny klíčové parametry vzorku ze základního materiálu použitého podle tahového diagramu provedeného po normalizované tahové zkoušce, a to mez kluzu $R_{p0,2}$, kontrakci Z , tažnost A_5 jako kvantifikovanou plastickou deformovatelnost před dosažením meze kluzu a mez pevnosti materiálu R_m .

Tabulka 4: Parametry materiálu po tahové zkoušce [12]

R_m MPa	$R_{p0,2}$ MPa	A_5 GPa	Z %
1024	932	17.3	62

6.3 Měřicí zařízení

6.3.1 Měření rezných sil

Výstupem tohoto výzkumu jsou zpracované rezné síly naměřené při obrábění žárového nástřiku NiCrBSi. Během procesu obrábění je nutné měřit složky rezných sil F_c , F_p a F_f . K tomu na ZČU slouží měřicí soustava KISTLER, která je vidět na obrázku (Obrázek 19). Ta je vybavena osmi-kanálovým

zesilovačem, digitalizační kartou a statickým piezoelektrickým dynamometrem. Všechny komponenty jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.

6.3.1.1 Zesilovač KISTLER

Tento typ zesilovače napětí má schopnost provádět velmi přesná měření, zejména nachází využití u menších sil. Jeho využití je flexibilní a lze uzpůsobit požadavkům, které jsou pro měření vyžadovány. Základní parametry zesilovače jsou popsány v tabulce (Tabulka 5).

Tabulka 5: Základní parametry zesilovače KISTLER [26]

Počet kanálů	1-8	
Rozsah měření FS	$\pm 2 - 2\,200\,000$	pC
Frekvenční rozsah (-3 dB)	0 - 200	kHz
Výstupní signál	$\pm 10 / -8 - 10$	V
Napájení	100-240; 11-36	VAC/VDC



Obrázek 24: Osmikanálový zesilovač KISTLER [26]

6.3.1.2 Digitalizační karta

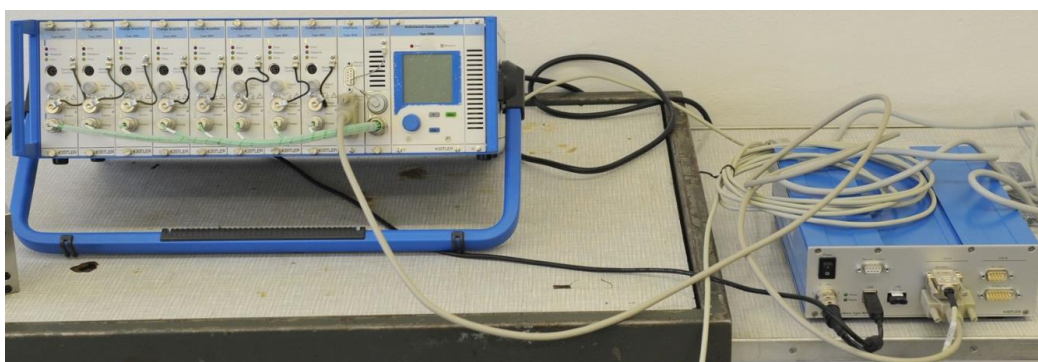
Tento univerzální systém umožňuje sběr analogových signálů s frekvencí až 1 MHz. V kombinaci s programem DynoWare, který byl stěžejním při vyhodnocování výsledků v tomto experimentu. Propojení s počítačem probíhá prostřednictvím rozhraní USB. Tento univerzální laboratorní zesilovač lze použít pro měření síly a točivého momentu pomocí piezoelektrického dynamometru nebo siloměrů. Piezoelektrické snímače vytvářejí elektrický náboj, který se mění přímo úměrně se zatížením působícím na snímač. Zesilovač převádí tento nábojový signál na proporcionální výstupní napětí. Spolu se softwarem DynoWare se tento systém sběru dat používá ve všech měřeních reálných sil od firmy KISTLER. Níže lze vidět základní parametry digitalizační karty a ilustrační obrázek.



Obrázek 25: Digitalizační karta [24]

6.3.1.3 Piezoelektrický dynamometr KISTLER

V kapitole 4.3 jsou popsány dynamometry a jejich princip fungování. Pro měření experimentu byl zvolen statický piezoelektrický dynamometr KISTLER kterým disponuje katedra obrábění ZČU. Dynamometr se skládá ze čtyř třísložkových snímačů síly namontovaných pod vysokým předpětím mezi krycí desku a dvě boční základní desky. Touto speciální montáží snímačů se dosahuje nízké teplotní chyby. Každý snímač síly obsahuje tři krystalové kroužky, z nichž jeden je citlivý na tlak ve směru Y a další dva na smyk ve směrech X a Z. Výstupy čtyř namontovaných snímačů síly jsou přivedeny do devíti pólové přírubové zásuvky. Dynamometr nabízí možnost vícesložkového měření silových momentů. Čtyři snímače jsou namontovány tak, aby byly odděleny od země. Tím se do značné míry eliminují problémy se zemní smyčkou. Dynamometr je odolný proti korozi a je chráněn proti vniknutí stříkající vody nebo řezné kapaliny. [26]



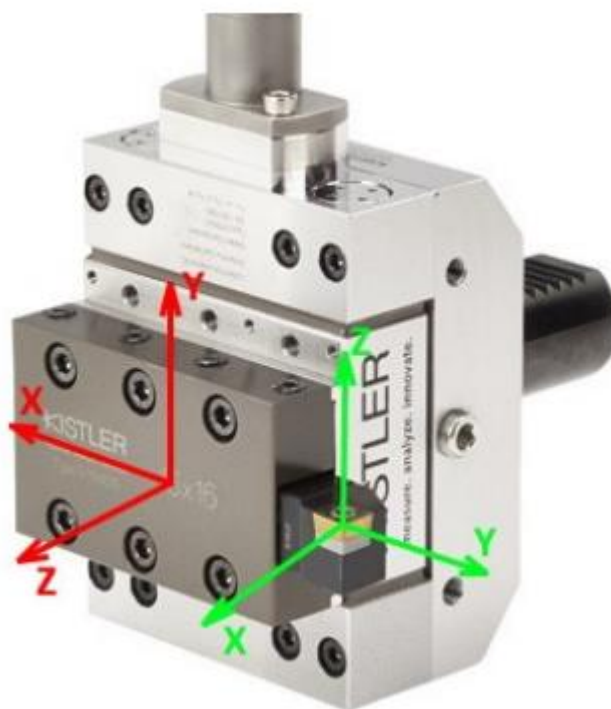
Obrázek 26: Měřicí soustava pro řezné síly od firmy KISTLER [29]

Na obrázku níže (Obrázek 25) je možné vidět dynamometr KISTLER, který je pro lepší znázornění uveden s měřicí soustavou. K dynamometru je dále připojený nástroj s VBD. Takto vypadá zapojení ve skutečnosti.



Obrázek 27: Dynamometr s nástrojem s VBD

Složky řezných sil dynamometru jsou rozdílné se souřadnicovým systémem nástroje. Tuto skutečnost bylo nutné vzít v potaz a u vyhodnocení systémy prohodit. Odlišnost dvou souřadnicových systémů lze vidět na obrázku (Obrázek 27) níže. Červenou barvou je označen systém dynamometru a zelenou barvou je označen systém nástroje. Ve výsledku byly měřeny síly $F_p(F_x)$, $F_c(F_y)$ a $F_f(F_z)$ [30].



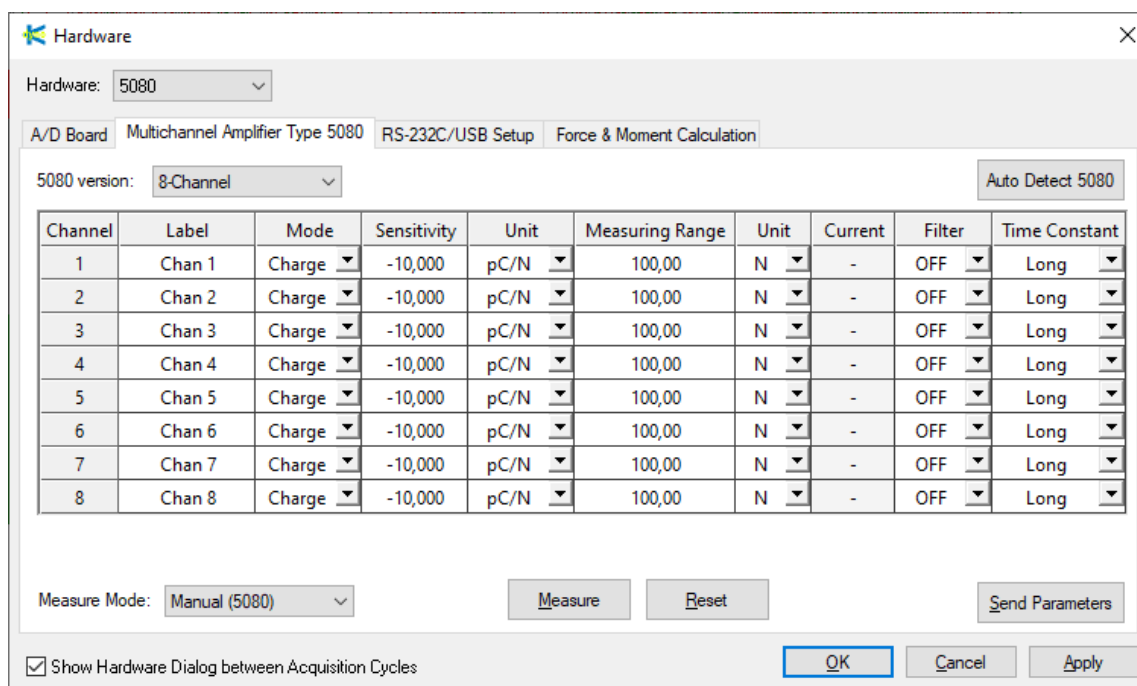
Obrázek 28: Zobrazení rozdílnosti souřadnicových systémů dynamometru a nástroje [30]

7. Vyhodnocení experimentu

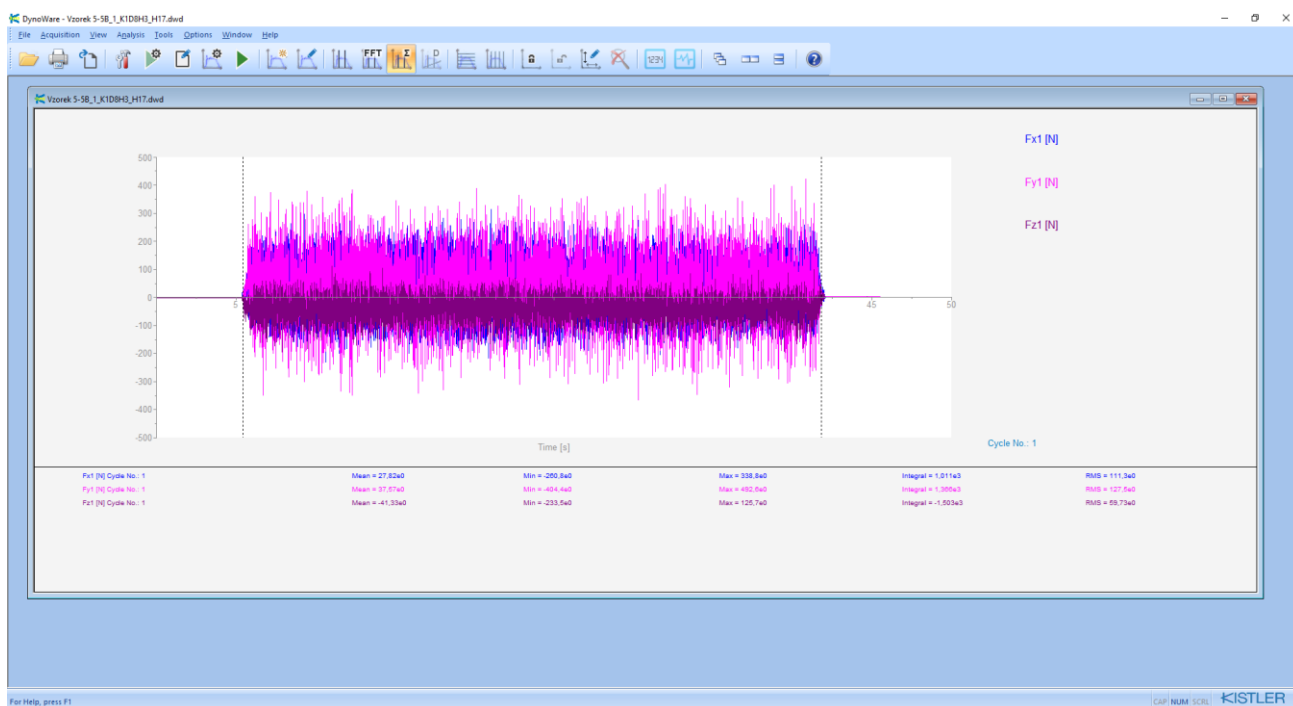
První věcí, kterou bylo nutné udělat ještě před zahájením experimentu, je příprava pracoviště. Nutností bylo zapojení veškerých komponentů ke stroji. Dynamometr byl upnut do revolverové hlavy společně s držákem VBD. Měřicí soustava, zahrnující ještě zesilovač a digitalizační kartu byly zapojeny do zdroje a propojeny s PC. Vyhodnocování signálu probíhalo na jednotce PC za pomoci programu DynoWare. V dalším kroku byla kleština upnuta do hlavního vřetene a otočný hrot do protivřetene. Do nich byl následně upnut zkušební vzorek. Nulový bod byly společně s nástrojem s VBD zdefinovány do řízení stroje. Poslední částí přípravy bylo vytvoření programu pro obrábění. V tom se před každým spuštěním operace pouze změnilы hodnoty řezných podmínek. Tento jednoduchý program byl vytvořen přímo na řídicí jednotce stroje, konkrétně se jednalo o podélné soustružení s definovanými odjezdy do bezpečné vzdálenosti.

Před spuštěním pre-experimentu bylo potřeba zajistit funkčnost dynamometru a jeho software. V programu byla vytvořena složka, do které byly následně během celého experimentu zaznamenávány naměřené hodnoty. Dále byly nastaveny požadované hodnoty do plusových i minusových hodnot.

Nyní bylo na místě celou sestavu ozkoušet a zkontrolovat tak její plnou funkčnost. Po ozkoušení bylo vše připraveno pro začátek měření.



Obrázek 29: Ukázka nastavení Hardware DynoWare



Obrázek 30: Ukázka měření v DynoWare

Z tohoto obrázku (Obrázek 27) lze vidět, jak software zachytil řezné síly. Prvních pár vteřin jsou řezné síly nulové, až po doteku řezné hrany s obrobkem začnou síly prudce růst. V nastavení Software lze zvolit několik mnoho prvků, které se budou měřit, pro tuto práci byly potřeba pouze 3 složky řezné síly, a to již zmíněné F_c , F_p a F_f . Vykreslení průběhu řezných sil je však ztlačně nečitelné, jelikož se složky řezných sil překrývají. Ve statistickém vyhodnocení bude pro lepší čitelnost řešen průběh složek řezných sil jednotlivě.

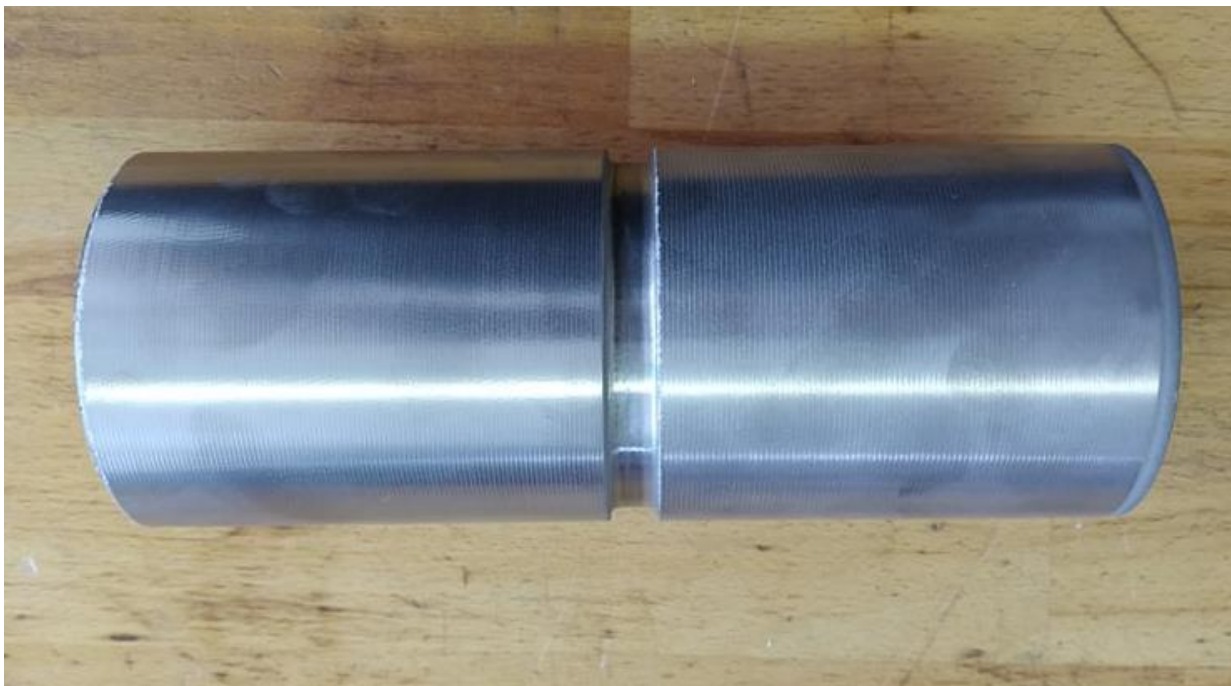
7.1 Pre-experiment

Veškerá příprava vedla ke zhotovení pre-experimentu. Ten byl proveden na jednom ze zkušebních vzorků za účelem zjistit, zdali vše probíhá podle plánu a bude se moci uskutečnit samotný experiment. Podle návrhu experimentu byly zvoleny řezné podmínky. Obsluha provedla nastavení na stroji, zaměřila nástroj a nastavila úhel sklonu ostří λ_s .

Tabulka 6: Hodnoty zvolené pro pre-experiment

λ [°]	a_p [mm]	v_c [mm]	f_{ot} [mm/ot]
70	0,15	200	0,2

Stroj provedl dva přejezdy, jeden hrubovací a druhý dokončovací. Pro oba byly nastavené výše zmíněné hodnoty. Výsledkem pre-experimentu byl obrobek polotovaru, hodnoty složek řezných sil vykreslené do grafu a číselná data. Těchto dat bylo opravdu mnoho, jelikož za neurčitou jednotku času T bylo zaznamenáno několik hodnot X. Zpracování číselných dat je popsáno v další kapitole. Jak je zmíněno výše, pre-experiment sloužil pro ozkoušení veškerého příslušenství a jako ukázka, že vše splňuje svou funkčnost.



Obrázek 31: Obrobený zkušební vzorek

7.2 Statistické vyhodnocení

Pre-experiment ukázal, že je vše připraveno na provedení experimentu. V následující kapitole je popsán experiment se zaznamenáním všech hrubovacích měření a vyhodnocení naměřených dat. Pro lepší čitelnost jsou grafy rozděleny do dvou částí, od prvního do šestého pokusu a od šestého do dvanáctého. Následuje rozdělení dokončovacích operací do několika skupin, a to podle toho, jaký je jejich úhel sklonu ostří λ_s (Viz. Tabulka 1– 50,55,60,65 [°])

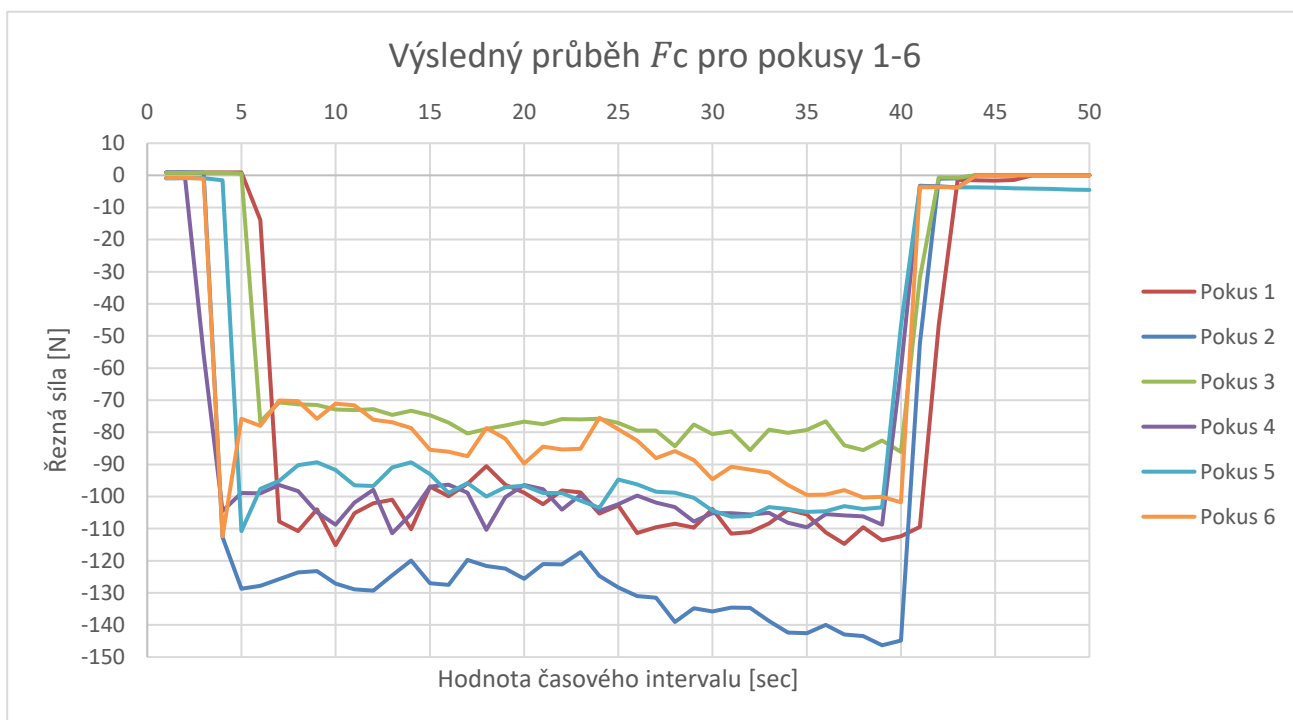
Výsledky průběhu grafů, které zobrazil program DynoWare mají vysoký rozptyl horních a spodních hodnot. Je tedy nutné rozhodnout, co je požadovaná výsledná hodnota řezné síly. Veškeré hodnoty X za čas T byly díky statistickým výpočtům přepočteny na 49 hodnot časového intervalu, konkrétně vteřin. Každý pokus obsahuje 49 hodnot časového intervalu pro tři složky F_c , F_p a F_f řezné síly. Každý tento interval je rozdělen do kvartilů. Dolní kvartil 25 (dále jen Q25) a horní kvartil 75 (dále jen Q75) eliminují horní a dolní výkyvy řezných sil. Q25 a Q75 se tedy neuvažují. Díky tomu se hodnoty zregulují na zbylých 50 (mezi Q25 a Q75) a vytvoří se z nich medián. Každá tato hodnota mediánu je přiřazena k hodnotě časového intervalu a vynesena v grafech. Hodnoty v grafech jsou proloženy křivkou, je tím znázorněn průběh jednotlivých složek během řezu.

7.2.1 Průběhy složek sil při hrubování

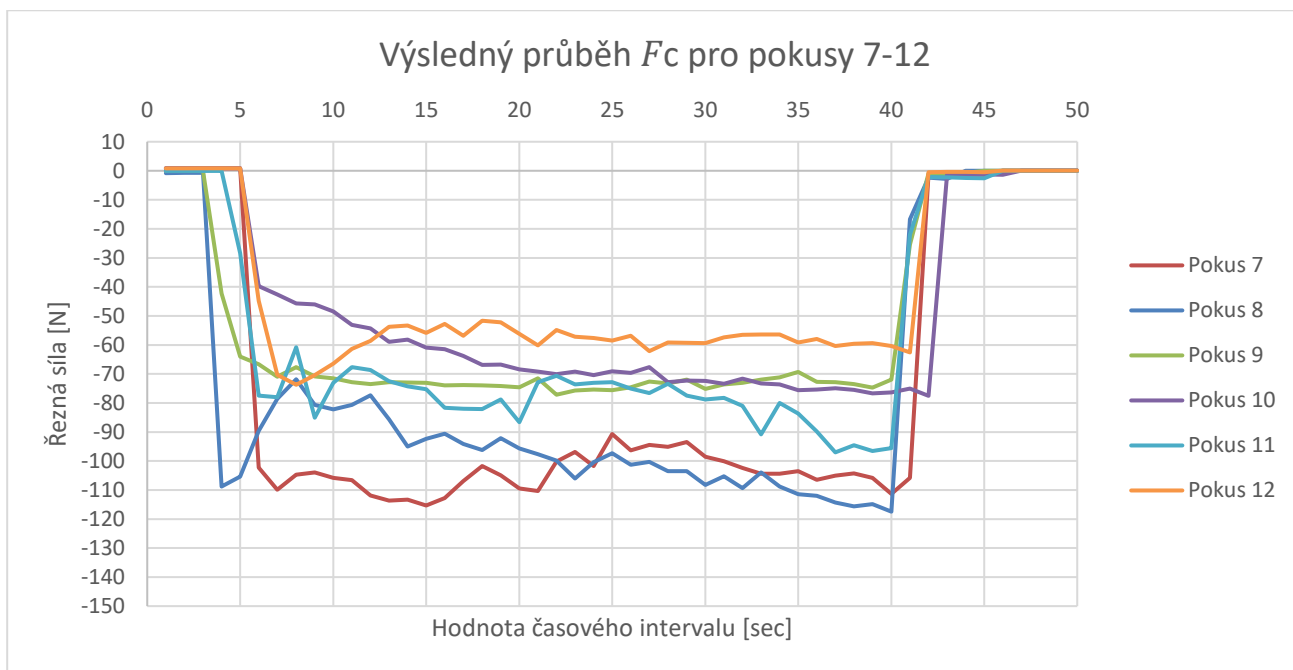
V této podkapitole se nacházejí všechna vyhodnocení pro řezné síly F_c , F_p a F_f pro hrubování. Vodorovná horní osa znázorňuje 49 hodnot časového intervalu v sekundách, svislá osa nalevo ukazuje hodnoty naměřené řezné síly. Pro větší přehlednost v grafech jsou pokusy rozděleny do dvou grafů v každé z podkapitol pro F_c , F_p a F_f . V prvním grafu (Graf 1) jsou pokusy 1-6 a ve druhém grafu (Graf 2) se nachází pokusy 7-12. Řezné podmínky se nachází v tabulce (Tabulka 1) na straně 29 této práce. Každý z pokusů začíná v rozmezí několika vteřin. Důvodem je samotné měření, kdy obsluha dynamometru pokaždé zapnula měření v trochu odlišný čas.

7.2.1.1 Vyhodnocení složky F_c

Takto (Graf 1) vypadá proložení křivkou 49 hodnot časového intervalu pro složku F_c . Všechny síly se pohybují v rozmezí cca -50 až -120 N pro všechny pokusy. Jedinou výjimkou je patrně pokus č.2. V tom se hodnoty pohybují od cca -118 do -147 N. I přes stejné řezné podmínky převyšuje tento pokus o desítky N všechny ostatní pokusy. Výsledný rozdíl může být dán např. špatným zaměřením obrobku nebo nerovnoměrností naneseného nástřiku. Jelikož se ale jedná o hrubování, desítky N jsou brány při těchto řezných podmínkách jako akceptovatelné.



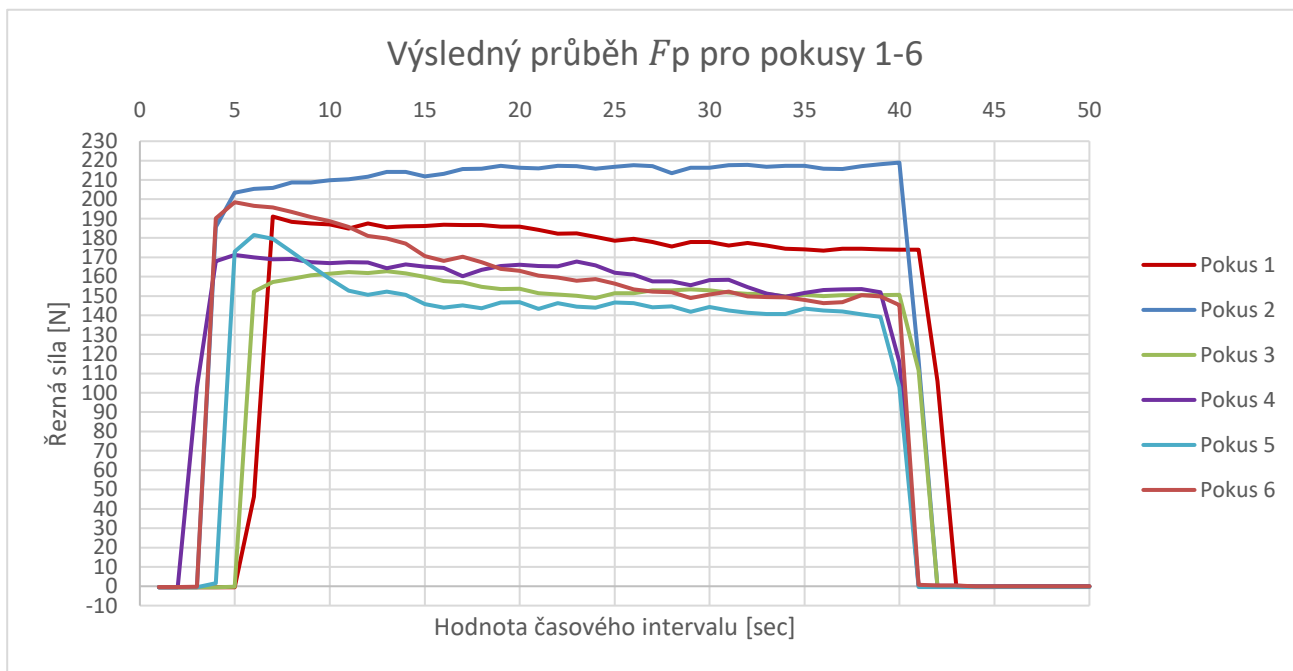
Graf 1: Výsledný průběh F_c pro pokusy 1-6 při hrubování



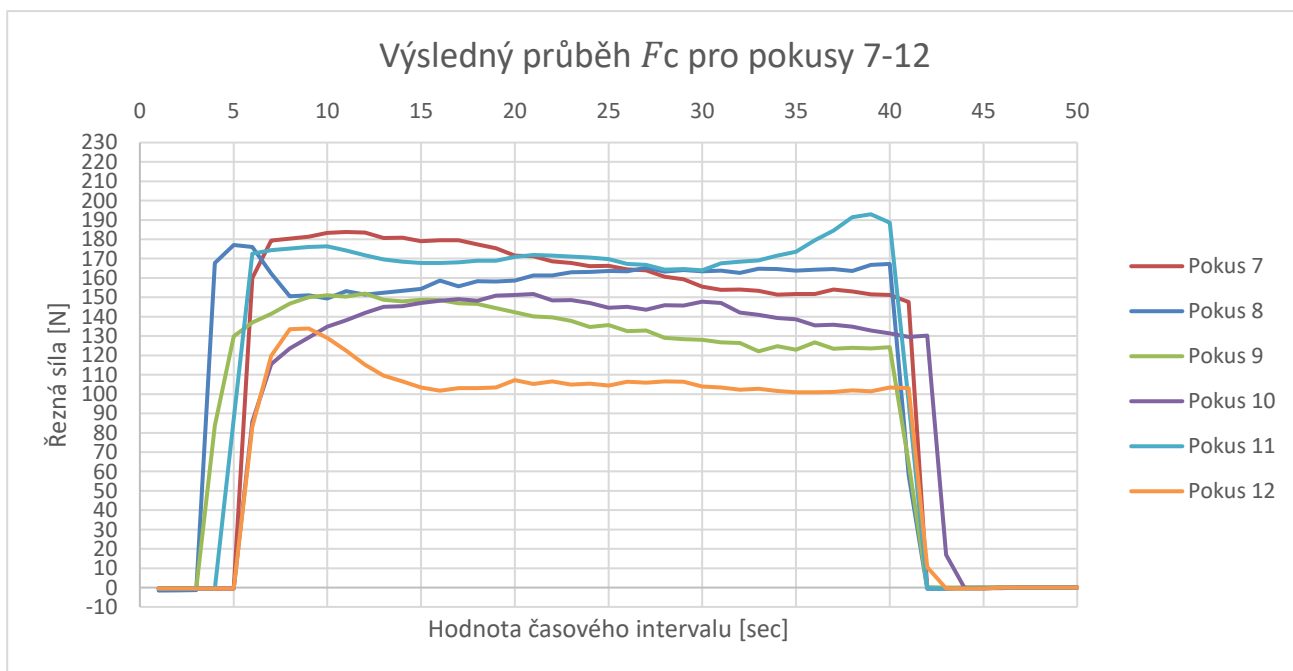
Graf 2: Výsledný průběh F_c pro pokusy 7-12 při hrubování

7.2.1.2 Vyhodnocení složky F_p

Stejně, jako tomu bylo u vyhodnocení složky F_c , je tomu tak i u složky F_p . Hodnoty proložené křivkou jsou kladné v rozmezí 100–200 N. Jediným pokusem pohybujícím se v rozmezí od 205–220 N je opět pokus č. 2. I v tomto případě lze předpokládat, že vzniklá odchylka od zbytku pokusů mohla být zapříčiněna např. špatným zaměřením obrobku nebo nerovnoměrností naneseného nástřiku. Oproti složkám F_c je zde možné vidět (Graf 3 a Graf 4) sice větší, ale za to plynulejší průběhy křivek.



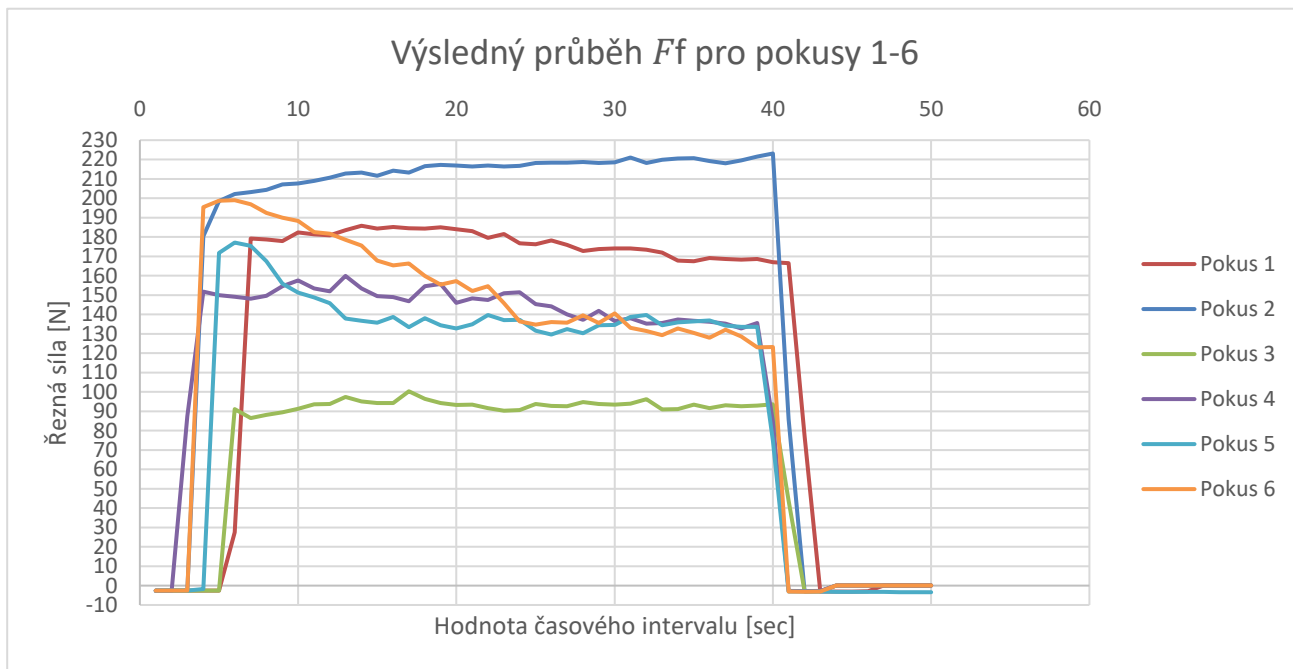
Graf 3: Výsledný průběh F_p pro pokusy 1-6 při hrubování



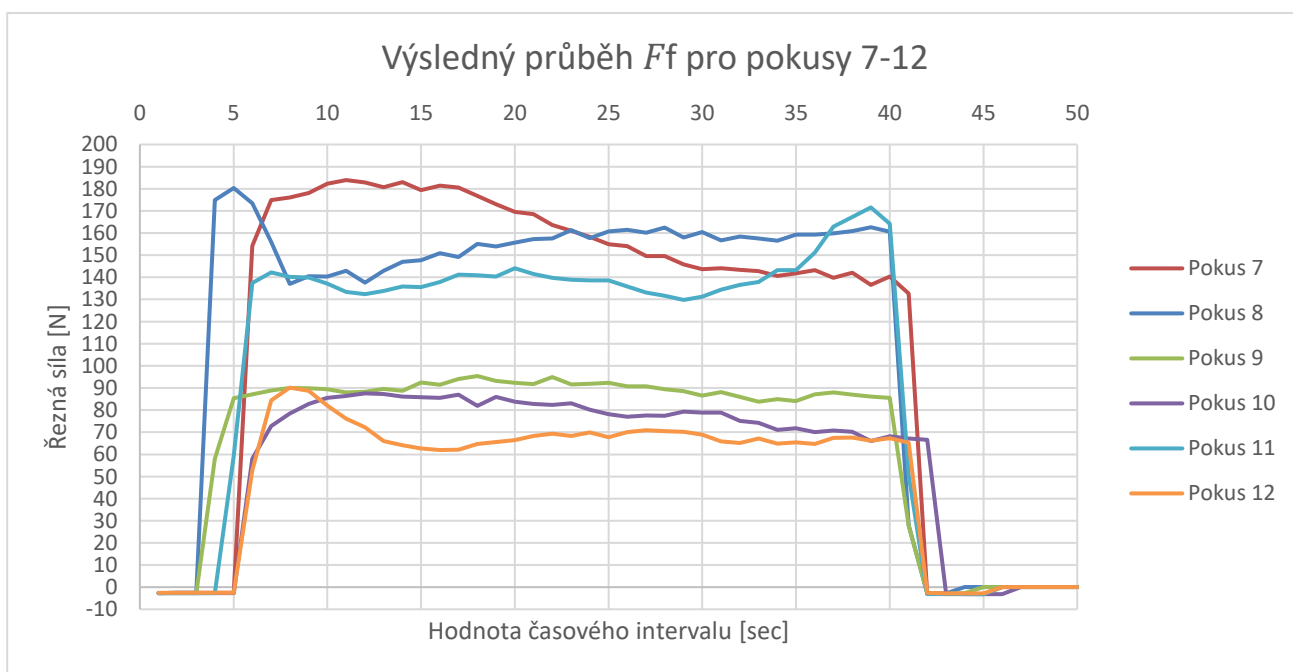
Graf 4: Výsledný průběh F_p pro pokusy 7-12 při hrubování

7.2.1.3 Vyhodnocení složky F_f

Poslední složkou pro vyhodnocení při hrubování je posuvová síla F_f . Zde se hodnoty křivek pohybují od cca 60 do 200 N. I v této podkapitole je tomu stejně jako ve dvou předešlých, křivka pokusu č.2 se pohybuje v rozmezí od 200-225 N a převyšuje tak ostatní pokusy.



Graf 5: Výsledný průběh F_f pro pokusy 1-6 při hrubování



Graf 6: Výsledný průběh F_f pro pokusy 7-12 při hrubování

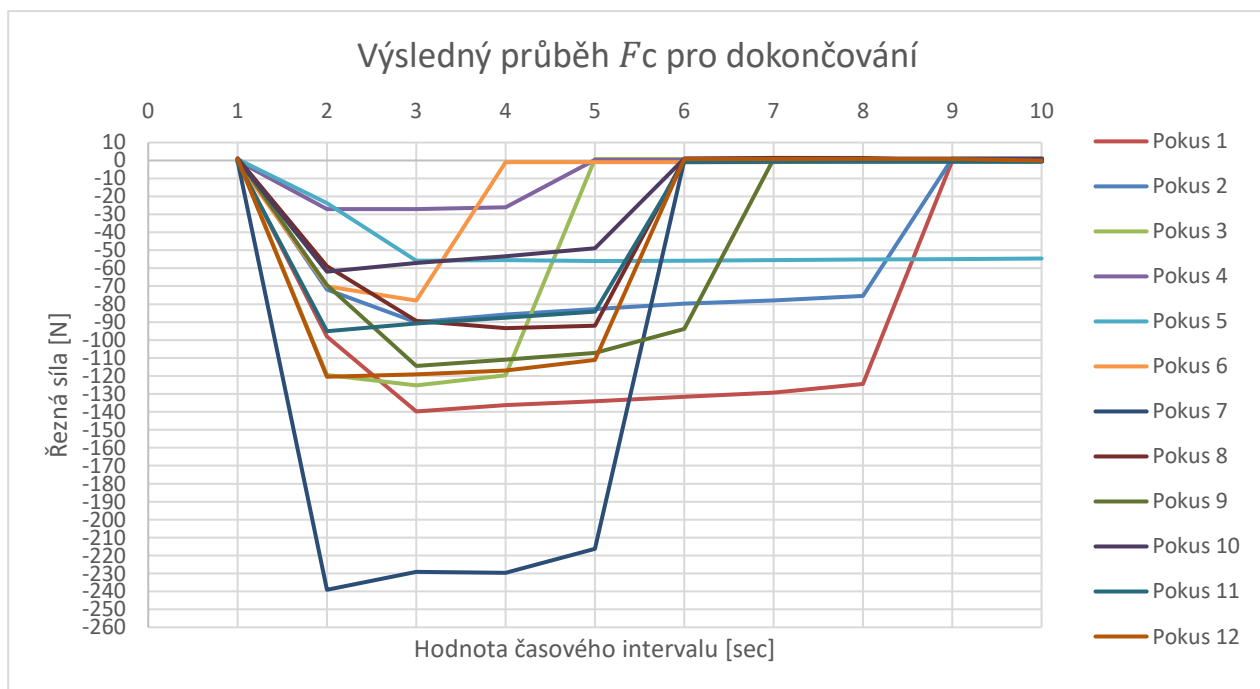
7.2.2 Průběhy složek sil při dokončování

U každé z následujících kapitol jsou vyhodnoceny průběhy řezných sil při dokončování. Plán byl proveden podle tabulky (Tabulka 1) na straně 29. Dokončování je podstatně důležitější složkou při vyhodnocování než hrubování, protože se vztahuje na finální operaci. Všechny polotovary byly vyhrubovány na stejný rozměr, na kterém byly prováděny právě dokončovací operace.

V každé z podkapitol se stejně jako při hrubování nachází grafy rozdělené podle F_c , F_p a F_f . Tyto grafy jsou vyhodnoceny stejným způsobem jako při hrubování, změřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny, rozděleny do kvartilů (Q25 a Q75) a z prostředních 50 vytvořen medián. Hodnoty byly při dokončování vyhodnoceny do 10 časových intervalů, pouze pokus č.5 byl díky malému posuvu vyhodnocen ve všech třech složkách na 20 sekund. Kvůli tomu byl tento pokus oříznut v časovém intervalu 10, jako ostatní pokusy. Ve všech třech složkách řezných sil byl průběh pokusu 5 mezi 10-20 sekundami prakticky totožný, jako v rozmezí 0-10. Všechny tyto fakty vedly k oříznutí grafu pro jeho lepší detail a čitelnost. V grafech, kde se vyskytují všechny pokusy, nejsou znázorněny proložené body, kvůli lepší čitelnosti průběhů.

7.2.2.1 Vyhodnocení složky F_c

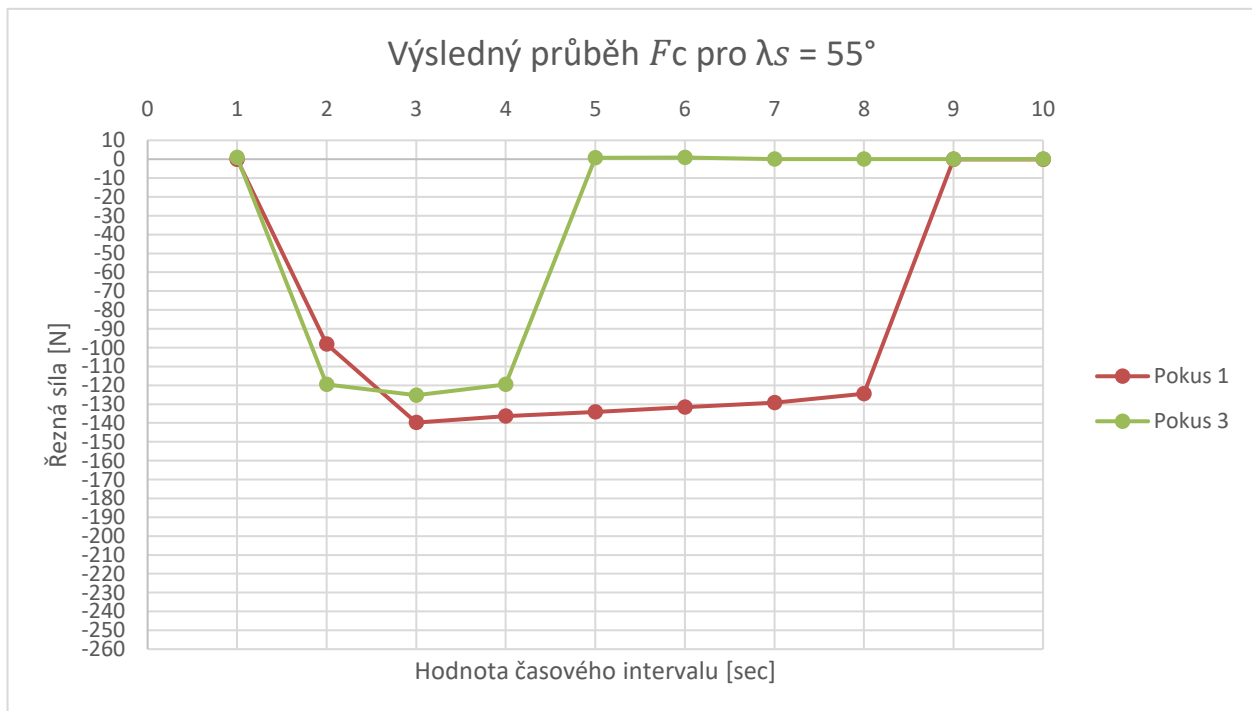
Hodnoty F_c se stejně jako u hrubování pohybují v mínusu. To je dáno působením síly proti ose souřadnicového systému. Hodnoty naměřených řezných sil se pohybují v rozmezí od 0 do -142 N. Viditelně největší síly vznikají při pokusu 7, a to až -239 N. Při porovnání s pokusy 8-12, které byly obrobena při stejných řezných podmínkách kromě úhlu naklonění ostří λ_s jsou hodnoty pokusu 7 téměř 2x větší. Lze tedy předpokládat, že zásadní vliv na velikost řezné složky F_c má úhel naklonění ostří λ_s . Čím je jeho hodnota větší, tím jsou výsledné síly nižší. Tento fakt potvrzuje porovnání pokusů 3 a 4, které mají stejné řezné podmínky, kromě úhlu naklonění ostří. Hodnoty jsou $\lambda_s = 55^\circ$ pro pokus 3 a $\lambda_s = 65^\circ$ pro pokus 4. Hodnoty pokusu 4 se pohybují do pouhých -30 N. Oproti tomu pokus 3 dosahuje až hodnot -130. Další podobnost je viditelná při pokusech 1 a 2. I jejich řezné podmínky jsou totožné až na úhel λ_s . Při pokusu 1 je hodnota úhlu 55° a při pokusu 2 je 65° . Průběhy těchto dvou pokusů prakticky kopírují svoje průběhy jen s posunutím o -50 N.



Graf 7: Výsledný průběh F_c při dokončování

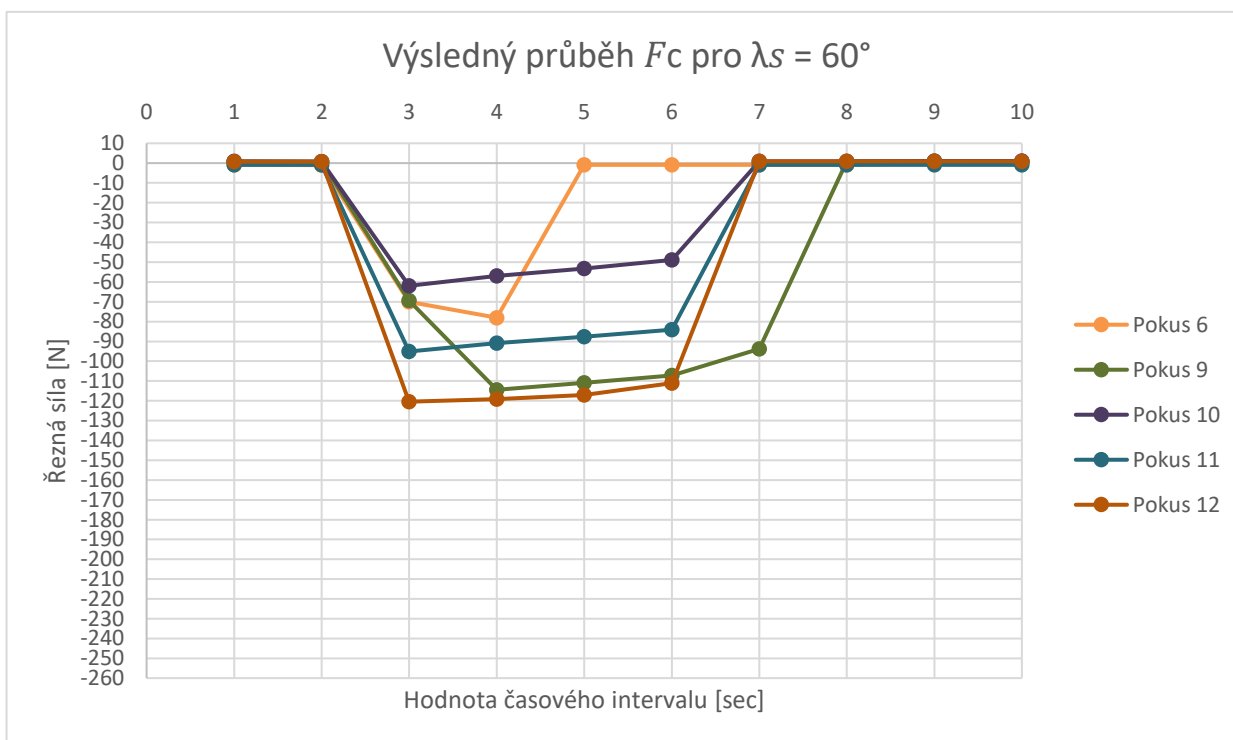
Další ovlivnění řezné složky F_c je patrné při pohledu na pokusy 5 a 6. Ty se liší v posuvu, který je u pokusu 5 roven 0,2 a u pokusu 6 roven 1,2. Pokus 6 je o 15 vteřin kratší, ale jeho síly jsou téměř o třetinu vyšší. Při další práci s výsledky pro použití v praxi je důležité počítat právě s časem. Složka F_c je tedy ovlivněna úhlem naklonění ostří λ_s , kdy při jeho větším naklonění dochází ke zmenšování sil a zároveň posuvem, který ve výsledku složku F_c zvětšuje. Tuto teorii potvrzuje pokus 8, který má největší λ_s , ale jeho hodnoty síly nejsou zdaleka nejmenší, to je dáno právě posuvem.

Při vyhodnocení grafů podle λ_s byla zjištěna zajímavost v podobnosti průběhů sil s rozdílem velikosti sil a jejich délky, která je dána posuvem f . Pro detailní ukázkou byl zvolen následující graf (Graf 8). Tento jev podobnosti průběhů nastal krom malých výjimek u všech rozdělení podle λ_s . Síly v podstatě kopírují svoje průběhy. Při stejném úhlu naklonění ostří 55° se pro pokusy 1 a 3 liší řezné síly. Pokus s menším posuvem má větší průběh řezných sil.



Graf 8: Výsledný průběh F_c pro $\lambda_s = 55^\circ$ při dokončování

Jedna z dalších nejasností vznikla při vyhodnocování výsledných průběhů F_c pro 60° . Délky pokusů 9-12 by měly být totožné kvůli zcela stejným řezným podmínkám. Z grafu (Graf 9) je však zcela patrné, že pokus 9 je o vteřinu delší, než zbytek. Jedním z nejpravděpodobnějších ukazatelů, proč by tomu tak mohlo být, je chyba obsluhy stroje. Ta zřejmě nastavila menší posuv než u zbylých pokusů. Výsledkem bylo prodloužení času obrábění. I u tohoto obrázku je patrná shoda v zrcadlení průběhů u pokusů 9-12.

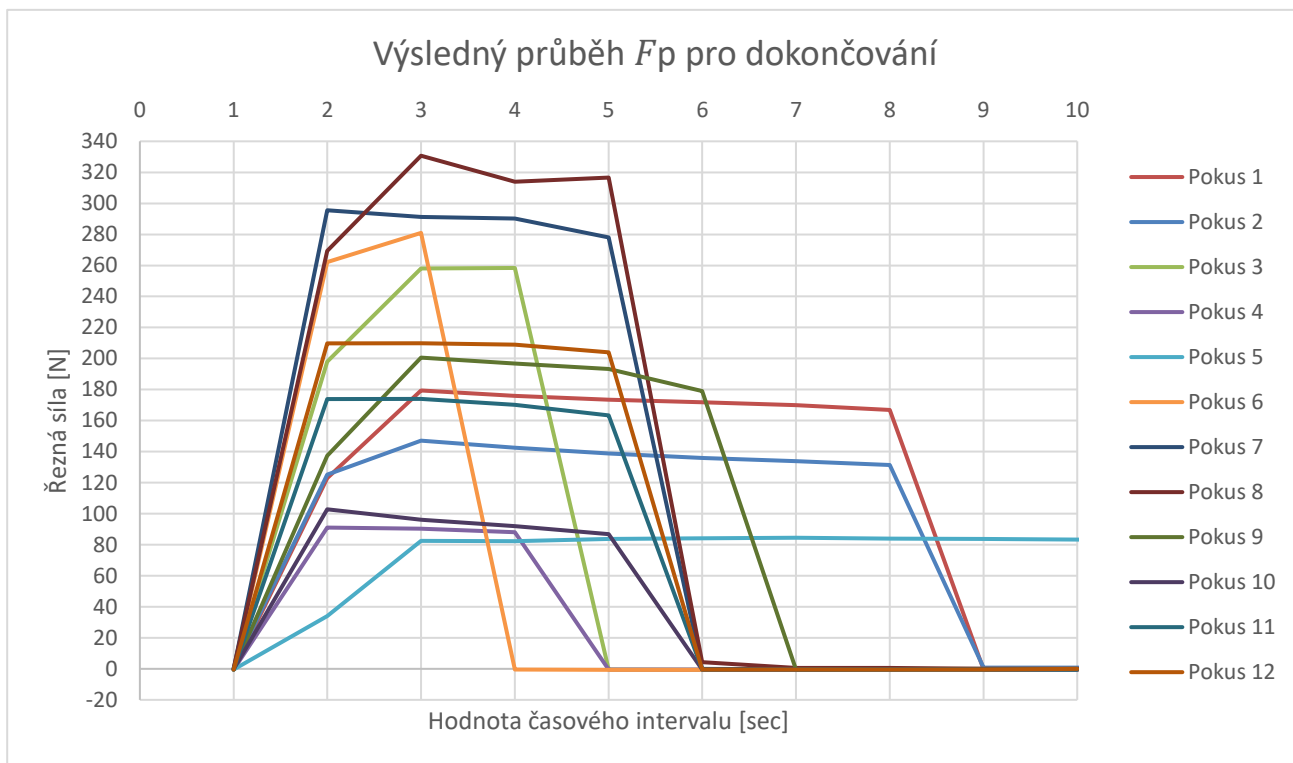


Graf 9: Výsledný průběh F_c pro $\lambda_s = 60^\circ$ při dokončování

7.2.2.2 Vyhodnocení složky F_p

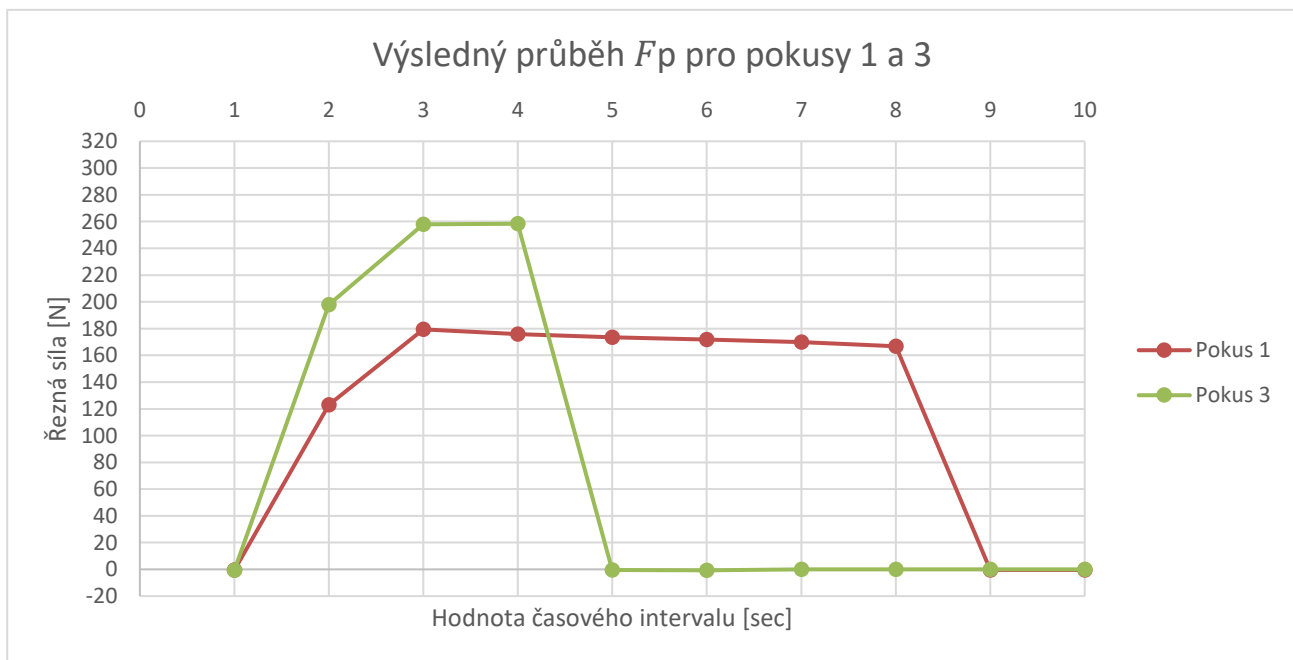
V této kapitole je popsáno vyhodnocení pasivní složky řezné síly F_p . Průběhy všech pokusů se pohybují v plusových hodnotách kromě náběhů a doběhů, které lehce překračují do záporu.

Nejnižší průběh byl vyhodnocen u pokusu 5 s jeho nejvyšší hodnotou 83 N. Tento pokus byl proveden při nejnižším posuvu $f = 0,2$ mm/ot. Pro porovnání, pokus 6 disponuje stejnými řeznými podmínkami kromě posuvu, který je 1,2 mm/ot, ale jeho hodnoty jsou trojnásobně větší. Podobnost stejného druhu jako u pokusu 6 lze vidět na grafu (Graf 10) u pokusů 1 a 3. Jejich řezné podmínky jsou opět stejné kromě posuvu. Ten s růstem zvyšuje složku F_p a také, jak bylo zmíněno výše v práci, prodlužuje délku řezného procesu.

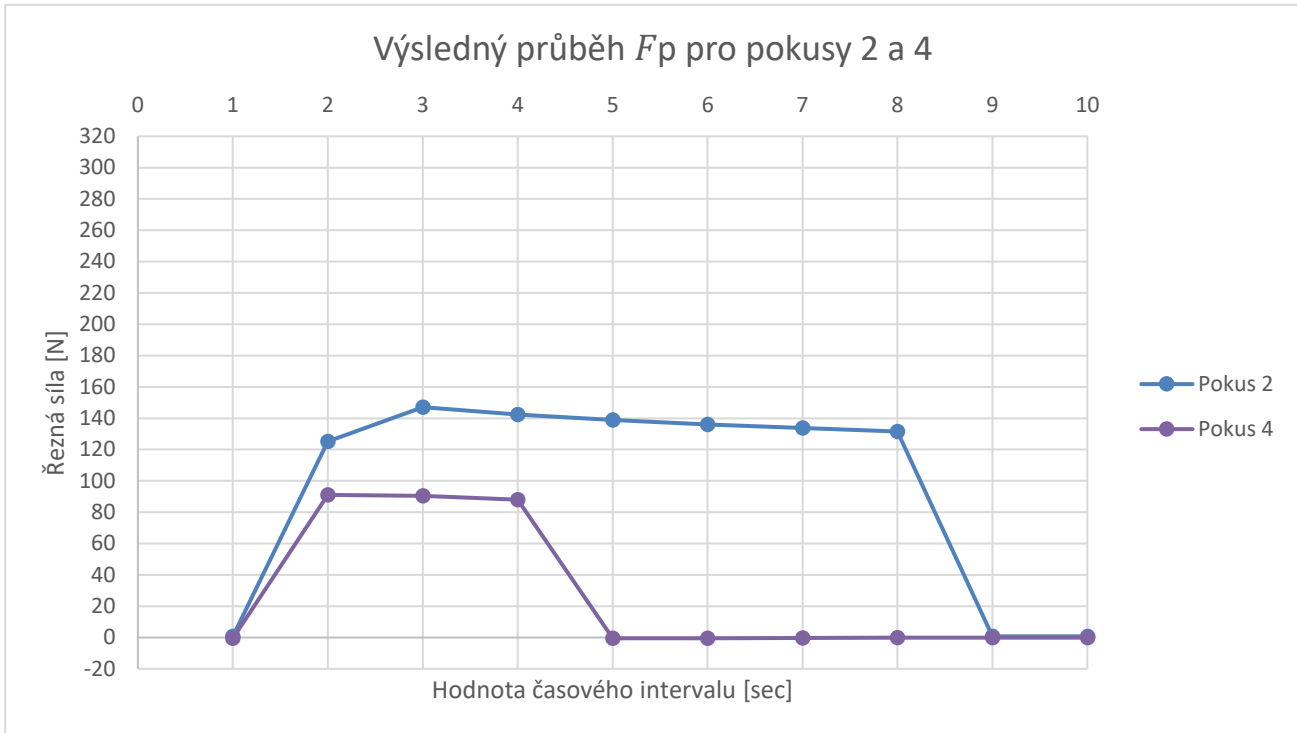


Graf 10: Výsledný průběh F_p při dokončování

Oproti zmíněným poznatkům je však nepopsatelnou skutečností srovnání pokusů 2 a 4, kdy nižší posuv zapříčiňuje vyšší sílu F_p . Tento problém se nachází i u vyhodnocení posuvové složky a je také zmíněn níže.



Graf 11: Výsledný průběh F_p pro pokusy 1 a 3 při dokončování



Graf 12: Výsledný průběh F_p pro pokusy 2 a 4 při dokončování

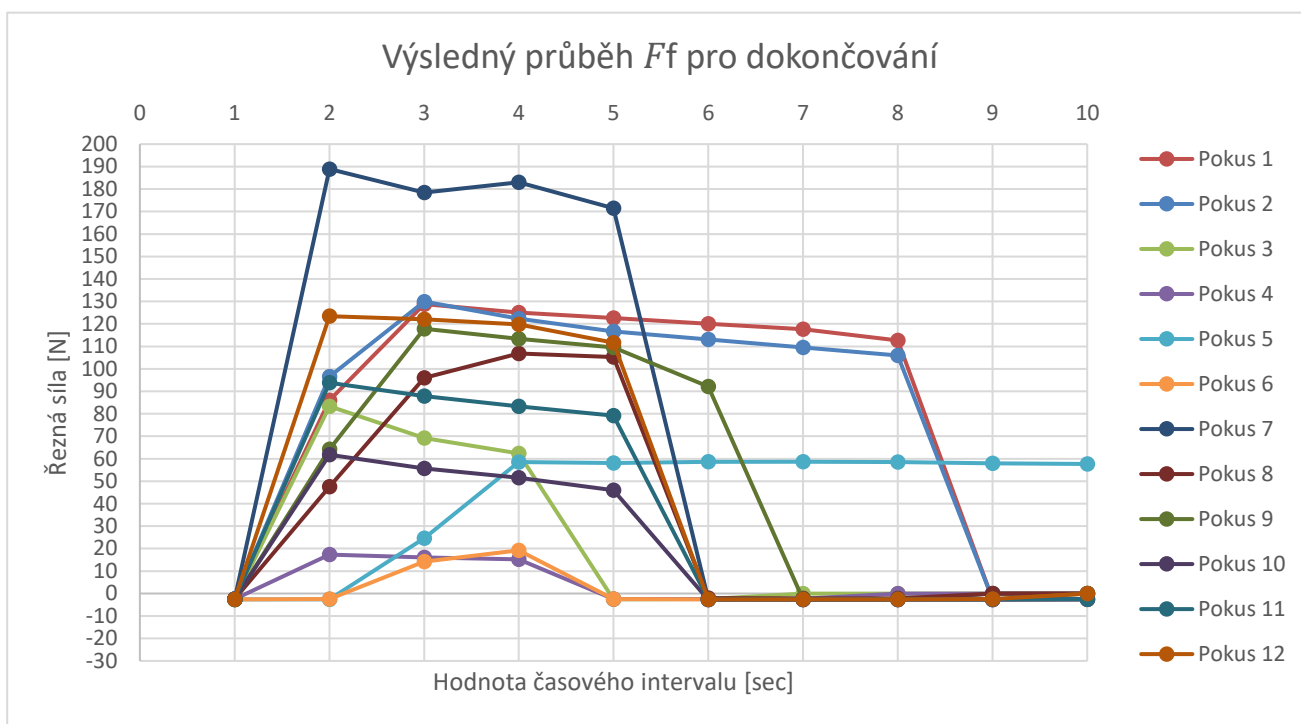
Pokusy 1-4 byly konkrétněji podrobeny rozboru, jelikož jejich výsledky jsou díky jejich malým rozdílům v řezných podmínkách více vypovídající. Pokusy 1 a 2 mají až na λ_s stejné výchozí řezné podmínky. Větší síly jsou patrné na pokusu jedna s úhlem naklonění ostří 55° . Stejně tak je tomu u pokusů 3 a 4, kde má pokus 3 s nižším úhlem naklonění ostří větší síly F_p , než pokus 4 s úhlem 65° . Lze tedy obecně předpokládat, že menší úhel λ_s zvyšuje při zbylých stejných řezných podmínkách pasivní složku síly F_p .

7.2.2.3 Vyhodnocení složky F_f

Posledním z vyhodnocení sil při dokončování je posuvová složka F_f . Z grafu (Graf 13) lze vyčíst totožné podobnosti u pokusů 1-4, jako při vyhodnocování složky F_p . Při porovnání pokusů 1 a 2 se došlo k faktu, že růst úhlu naklonění ostří vede ke snížení složky F_f . Oproti tomu stejně, jako u vyhodnocování předchozí podkapitoly nastává těžce popsatelný jev, kdy u porovnání pokusů 2 a 4 nižší posuv značí vyšší sílu F_f . Na tento poznatek nebyla nalezena pádná a podložená fakta, která by mohla vše objasnit. Nějaké úvahy jsou ale zde vypsány. Nejvíce pravděpodobné bude zapříčinění lidskou chybou, nebo nepřesností několika z destiček. Při opakovaném měření se totiž zjistilo, že destičky svými rozměry sice odpovídají výrobní toleranci, ale svými rozměry v podstatě nekopírovaly tvar čtverce, ale spíše obdélník, jelikož strany byly rozměrově odlišné. K tomuto zjištění došlo poté, co při nastavení řezných podmínek a následné kontroly jednoho z obrobků nedošlo k obrobení žádného materiálu. Destička se tedy přeměřila a byl zjištěn výše uvedený problém. Toto zjištění mohlo značně ovlivnit další měření. Všechny destičky byly změřeny a u některých opravdu došlo k rozměrové odlišnosti. Je nutné zmínit, že posuv při stejných zbylých řezných podmínkách zvyšuje nejen složky F_p a F_f , ale také již známý fakt v podobě délky řezu, což je patrné z pokusu 5, kdy délka tohoto pokusu je téměř 20 vteřin. Pokusy 1 a 2 mají také viditelně delší průběh, jelikož jejich posuv $f=0,45$.

Proběhlo laboratorní rozměrové měření všech destiček za účelem zjištění rozměrů a hlavně

opotřeбенí. To mohlo posloužit pro zpracování v závislosti na řezných silách. Tímto směrem se však práce neubírala, jelikož opotřeбенí bylo tak malé možná až žádné, spíš se jednalo o vnější oter.



Graf 13: Výsledný průběh F_f při dokončování

7.2.3 Shrnutí vyhodnocení dokončování

Bylo provedeno vyhodnocení pro všechny složky řezných sil. U řezné síly F_c byla zjištěna podobnost u mnoha vzorků týkající se úhlu naklonění ostří λ_s . Čím je jeho hodnota větší, tím jsou výsledné síly nižší. U zbylých dvou složek hrál největší roli posuv. Dalším zjištěním je podobnost průběhů pokusů se stejnými řeznými podmínkami kromě posuvu, kdy se takto provedené pokusy defacto kopírují navzájem. Obecně u většiny z pokusů docházelo k podobným průběhům sil ve všech třech složkách, kdy síla dosáhla jisté hodnoty, okolo ní probíhal celý zbytek řezu a poté klesly síly opět na 0. Pro celkový přehled výsledných sil byla vytvořena tabulka (Tabulka 8).

Tabulka 7: Průměrné hodnoty sil a jejich pořadí

	průměr F_c	Pořadí F_c	průměr F_p	Pořadí F_p	průměr F_f	Pořadí F_f
Pokus 1	-132,6	11	172,9	6	122,8	11
Pokus 2	-82,0	5	138,3	4	116,2	9
Pokus 3	-122,4	10	258,2	9	71,6	5
Pokus 4	-26,7	1	89,8	2	16,2	2
Pokus 5	-54,4	2	83,0	1	57,1	4
Pokus 6	-74,0	4	271,6	10	10,3	1
Pokus 7	-228,6	12	288,8	11	180,5	12
Pokus 8	-91,6	7	320,4	12	102,7	7
Pokus 9	-110,8	8	196,9	7	113,6	8
Pokus 10	-57,4	3	94,4	3	53,7	3
Pokus 11	-89,4	6	170,4	5	86,0	6
Pokus 12	-117,0	9	208,1	8	119,2	10

Pro každý pokus a jeho složku byl z mediánů vytvořen průměr, který udává průměrnou řeznou sílu. Na základě toho je každému pokusu přiřazena číselná hodnota. Nejlépe hodnocené pokusy, tedy s nejmenší řeznou silou, jsou označeny číslem jedna, řada dále postupuje vzestupně až do čísla 12, která náleží pokusu s největší řeznou silou.

Z tabulky lze vyčíst několik výsledků. Jako pokusy s nejmenšími řeznými silami se dají považovat pokusy 4 a 5. Z tohoto výsledku se dá nepodloženě tvrdit, že vyšší úhel naklopení ostří s vyšším posuvem a nižší úhel naklopení ostří s nižším posuvem se zdají být pro obrábění NiCrBSi jako nejlepší volbou s ohledem na řezné síly. Desátý pokus se z důvodu problému s destičkou uvedených výše v práci nedá brát jako pádný.

Oproti tomu pokus 7 je jednoznačně pokusem s nejvyššími řeznými silami. Tato tvrzení sama o sobě nic neznamenají, jelikož není známo, jaké mají být síly při obrábění NiCrBSi, jestli je lepší dosáhnout výsledku nižších sil atd. Proto jsou výsledky řezných sil vztaženy k drsnosti povrchu Ra a Rz v kapitole 6.2.5.

7.2.4 Vyhodnocení drsnosti povrchu

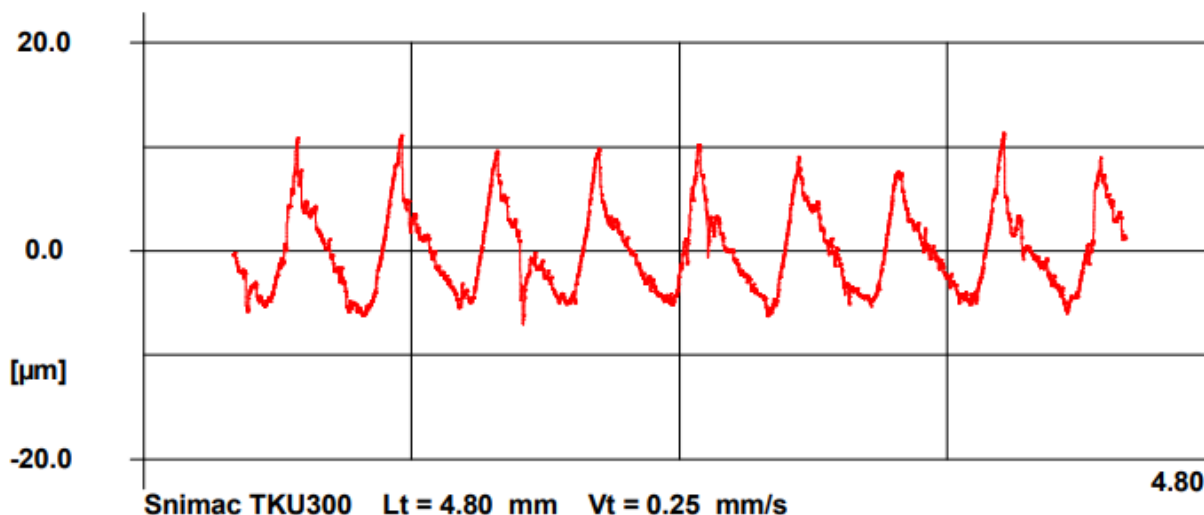
Měření povrchu proběhlo v laboratoři metrologie na ZČU za účelem zjištění vlivu řezných sil na obrobeném povrchu. Pokusy 1 a 6 jsou vybrány záměrně, jelikož pokus 1 má nejvyšší výsledné hodnoty drsnosti a pokus 6 naopak hodnoty nejnižší. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce níže. Každému pokusu byla opět přiřazena hodnota určující pořadí, jako tomu bylo u řezných sil.

Hodnoty na drsnoměru byly měřeny pokaždé ve třech místech po délce obrobku a pootočením o 120°, na jednom vzorku bylo tedy naměřeno 9 náměrů. Z těchto naměřených hodnot byl vypočítán průměr a dosazen do tabulky. Výsledkem je tabulka (Tabulka 9), která ukazuje pořadí naměřených drsností. Závislost drsnosti na řezných silách je samostatně popsána v kapitole 6.2.5.

Tabulka 8: Průměrné hodnoty drsností a jejich pořadí

	průměr R_a	pořadí R_a	průměr R_z	pořadí R_z
Pokus 1	1,12	1	8,07	1
Pokus 2	4,85	7	25,82	7
Pokus 3	9,50	11	43,22	11
Pokus 4	3,72	4	17,75	3
Pokus 5	1,30	2	8,14	2
Pokus 6	11,40	12	47,40	12
Pokus 7	8,26	10	40,80	10
Pokus 8	6,95	9	34,27	9
Pokus 9	4,99	8	25,97	8
Pokus 10	3,98	5	22,12	5
Pokus 11	3,24	3	18,82	4
Pokus 12	4,32	6	22,85	6

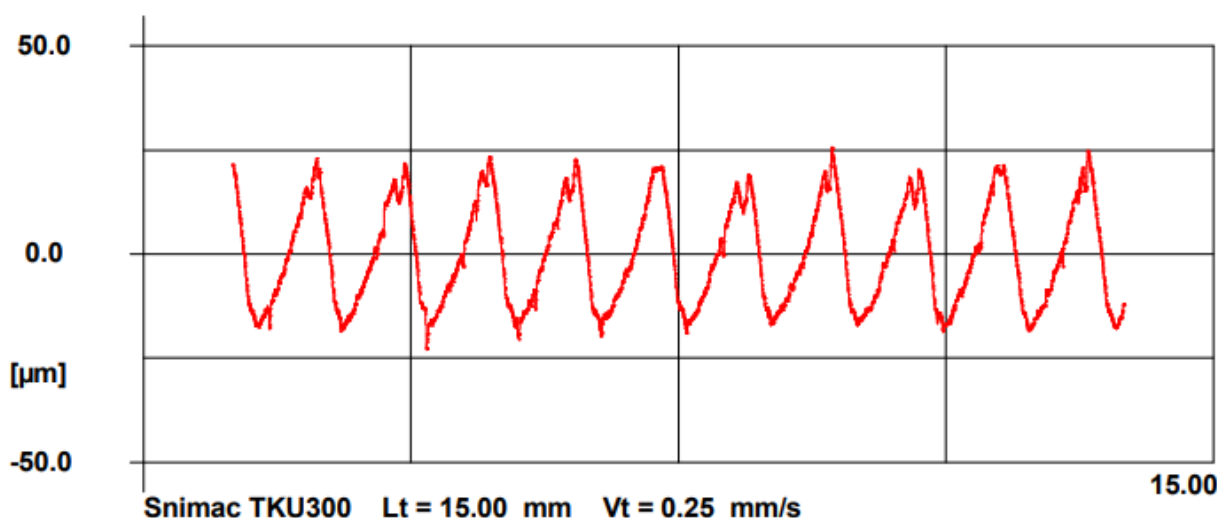
R- Profil vyrovnan Filtr ISO 11562 Lc = 0.800 mm



Obrázek 32: Výsledek měření drsnosti pro pokus 1 v místě 1

Na obrázku (Obrázek 32) je možné vidět výsledek měření pro drsnost povrchu po vyfiltrování šumu a dalších okolních vlivů. To dělá graf lépe čitelným a srozumitelným. Cílem této a následující kapitoly (kapitola 6.2.4) není popsat samotnou drsnost povrchu a její problematiku, ale zjistit vzájemnou závislost mezi drsností a řeznými silami. Drsnost R_a přímo nevypovídá danou hodnotu. Důležité je pozorovat výchyly tvaru křivky, které byly změřené profiloměrem. Níže červeně vybarvená křivka (Obrázek 32) přísluší pokusu 1. Tento profil se až na malé odchylky přibližuje profilu harmonickému. To samé je vidět na obrázku pod ním (Obrázek 33) ukazující profil R pro pokus 6, kde se tvar křivky vykresluje také celkem harmonicky.

R- Profil vyrovnan Filtr ISO 11562 Lc = 2.500 mm



Obrázek 33: Výsledek měření drsnosti pro pokus 6 v místě 1

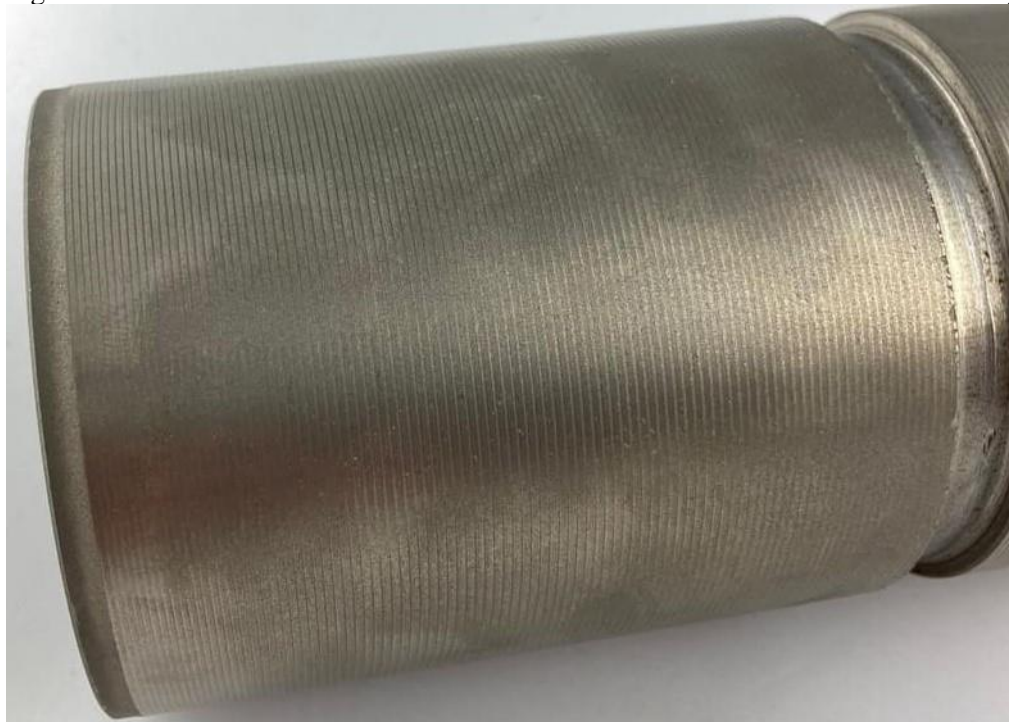
Hlavní rozdíly jsou vidět ve velikosti naměřené drsnosti R_a , další rozdíl odhalilo až detailní zkoumání obou pokusů. Na horním obrázku (Obrázek 32) jsou vidět malé úzké propadliny. Ty by mohly znamenat vytrhané kousky částic, které při obrábění vznikly a vytvořily tak více třpytivý nežli lesknoucí se

povrch. Při první kontrole se ukázalo, že je povrch pod optickým kukátkem se zvětšením 10x bez větších vytrhaných částic, i když jeho povrch není zcela lesklý. Právě to by mohly značit propadliny v údolích. U pokusu 6 je měřítko os větší, a i přesto jsou v údolích vidět propadliny. Detailní zvětšení odhalilo následující fakta.

Níže je obrázek pokusu 1 a pod ním je na další stránce umístěn obrázek pokusu 6. Při prvním pohledu je horní vzorek hladký, mírně lesknoucí až trošku matný. Na spodním vzorku je vidět stopa po nástroji, při zaostření jsou vidět i vytrhané částice nástřiku. Dá se předpokládat, že takto obroběný povrch je značně nevyhovující. Jelikož se tento typ nástřiku využívá na strojní součásti v automobilovém a leteckém průmyslu, mohl by takto hrubý povrch způsobit nežádoucí jevy jako je nadměrné abrazivní opotřebení. Došlo by k rychlému degradování materiálu, a to právě kvůli špatnému povrchu. Tato práce je zaměřená na řezné síly, avšak vždy by se mělo před experimentem vědět, jaké jsou na obrobek kladeny požadavky. Jedním z nich může být právě drsnost, kdy zákazník může požadovat např. drsnost R_a nižší než $2\mu\text{m}$. Za účelem splnění požadavků se pak zhotoví experiment tak, aby byly požadavky naplněny.



Obrázek 34: Snímek pokusu 1 po obrobení



Obrázek 35: Snímek pokusu 6 po obrobení

7.2.5 Závislost povrchu na řezných silách

Jedním z prvních nejvíce vypovídajících a viditelných prvků je povrch. Cílem této práce je zpracování řezných sil, není však nikde psáno, jak velké mají síly být, při jakém průběhu jsou ideální atd. Spojením povrchu a řezných sil je však možné vyvodit další z poznatků, ke kterým se zpracováním tohoto experimentu docílilo. Tato oblast je totiž minimálně probádána, snahou je tedy přijít na co nejvíce věcí, které by mohly obohatit tým, který experimenty prováděl a posloužit tak jako podklad pro zpracování řezných sil při obrábění tvrdých materiálů.

Tabulka 9: Sloučené pořadí sil a drsností

	Pořadí F_c	Pořadí F_p	Pořadí F_f	Pořadí R_a	Pořadí R_z
Pokus 1	11	6	11	1	1
Pokus 2	5	4	9	7	7
Pokus 3	10	9	5	11	11
Pokus 4	1	2	2	4	3
Pokus 5	2	1	4	2	2
Pokus 6	4	10	1	12	12
Pokus 7	12	11	12	10	10
Pokus 8	7	12	7	9	9
Pokus 9	8	7	8	8	8
Pokus 10	3	3	3	5	5
Pokus 11	6	5	6	3	4
Pokus 12	9	8	10	6	6

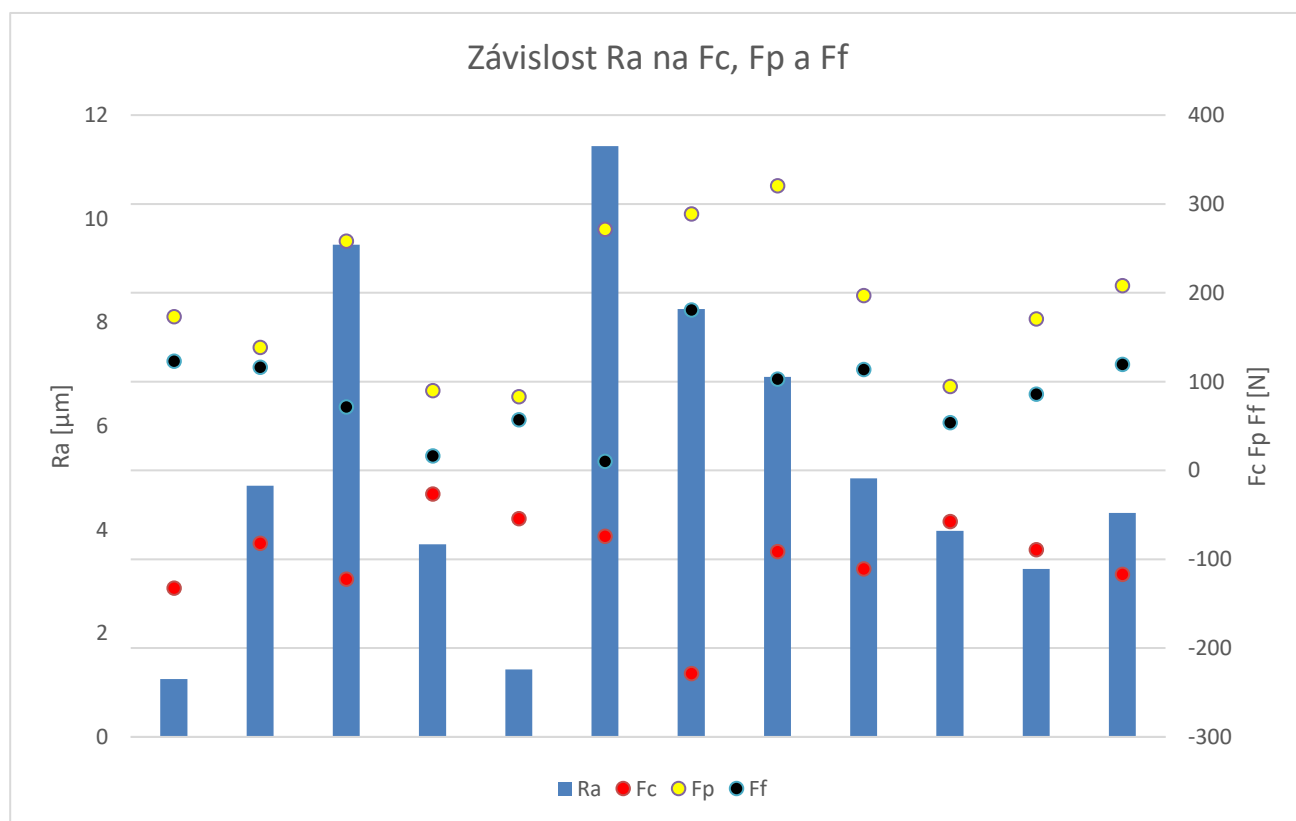
Sloučením tabulek 8 a 9 vznikla tabulka výše, tedy pořadí udělené jednotlivým složkám sil a následně pořadí drsností. Zde je možné vyčíst, které z pokusů budou pro výstup zhodnoceny jako nejlepší a které jako nejhorší.

Viditelně nejlépe hodnoceným v poměru řezných sil a drsností je pokus číslo 5. Jeho síly ve všech složkách dosahují velmi nízkých hodnot a drsnosti vyšly dokonce nejlépe ze všech pokusů. S největší pravděpodobností zde byly zvoleny nejlepší podmínky v poměru těchto dvou měřených prvků. Prostřední ze zvolených úhlů naklopení ostří 60° je vhodný v kombinaci s velmi malým posuvem pro docílení výsledných drsností. Oproti tomu stojí pokus 7, který měl v porovnání s ostatními prvky takřka nevyšší výsledné všechny složky řezné síly a zároveň také velmi špatné výsledky povrchu. To se i při průměrném posuvu $0,7 \text{ mm/ot}$ zdá jako nejhorší. To se dá přičíst, jak už bylo zmíněno v kapitolách výše, úhlu $\lambda_s=50^\circ$. Malý úhel tedy značí velmi špatné výsledky jak sil, tak drsností. Pokus 1 má největší kvalitu povrchu, ale jeho dvě složky řezných sil jsou téměř nejvyšší.

Pokusy 9-12 jsou velmi relativní. Při stejných řezných podmínkách se ale obecně dá tvrdit, že takto zvolené řezné podmínky vedou k uspokojivým výsledkům.

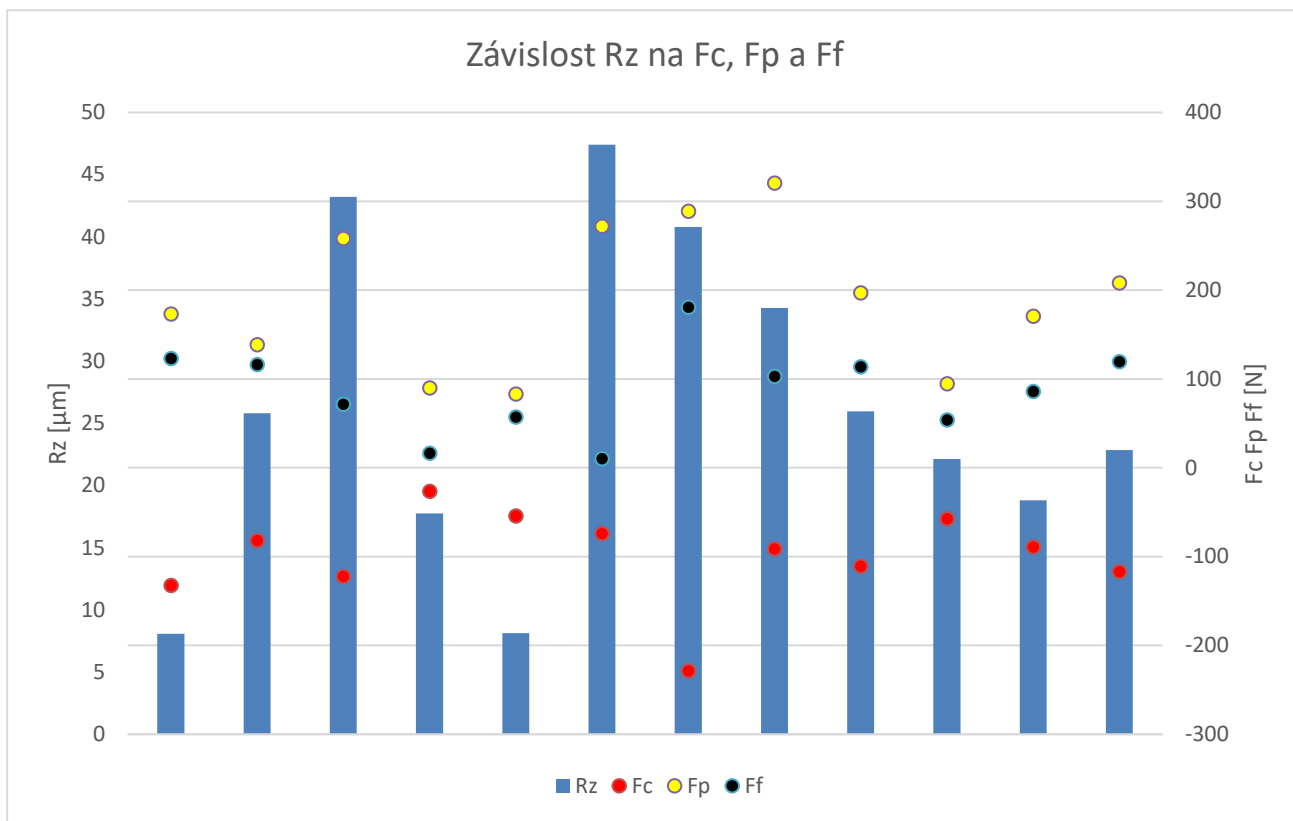
Obecně tedy nelze říct, že velké síly znamenají špatný povrch a naopak. Záleží spíše na všech zvolených parametrech. Pro potvrzení by bylo nutné provést mnoho měření lišících se jen v malých změnách řezných podmínek. Pouze tak by se po vyhodnocení dalo konstatovat více faktů. Tento postup by ale byl velice finančně i časově nákladný. Z výsledného experimentu tedy nelze přesně konstatovat, jaké výsledné řezné síly jsou nejlepší za účelem nejkvalitnějšího povrchu.

Pro přehlednost byly sestaveny z výsledků experimentu grafy, které ukazují závislost R_a a R_z na jednotlivých složkách řezné síly. První z grafů (Graf 14) znázorňuje závislost drsnosti R_a na všech složkách řezné síly F_c , F_p a F_f . Tento a následující (Graf 15) jsou grafickým sloučením tabulek 7 a 8.



Graf 144: Závislost R_a na F_c , F_p a F_f

Tento graf potvrzuje, že nejlepším z pokusů při zaměření na řezné síly celého experimentu je pokus 5 s velmi nízkými hodnotami řezných sil i vyhodnocených drsností. Naopak nejhorším je pokus 5, který má největší drsnost obrobeneho povrchu.



Graf 155: Závislost Rz na Fc, Fp a Ff

7. Technicko-ekonomické vyhodnocení experimentu

Nejprve je v této kapitole vyhodnocena technická stránka experimentu. Pro obrobení žárových nástřiků jako je nástřik NiCrBSi je standardně používána technologie broušení. Ta je svým způsobem nákladná z důvodu rychlého opotřebení brusných kotoučů a jejich nutné výměny. Další z nevýhod této metody je její čas, který je oproti soustružení mnohokrát pomalejší. Soustružení špičkou však nese svá úskalí v podobě ulomené špičky či velké koncentrace napětí na špičce nástroje, jež mohou výrobu značně ovlivnit. Proto byla navržena a zvolena metoda obrábění lineární řeznou hranou, kde k těmto úskalím nedochází.

Výsledným rozdílem technologií po technické stránce se již v minulosti zabýval pan Chýna M [14]. Ten ve své závěrečné práci porovnával broušení do kulata a soustružení lineární řeznou hranou. Při jeho zvolených podmínkách a daných rozměrech s ohledem na čas došel k závěru, že využití soustružení bylo o 92% úspornější, než broušení. Dá se tedy předpokládat, že podobných výsledků by bylo dosaženo i při výpočtech u tohoto nástřiku.

To přináší nové poznatky a ukazuje, kterým směrem by mohla směřovat budoucnost. Co však oponuje tomuto faktu, je výsledný povrch. I přes vyšší náklady a časovou náročnost se dá při použití broušení docílit výrazně lepších povrchů. Soustružení lineární řeznou hranou je tedy efektivnější metodou při obrábění NiCrBSi, ale jen v určitých aspektech.

Kalkulace ekonomického vyhodnocení byla zhotovena na principu principového kalkulačního vzorce. Nejprve je nutné sestavit kalkulační vzorec pro tento experiment. Ten je složen ze tří částí, které jsou vidět na obrázku (Obrázek 36).

$$\begin{aligned} & \text{přímý materiál} \\ & + \text{náklady na nástroje} \\ & + \text{zpracovací náklady} \\ \hline & = \text{vlastní náklady výroby} \end{aligned}$$

Obrázek 36: Kalkulační vzorec experimentu

První z nich je přímý materiál (PMa), který je tvořen náklady na materiál. Mezi ně patří náklady na polotovary a náklady na nástřik. Druhou částí jsou náklady na nástroje (NN), mezi které patří náklady na výrobu nástroje a upínacího trnu a jejich konstrukci, dále pak náklady na destičky. Poslední částí jsou ZN, tedy zpracovací náklady. Ty jsou tvořeny jako suma nákladů na pracoviště, tedy za pracovníka (přímých mezd) a za stroj (strojních nákladů). Spojení těchto dvou položek bylo nutné z důvodu cen, které nemohly být určeny rozděleně. Výrobce např. trnu totiž neuvádí jeho samotnou cenu, ale určuje si vlastní hodinovou sazbu. Výsledná cena se tedy odráží na složitosti, protože pokud je velká, výrobce nad ní stráví více času. Stejný příklad uvádí univerzita, kdy její pracovník je zahrnut v hodinové sazbě daného pracoviště. Další ze skutečností je nezapočítání režijních nákladů. Při experimentech na ZČU se nezapočítávají náklady na údržbu, úklid, vytápění atd. V kalkulačním vzorci experimentu chybí také režijní přírážka, protože celý experiment je brán jako kalkulační jednice. Je nutné zmínit, že nástroje s jejich náklady byly vynaloženy pouze na tento experiment, který byl unikátní.

PMa – Náklady na materiál:

Polotovary:

Cena za 1 m tyče: 1700 Kč/m

Celková délka: 3 m

Cena za 3 m tyče:

$$1700 * 3 = 5100 \text{ Kč}$$

Náklady na hod. přípravy 800Kč/h

Doba přípravy polotovaru: 3 h

Náklady na přípravu:

$$800 * 3 = 2400 \text{ Kč}$$

Celkové náklady za polotovary:

$$5100 + 2400 = 7500 \text{ Kč}$$

Nástřík:

Obsah polotovaru:

$$V = 2 * \pi * r * l = 2 * \pi * 4 * 20 = 503 \text{ cm}^2$$

r = poloměr obrobku v cm

l = délka obrobku v cm

Cena nástřiku za cm²: 19,30 Kč/cm²

Počet polotovarů: 6 ks

Celkové náklady za nástřík:

$$503 * 19,30 * 6 = 58200 \text{ Kč}$$

$$\sum PMa = 7500 + 58200 = 65700 \text{ Kč}$$

NN – Náklady na nástroje

Doba výroby nástroje: 3 h

Doba výroby trnu: 1,5 h

Náklady na hod výroby: 1600 Kč/h

Náklady na výrobu nástroje a trnu:

$$(3 + 1,5) * 1600 = 13200 \text{ Kč}$$

Doba tvorby konstrukce: 6 h

Náklady na hod tvorby konstrukce: 1000 Kč

Náklady za konstrukci:

$$6 * 1000 = 6000 \text{ Kč}$$

Náklady na 10 destiček: 25600 Kč

NN – Celkové náklady na nástroje:

$$\sum NN = 13200 + 6000 + 25600 = 44800 \text{ Kč}$$

ZN – suma nákladů na pracoviště, tedy za pracovníka (přímých mezd) a za stroj (strojních nákladů) soustruh + dynamometr + drsnoměr

Zpracovací náklady na soustruh:

Hodinová sazba pracovišti: 1400 Kč/h

Počet hodin na stroji: 12 h

Celkové náklady na soustruh:

$$1400 * 12 = 16800 \text{ Kč}$$

Zpracovací náklady na dynamometru:

Hodinová sazba pracoviště: 800 Kč/h

Počet hodin na pracovišti: 12 h

Celkové náklady na dynamometru:

$$800 * 12 = 9600 \text{ Kč}$$

Zpracovací náklady na drsnoměr a kruhoměr:

Hodinová sazba pracoviště: 850 Kč/h

Počet hodin na pracovišti: 9,5 h

Celkové náklady na drsnoměr a kruhoměr:

$$850 * 9,5 = 8075 \text{ Kč}$$

ZNs – zpracovací náklady na stroje:

$$\sum ZNs = 116800 + 9600 + 8075 = 33675 \text{ Kč}$$

VNV – Vlastní náklady výroby

$$VNV = \sum PMa + \sum NN + \sum ZNs =$$

$$= 65700 + 44800 + 33675 = 144175 \text{ Kč}$$

Výše uvedené výpočty vedly k následujícím číslům. Součet nákladů na materiál činí 65 700 Kč, čímž je nejdražší položkou z celého experimentu. Je tomu kvůli vysoké ceně nástřiku, který není běžně používaným povlakem. Další z položek jsou náklady na nástroje, kde bylo nutné nechat vyhotovit nástroj, hrot a obě tyto položky zkonstruovat za 44 800 Kč. Poslední z položek jsou zpracovací náklady na stroje, které činí 33 675 Kč. Ekonomické vyhodnocení bylo situováno tímto směrem výpočtu celkových nákladů na zhotovení experimentu. Nutností je dodat, že tato částka je částkou, kterou ZČU musela vynaložit navíc, nejsou v ní zahrnuty ceny strojů, měřicích zařízení, prostor, energií atd. I tak je celková cena téměř 145 000 Kč.

8. Závěr

Jak je zmíněno v úvodu, na strojní součásti jsou kladeny přísné nároky z hlediska životnosti, funkčních vlastností aj. Za účelem zlepšení těchto aspektů se dostaly do popředí žárové nástřiky.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provést experiment za účelem prozkoumání problematiky řezných sil při obrábění žárového nástřiku NiCrBSi za použití lineární řezné hrany. Prvním z úkolů bylo sestavení plánu experimentu a jeho následné provedení. Při provádění byly souběžně s obráběním měřeny řezné síly. Dále proběhlo měření a zpracování drsností obrobeného povrchu, které byly vztaženy k výsledným řezným silám.

V úvodu teoretické části je zpracována problematika žárových nástřiků, zkonkretizovaná přes nástřiky na bázi Niklu až po nástřik NiCrBSi. Dále je popsán aktuální stav obrábění žárových nástřiků, který standardně probíhá pomocí broušení. V neposlední řadě je zpracována problematika řezných sil.

Praktická část se zabývá nejprve návrhem, konkrétně popisem a plánem experimentu, kde jsou zahrnuty popisy stroje, měřicího zařízení a polotovaru. Samotný experiment doprovázel ještě zkušební pre-experiment, kde byly ozkoušeny veškeré komponenty a zvolené řezné podmínky a zjištěním funkčnosti celé soustavy. Při samotném experimentu došlo nejprve ke hrubování všech vzorků. Všechny průběhy hrubování byly zaznamenány, vyhodnoceny a graficky zpracovány. Dále bylo provedeno a zpracováno dokončování. Bylo zjištěno, že výsledné velikosti řezných sil nejvíce ovlivňuje úhel naklopení ostří λ_s , kdy při větším naklopení jsou výsledné síly ve všech složkách menší. Z vyhodnocených dat bylo každému pokusu uděleno pořadí, podle velikosti průměrných sil, kde pořadí 1 příslušelo pokusu s nejmenšími vyhodnocenými silami. Výsledky však bylo nutné k něčemu vztáhnout, proto byla zvolena drsnost povrchu. Ta byla změřena, vyhodnocena a bylo jí uděleno pořadí, stejně jako tomu bylo u řezných sil. Nejlepším pokusem, co se týče drsnosti, byl pokus 1 a nejhorším pokus 6. Při detailnějším prozkoumání však nebyla nalezena žádná větší souvislost mezi velikostmi řezných sil a drsností. Jedinou výjimkou je pokus 7, který má největší řezné síly a téměř nejhorší kvalitu povrchu. Stejně tak tomu bylo i u zbylých pokusů. Nelze tedy konstatovat, že vysoké řezné síly souvisejí s kvalitním povrchem a naopak. Pro nalezení souvislostí by bylo nutné provést několik stejných měření a posléze potvrdit či vyvrátit vztah mezi drsností a řeznými silami.

Pro hrubování a dokončování byl vždy použit jiný břit a po jednom přejezdu nebyla na destičkách žádná měřitelná opotřebení. V průběhu, když jeden přejezd neodebral žádný materiál, byly zjištěny rozdíly v rozměrech VBD. Jednalo se sice o minimální rozdíly, ale u takto malé hloubky řezu jsou tyto rozdíly nezanedbatelné. Toto zjištění mohlo mít dopad na více měření. Po dokončení experimentu byly všechny VBD přeměřeny a potvrzena rozdílnost v rozměrech hned u několika destiček. Tento fakt také přispěl k nenalezení podobností mezi řeznými silami a drsností.

Technicko-ekonomické vyhodnocení bylo vztaženo na celkové náklady za provedení experimentu. Po veškerých výpočtech byla stanovena finální částka ve výši 144 175 Kč.

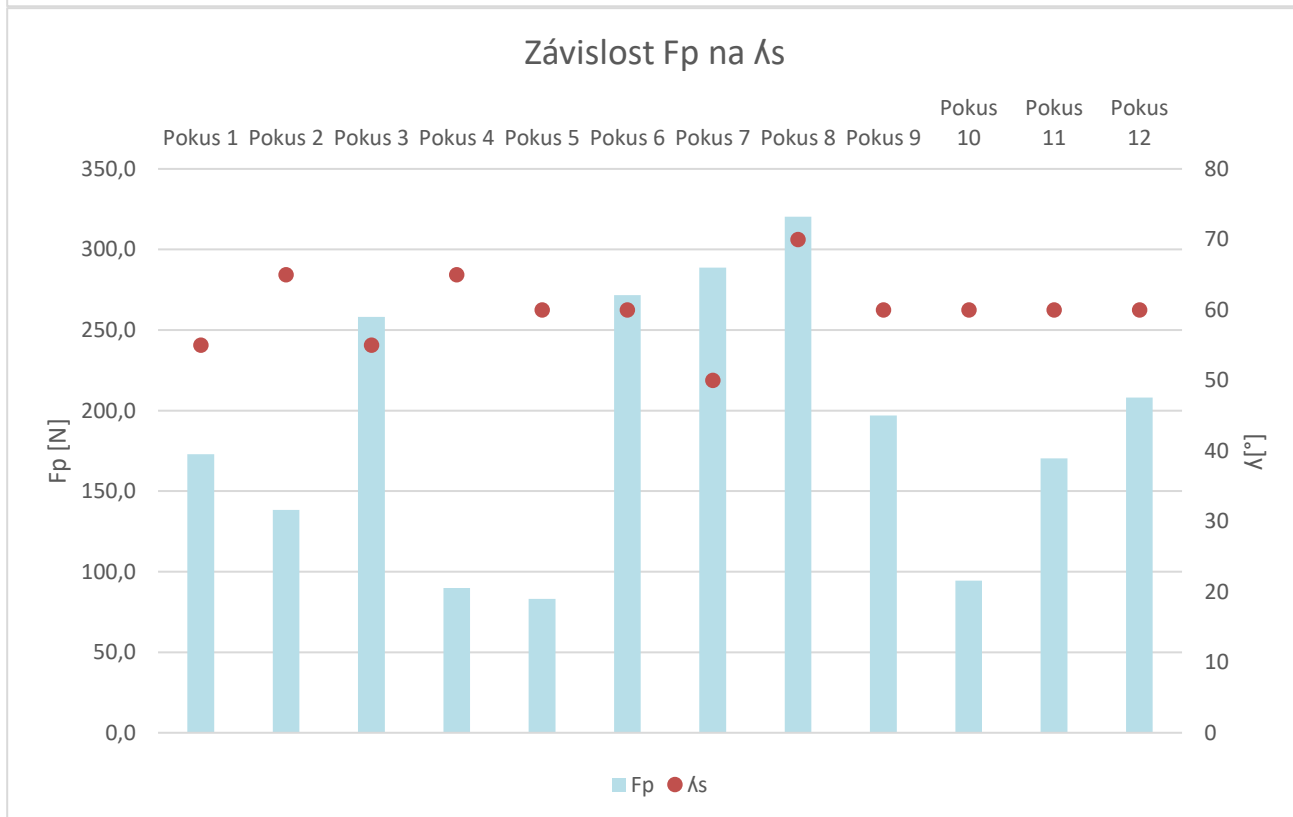
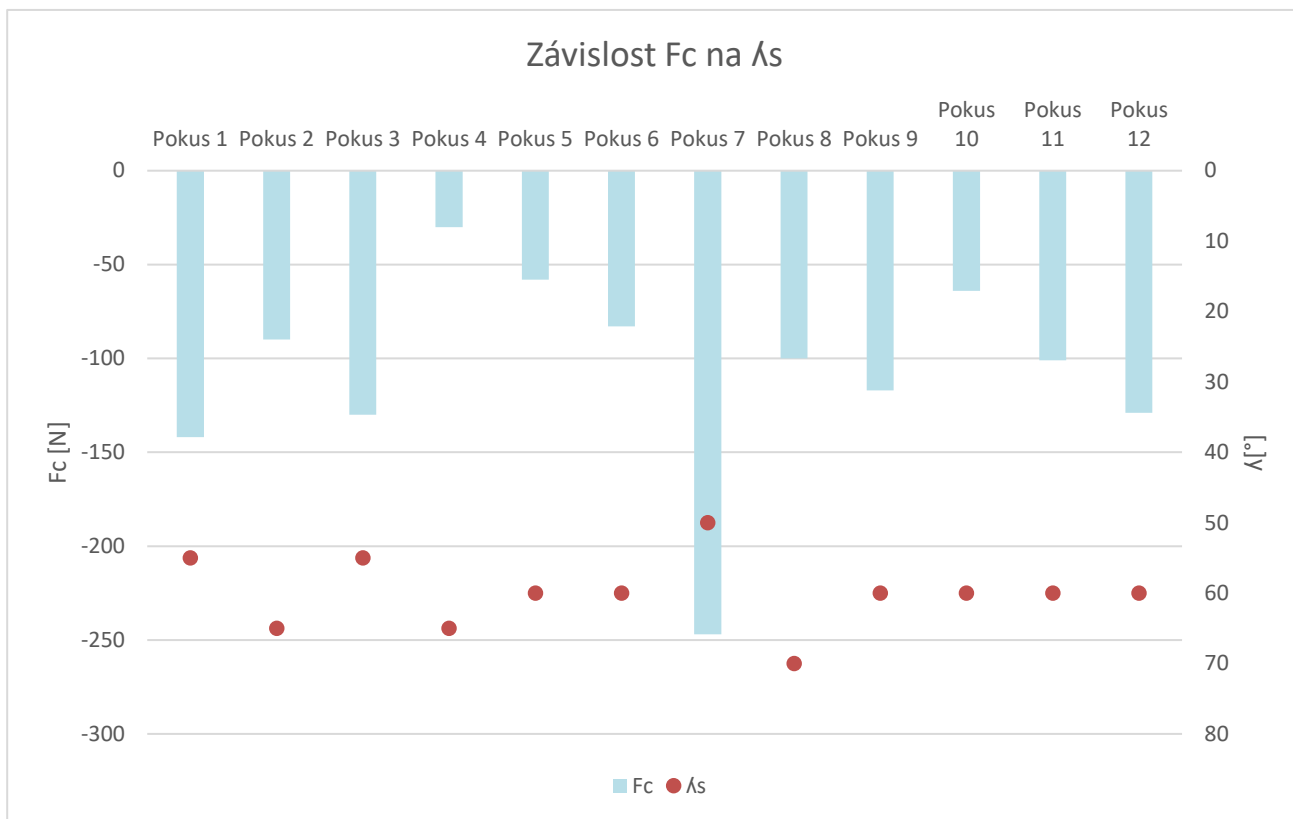
Seznam použité literatury

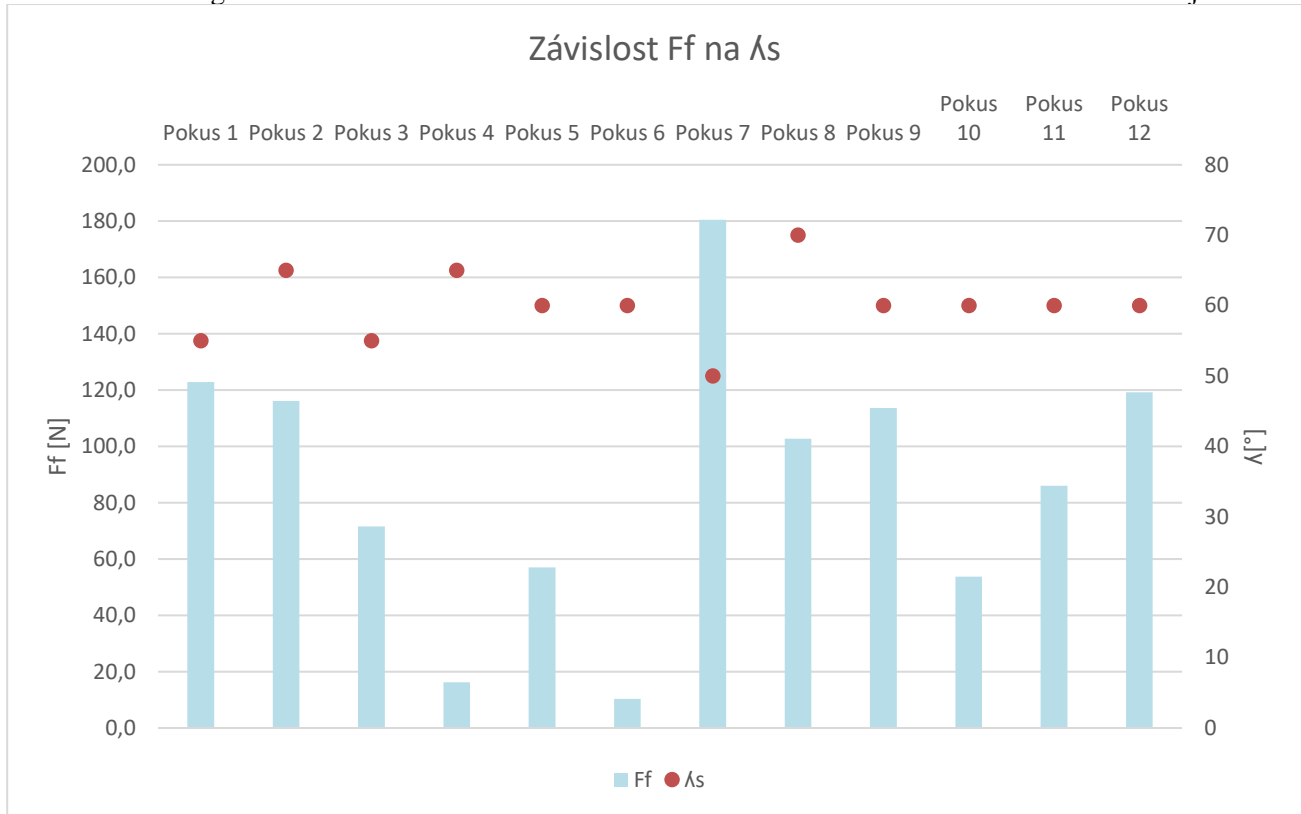
- [1] A. V. a. B. D. P. FAUCHAIS, „*Quo Vadis Thermal Spraying?*“, July, 1999. [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1361/105996301770349510.pdf>.
- [2] ŠILDBERGER, Radek „*Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem*“, 2008. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7516.
- [3] WILDEN, FRANK, BERGMANN. „Process and microstructure simulation in thermal spraying“, *Surface and Coatings Technology*, pp. 1962-1968, 26 10 2006.
- [4] Engineering, „engineering.sk“, [Online]. Available: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3864-technologie-zarovych-nastriku>.
- [5] M. HELALI, M. HASHMI, „A Comparative study of plasma spraying and High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spraying“, v *Proceeding of the 10th Conference of the Irish Manufacturing Committee (IMC 10)*, Galway, Ireland, 1992.
- [6] „<https://www.fst.nl/>“, [Online].
- [7] MILLER. „Thermal Inc. Brochure of HVOF Spray System“, 1988.
- [8] G. M. NIMEL SWORNA ROSS, „*Effect of cryogenic coolant on machinability of difficult-to-machine Ni–Cr alloy using PVD-TiAlN coated WC tool*“, 2019. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-018-1552-3>.
- [9] RASHID P. „*Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review*“, 2013. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2014.880460>.
- [10] KULJANIC, SORTINO, TOTIS. „MACHINABILITY OF DIFFICULT MACHINING MATERIALS“, v *International Research/Expert Conference*, Udine, 2010.
- [11] COELHO, SILVA, BRAGHINI a BEZERRA, „*Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications analysis when turning INCONEL 718TM at high cutting speeds*“, v *Journal of Materials Processing Technology*, 2004.
- [12] VALÍČEK, HARNIČÁROVÁ, ŘEHOŘ, KIŠNEROVÁ, FULEMOVÁ, GOMBÁR, KUČEROVÁ, HNÁTÍK. „*Milling of Complex Surfaces of EN 10060 Steel after HVOF Sprayed NiCrBSi Coatings*“, MDPI, 30 Červen 2020.
- [13] M.P.Planche, „*Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes*“, *Surface and Coatings Technology*, 21 Prosinec 2005.
- [14] CHÝNA, Marek. *Obrobitelnost žárového nástřiku Fe13Cr a jeho vlastnosti*, Plzeň, 2021.
- [15] KAVKOVÁ, D. „*Broušení*“, 2016. [Online]. Available: <https://docplayer.cz/47292248-Charakteristika-stroje-brusky-nastroje-brousici-kotouce-teliska-kameny-pasy-volne-brusivo.html>.
- [16] V. š. Bářská, *Technologie třískového obrábění*, Ostrava.
- [17] I. MIČÍKOVÁ, *Strojní obrábění Soustružení V.*, Havířov.
- [18] FILIPPOV, FILIPPOVA, CHAZOV. *Cutting-force components in turning by tools with no cutting tip*, Tomsk: Russian academy of sciences, 2016.
- [19] [Online]. Available: <https://www.youtube.com/>.
- [20] FILIPPOV A PETRUSHIN. *Analysis of the geometry of oblique sharpening of single-edge tools*, *Obrab. Met., Tekhnol., Oborud., Instrum.*, 2013, pp. 8-14.
- [21] MMspektrum, „mmspektrum.com“, Březen 2012. [Online]. Available:

- <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>.
[Přístup získán 10 03 2022].
- [22] KIENZL A VIKTOR. *Spezifische Schnittkrafte bei der Metallbearbeitung*, 1957.
- [23] MAREK, Josef. *Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy*, Plzeň, 2018.
- [24] LUDĚK P. „*Silové zatížení frézovacích nástrojů při obrábění*,“ 2018. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174391.
- [25] BRYCHTA, ČEP, SADÍLEK, PEŘKOVSKÁ, NOVÁKOVÁČep. *Nové směry v progresivním obrábění*, Brno, 2007.
- [26] KISTLER, „*Force sensors from Kistler*,“ Kistler, 2022. [Online]. Available: <https://www.kistler.com/en/>.
- [27] P. DINEVA, D. GROSS, R. MULLER a T. RANGELOV, *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials*, Sofia, Bulharsko: SpringerLink, 2014.
- [28] OULEHLA. Martin, „*Analýza sil řezání při frézování*,“ 2020. [Online]. Available: <https://docplayer.cz/201361312-Analyza-sil-rezani-pri-frezovani-z-polotovaru-po-3d-tisku.html>.
- [29] „Katedra technologie obrábění.,*Vybavení a prostory katedry*,“ [Online]. Available: https://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/UF106.html. [Přístup získán 08 04 2022].
- [30] MARŠÁLEK, Ondřej. „*Obrobitelnost pružinové oceli 42SiCr*,“ 2020. [Online]. Available: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/41588/1/DP_Marsalek_Ondrej.pdf.

Příloha č.1

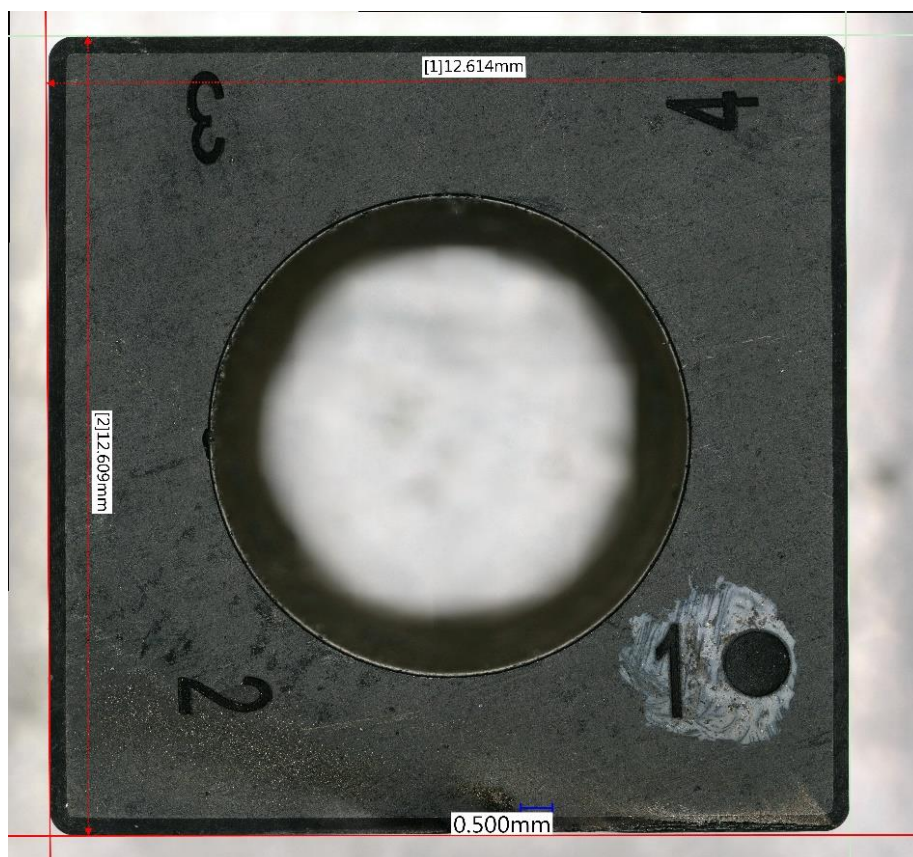
Závislost velikosti řezných sil na λ_s





Příloha č.2

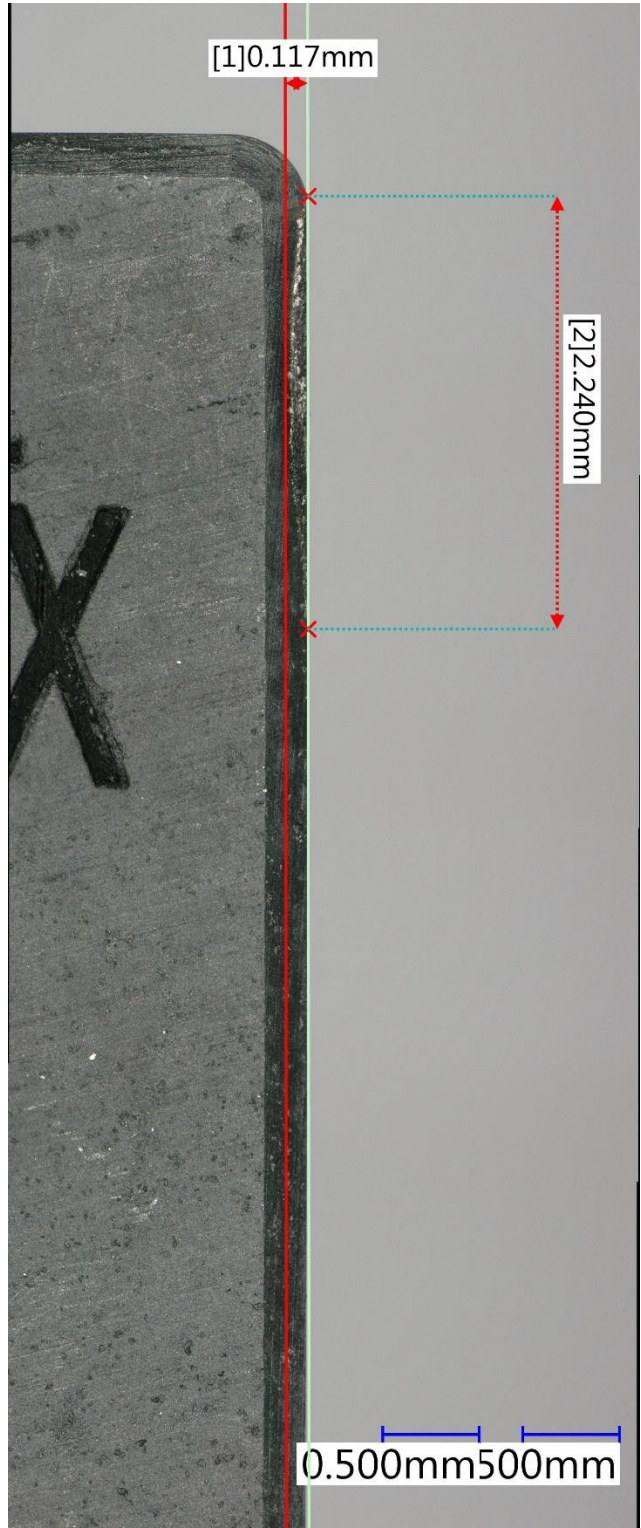
Ukázka měření rozměrů řezných destiček



Ukázka měření hřbetu destiček



Ukázka měření čela destiček



Příloha č.3

Parametry stroje a měřidel

Obráběcí stroj EMCO MAXXTURN 25

Work area		Tool turret	
Swing over bed	325 mm (12.8")	Shaft diameter for boring bars	16 mm (0.63")
Swing over cross slide	150 mm (5.9")	Turret indexing time	0.2 sec
Main spindle / counter spindle distance	485 mm (19")	Driven tools	
Maximum turning diameter	114 mm (4.5")	Speed range	0 – 6000 rpm
Maximum part length	315 mm (12.4")	Maximum torque	4 Nm (2.9 ft/lbs)
Maximum bar diameter	25.4 mm (1")	Maximum drive power	1.2 kW (1.6 hp)
Travel		Number of driven tools	6
Travel in X	100 mm (3.9")	Feed drives	
Travel in Z	320 mm (12.6")	Rapid motion speed X / Y / Z	20 / 10 / 30 m/min (787 / 394 / 1181 ipm)
Travel in Y	+20/-15 mm (0.78"/-0.59")	Feed force in the X / Y / Z axis	3000 / 4000 / 4000 N (674 / 900 / 900 lbs)
Travel in Z2	350 mm (13.8")	Positioning scatter VDI 3441 in X / Y / Z	3.5 / 3 / 4 (0.00014/0.00012/0.00014")
Main spindle		Coolant system	
Speed range	0 – 8000 rpm	Tank volume	140 Liter (37 gal)
Torque at spindle	30 Nm (22.1ft/lbs)	Pump power standard	0.57 kW (2.2 hp)
Spindle nose	ø 70 h5	Pump capacity at 3,5bar / 1bar	15 / 65 l/min (4 / 17.2 gal/min)
Spindle bearing	60 mm (2.36")	Pump capacity at 14 bar / 6 bar (optional)	10 / 60 l/min (2.6 / 15.8 gal/min)
Spindle bore hole	33 mm (1.3")	Power consumption	
Counter spindle		Connected load	12 kVA
Speed range	0 – 8000 rpm	Compressed air	6 bar (87 PSI)
Torque at spindle	20 Nm (14.7 ft/lbs)	Dimensions and weight	
Spindle nose	ø 70 h5	Height of spindle center above floor	1140 mm (45")
Spindle bearing	45 mm (1.77")	Total machine height	1870 mm (73.6")
C axis		Foot print (without chip conveyor) LxD	2180 x 1425 mm (85.8" x 56.1")
Resolution	0.001°	Total weight	2100 kg (4630 lb)
Rapid motion speed	1000 rpm	Safety devices	
Spindle indexing	0.01°	CE conform	
Drive power			
Main spindle	6.5 kW (8.7 hp)		
Counter spindle	3.5 kW (4.7 hp)		
Tool turret			
Number of tool positions	12		
Number of indexing positions	36		
VDI shaft (DIN 69880)	VDI16		
Tool cross-section for square tools	12 x 12 mm (0.47" x 0.47")		

Digitální mikroskop KEYENCE VHX-6000

Model		VHX-6000	
Camera	Image sensor	1/1.8-inch CMOS image sensor Virtual pixels: 1600 (H) × 1200 (V)	
	Scanning system	Progressive	
	Frame rate	50 F/s (max.)	
	High Dynamic Range	16-bit intensity range through RGB data from each pixel	
	Gain	Auto, Manual, Preset	
	Electronic shutter	Auto, Manual, 1/60, 1/120, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/5000, 1/9000, 1/19000	
	Supercharge shutter	0.02 to 4 s	
	White balance	Push set, Auto, Manual, Preset (2700K, 3200K, 5600K, 9000K)	
	Back-focus adjustment	Not required	
LCD monitor	Size	Color LCD (IPS) 23"¹	
	Panel size	509.184 (H) × 286.416 (V) mm 20.05"(H) × 11.28"(V)¹	
	Pixel pitch	0.2652 (H) × 0.2652 (V) mm 0.01"(H) × 0.01"(V)¹	
	Number of pixels	1920 (H) × 1080 (V) (FHD)¹	
	Display colors	Approx. 16770000 colors²¹	
	Brightness	300 cd/m² (Center 1 Point, typical)¹	
	Contrast ratio	1000:1 (typical)¹	
	Field of view	±89° (typ., horizontal), ±89° (typ., vertical)¹	
CD-R/CD-RW/DVD drive unit	Unit	DVD-ROM super-multi drive unit	
	Applicable disk	CD-R/CD-RW/DVD±R/DVD±R DL/DVD±RW/DVD-RAM	
	Storage capacity	8.7 GB (when using DVD±R DL)	
Hard disk drive unit		500 GB (including 165 GB reserved area) Approx. 1680000 images (when a 2-million-pixel image is compressed) to approx. 55000 images (when a 2-million-pixel image is not compressed)	
Image format		JPEG (with compression), TIFF (without compression)	
Observable image size		20000 (H) × 20000 (V) pixels (when stitched)	
Light source	Lamp	High-brightness LED	
	Lamp life	40000 hours (reference)	
	Color temperature	5700K (typical)	
Video output	Output method	DVI-I (1920 × 1080 pixels)	
	Scanning frequency	Special LCD monitor	66 kHz (H), 60 Hz (V)
		External monitor	
Input	Mouse input	USB mouse supported	
	Keyboard input	USB keyboard supported	
	External remote input	Pause/Recording, Non-voltage input (Contact/Noncontact)	
Interface	LAN	RJ-45 (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T)	
	USB 2.0 Series A	6 types	
	USB 3.0 Series A	2 types	
Power supply	Power voltage	100 to 240 VAC, 50/60 Hz	
	Power consumption	280 VA	
Environmental resistance	Ambient temperature	+5 to +40 °C 41 to 104 °F	
	Relative humidity	35 to 80 % RH (No condensation)	
Weight	Controller	Approx. 12.5 kg	
	Camera unit	Approx. 1.2 kg (VHX-6100/6020)	
	Console	Approx. 0.5 kg	
Dimensions (Excluding the projected areas)		550 (W) × 470 (H) × 200 (D) 21.65"(W) × 18.50"(H) × 7.87"(D) (when stored)	

Piezelektrický dynamometr KISTLER:9119AA2

Measuring range (central), single components	F_x, F_y, F_z M_x, M_y M_z	kN N-m N-m	-4 ... 4 -150 ... 150 -300 ... 300
Meas. range when compon. act simult.(centr.), $M_x, M_y, M_z = 0$	F_x, F_y, F_z	kN	-2,5 ... 2,5
Calibrated measuring range			
100 %	F_x, F_y, F_z	N	0 ... 4 000
10 %	F_x, F_y, F_z	N	0 ... 400
1 %	F_x, F_y, F_z	N	0 ... 40
Overload (central), single comp.	F_x, F_y, F_z	kN	-4,5/4,5
Threshold		N	<0,002
Sensitivity	F_x, F_z F_y	pC/N pC/N	≈-26 ≈-13
Linearity			
Meas. range 10% ... 100%		%/FSO	≤±0,3
Meas. range 0% ... <10%		%/FSO	≤±0,5
Hysteresis			
Meas. range 10% ... 100%		%/FSO	≤±0,3
Meas. range 0% ... <10%		%/FSO	≤±0,5
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$ $F_x \leftrightarrow F_y$ $F_x, F_y \rightarrow F_z$	% % %	≤±2 ≤±2 ≤±2
Natural frequency (without additional mass)	$f_n(x)$ $f_n(y)$ $f_n(z)$	kHz kHz kHz	≈4,3 ≈4,6 ≈4,4
Operating temperature range		°C	-20 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈230
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10 ¹³
Ground isolation		Ω	>10 ⁸
Degree of protection EN60529		-	IP67 ¹⁾
Weight	Dynamometer Cover plate	kg kg	1,35 0,72
Mounting surface		mm	55x80

Digitalizační karta KISTLER: 5697

Dimensions	mm	208x70x249
Weight	kg	2,15
Operating temperature range	°C	0 ... 50
Min./max. temperature	°C	-10/60

Power supply

Galvanic isolation (max. 40 V) between input voltage
and supply voltage

Input voltage range	VDC	10 ... 36
Consumption	VA	≈5

A/D conversion

Number of channels		28 ¹⁾
Resolution (per channel)	Bit	16
Input voltage ranges (configured through software)	V	±0,1/±0,2/±0,5 ±1/±2/±5/±10
Input voltage	V	max. ±20
Sampling frequency (configured through software)	kS/s	... 1 000
max. @ 1 channel	kS/s	1 000
max. @ 3 channels	kS/s	333
max. @ 8 channels	kS/s	125
max. @ 14 channels	kS/s	71

Osmikanálový zesilovač KISTLER:5080

Connector Type		BNC neg.
Measuring range FS	pC	±2 ... 2 200 000
Measurement uncertainty (0 ... 50 °C)		
FS ≥2 ... <10 pC	%	<±2
FS ≥10 ... <100 pC	%	<±0,6
FS ≥100 ... <2 200 000 pC	%	<±0,3
Drift, measuring mode DC (Long)		
at 25 °C, max. relative Humidity RH of 60 % (non-condensing)	pC/s	<±0,03
at 25 °C, max. relative Humidity RH of 70 % (non-condensing)	pC/s	typ. <±0,05
at 50 °C, max. relative Humidity RH of 50 % (non-condensing)	pC/s	<±0,3
Overload	%FS	≈±110