

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270011 - Obrábění, aditivní  
technologie a zabezpečování kvality

**Studijní specializace:** Bez specializace

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv technologie HVOF žárového stříkání NiCrBSi na jeho  
obrobitelnost**

**Autor:** Bc. Jan MEZULIÁNIK

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MEZULIÁNIK**  
Osobní číslo: **S21N0010P**  
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Téma práce: **Vliv technologie HVOF žárového stříkání NiCrBSi na jeho obrobiteľnosť**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

## Zásady pro vypracování

1. Úvod od problematiky
2. Současný stav a jeho hodnocení
3. Návrh a realizace experimentu
4. Vyhodnocení
5. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z [www.knihovna.zcu.cz](http://www.knihovna.zcu.cz)
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)
- Spektrum, MM Průmyslové dostupné z [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)
- 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. Tomáš Zatloukal**  
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

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

## 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 chtěl poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Janu Řehořovi Ph.D. za pomoc, rady a spolupráci při tvorbě mé diplomové práce a taky za jeho důvěru ve mne vloženu.

Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi Ing. Tomášovi Zatloukalovi a jeho kolegovi Ing. Michalovi Povolnému za pomoc při přípravě a realizace experimentů. Děkuji také Ing. Lubošovi Kroftovi Ph.D. a to nejen za pomoc při zařizování přípravy vzorků. Svůj vděk bych chtěl v neposlední řadě také vyjádřit doc. Ing. Miroslavu Gombárovi Ph.D. za konzultace a pomoc při přípravě a statistickém vyhodnocování experimentů.

Nakonec bych rád poděkoval celé své rodině ze jejich finanční i psychickou podporu po celou dobu mého studia.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Mezuliánik	<b>Jméno</b> Jan		
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	<b>Jméno</b> Jan		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv technologie HVOF žárového stříkání NiCrBSi na jeho obrobiteľnosť			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	106	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	77	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	17
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce řeší vliv změny parametrů žárového stříkání slitiny NiCrBSi na obrobiteľnosť povlaku při obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu, čímž navazuje na výzkum prováděný v minulých letech. V práci jsou také zkoumané nedefinovatelné faktory, které by mohly ovlivnit rezný proces. Zaznamenaná data jsou statisticky vyhodnocena načež jsou ze získaných poznatky vyvozeny závěry k chování procesu a k obrobiteľnosti daného materiálu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Žárové nástřiky, obrábění žárových nástřiků, NiCrBSi, HVOF, lineární rezná hrana, soustružení žárových nástřiků, parametry žárového stříkání

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Mezuliánik	<b>Name</b> Jan
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270011 - Machining, additive technology and quality assurance	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	<b>Name</b> Jan
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Effect of HVOF thermal spraying on the machinability of NiCrBSi coatings	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	106	<b>TEXT PART</b>	77	<b>GRAPHICAL PART</b>	17
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis addresses the influence of changing parameters in flame spraying of NiCrBSi alloy on the machinability of the coating when machined with a tool with defined cutting edge geometry, while building upon research conducted in previous years. The study also examines external factors that could affect the cutting process. The recorded data is statistically evaluated, and conclusions regarding the behaviour of the process and the machinability of the material are drawn from the acquired knowledge.
<b>KEY WORDS</b>	Thermal spraying, thermally sprayed coating, machining thermally sprayed coatings, NiCrBSi, HVOF, linear cutting edge, turning thermally sprayed coating, thermal spraying parameters.

## Obsah

Zadání DP.....	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků .....	11
Seznam grafů.....	14
Seznam tabulek .....	15
1 Úvod.....	16
1.1 Cíle práce.....	16
2 Představení problematiky.....	16
2.1 Technologie žárového stříkání.....	17
2.1.1 Princip žárového stříkání.....	17
2.1.2 Historie žárových nástřiků [1, 3, 4].....	18
2.1.3 Kdy se používají.....	19
3 Současný stav a jeho hodnocení.....	20
3.1 Metody žárového stříkání .....	20
3.1.1 Žárový nástřik plamenem.....	20
3.1.2 Nástřik studeným plynem [9].....	21
3.1.3 Nástřik elektrickým obloukem .....	22
3.1.4 Plazmový nástřik.....	22
3.2 Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF .....	23
3.2.1 Parametry HVOF žárového stříkání.....	24
3.3 Reálný vliv parametrů metody HVOF.....	25
3.3.1 Vliv průtoku paliva a kyslíku .....	25
3.3.2 Vliv vzdálenosti aplikačního zařízení od základního materiálu.....	28
3.3.3 Vliv průtoku nosného plynu.....	29
3.3.4 Vliv množství dodávaného prášku .....	30
3.4 Žárové nástřiky na bázi niklu .....	30
3.4.1 Nástřik NiCrBSi.....	30
3.4.2 Nástřik NiTi.....	31
3.4.3 Nástřik Ni5Al .....	31
3.5 Obrábění niklových slitin .....	31
3.6 Výzkum obrábění nástřiku NiCrBSi na ZČU [35, 36] .....	35
3.6.1 Obrábění lineární řeznou hranou.....	35
3.7 Obrábění žárových nástřiků obecně .....	39



3.8	Shrnutí poznatků týkajících se obrábění žárových nástřiků .....	41
4	Před-experiment – nedefinovatelné faktory ovlivňující řezný proces .....	43
4.1	Teplotní dilatace .....	43
4.2	Opakovatelnost najetí .....	44
4.3	Síla opření protivřetena .....	46
4.4	Skutečný rozměr a profil žárového nástřiku.....	46
4.5	Skutečná velikost vyměnitelné břitové destičky .....	46
4.6	Přesnost opakovaného vložení VBD .....	50
5	Hlavní experiment .....	52
5.1	Návrh hlavního experimentu .....	52
5.2	Proces žárového stříkání .....	53
5.2.1	Příprava před nástřikem .....	53
5.2.2	Žárové stříkání.....	55
5.2.3	Proces žárového stříkání vzorků pro DP .....	56
5.2.4	Stechiometrie spalování směsi kerosinu a kyslíku [49] .....	58
5.3	Tvarová charakteristika žárově stříkaného povlaku .....	60
5.4	Samotné testy obrobitelnosti .....	63
5.4.1	Použitý řezný nástroj.....	63
5.4.2	Měření řezných sil.....	64
5.4.3	Měření akustické emise .....	65
6	Výsledky.....	68
6.1	Vznikající tříska.....	68
6.2	Řezné síly .....	69
6.3	Akustická emise.....	72
6.4	Drsnost obrobené plochy .....	72
6.5	Opotřebení bříty VBD .....	74
6.6	Materiálové charakteristiky .....	76
6.6.1	Pórovitost .....	77
6.6.2	Mikrotvrdost.....	77
6.6.3	Mikrostruktura a EDX analýza .....	77
7	Vyhodnocení .....	79
7.1	Vyhodnocení plánovaného experimentu .....	79
7.1.1	Vyhodnocení celkové řezné síly .....	79
7.1.2	Vyhodnocení pasivní síly .....	84
7.1.3	Vyhodnocení řezné síly $F_c$ .....	84

7.1.4	Vyhodnocení posuvové síly .....	87
7.1.5	Vyhodnocení dosahované drsnosti .....	87
7.1.6	Vyhodnocení opotřebení břitu nástroje .....	88
7.2	Strukturální rovnice .....	89
8	Závěr.....	92
	Seznam použitých zdrojů .....	94
	PŘÍLOHA č. 1 .....	i
	PŘÍLOHA č. 2.....	ii
	PŘÍLOHA č. 3.....	iii
	PŘÍLOHA č. 4.....	iv
	PŘÍLOHA č. 5.....	v
	PŘÍLOHA č. 6.....	vi
	PŘÍLOHA č. 7.....	vii
	PŘÍLOHA č. 8.....	viii

## Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
HVOF	Vysokorychlostní nástřik plamenem
APS	Plazmový nástřik
NiCrBSi	Slitina nikl chrom bor křemík
SLM/SLPM/NLPM	Standartních litrů za minutu
LPH	Litrů za hodinu
VZÚ	Výzkumný a zkušební ústav
RTI	Regionální technologický institut
CBN	Kubický nitrid boru
SK	Slinutý karbid
PD	Polykrystalický diamant
PVD	Nanášení odpařením z pevné fáze
CVD	Chemická depozice z plynné fáze
SNOP	Stroj, nástroj, obrobek, přípravek
RC	Rezistor – kondenzátor
VBD	Vyměnitelná břitová destička
AE	Akustická emise
DoE	Design of Experiment – metodika plánovaných experimentů
PLC	Programovatelné logické obvody
AD	Analogově-digitální
EDX	Energiově disperzní spektroskopie

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Struktura povrchu žárového nástřiku NiCrBSi.....	17
Obrázek 2	Struktura žárového nástřiku [2] .....	18
Obrázek 3	Schéma prvotního principu žárového stříkání [5] .....	18
Obrázek 4	Rotor elektromotoru určený k žárovému stříkání opotřebovaných ploch pod ložiska	19
Obrázek 5	Podávací šnek určený k nástřiku HVOF [7] .....	19
Obrázek 6	Schéma zařízení pro nástřik plamenem [2] .....	20
Obrázek 7	Schéma zařízení pro nástřik studeným plynem [10].....	21
Obrázek 8	Schéma zařízení pro nástřik elektrickým obloukem [2] .....	22
Obrázek 9	Schéma zařízení pro plasmový nástřik [2].....	22
Obrázek 10	Schéma zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem [2] .....	23
Obrázek 11	Mikrostruktury vzniklé při experimentech A – D [14].....	27
Obrázek 12	Vliv průtoku nosného plynu na trajektorii částic I [20].....	30
Obrázek 13	Vliv průtoku nosného plynu na trajektorii částic II [20] .....	30
Obrázek 14	Srovnání spotřeby zdrojů při obrábění nástroje ze SK a řezné keramiky [33] .....	34
Obrázek 15	Tříska s jasně znatelným otřepem [34] .....	35
Obrázek 16	Tříska vzniklá při $v_c=200$ m/min [34] .....	35
Obrázek 17	Postavení břitu nástroje při obrábění lineární řeznou hranou [35] .....	36
Obrázek 18	Geometrie břitu při obrábění lineární řeznou hranou [39].....	37
Obrázek 19	Obrobený nástřik NiCrBSi .....	38
Obrázek 20	Teoretický obrobená plocha při $\lambda_s = 50^\circ$ .....	38
Obrázek 21	Teoretický obrobená plocha při $\lambda_s = 70^\circ$ .....	38
Obrázek 22	Povrch po obrábění s vysokým posuvem a úhlem sklonu ostří.....	39
Obrázek 23	Struktura obrobeného žárového nástřiku (při $v_c = 200$ m/min) [42].....	40
Obrázek 24	Dosah oblasti zasažené řeznou silou [36] .....	42
Obrázek 25	Vytrhaný žárový nástřik po obrábění .....	42
Obrázek 26	Motor a řemenice pohybového šroubu osy X.....	44
Obrázek 27	Motor a řemenice pohybového šroubu osy X – detail.....	44
Obrázek 28	Držák úchylkoměru pro upnutí do vřetena .....	46
Obrázek 29	Profilprojektor KEYENCE IM7000 [48] .....	47
Obrázek 30	Měření VBD č. 1 pomocí profilprojektoru KEYENCE IM7000 .....	48
Obrázek 31	Skutečný úhel fazetky .....	48
Obrázek 32	Skutečný úhel hřbetu .....	49
Obrázek 33	Skutečná délka fazetky .....	49

Obrázek 34 Břítová destička BONAR SCMW 120408 s fazetkou 0,2x20° .....	49
Obrázek 35 Sestava pro měření odchylky polohy břitu v ose X.....	50
Obrázek 36 Teflonová maskovací páska.....	54
Obrázek 37 Vzorky připravené k otryskání .....	54
Obrázek 38 Ruční tryskací box ENETEX TM1500.....	54
Obrázek 39 Stříkání elektrickým obloukem a manipulační robot.....	55
Obrázek 40 Nenastříkaný okraj válcové plochy vzniklý stíněním.....	55
Obrázek 41 Trysky vzduchového chlazení .....	56
Obrázek 42 Označené vzorky .....	56
Obrázek 43 Laserové značení vzorku .....	56
Obrázek 44 Otryskaný vzorek připravený pro nástřik .....	57
Obrázek 45 Stínící plechy s nánosem žárového nástřiku .....	57
Obrázek 46 HVOF hořák JP-5000 .....	58
Obrázek 47 Řídící jednotka HV-50 spolu s podavačem PF-50 .....	58
Obrázek 48 Kruhoměr TAYLOR HOBSON TALYROND 585LT .....	61
Obrázek 49 Drsnoměr HOMMEL ETAMIC T-8000 .....	61
Obrázek 50 Vzorek 1 před nástřikem.....	62
Obrázek 51 Vzorek 1 po nástřiku.....	62
Obrázek 52 CNC obráběcí centrum EMCO MAXXTURN 25 a měřicí aparatura.....	63
Obrázek 53 Držák VBD s hlavičkou s ploškou pro senzor AE .....	64
Obrázek 54 Snímací soustava na straně nástroje .....	65
Obrázek 55 Měřicí aparatura.....	66
Obrázek 56 Vzniklá tříska pod mikroskopem (200x) .....	68
Obrázek 57 Tříska vzniklá při soustružení žárového nástřiku .....	69
Obrázek 58 Válcovitost vzorku po obrobení.....	71
Obrázek 59 Profil drsnosti jednoho z náměrů na vzorku 17 (Rz 1,16 μm).....	74
Obrázek 60 Opotřebený břit nástroje [53] .....	74
Obrázek 61 Mikroskop KEYENCE VHX6000 .....	75
Obrázek 62 Opotřebené ostří (VBD 5, hrana 2) - čelo.....	75
Obrázek 63 Opotřebené ostří (VBD 5, hrana 2) - hřbet .....	75
Obrázek 64 Porovnání nového (vlevo) a použitého (vpravo) břitu.....	76
Obrázek 65 Odměrování VB.....	76
Obrázek 66 Struktura vzorku 5 pod světelným mikroskopem (100x) .....	77
Obrázek 67 Struktura vzorku 19 pod světelným mikroskopem (100x) .....	77
Obrázek 68 Snímek vzorku 5 z elektronového mikroskopu .....	78

Obrázek 69 EDX analýza na úrovni přechodové vrstvy .....	78
Obrázek 70 Liniová analýza chemického složení (vzorek 3) .....	78
Obrázek 71 Analýza reziduí – Fcelk .....	81
Obrázek 72 Porovnání skutečné a teoretické Fcelk .....	82
Obrázek 73 Nenatavené částice pod optickým mikroskopem (1000x).....	83
Obrázek 74 Navržený strukturální model .....	90

## Seznam grafů

Graf 1 Vliv složení palivové směsi na teplotu a rychlost částic [14].....	26
Graf 2 Vliv vzdálenosti nástřiku na porozitu a podíl oxidů ve vzniklém povlaku [15].....	28
Graf 3 Vliv vzdálenosti nástřiku a složení palivové směsi na porozitu nástřiku [18].....	29
Graf 4 Vývoj zvyšování trvanlivosti vyvíjené VBD [32] .....	33
Graf 5 Vývoj drsnosti obrobené plochy se změnou řezné rychlosti [42].....	40
Graf 6 Opakovatelnost najetí a teplotní chyba stroje .....	45
Graf 7 Histogram rozměru VBD .....	47
Graf 8 Vývoj přírůstku povlaku se změnou množství prášku .....	63
Graf 9 Záznam řezných sil (vzorek 26) – raw .....	69
Graf 10 Záznam řezných sil (vzorek 26) – filtrovaný .....	70
Graf 11 Záznam řezných sil (vzorek 2).....	71
Graf 12 Záznam řezných sil a akustické emise (vzorek 26) .....	72
Graf 13 Drsnost na obrobených vzorcích.....	72
Graf 14 Závislost velikosti celkové řezné síly na aplikační vzdálenosti při konstantním množství prášku.....	82
Graf 15 Závislost velikosti celkové řezné síly na množství prášku při konstantní aplikační vzdálenosti.....	83
Graf 16 Vývoj velikosti $F_c$ se změnou PrP a PrK (při MnP = 0 a Vzđ = -1).....	86
Graf 17 Vývoj velikosti $F_c$ se změnou PrP a PrK (při MnP = 0 a Vzđ = +1).....	87
Graf 18 Histogram drsnosti po obrobení nástřiku .....	88
Graf 19 Opatřebení VB po obrábění jednotlivých vzorků.....	88

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání metod žárového stříkání [1, 13] .....	24
Tabulka 2 Parametry HVOF nástřiku.....	25
Tabulka 3 Podmínky experimentů A – D [14] .....	26
Tabulka 4 Chemické složení slitiny C-263 [30].....	32
Tabulka 5 Nejlepší řezné podmínky [40] .....	39
Tabulka 6 Srovnání dosahované kinematické a skutečné drsnosti [27].....	41
Tabulka 7 Odchyly při opakovaném vložení VBD .....	51
Tabulka 8 Plán experimentu v kódovaném tvaru.....	52
Tabulka 9 Plánované řezné podmínky .....	53
Tabulka 10 Složení palivové směsi.....	60
Tabulka 11 Skutečné použité řezné podmínky .....	66
Tabulka 12 Shrnutí vhodnosti modelu pro Fcelk .....	79
Tabulka 13 Tabulka výsledků analýzy ANOVA – Fcelk .....	80
Tabulka 14 Tabulka výsledku analýzy nedostatečného přizpůsobení modelu – Fcelk.....	80
Tabulka 15 Tabulka určení parametrů modelu – Fcelk.....	80
Tabulka 16 Zkratky ve strukturálním modelu.....	89
Tabulka 17 Výsledky významnosti jednotlivých vztahů .....	91



# 1 Úvod

Tato kvalifikační práce navazuje na výzkum problematiky obrábění žárového nástřiku NiCrBSi zhotoveného metodou žárového stříkání HVOF. Původním smyslem tohoto výzkumu bylo navrhnout technologii pro soustružení tohoto nástřiku, která by mohla nahradit doposud využívané technologie obrábění s přínosem zvýšení produktivity. Tento cíl byl již naplněn a s výzkumem obrábění žárových nástřiků se pokračuje dál, avšak nyní ve smyslu základního výzkumu za účelem detailního poznání celého procesu. Právě do schéma tohoto základního výzkumu by měla svým tématem a výsledky zapadnout tato diplomová práce.

Krom obrábění žárového nástřiku NiCrBSi bude pak tato práce také reflektovat na některé komplikace, které se objevili v průběhu předchozích experimentů a které souvisejí s nedefinovatelnými faktory ovlivňujícími řezný proces. Tyto faktory budou prozkoumány a pokud možno bude jejich vliv v hlavním experimentu minimalizován, či zcela eliminován.

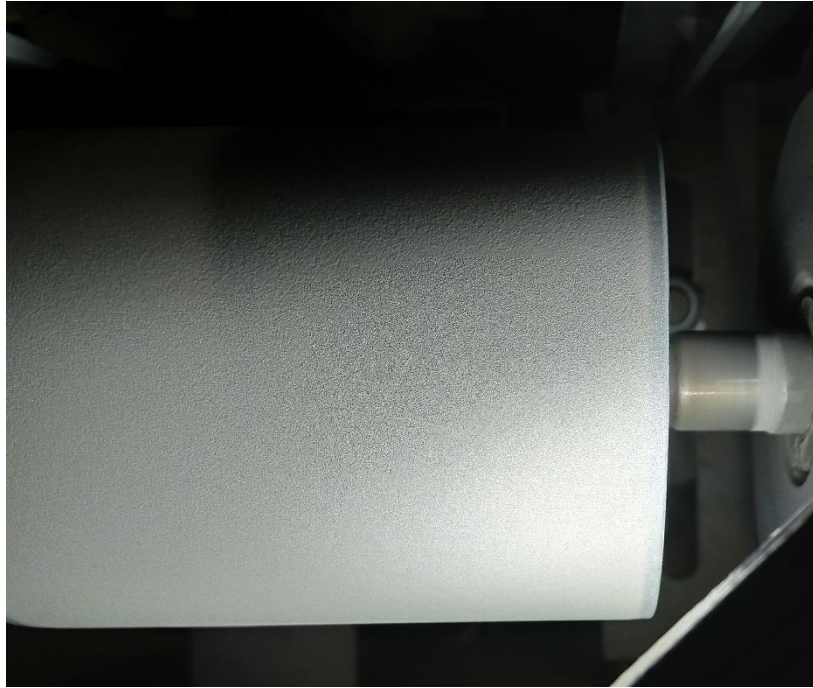
## 1.1 Cíle práce

Zatímco výše zmíněný výzkum se zaměřoval na stránku obrábění a řezných parametrů a žárový nástřik považoval vždy za konstantu, bude tato kvalifikační práce celou situaci řešit z opačného konce. Jako neměnný faktor bude nastavena technologie obrábění, tj. řezný nástroj, stroj i řezné podmínky, a jako zkoumané proměnné budou zvoleny parametry procesu HVOF žárového stříkání. Výsledkem pak bude poznání, jakým způsobem a jakou měrou se změna parametrů procesu tvorby povlaku promítne do jeho obrobitelnosti. Zároveň bude tímto otestována stabilita a šíře aplikovatelnosti již zmíněné dříve navržené technologie soustružení žárového nástřiku NiCrBSi. Doplnujícím cílem je prozkoumat vliv nedefinovatelných faktorů na řezný proces a pokud možno navrhnout způsob, jak tyto vlivy odstranit.

## 2 Představení problematiky

S postupem doby a technologickým vývojem začínají být kladené čím dál větší nároky na mechanické vlastnosti vyráběných dílů a současně je vyvíjen značný tlak na minimalizování nákladů na jejich výrobu. Odpovědí na tuto situaci jsou různé technologie tvorby povlaků a tenkých vrstev, které umožňují dodat dílu z materiálu nižší jakosti mechanické vlastnosti kvalitnějšího a nákladnějšího materiálu.

Jednou z těchto technologií je technologie žárového stříkání. Jejím principem je tvorba povlaku z natavených, nebo dokonce roztavených částic stříkaných na zpracovávaný povrch. Jednou z výhod této metody je, že lze s její pomocí dosahovat tloušťky povlaku v rámci desetin, nebo dokonce jednotek milimetrů, nicméně z principu svého fungování vyplývá jedna z jejích velkých nevýhod. [1] Žárový nástřik vykazuje po dokončení hrubou strukturu (viz obrázek 1), která ve většině případů nebývá pro provoz ošetřené součásti přijatelná. Tento povlak je tedy zapotřebí následně obrobit, aby dosahoval požadovaných rozměrových a geometrických přesností. Z mechanických vlastností nástřiků, kterých se využívá k ochraně dílu proti otěru, nebo vysokoteplotní korozi, však vyplývají značné obtíže s tímto obráběním. Nástřiky bývají velmi tvrdé a mnohdy vykazují další vlastnosti zhoršující jejich obrobitelnost.



Obrázek 1 Struktura povrchu žárového nástřiku NiCrBSi

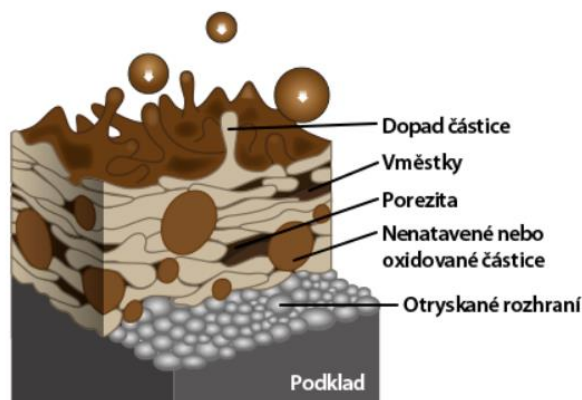
Z tohoto důvodu se nejčastěji žárově stříkané povlaky obrábí broušením. Broušení, jakožto dokončovací metoda třískového obrábění, si s takovýmto materiálem zpravidla poradí bez větších potíží, nicméně produktivita procesu broušení značně zaostává za ostatními metodami obrábění, zejména definovanou geometrií břitu. Pokud tedy chceme zvýšit produktivitu obrábění žárových nástřiků, je nutné vydat se spíše směrem třískového obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu. Za účelem využití takové metody obrábění je nutné nejprve důkladně prozkoumat obrobitelnost těchto žárových nástřiků, a to jak z hlediska jejich odezvy na různé řezné podmínky, tak na různé parametry stříkání. Právě zkoumáním vlivu parametrů žárového stříkání na obrobitelnost výsledného povlaku se bude zabírat tato diplomová práce.

## 2.1 Technologie žárového stříkání

V této kapitole bude podrobněji popsána technologie žárového stříkání, základní kroky při tvorbě žárového nástřiku a jeho typické vlastnosti

### 2.1.1 Princip žárového stříkání

Jak bylo v krátkosti již zmíněno, žárové stříkání spočívá v pokrývání povrchu základního materiálu roztaveným materiálem povlaku. Tento materiál může být keramický, nebo na kovové bázi a prodává se nejčastěji ve formě prášků, drátů, nebo tyčí. Ve zmíněné formě je materiál přiváděn do aplikačního zařízení, kde bývá vystaven vysokým teplotám a urychlen. Výsledkem je, že aplikační zařízení opouští natavené, nebo dokonce roztavené částice přídavného materiálu se značnou kinetickou energií. Při dopadu částic na ošetřovaný povrch dojde k přeměně jejich kinetické energie na deformační a částečně i tepelnou. Dopadovou energií se částice zdeformují, čímž vznikají splaty. Vrstvením splatů pak vzniká pro žárové nástřiky typická lamelární struktura (viz obrázek 2), která obsahuje také nenatavené částice, nečistoty (v podobě vměstků a oxidů) a také póry.

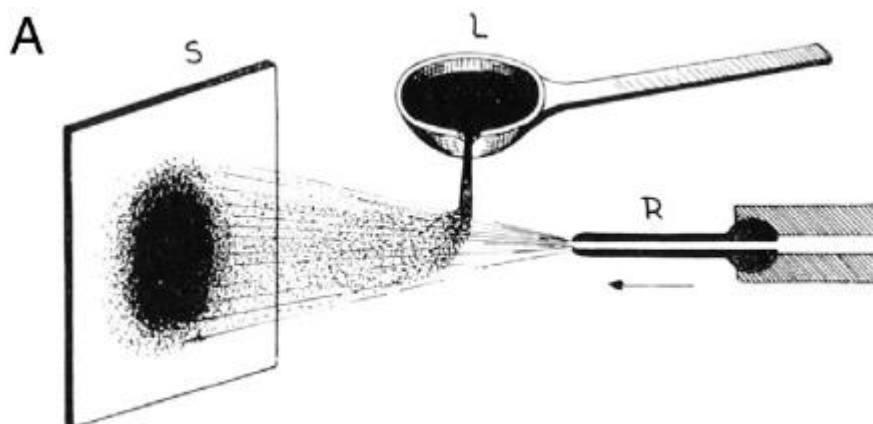


**Schéma řezu žárově nastříkané vrstvy**

**Obrázek 2** Struktura žárového nástřiku [2]

### 2.1.2 Historie žárových nástřiků [1, 3, 4]

První zmínky o žárovém stříkání pocházejí z poslední dekády 19. století, nicméně soustředěného vývoje a použití se žárové nástřiky dočkali až začátkem 20. století. Švýcarský inženýr M. U. Schoop společně se svými německými kolegy F. Meyerem a F. Herkenrathem postavili v roce 1910 první zařízení pro žárové stříkání. Prvotní princip žárového stříkání využíval na vstupu již roztavený kov, který byl pomocí stlačeného plynu pouze akcelerován k ošetřovanému povrchu (viz obrázek 3), nicméně krátce na to přišli zmínění výzkumníci s využitím kovového drátu a následně i prášku. S tím spojeným dalším krokem byl nástřik plamenem, kdy se využívalo energie oxy-acetylenového plamene k roztavení přídavného materiálu a stlačeného vzduchu k urychlení natavených částic. Dostupnost jemných kovových prášků dala v první polovině 20. století vzniknout technologii studeného nástřiku a s technologickým vývojem se následně v 50. letech 20. století objevil laserový nástřik, plazmový nástřik a detonační nástřik. V 80. letech se poprvé objevuje také vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF, z angl. High Velocity Oxygen Fuel) a tím se průlomový vývoj žárového stříkání zpomaluje. V následujících letech, sahaje až do současnosti, probíhá zejména zdokonalování jednotlivých metod, případně experimenty s jejich kombinacemi, nebo jinými palivy.



**Obrázek 3** Schéma prvotního principu žárového stříkání [5]

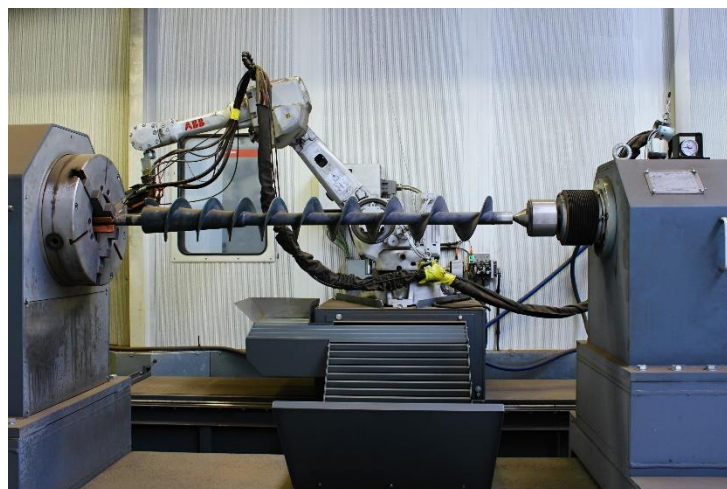
### 2.1.3 Kdy se používají

Ať už v minulosti, či v současné době, žárové nástřiky nacházejí využití jak v prvovýrobě, kde plní funkci ochranné vrstvy základního materiálu a dodávají tak potenciálně levnějšímu základnímu materiálu lepší mechanické vlastnosti, tak v opravných a renovačních činnostech. Díky dosažitelné tloušťce nástřiků lze s jejich pomocí přidat materiál do míst, kde došlo k nadměrnému opotřebení, nebo otlacení součásti. Krom mechanických vlastností se zejména u nástřiků na bázi niklu využívá také například jejich elektrické rezistivity pro výrobu topných těles. Varacelle a kol. [6] ve svém článku popisují optimalizaci parametrů žárového stříkání z hlediska dosahovaného elektrického odporu. Stříkaným polotovarem jsou tyče následně využívány pro simulaci palivových tyčí v jaderném reaktoru. Jiné žárové nástřiky se zase pro svou biokompatibilitu využívají k ošetření kloubních náhrad. [1]



Obrázek 4 Rotor elektromotoru určený k žárovému stříkání opotřebovaných ploch pod ložiska

Mezi praktické příklady z tuzemského prostředí, pocházející s činností firmy Plasmametal s.r.o. v Brně, lze zařadit například ložiskové domky pro pražské metro, nápravy pro lokomotivy, rotory výkonných elektromotorů (viz obrázek 4), případně díly jaderné elektrárny Dukovany, které se však kvůli bezpečnosti zpracovávají na externím pracovišti. Další firmou působící v odvětví žárového stříkání je například VZÚ Plzeň. I ta nabízí oteruvzdorné žárové nástřiky k ošetření kupříkladu turbínových hřídelí, či podávacích šneků na sypký materiál. [7]



Obrázek 5 Podávací šnek určený k nástřiku HVOF [7]



### 3 Současný stav a jeho hodnocení

V této kapitole bude popsán současný stav problematiky žárového stříkání s důrazem na metodu HVOF a vliv jejích pracovních parametrů. Zahrnut bude také popis některých z niklových slitin včetně jejich charakteristik a také problematika obrábění niklových slitin a žárových nástřiků. Poznátky uvedené v této kapitole vycházejí převážně z elektronických informačních zdrojů.

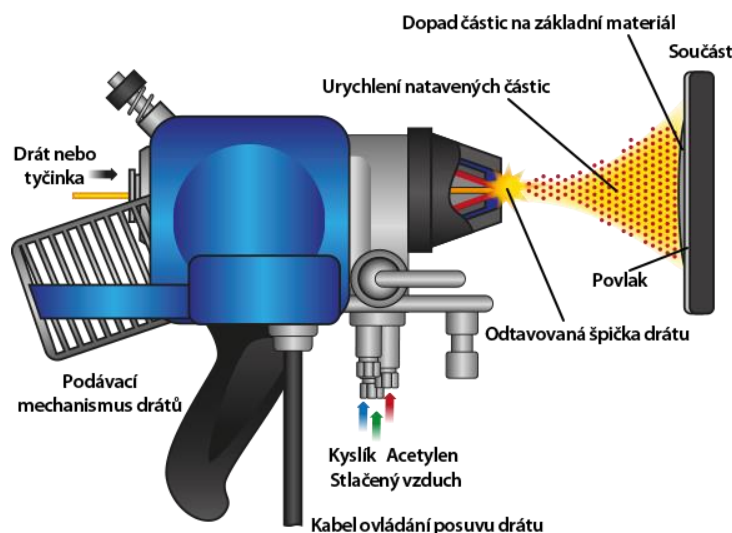
#### 3.1 Metody žárového stříkání

Z využití žárových nástřiků, popsaného v kapitole 2.1.3. je patrné široké spektrum možných aplikací. Velké množství odlišných oblastí uplatnění však také znamená velké množství používaných materiálů a také možností, jak je nanášet, a proto následuje popis nejběžnějších metod žárového stříkání. Největší důraz bude kladený na metodu HVOF, která je předmětem této kvalifikační práce.

##### 3.1.1 Žárový nástřik plamenem

Jak bylo uvedeno v kapitole o historii, nástřik plamenem byla jedna z prvních metod žárového stříkání. [3, 4] Jedná se o principiálně nejjednodušší a na strojní vybavení nejméně náročnou metodu žárového stříkání.

Při nástřiku plamenem se obvykle využívá směs acetylenu a kyslíku jako zdroj tepla a do plamenu z hoření této směsi je následně přiváděn přídavný materiál ve formě nejčastěji prášku, nebo drátu společně se stlačeným vzduchem pro akcelerování natavených částic (princip fungování nanášecího zařízení zobrazuje obrázek 6). Tato metoda nedosahuje již z principu nijak extrémních teplot, ani rychlostí, a proto i výsledky dosažitelné s jejím využitím jsou na dnešní poměry spíše horší. Výsledný nástřik nedosahuje takové přilnavosti, výsledná pórovitost a obsah oxidů v povlaku jsou vysoké a parametry plamene umožňují nástřik pouze úzkou paletou materiálů. [2, 8] Přesto si i v dnešní době najde tento nástřik využití. Oproti jiným nástřikům lze tuto metodu praktikovat díky své jednoduchosti téměř kdekoli, a navíc i ručně (dělník přímo manipuluje s nástřikovým zařízením).

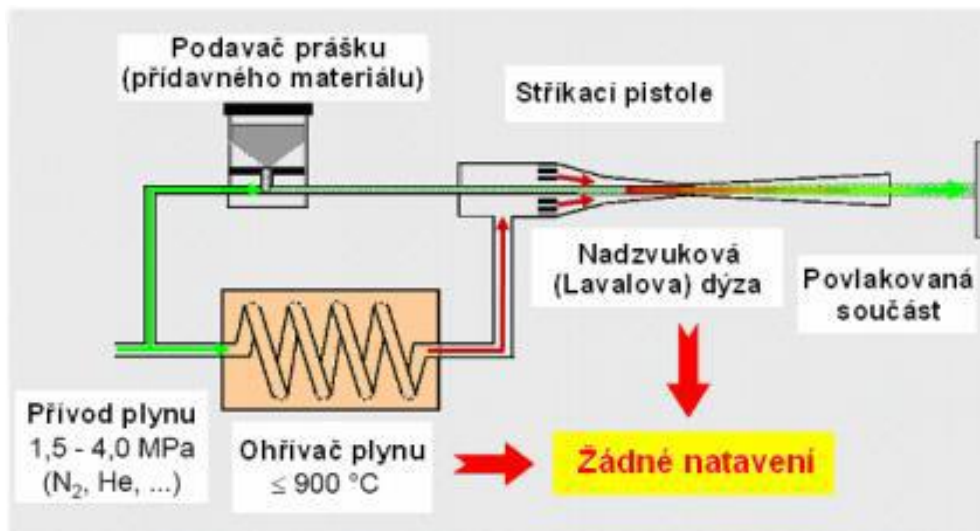


Obrázek 6 Schéma zařízení pro nástřik plamenem [2]

### 3.1.2 Nástřik studeným plynem [9]

Tato metoda, někdy také nazývané jako studený kinetický nástřik, je z chronologického hlediska nástupcem nástřiku plamenem. Jak její název naznačuje, nevyužívá tato metoda tepla z hoření paliva k natavení přídavného materiálu. Přídavný materiál je místo toho unášen stlačeným a předehřátým nosným plynem (N, He, vzduch...) skrze konvergentně-divergentní trysku rovnou na ošetřovanou plochu (grafické schéma nástřikového zařízení je zobrazeno na obrázku 6). Vlivem expanze stlačeného plynu skrze konvergentně divergentní (tzv. Lavalovu) dýzu, dosahuje plyn společně s částicemi rychlosti 500-1200 m/s.

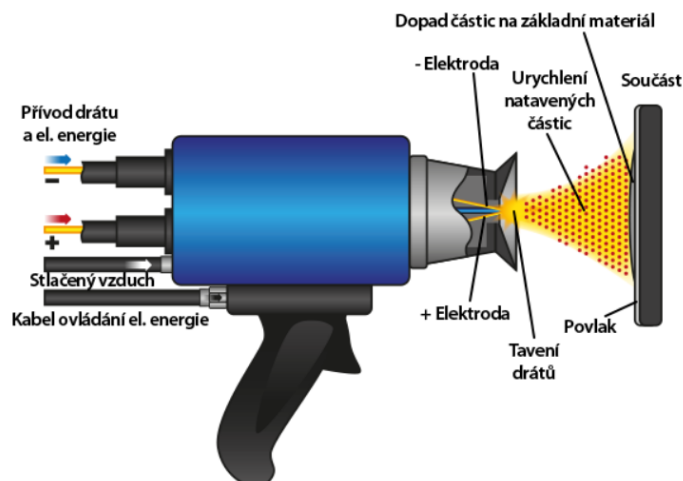
Nižší teploty a extrémní kinetická energie částic předurčuje metodu studeného kinetického nástřiku k tvorbě povlaků na bázi neželezných kovů, kde není zapotřebí vysokých teplot a vysoké rychlosti společně s dobrou houževnatostí těchto slitin vyústí v povlak s nízkou pórovitostí a dobrou přilnavostí.



Obrázek 7 Schéma zařízení pro nástřik studeným plynem [10]

### 3.1.3 Nástřik elektrickým obloukem

Tato metoda spadá do skupiny využívající elektrické energie jako zdroje tepla. Konkrétně využívá tepla elektrického oblouku hořícího mezi dvěma elektrodami, přičemž ty jsou tvořeny dráty ze samotného přídavného materiálu, který je kontinuálně do oblouku přiváděn. Teplo elektrického oblouku tento materiál taví a stlačeným vzduchem jsou roztavené částice akcelerovány směrem k opracovávanému povrchu. [10] Grafické schéma zařízení pro nástřik elektrickým obloukem je zobrazeno na obrázku 8.

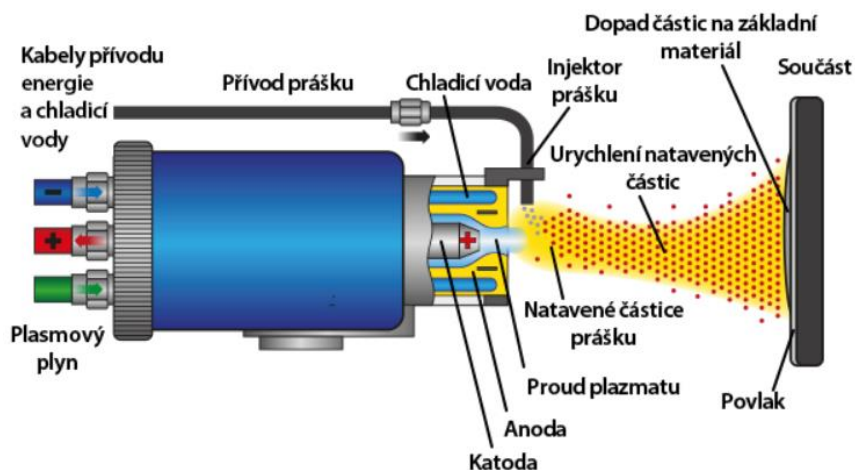


Obrázek 8 Schéma zařízení pro nástřik elektrickým obloukem [2]

Zajímavým příkladem využití této metody stříkání je nástřik válců pro automobilové dynamometry. Válcové musí mít extrémně hrubý a trvanlivý povrch, aby byl zajištěn perfektní kontakt s pneumatikou. Ve firmě Plasmametal s.r.o. dosahují takového povrchu právě nástřikem plamenem s vysokou rychlostí podávání přídavného materiálu. Materiál se natavuje a tvoří větší shluky částic, které po dopadu utváří neobvykle hrubý povrch.

### 3.1.4 Plazmový nástřik

Plazmový nástřik je druhá z metod využívajících ke generování tepla elektrické energie. Princip těchto dvou metod se liší jen v tom, že zatímco u nástřiku obloukem se elektrody průběžně odtavují, u plazmového nástřiku jsou trvalé. Elektrody jsou vyrobené obvykle z mědi a wolframu a díky tomu, že se při práci netaví, umožňují vznik stabilnějšího elektrického oblouku, který ionizuje okolní plyn (obvykle argon), za vzniku plazmatu. [11, 12] Grafické schéma zařízení pro plazmový nástřik je zobrazeno na obrázku 9.

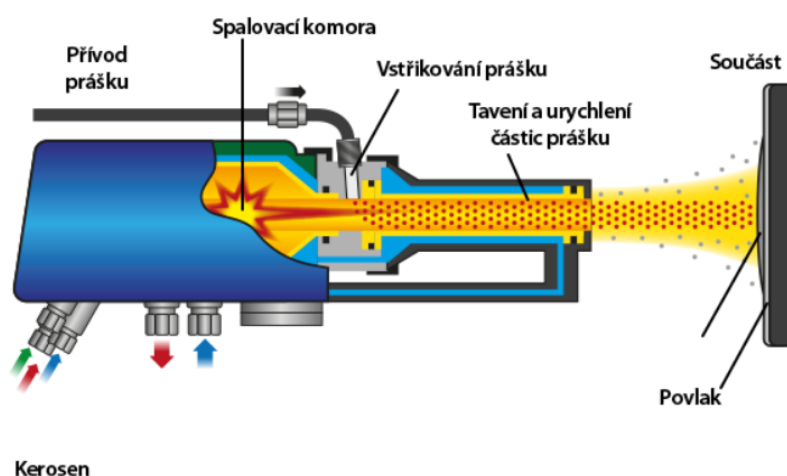


Obrázek 9 Schéma zařízení pro plazmový nástřik [2]

### 3.2 Vysokorychlostní nástřik plamenem – HVOF

Metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem je v dnešní době populární a široce využívaná metoda žárového stříkání. Zároveň je to metoda, na kterou se zaměřuje tato kvalifikační práce.

Metoda HVOF, využívá jako zdroj tepla hoření palivové směsi tvořené buďto plynným, nebo kapalným palivem ve spojení s kyslíkem. Mezi plynná paliva patří například propan, propylen, acetylen, nebo vodík. Mezi nejčastěji využívaná kapalná paliva spadá kerosin. Hoření palivové směsi způsobuje uvolnění velkého množství tepla a současnou expanzi plynů. Plamen vzniklý touto reakcí je nasměrován do Lavalovy dýzy, která díky svému sbíhavému a následně rozbíhavému tvaru zvýší jeho rychlost na nadzvukovou úroveň. Na vstupu do Lavalovy dýzy je do plamene také přiváděn přídatný materiál – nejčastěji prášek. [10, 11] Grafické schéma zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem je zobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 10 Schéma zařízení pro vysokorychlostní nástřik plamenem [2]

Metoda HVOF dosahuje nadzvukových rychlostí částic jako metoda nástřiku studeným plynem a nejvyšších teplot ze všech spalovacích metod. Tato kombinace umožňuje nástřikům HVOF dosahovat výborných hodnot přilnavosti a minimální pórovitosti. Konkrétní srovnání jednotlivých metod žárového stříkání z hlediska teploty a rychlosti nabízí tabulka 1.



**Tabulka 1 Srovnání metod žárového stříkání [1, 13]**

	Metoda nástřiku					
	Plamenem	Elektrickým obloukem	Plazmou	Detonační nástřik	HVOF	Studeným plynem
<b>Teplota [°C]</b>	3200	6000 - 8000	16 000 - 20 000	2500 - 3200	3200 - 3600	400 - 900
<b>Dopadová rychlost [m/s]</b>	80 - 100	150	150 - 250	600 - 800	800 - 1200	900 - 1200
<b>Pórovitost [%]</b>	10 - 15	5 - 10	3 - 10	1 - 3	0,5 - 2	-
<b>Přilnavost [MPa]</b>	8 - 20	15 - 20	15 - 35	50 - 80	70 - 90	-

### 3.2.1 Parametry HVOF žárového stříkání

Aby bylo však možné dosáhnout zmíněných vlastností nástřiku, je nutné zvolit správné parametry nástřiku s ohledem na materiál povlaku. Proces žárového stříkání zahrnuje velké množství proměnných. Souhrn některých z nich obsahuje tabulka 2. Konkrétní hodnoty uvedené v tabulce byly zaznamenány na stáži ve firmě Plasmametal s.r.o. v Brně.

Parametry, které nejvíce ovlivňují vlastnosti nastříkaného povlaku jsou množství paliva, množství kyslíku, množství dodávaného přídavného materiálu, množství nosného plynu a vzdálenost aplikačního zařízení od ošetřovaného povrchu (parametry vyznačené v tabulce 2). Za nejpodstatnější z těchto parametrů bývají považovány průtok paliva a kyslíku a vzdálenost stříkání. [6, 14–16]

Z důvodu ochrany know-how firmy Plasmametal s.r.o. jsou hodnoty nejdůležitějších parametrů skryty, nebo označeny v kódovaném tvaru.

Tabulka 2 Parametry HVOF nástřiku

Fáze	Proměnná	Hodnota
Tryskání	Druh abrasiva:	Hnědý korund; zrnitost F36
	Tlak vzduchu [Bar]:	7,2 - 7,5
	Vzdálenost [mm]:	50
	Posuv [mm/s]:	1
	Otáčky [ot/min]:	25
	Doba tryskání [s]:	446
	Počet přejezdů [-]:	1
Žárové stříkání	Průtok paliva [l/h]:	x
	Průtok kyslíku [Nl/min]:	x
	Průtok nosného plynu [Nl/min]:	x
	Tlak kyslíku [Bar]	11,5
	Tlak paliva [Bar]	8,1
	Druh paliva:	Kerosin
	Druh nosného plynu:	Dusík
	Množství prášku [g/min]	x
	Poměr palivo/kyslík [-]:	0,000389
	Posuv ramene manipulátoru [m/min]:	12,6
	Otáčky obrobku [ot/min]:	205
	Počet přejezdů:	13
	Vzdálenost nástřiku [mm]:	x
	Barel (hlaveň HVOF děla):	4"

Pozn.: Nl/min značí normální litr za minutu, tedy 1 litr při  $T = 273,15\text{ K}$  a  $P = 101325\text{ Pa}$ .

### 3.3 Reálný vliv parametrů metody HVOF

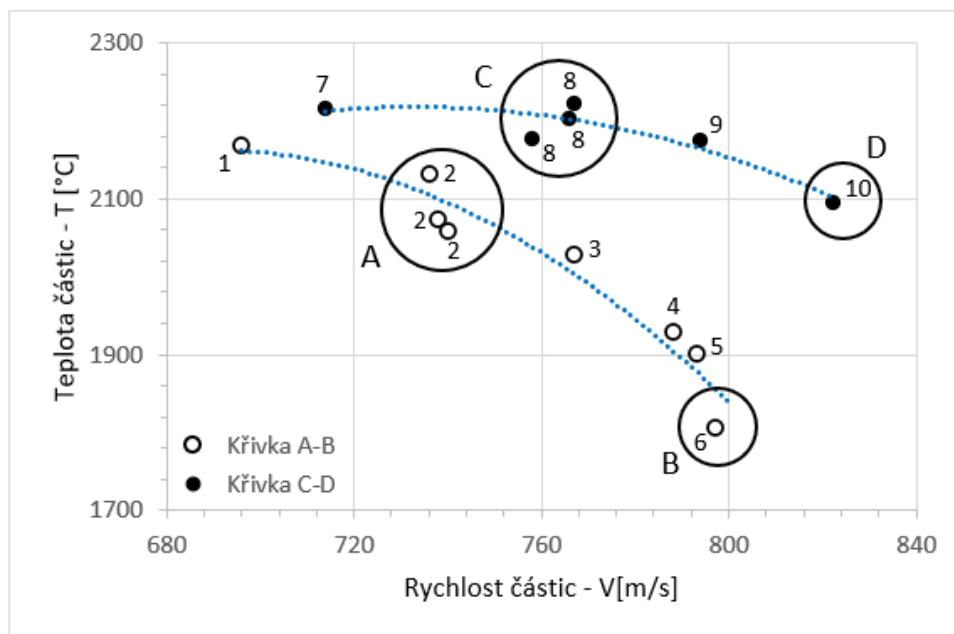
Následující kapitola je zaměřena na shrnutí poznatků plynoucích z vědeckých článků zaměřených na problematiku žárového stříkání metodou HVOF.

#### 3.3.1 Vliv průtoku paliva a kyslíku

Množství paliva a kyslíku, respektive jejich poměr určuje finální vlastnosti plamene a je tedy asi nejdůležitější ze všech parametrů. Obecně je tento poměr posuzovaný vzhledem k poměru stechiometrickému, tedy k takovému poměru paliva a kyslíku, kdy dojde k úplnému shoření obou složek palivové směsi. Bude-li směs nad-stechiometrická (více paliva, nebo méně kyslíku), bude v plameni přebývat palivo a plamen bude mít spíše redukční vlastnosti. V případě pod-stechiometrické směsi (méně paliva, nebo více kyslíku) bude plamen bohatší na kyslík a spíše oxidační.

Valarezo a kol. ve svém článku [14] vytvořili procesní mapu parametrů žárového stříkání ve vztahu ke stavu částic za letu a k vlastnostem výsledného nástřiku. Nanášeným materiálem byla slitina Ni20Cr. Jako palivo byl využit propylen a jeho průtok byl regulován v rozsahu od 50,9 l/min po 91,8 l/min. Rozsah množství kyslíku byl od 166 do 225 l/min. Současnou změnou těchto dvou parametry (průtok paliva byl postupně zvyšován, zatímco průtok kyslíku snižován) bylo dosaženo pod-stechiometrických i nad-stechiometrických podmínek. Ze sledovaného stavu částic vyplynulo, že pod-stechiometrická směs produkuje

chladnější, rychlejší plamen, zatímco nad-stechiometrická produkuje plamen teplejší a pomalejší. Konkrétněji popisuje zmíněný vývoj graf 1, kde zleva doprava bylo upravováno složení palivové směsi od směsi bohaté na kyslík, po směs bohatou na palivo. Křivky A-B a C-D označují experimenty provedené při dvou různých úrovních množství stlačeného vzduchu. Experimenty 2 a 8 byly provedené třikrát pro kontrolu opakovatelnosti měření a stability procesu. Konkrétní podmínky experimentů A, B, C a D obsahuje tabulka 3. [14]



Graf 1 Vliv složení palivové směsi na teplotu a rychlost částic [14]

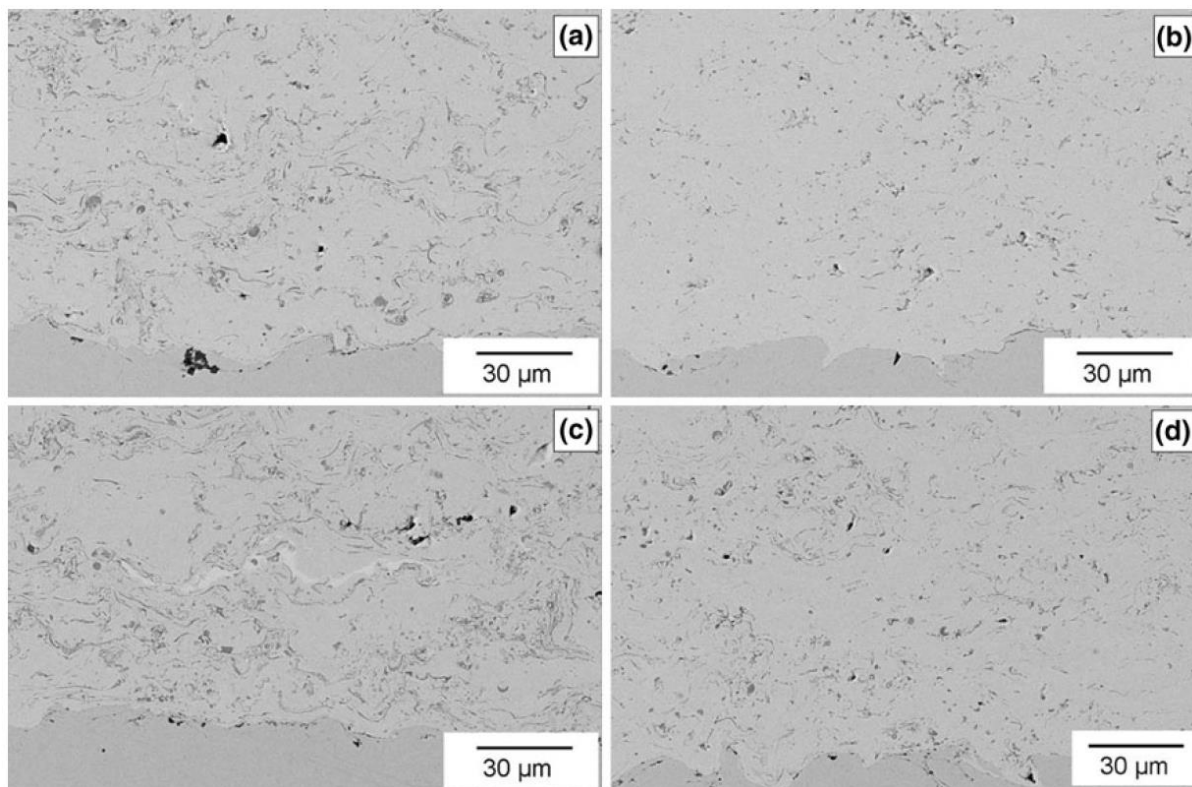
Tabulka 3 Podmínky experimentů A – D [14]

Experiment	Množství paliva [l/min]	Množství kyslíku [l/min]	Množství stlačeného vzduchu [l/min]	Normalizovaný poměr palivo/kyslík*
A	60,2	198	351	0,96
B	91,8	166	351	1,43
C	62,8	218	316	0,96
D	77,9	196	316	1,3

\*Normalizovaný poměr je vztažený ke stechiometrickému poměru, tzn. poměr 1 je stechiometrický, poměr <1 je pod-stechiometrický (bohatší na kyslík) a poměr >1 je nad-stechiometrický (bohatší na palivo).

Z hlediska struktury povlaku vykazovaly nástřiky vzniklé při spalování většího množství kyslíku větší množství oxidů. To bylo způsobeno vyšší teplotou a nižší rychlostí plamene, následkem čehož byly částice vystavené vysoké teplotě déle a vzhledem k přebytku kyslíku v plamenu mohli také snáze oxidovat. Zároveň vlivem nízké rychlosti strávili částice více času v letu, a tedy vystavené působení okolní atmosféry, která rovněž přispěla k jejich oxidaci. Naopak nástřiky vytvořené s využitím nad-stechiometrické směsi (experimenty B a D) vykazovali menší množství oxidů. Vyšší rychlost a nižší teplota částic ve spojení s redukčními vlastnostmi plamene vzdorovali oxidaci částic. Zároveň vznikal při spalování směsi bohaté na palivo delší plamen, který chránil částice před působením okolního kyslíku i

po opuštění hlavně aplikačního zařízení. Konkrétní vzniklé mikrostruktury nástřiků zobrazuje obrázek 11. [14]



Obrázek 11 Mikrostruktury vzniklé při experimentech A – D [14]

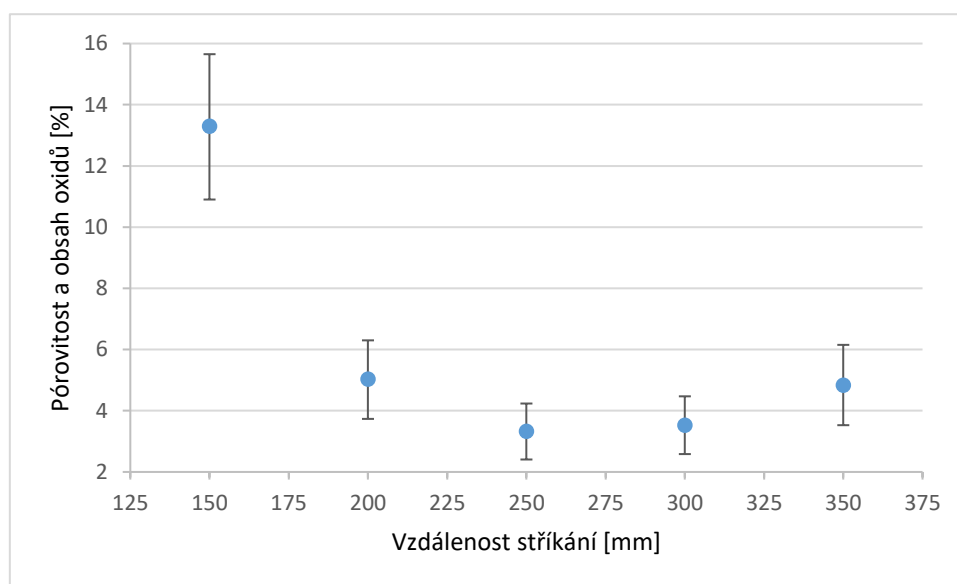
Obdobnou reakci niklových nástřiků na změnu složení palivové směsi popisují i další články. [6, 15–18]. Ruiz-Luna a kol. [15] zkoumal reakci procesu HVOF žárového stříkání na změnu parametrů metodou plánovaného experimentu. Materiálem nástřiku byla slitina NiCoCrAlY. Oksa a kol. [16] řešil ve svém článku žárové stříkání slitin NiCr a FeCr za různých podmínek a s použitím tekutého (kerosin) i plynného (propan) paliva. Varacelle a kol. [6] zkoumali vliv parametrů nástřiku INCONELU na jeho elektrickou rezistivitu a korozní odolnost. Ačkoliv podíl paliva a kyslíku byl při všech experimentech v tomto článku bohatý na kyslík, výsledky jsou ve shodě s výše zmíněnými poznatky, neboť všechny získané povlaky vykazovaly velké množství mezi-lamelárních oxidů, které vznikly vlivem oxidace povrchu roztavených částic před dopadem.

Gil a kol. [18] při svém výzkumu sice nesledovali stav (teplotu a rychlost) částic za letu, ale přesto se jejich výsledky s výše zmíněnými shodují. Při zkouškách přilnavosti povlaku došlo u nástřiků vytvořených s využitím směsi bohaté na kyslík k odtržení povlaku na přechodu základní materiál – nástřik. Při následné EDX analýza byly na povrchu základního materiálu nalezeny oxidy. To vznikly s nejvyšší pravděpodobností v průběhu stříkání působením oxidačního plamene na nechráněný základní materiál a zabránili vyhovujícímu přilnutí nástřiku. Obdobně když bylo využito krátké vzdálenosti nástřiku a směsi bohaté na palivo, byla výsledná přilnavost zvolenou metodou neměřitelná a tedy vyšší, než 63 MPa. [18]

Krom vlivu složení palivové směsi se zmíněné články [6, 15, 18] shodují také v tom, že všechny zkoumají také vliv vzdálenosti nástřiku na jeho výsledné vlastnosti.

### 3.3.2 Vliv vzdálenosti aplikačního zařízení od základního materiálu

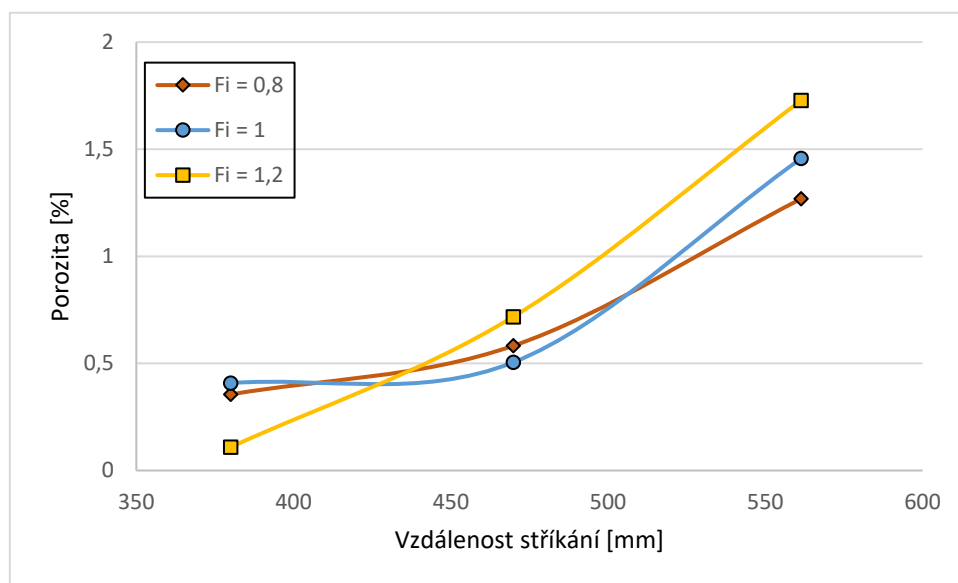
Jedním z obsáhlejších článků řešících mimo jiné i vliv vzdálenosti nástřiku je již zmíněný článek od Ruiz-Luny [15]. V jeho článku byl tento parametry upravován z rozsahu od 150 do 350 mm. Malá vzdálenost mezi hlavní aplikačního zařízení a ošetřovaným povrchem znamená kratší dobu letu částic, které dopadají na povrch s větší tepelnou energií. Zároveň umožňuje tato vzdálenost větší tepelné ovlivnění povrchu teplotou samotného plamene. V případě nejkratší vzdálenosti nástřiku (150 mm) dosáhl základní materiál v průběhu stříkání teploty 410 °C. Tato teplota v kombinaci s vysoce deformovanými splaty (částice dopadly na povrch díky krátké dráze s vysokou tepelnou i kinetickou energií) vyústila při chladnutí nástřiku ve vznik tahového zbytkového napětí a popraskání nástřiku. To mělo za následek vyšší porozitu. Vysoká teplota částic vedla také k rozvoji oxidů ve struktuře nástřiku, které v kombinaci s prasklinami mohou vést k horší přilnavosti a soudržnosti povlaku. S navyšováním vzdálenosti nástřiku postupně podíl pórů a oxidů v nástřiku klesal (viz graf 2), jelikož částice dopadaly na povrch s nižší teplotou (ale stále v nataveném stavu), dostatečnou rychlostí a plamen čím dál tím méně ovlivňoval teplotu základního materiálu. Delší vzdálenost se jevila jako výhodnější až po maximální zkoušenou úroveň – tedy 350 mm – kdy se již částice za letu tak zpomalily a ochladily, že se nadále nebyly schopné vlivem dopadové energie dostatečně deformovat a tvořit homogenní splatovou strukturu. Místo toho vznikaly mezi částicemi opět póry. Jako optimální se tedy ukázala vzdálenost v rozmezí 250-300 mm. Větší vzdálenost stříkání měla však negativní vliv na efektivitu procesu, neboť docházelo vlivem kužele rozprachu k větším ztrátám přídavného materiálu. [15]



Graf 2 Vliv vzdálenosti nástřiku na porozitu a podíl oxidů ve vzniklém povlaku [15]

S obdobnými výsledky se při svém výzkumu setkali Gil a kol. [18], kteří při svých experimentech sledovali vliv složení palivové směsi, vzdálenosti nástřiku a množství dodávaného prášku na porozitu a přilnavost nástřiku NiWCrBSi. Vzdálenost nástřiku byla upravována v rozmezí od 380 do 560 mm, což je ve srovnání například s právě zmíněným článkem od Ruiz-Luny [15] interval spíše vysokých hodnot. Přesně to však není možné porovnat, neboť Gil a kol. se ve svém článku nezmiňují o konkrétním druhu, ani použitém množství paliva a nanášený materiál se taktéž značně liší. Zhodnotit však ve spojení s dalšími články lze samotný vliv vzdálenosti nástřiku, který ukázal, že čím byla vzdálenost větší, tím vyšší byla porozita a množství nenatavených částic. Tento trend se shoduje s tím, o kterém referoval Ruiz-Luna [15]. Konkrétní vývoj porozity vzhledem k vzdálenosti popisuje graf 3, který zároveň zohledňuje i vliv složení směsi ( $F_i < 1 \Rightarrow$  směs bohatší na kyslík;

$F_i = 1 \Rightarrow$  stechiometrická směs;  $F_i > 1 \Rightarrow$  směs bohatší na palivo). Z hlediska přilnavosti povlaku bylo lepších výsledků taktéž dosahováno při malých vzdálenostech stříkání.

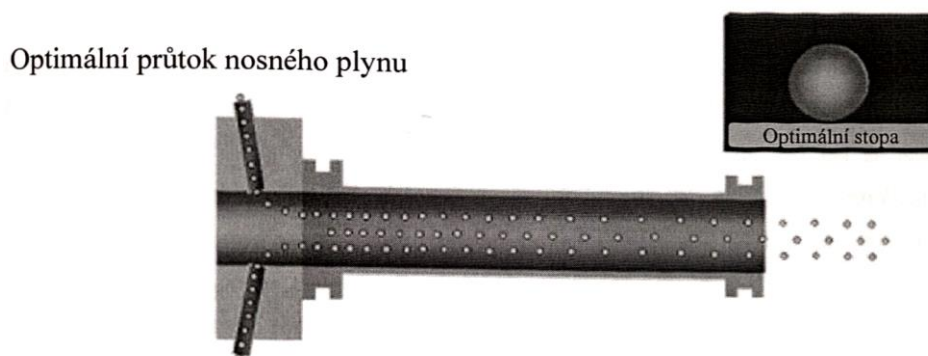


Graf 3 Vliv vzdálenosti nástřiku a složení palivové směsi na porozitu nástřiku [18]

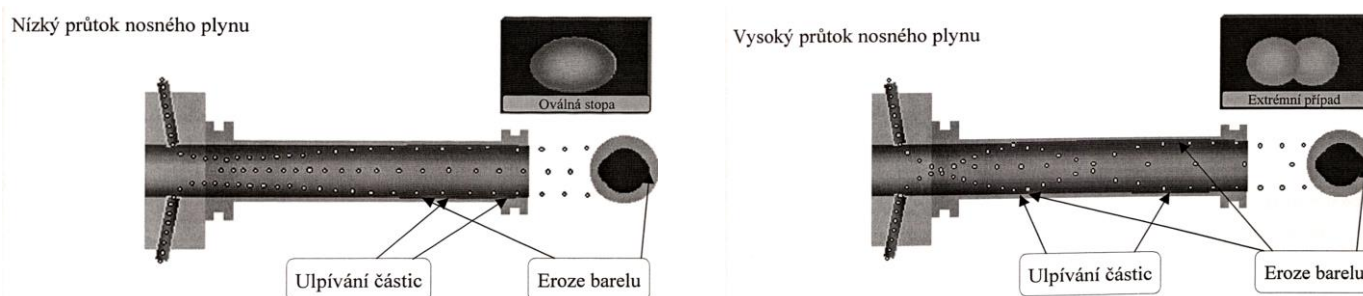
Článek od Varacelle a kol. [6], který byl taktéž zmíněn v kapitole 3.3.1. řešil vliv velkého množství proměnných (průtok paliva, kyslíku, stlačeného vzduchu, dodávané množství prášku, vzdálenost a použitý hardware) současně a vliv všech těchto proměnných vyhodnocoval kombinovaně. Je proto obtížné určit vliv jednoho konkrétního faktoru na jeden konkrétní parametry. Přesto se ale z autorova statistického vyhodnocení ukázal nemalý vliv vzdálenosti nástřiku na tvrdost, která byla při menších vzdálenostech vyšší a také na drsnost nástřiku. V jejím případě byly nástřiky aplikované na kratší vzdálenost drsnější, nejspíš vlivem většího rozstříku částic, způsobeným jejich vyšší dopadovou teplotou a rychlostí. Stejně jako v článku [15] se kratší vzdálenost nástřiku ukázala jako vhodnější z hlediska efektivního využití přídavného materiálu. [6]

### 3.3.3 Vliv průtoku nosného plynu

Hlavním úkolem nosného plynu je dopravit přídavný materiál, v případě HVOF nástřiků nejčastěji prášek, do hlavní a oblasti hoření. Aby nebyl materiál tímto plynem nijak ovlivněn, využívají se pro tyto účely inertní plyny – nejčastěji dusík, nebo argon. Průtok nosného plynu je nutné mít přesně nastavený, aby byly částice dopraveny přesně do osy hlavně (barelu) aplikačního zařízení (viz obrázek 12, potažmo 13). Bude-li průtok nosného plynu příliš nízký, nebo vysoký, bude ohnisko vstřikování prášku radiálně vyosené a prášek bude mít tendence ulpívat v hlavní nástřikového děla a tím zhoršovat stabilitu hoření a zvyšovat opotřebení hardwaru. [19] Tato proměnná je tedy sice z hlediska fungování procesu velice důležitá, ale k experimentování není vhodná. Úprava její hodnoty nebude mít vliv na vlastnosti vznikajícího nástřiku, ale spíše na fungování procesu žárového stříkání.



Obrázek 12 Vliv průtoku nosného plynu na trajektorii částic I [20]



Obrázek 13 Vliv průtoku nosného plynu na trajektorii částic II [20]

### 3.3.4 Vliv množství dodávaného prášku

Tento parametr zkoumali při svém výzkumu Gil a kol. [18] a Varacalle a kol. [6]. Zatímco Gil a kol. v závěrech svého výzkumu tvrdí, že dodávané množství prášku nemá na vlastnosti nástřiku statisticky významný vliv, Varacalle a kol. [6] zmiňují znatelný vliv na přírůstek tloušťky povlaku připadající na jeden průchod nástřikového zařízení a také popisují zvýšení tvrdost (HRC) při využití vyššího množství prášku. Již ne tak velký ale stále měřitelný vliv měl podle nich průtok prášku na porozitu, kdy méně prášku vedlo k poklesu porozity. Porozita a přírůstek nástřiku jdou z hlediska množství dodávaného prášku proti sobě. S větším množstvím prášku by bylo zapotřebí větší množství tepla k jeho dostatečnému ohřevu, respektive k jeho natavení. Množství tepla, je však pro dané složení palivové směsi konstantní, a tak bude teplota částic při vyšším průtoku prášku nižší, a tedy i jejich přetvárný odpor rozhodující pro jejich plastickou deformaci vlivem dopadové energie bude vyšší. Částice se budou tedy při dopadu méně deformovat a společně s póry mezi nimi budou zabírat více prostoru. Nižší teplota částic vedoucí k jejich menší dopadové deformaci tedy vysvětluje jak vyšší porozitu, tak větší přírůstek nástřiku. Nakonec zmiňují Varacalle a kol. [6] také nárůst drsnosti ovlivněný vyšším množstvím prášku což opět ukazuje na méně deformované částice a hrubší strukturu povlaku. [6]

## 3.4 Žárové nástřiky na bázi niklu

Všechny zmíněné poznatky o chování procesu HVOF žárového stříkání se vztahují k tvorbě nástřiků na bázi niklu. Tohoto prvku jakožto báze nanášeného materiálu využívá široká paleta slitin, z nichž budou v této kapitole zmíněni jen někteří zástupci.

### 3.4.1 Nástřik NiCrBSi

Tento nástřik je předmětem této kvalifikační práce. Z hlediska mechanických vlastností se vyznačuje výbornou korozní odolností a žáruvzdorností. Krom toho vykazuje také značnou

tvrdost (cca 400 HV [21]). Korozivzdornost a žáruvzdornost nástřiku poskytuje přítomnost niklu a chromu, který zlepšuje pasivační vlastnosti povlaku. Nikl, a především karbidy chromu a boru přidávají nástřiku na tvrdosti a bor společně s křemíkem zlepšují smáčivost nástřiku a lepší vzájemnou přilnavost částic. [21, 22] Jsou-li od nástřiku požadované jiné, nebo lepší vlastnosti, bývá NiCrBSi spojován s jinými nástřiky, čímž vznikají například slitiny:

- NiCrBSi – SiC (Vyšší tvrdost nástřiku [22])
- NiCrBSi – WC (Vyšší tvrdost nástřiku [23])
- NiCrBSi-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr (Lepší korozní a teplotní odolnost nástřiku [24])

### 3.4.2 Nástřik NiTi

Slitina NiTi se krom korozní odolnosti pro niklové slitiny typické vyznačuje tvarovou pamětí. Výroba směsi a aplikace je však komplikovaná. Jednou z nejvýhodnějších metod tvorby toho povlaku je HVOF stříkání, které je nejtolerantnější z hlediska promísení směsi. [25, 26]

### 3.4.3 Nástřik Ni5Al

Povlak Ni5Al krom obligátní korozivzdornosti nabízí využití jako mezivrstva. Je totiž houževnatější, než jiné niklové nástřiky a vykazuje obecně dobrou přilnavost. [27] Využití ho lze například při nástřiku keramického povlaku na ocelový základní materiál. Značně odlišná teplotní roztažnosti obou materiálů by mohla způsobit popraskání keramického nástřiku. Aplikuje-li se však pod keramický nástřik vrstva Ni5Al, umožní její houževnatost kompenzovat rozdílné dilatace a ochrání keramický povlak.

## 3.5 Obrábění niklových slitin

Jelikož nebyly při rešerši nalezené téměř žádné externí (pocházející zpoza hranic ZČU) zdroje řešící problematiku obrábění niklových žárových nástřiků, zaměřuje se tato kapitola na obrábění niklových slitin obecně.

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, slitiny na bázi niklu vykazují typicky vysokou korozivzdornost a tvrdost. Korozivzdornost sama o sobě není z hlediska obrobitelnosti komplikace, ale vysoká tvrdost už ano. Zároveň mají niklové slitiny další typické vlastnosti, které komplikují jejich obrábění. Některé niklové slitiny patří mezi nejhůře obrobitelné kovové materiály [28].

Z hlediska členění obráběných materiálů spadají niklové slitiny do třídy ISO S neboli super-slitiny. Při jejich obrábění typicky dochází k deformačnímu zpevnování. V každé oblasti plastické deformace při řezání tedy dochází k nárůstu tvrdosti materiálu. V primární oblasti to znamená, že materiál při oddělování klade postupně větší odpor až do chvíle, kdy dojde ke stříhu. Následně odchází v podobě třísky po čele nástroje, kde opět dochází k deformaci (sekundární) a tedy zpevnování. Zpevněná odcházející tříška vymílá čelo nástroje a zvyšuje tak jeho opotřebení. Materiál, který se nacházel pod zaoblením ostří nástroje, a tedy nemohl být odříznut, je zatlačován pod hřbet nástroje a podléhá přitom terciální plastické deformaci, a tedy se opět zpevňuje. Dochází tak k opotřebení hřbetu otěrem a při obrábění v další úrovni hloubky řezu (obrábění menšího průměru) vytváří tato zpevněná povrchová vrstva vryp na břitu rezného nástroje.

Dalším problémem při obrábění niklových slitin je jejich velmi špatná tepelná vodivost. Většina energie vložená do procesu třískového obrábění se přeměňuje v teplo. Ve většině případů „běžného obrábění“ (obrábění materiálů třídy ISO P, ISO K, nebo ISO N) je toto teplo většinou odváděno v tříске a do obráběného materiálu, avšak u materiálů se špatnou



tepelnou vodivostí se teplo více koncentruje v místě řezu a značně tím pádem zasahuje břit řezného nástroje. Ten je pak více náchylný k opotřebení plastickou deformací, nebo difusními procesy. [28]

Posledním z největších neduhů niklových slitin je jejich vysoká tvrdost. Jako u obou výše zmíněných vlastností i zde platí, že z hlediska mechanického využití užitečná vlastnost způsobuje při obrábění nemalé potíže. Vysoká tvrdost znemožňuje použití nástrojů z rychlořezné oceli. Případají v úvahu pouze tvrdší řezné materiály. Niklové slitiny jsou navíc materiály žárupevné, což znamená, že si svou tvrdost zachovávají i za vysokých teplot. Využití vyšších řezných rychlostí za účelem větší produkce tepla, které následně sníží přetvárný odpor materiálu (v čemž spočívá princip vysokorychlostního – HSC – obrábění) tedy nemá v tomto případě takový vliv, jako u jiných materiálů. Naopak v kombinaci s již zmíněnou špatnou tepelnou vodivostí může vyšší řezná rychlost přispět k rychlejšímu selhání nástroje.

Ezugwu a kol. [29] zkoumal ve svém článku rozdíl v opotřebení povlakovaných nástrojů ze slinutého karbidu při soustružení niklové slitiny C-263 (chemické složení viz tabulka 4). Použité tenké vrstvy byly vrstva TiAlN a sendvičová vrstva TiN-TiCN-TiN. Při použití nižší řezné rychlosti (54 m/min) a menší hloubky řezu (1,25 mm) si byly oba nástroje z hlediska trvanlivosti rovné. Jakmile byly ale zvýšena řezná rychlost a hloubka řezu, a tedy došlo k nárůstu řezných sil i zvýšení produkce tepla, projevil se nástroj se sendvičovou vrstvou jako několikanásobně lepší. To mohlo být způsobeno například tím, že byla vrstva TiN-TiCN-TiN dvakrát silnější (7  $\mu\text{m}$  vs 3,5  $\mu\text{m}$ ), a tedy byl celý břit nástroje robustnější a lépe schopný snášet podmínky v místě řezu. Zároveň má vrstva TiN (nacházející se na povrchu sendvičové vrstvy) velmi dobré kluzné vlastnosti, což napomáhá plynulému odchodu třísky. Nástroj opatřený vrstvou TiAlN měl při obrábění větší tendenci vytvářet otřep, jehož přítomnost v kombinaci s deformačním zpevněním mohli přispět ke kratší trvanlivosti břitu tohoto nástroje. [29]

**Tabulka 4 Chemické složení slitiny C-263 [30]**

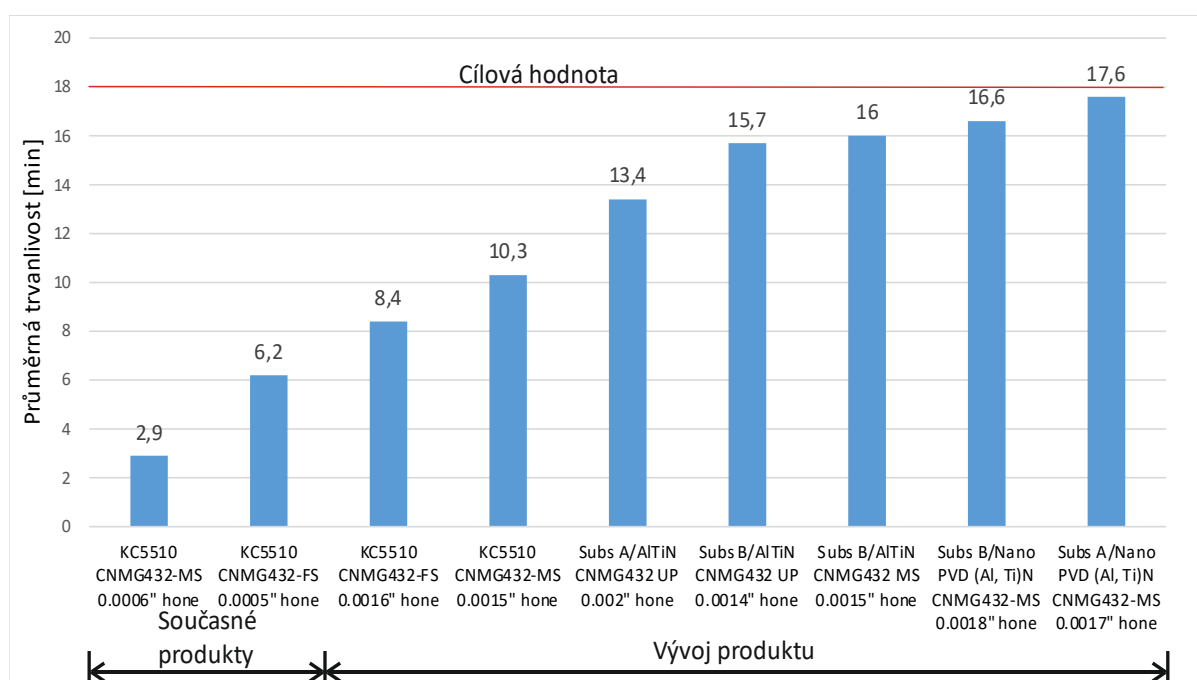
Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Fe	Al	Mn	Si	Cu	C
Báze	20	20	6	2,4	0,7	0,6	0,6	0,4	0,2	0,06

*\*Podíly jsou udávány v hmotnostních procentech.*

Ezugwu a kol. po slitině C-263 zkoumali v dalším článku [31] také chování materiálu INCONEL 718 při soustružení. I v tomto článku šlo o trvanlivost a opotřebení PVD povlakovaných nástrojů ze slinutého karbidu. Zatímco sendvičový systém tenkých vrstev TiN-TiCN-TiN zůstal zachován, byl v tomto případě srovnáván s vrstvou TiN. I zde se sendvičový systém ukázal jako vhodnější a znovu profitoval ze své větší tloušťky a tedy robustnosti. Mechanismy opotřebení obou nástrojů byly různorodé. Objevoval se otěr, praskliny, vylamování a vytrhávání břitu. Zatímco při využití nízké řezné rychlosti (29 m/min) docházelo vlivem pomalého a nerovnoměrného odchodu třísky k vytrhávání částí čela nástroje (skrz tvoření nárůstku), při vyšších řezných rychlostech (42 m/min) bylo pozorováno opotřebení otěrem na hřbetě a plastickou deformací. Při vyšších řezných rychlostech bylo také častější vylamování břitu nástroje. Při využití nejvyšší řezné rychlosti a malé hloubky řezu a posuvu byly naměřeny nejmenší hodnoty řezné síly. Malý průřez odřezávané vrstvy sám o sobě znamená menší potřebnou sílu pro oddělení třísky, zatímco vysoká teplota dosažená vyšší řeznou rychlostí způsobí pokles měrného řezného odporu materiálu. [31]

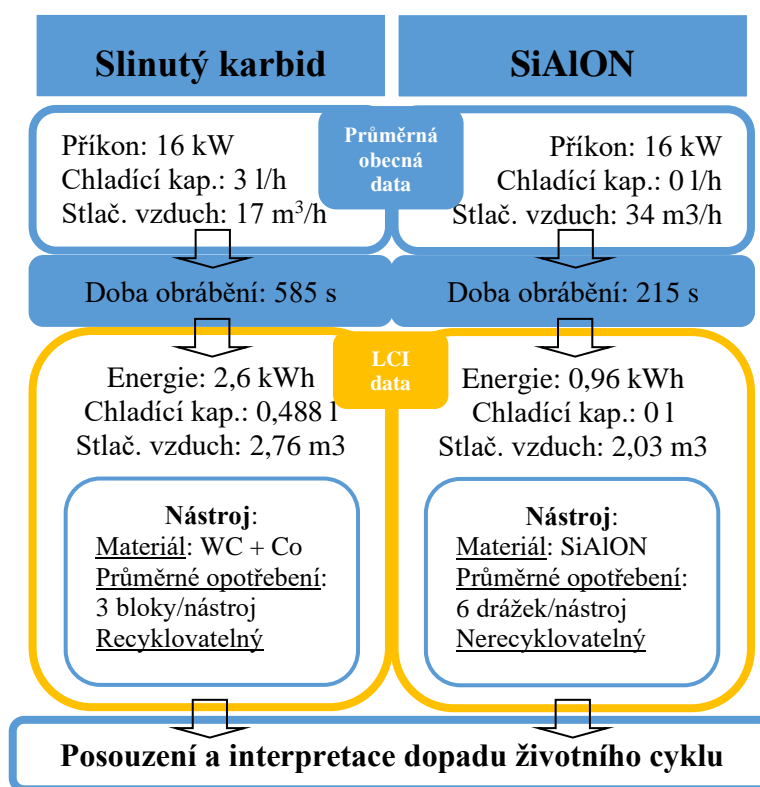
Společnost KENNAMETAL Inc. se v roce 2006 zabírala vývojem nástroje speciálně pro soustružení niklové slitiny INCONEL 718 pro letecký průmysl. Ve své shrnující zprávě

z tohoto projektu [32] popisují jednotlivé kroky samotného vývoje. Cílem vývoje bylo navrhnout nástroj, který bude alespoň o 40 % produktivnější než nejlepší současný nástroj. Nejprve bylo provedeno srovnání dostupných nástrojů i od konkurenčních značek za účelem identifikování typických mechanismů jejich opotřebení a selhání. Při řezné rychlosti 55 m/min docházelo k otěru VBD na hlavním a vedlejším hřbetu a na špičce a zároveň se tvořila rýha v úrovni hloubky řezu. Obdobně jako Ezugwu [31] se i výzkumníci z firmy KENNAMETAL setkali při nižší řezné rychlosti s větším váznutím třísky na čele VBD. To zprvu způsobilo vytrhání tenké vrstvy, což mělo za následek zlepšení podmínek pro tvorbu nestabilního nárůstku, čímž se opotřebení ještě uspíšilo. Při vyšších řezných rychlostech (76 m/min) se jako dominantní mechanismus opotřebení projevovalo opět opotřebení špičky nástroje. Jako cíl vývoje bylo tedy zaměřit se na odolnost nástroje proti otěru, zejména na špičce a také na jeho odolnost vůči tvorbě nárůstku. Následovalo experimentování se složením použitého slinutého karbidu, tvarem utvařeče třísek, mikro-geometrií (omletím) ostří a použitou tenkou vrstvou jehož výsledkem byla skutečně nová VBD s trvanlivostí téměř o 40 % vyšší (konkrétní vývoj trvanlivosti v průběhu experimentování zobrazuje graf 4). [32]



Graf 4 Vývoj zvyšování trvanlivosti vyvíjené VBD [32]

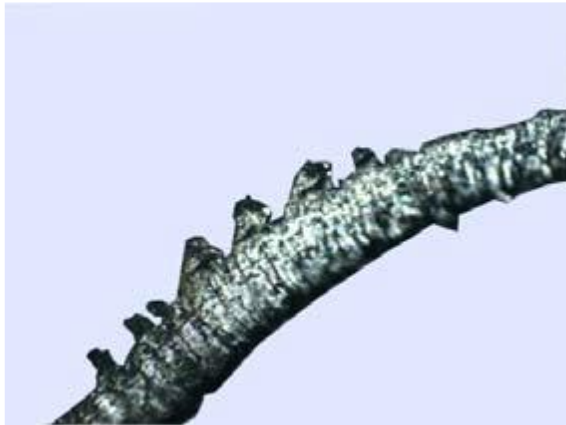
Fricke a kol. [33] se na rozdíl od ostatních dosud zmíněných výzkumníků zaměřili na využití i jiného řezného materiálu než slinutého karbide a sice řezné keramiky (SiAlON). Předmětem bylo opět obrábění (tentokrát frézování) slitiny INCONEL 718 pro letecký průmysl, ovšem hodnotícím hlediskem byl ekologický dopad procesu obrábění. Autoři poukazují na důležitost spotřeby a nakládání se zdroji (elektřina, nástroje, procesní kapalina atd.) při zhodnocování výroby. Díky tomu, že je řezná keramika vysoce teplotně odolná, umožňuje obrábění niklových slitin v režimu HSC. Při řezné rychlosti 800 m/min je množství tepla z řezání tak vysoké, že dojde ke znatelnému poklesu řezného odporu i žárupevných slitin, přičemž stále nedojde k teplotnímu poškození nástroje. Využití procesní kapaliny je v případě vysokorychlostního obrábění (HSC) kontraproduktivní, čímž odpadá jeden značně ekologicky problematický faktor. Navíc by teplotní šoky z nuceného chlazení mohly značně přispět k destrukci sice tvrdého, ale velmi křehkého keramického nástroje. Vysoká řezná rychlost umožňuje dosáhnout vysokého úběru i při malém posuvu a přísuvu, což vede k prodloužení životnosti nástroje. Finální čas obrábění byl při řezné rychlosti přes 800 m/min méně než poloviční, což poukazuje na značné zvýšení produktivity. Ve výsledku se tedy ukázalo využití nástroje lépe snášejícího teplo v kombinaci s progresivnějšími řeznými podmínkami jako výhodnější jak z hlediska produktivity, tak z hlediska ekologického. Z výstupního srovnání, které Fricke a kol. vypracovali (viz obrázek 14) je patrné, jak velký rozdíl změna materiálu nástroje a s ní spjatá změna řezných podmínek přinesla. [33]



Obrázek 14 Srovnání spotřeby zdrojů při obrábění nástroje ze SK a řezné keramiky [33]

Posledním článkem zvoleným pro popis problematiky obrábění niklových slitin byl článek od Khidira a Mohameda [34] z roku 2010. Výzkumníci zkoumali v tomto článku vliv řezné rychlosti na výslednou drsnost a morfologii vznikající třísky při soustružení slitiny Hastelloy-276 nástrojem ze slinutého karbide. Obdobně jako dosud zmíněné zdroje zabývající se touto problematikou popisuje i tento zdroj jako dominantní mechanismy opotřebení VBD vrub v úrovni hloubky řezu a otěr na špičce, který vedl ke zhoršení drsnosti obrobeného povrchu. Dalšími projevy opotřebení bylo vylamování ostří (hlavního i vedlejšího) a otěr na

hřbetě. Při nižších řezných rychlostech a při použití nástroje bez tenké vrstvy docházelo k výraznému otěru hřbetu a tvorbě nárůstku, která byla podpořena nerovnoměrným odchodem třísky podobně jak referují předešlé zdroje [31]. Nestabilita odchodu třísky společně s přítomností vrubu na hlavním ostří se na vznikající třisce podepsali zjevným otřepem (viz obrázek 15), který pak dále přispíval k destrukci břitu nástroje. Naopak při využití vyšších řezných rychlostí (nad 150 m/min) a povlakovaného nástroje, byla trvanlivost břitu delší a úběr materiálu plynulejší, jak je patrné i na změně tvaru třísky (obrázek 16). Zároveň při využití nástroje opatřeného tenkou vrstvou bylo dosaženo při řezné rychlosti 200 m/min lepší kvality obrobené plochy. [34]



Obrázek 15 Tříska s jasně znatelným otřepem [34]



Obrázek 16 Tříska vzniklá při  $v_c=200$  m/min [34]

### 3.6 Výzkum obrábění nástřiku NiCrBSi na ZČU [35, 36]

Jak bylo zmíněno v úvodu, kvalifikační práce navazuje na výzkumné aktivity řešené v předchozích letech. Předmětem tohoto proběhnuvšího výzkumu bylo nalezení optimálních podmínek obrábění (soustružení) žárového nástřiku NiCrBSi za účelem zvýšení produktivity oproti broušení (období 2019-2020) a také prozkoumání reakce žárového nástřiku na variaci řezných podmínek (rok 2021 a dále).

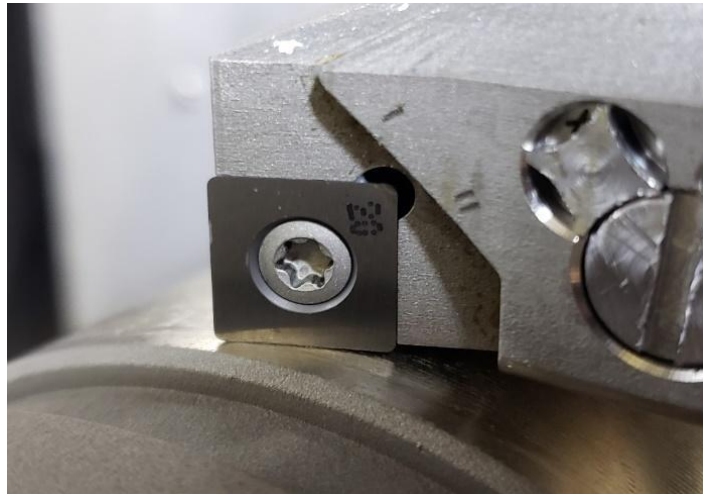
V letech 2019 a 2020 proběhly v rámci projektu Národního Centra Kompetence – Strojírenství (NCKS) experimenty se soustružením nástřiku NiCrBSi pomocí speciálního 3břitého nástroje. Nástroj byl navržen tak, aby s ním bylo možné, jak frézovat, tak soustružit, a to s možností rychlé výměny opotřeбенé řezné hrany pootočením nástroje v indexovaném frézovacím vřetenu. Břit VBD byl polohován nikoliv do osy obrobku, jak tomu běžně bývá, ale tangenciálně k obráběné ploše a skloněn vůči ose obrobku o proměnný úhel  $\lambda_s$ . Obrábění s takto ustaveným břitem nástroje se označuje jako obrábění lineární řeznou hranou a jelikož je tento přístup poměrně ojedinělý bude mu nyní věnována krátká podkapitola.

#### 3.6.1 Obrábění lineární řeznou hranou

Jako jeden z prvních autorů zmiňuje tento způsob obrábění A. L. De Leeuwe v roce 1918. V průběhu celého 20. století je pak obrábění lineární řeznou hranou (LŘH) dále studováno a rozvíjeno. [37] Strategie obrábění LŘH se především využívá při soustružení, nicméně lze se s ní setkat i u frézování.

Jak bylo zmíněno, spočívá obrábění lineární řeznou hranou v polohování břitu nástroje tečně k obráběné ploše a ve srovnání s konvenčními nástroji s několikanásobně větším úhlem sklonu hlavního ostří ( $\lambda_s$ ), viz obrázek 17. Přímka ostří a osa obrobku jsou tedy vzájemně mimoběžné. Rotací mimoběžky kolem osy vzniká rotační hyperboloid, což je právě tvar, který nese obrobená plocha. Přesněji, jedná-li se o příčné obrábění (zapichování), má

obrobená plocha přímo tvar rotačního hyperboloidu, zatímco při podélném obrábění vzniká „šroubovicový“ hyperboloid a plocha řezu má tvar komolého rotačního hyperboloidu.

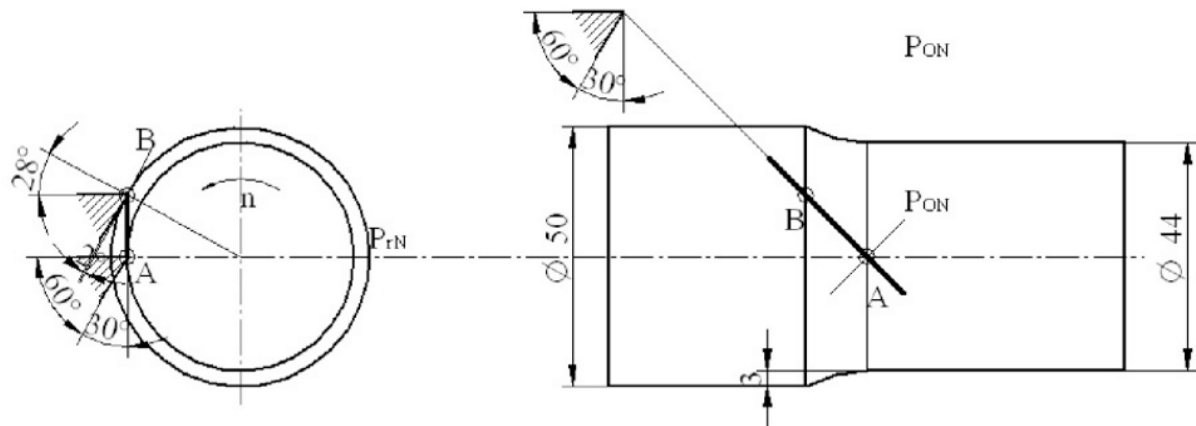


Obrázek 17 Postavení břitu nástroje při obrábění lineární řeznou hranou [35]

Díky tečnému nastavení ostří se celková hloubka řezu rozloží na větší část ostří a tloušťka odřezávané vrstvy se tím zmenší. Následkem toho se snižuje i opotřebení břitu nástroje, které se zároveň také rozkládá na delší část břitu než při konvenčním soustružení. Malá tloušťka odřezávané vrstvy však méně stabilizuje břit nástroje, který je tím pádem náchylnější k vibracím. Větší aktivní délka ostří zároveň zvyšuje řezné síly, což vyžaduje volbu o to tužší soustavy SNOP. Není-li tato soustava dostatečně tuhá, opět roste riziko jejího rozvibrování a také bude mít břit větší tendenci se odtláčovat, a tak ovlivňovat nastavenou hloubku řezu. [37, 38] Při konvenčním obrábění je špička často z hlediska opotřebení nejrizikovější částí ostří, neboť je z jedné strany volná. Tangenciálním nastavením ostří jsou však špičky z řezání vyřazeny a o to je výsledné ostří odolnější. Z tohoto faktu také vychází jedno ze zahraničních označení nástrojů s LRH a sice Tipless tool („bezšpičkový/bezhrotý nástroj“).

Skloněním hlavního ostří o úhel  $\lambda_s$  se každý element ostří nachází v jiné vzdálenosti nad/pod osou. To má za následek, že skutečné záběrové podmínky se pro každou část ostří liší a geometrie obecně přechází od zdánlivě pozitivní (v místě přechodu obráběné plochy v plochu řezu) k nastavené (v místě přechodu plochy řezu v obrobenou plochu). Tento jev ilustruje obrázek 18. [37, 39]

Posledním projevem tečného ustavení ostří je zlepšení drsnosti obrobené plochy. V teoretické situaci, kdy by se  $\lambda_s$  rovnalo 0, byl se nástroj choval jako hladicí a drsnost obrobené plochy by byla naprosto minimální. Tento scénář však neodpovídá obrábění lineární řeznou hranou, neboť špička nástroje a vedlejší ostří by sehrávali klíčovou roli. Zvýší-li se však úhel sklonu ostří, špička vyjde ze záběru a dosahovaná drsnost bude stále velmi nízká. Řádově může být při stejných hodnotách posuvu drsnost dosahovaná nástrojem s lineární řeznou hranou i desetkrát nižší než u konvenčního nástroje. [37] Díky tomu je možné při obrábění lineární hranou využít vyšší posuvy se zachováním nízké drsnosti a tím pádem zvýšit produktivitu procesu obrábění. S vyšším posuvem by však měl mírně vzrůst i úhel sklonu hlavního ostří, aby vlivem zatížení ostří nedocházelo k destabilizaci soustavy SNOP. [38]



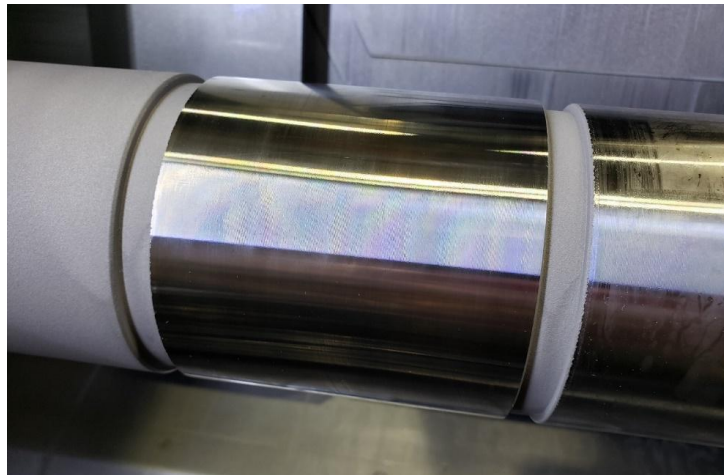
Obrázek 18 Geometrie břítu při obrábění lineární řeznou hranou [39]

Souhrnně lze technologii obrábění (soustružení) lineární řeznou hranou s úspěchem využít pro dokončovací operace, a to díky odolnosti vůči opotřebení a široce rozloženému zatížení i při obrábění tvrdých materiálů. Dosahované drsnosti dokonce v některých případech umožňují nahradit touto technologií broušení a tím značně zvýšit produktivitu výroby. Posunem nástroje v ose Y lze navíc posouvat aktivní část ostří a tím ho celé maximálně využít. Hlavními nevýhodami je větší náchylnost k vibracím, nárůst řezných sil a také možnost obrábět pouze válcové oboustranně volné plochy (obráběná plocha nesmí přiléhat k čelům většího průměru), jelikož nástroj nedokáže obrábět až do rohu. Zároveň nelze s využitím lineární řezné hrany obrábět vnitřní díry. Toho lze však se zachováním většiny benefitů dosáhnout využitím kruhové VBD [37–39]. Popsané výhody byly hlavním důvodem, proč byla tato strategie obrábění využita při experimentech na FST ZČU.

Pro účely experimentů byly zmíněným žárovým nástřikem opatřeny tyče o průměru 100 mm a délce 500 mm. Postupně se experimentovalo s různými řeznými materiály a druhy destiček a následně s řeznými podmínkami.

V prvotní fázi proti sobě stály destičky ze slinutého karbidu (SK), z polykrystalického nitridu boru (PCBN) a z polykrystalického diamantu (PD). Velmi rychle se ukázalo, že destičky ze slinutého karbidu nejsou pro tento druh obrábění vhodné. Zatížení destičky ve spojení s vysokou tvrdostí obráběného materiálu vedly často až k úplnému zničení řezné hrany. K tomu zprvu občas docházelo i u destiček z PCBN, nicméně později se ukázalo, že především proto, že destička měla jen malý pájený řezný segment. Destičky z polykrystalického diamantu si s nástřikem NiCrBSi poradily dobře a nejnižší dosažená drsnost byla menší než Ra 0,2 (viz obrázek 19). Později byly také vyzkoušeny destičky od firmy BONAR, které měly řezný segment z PCBN přes celé čelo. Nejen že bylo díky „fullface“ provedení možné využít všechny čtyři řezné hrany destičky, ale zřejmě napomohla souvislá plocha čela i rovnoměrnějšímu rozložení řezných sil a k vylovení destičky již zdaleka nedocházelo tak často. Větší odolnosti řezné hrany napomohla také fazetka vytvořená na čele břítu. S destičkami od firmy BONAR se experimentovalo jak při běžných řezných rychlostech (mezi 80 a 200 m/min), tak v režimu vysokorychlostního (HSC) obrábění, kde se řezná rychlost blížila 1000 m/min.



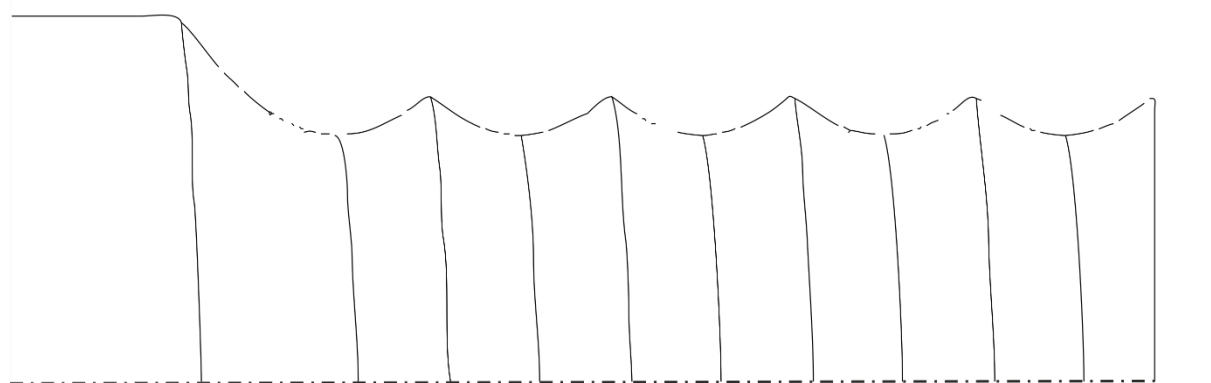


Obrázek 19 Obrobený nástřik NiCrBSi

Z hlediska úhlu sklonu hlavního ostří neboli úhlu  $\lambda_s$  se ukázalo, že čím je tento úhel menší, tím více se nůž chová jako hladící a zhlazuje stopy po obrábění. Vliv úhlu  $\lambda_s$  na kinematickou drsnost (při zachování stejného posuvu) obrobené plochy a tvar plochy řezu ukazují následující obrázky.



Obrázek 20 Teoretický obrobená plocha při  $\lambda_s = 50^\circ$



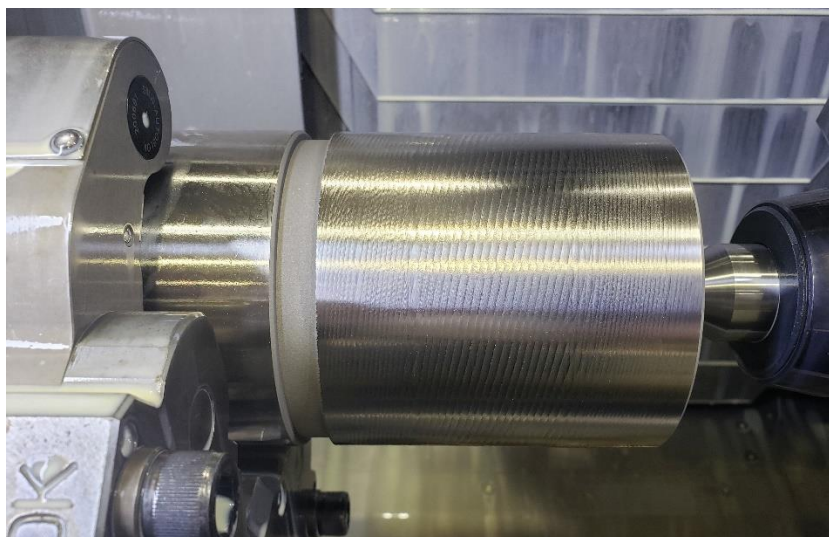
Obrázek 21 Teoretický obrobená plocha při  $\lambda_s = 70^\circ$

Menší úhel  $\lambda_s$  zároveň díky hladícímu účinku umožňuje použít vyšší posuv, čímž roste produktivita obrábění. Když byl použitý velký posuv ve spojení s velkým úhlem sklonu ostří, začínala obrobená plocha silně vykazovat charakter šroubovice (viz obrázek 22).

Po vyhodnocení a shrnutí všech pokusů s variací řezných podmínek [40] (jmenovitě: úhel sklonu hlavního ostří, řezná rychlost, posuv) byly jako nejvhodnější z hlediska drsnosti a opotřebení VBD zvoleny hodnoty (viz tabulka 5):

**Tabulka 5 Nejlepší řezné podmínky [40]**

Řezná rychlost [m/min]	Úhel $\lambda_s$ [°]	Posuv [mm/ot]	Hloubka řezu [mm]
240	50	0,2	0,05



**Obrázek 22 Povrch po obrábění s vysokým posuvem a úhlem sklonu ostří**

Důležitým poznatkem také bylo, že působením vysoké tvrdosti obráběného materiálu, negativní geometrie řezného nástroje způsobené fazetkou a tangenciálního postavení řezné hrany docházelo při obrábění ke značnému odtlačování nástroje vlivem velké pasivní/přísuvové síly ( $F_p$ ). To způsobilo, že skutečná hloubka řezu byla často menší než nastavená. Aby byla hloubka řezu co nejpřesněji dodržena, je nutno zvolit co nejtužší soustavu SNOP, a mít podrobné informace o skutečném rozměru břitové destičky a obrobku.

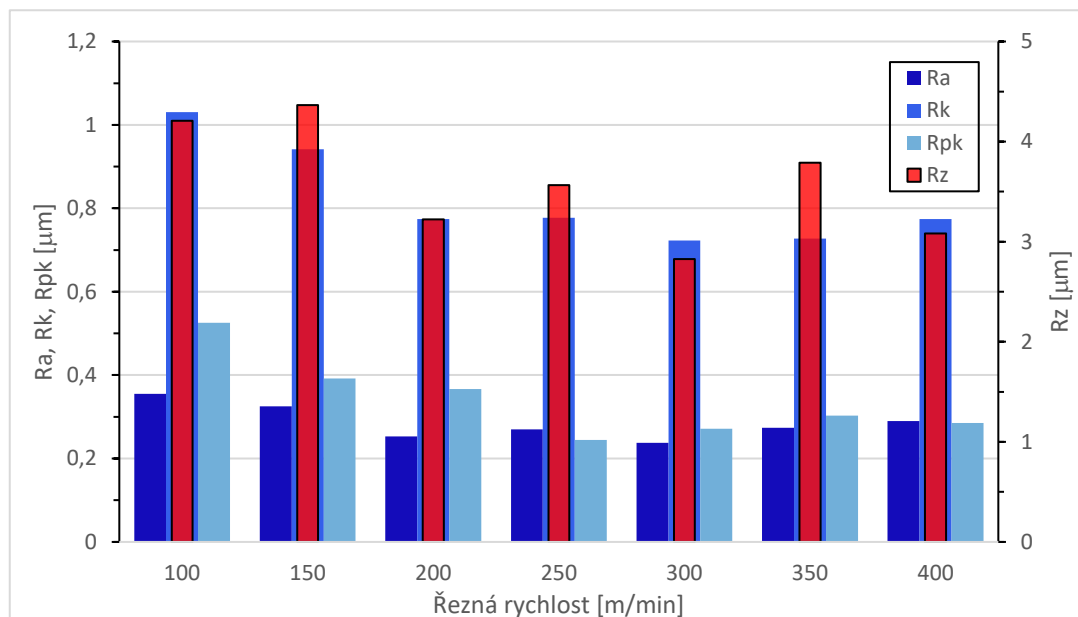
### 3.7 Obrábění žárových nástřiků obecně

Jak bylo již zmíněno, hledání zdrojů zaměřených konkrétně na obrábění žárových nástřiků na bázi niklu bylo neúspěšné. Podařilo se však nalézt zdroje řešící obrábění jiných nástřiků. Pro získání širšího obrazu, jak se žárové nástřiky při obrábění chovají a jak k této problematice doposud přistupovali v zahraničí budou, v této kapitole vypsány poznatky z těchto zdrojů.

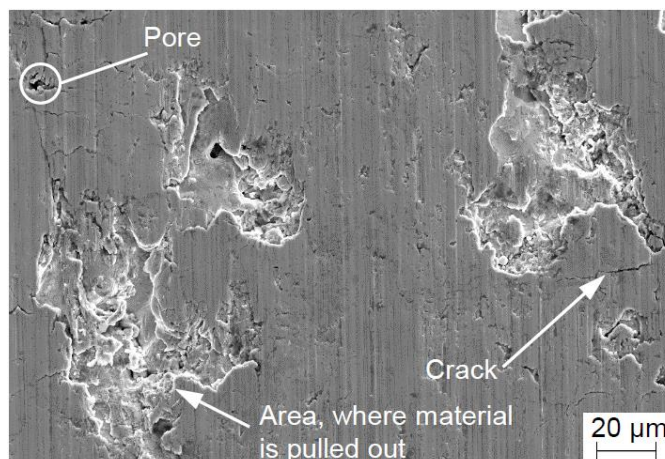
Liborius a kol. na univerzitě v německém Chemnitz ve svých člancích [27, 41, 42] zkoumali obrábění žárového nástřiku F17Cr2Ni0,2C zhotoveného metodou plazmového nástřiku (APS). Vliv řezné rychlosti na kvalitu obrobenej plochy a velikost zbytkového napětí řešili v článku, který byl uveden na konferenci „Competitive manufacturing“ v roce 2019. [42] Experimentální obrábění bylo prováděno při neměnné hloubce řezu a posuvu 0,5 mm a 0,5 mm/ot. Řezná rychlost byla upravována v rozmezí od 100 do 400 m/min. Nejnižší drsnosti bylo dosahováno v rozmezí řezných rychlostí od 250 do 300 m/min, nicméně nad úroveň 200 m/min už byly rozdíly méně patrné, jak ukazuje graf 5. Obzvláště zajímavé byl z hlediska charakteristik obrábění žárových nástřiků fakt, že drsnost obrobenej plochy v žádném z případů neodpovídala kinematické drsnosti (drsnosti matematicky vycházející



z posuvu a poloměru špičky nástroje), nýbrž byla výrazně vyšší. Tento rozdíl byl zapříčiněn odhalením pórovité struktury žárového nástřiku a také vytrháváním splatů z obrobenej plochy. Detailní pohled na strukturu obrobenej plochy je zobrazen na obrázku 23. Z povahy struktury žárových nástřiků vyvozují autoři tři hlavní situace, jakými může splat při obrábění projít. Může být rozříznut (přestřížen), plasticky deformován, nebo vytržen ze struktury. O tom, jaká situace nastane rozhodují okamžité podmínky v místě řezu a samotná struktura. Z hlediska podmínek v místě řezu je rozhodující úhel smykové roviny a teplota. S vyšší řeznou rychlostí dojde k nárůstu velikosti úhlu smykové roviny a také zvýšení produkce tepla v místě řezání, což vede k odpevnění obráběného materiálu. Zbytkové napětí bylo po obrábění vždy tlakového charakteru a řezná rychlost neměla na velikost tohoto napětí znatelný vliv.



Graf 5 Vývoj drsnosti obrobenej plochy se změnou řezné rychlosti [42]



Obrázek 23 Struktura obrobenej žárového nástřiku (při  $v_c = 200$  m/min) [42]

V dalším článku ze stejného roku [27] se autoři zaměřují na vliv jiné z řezných podmínek – posuvu, opět na charakteristiky obrobenej povrchu. Z tohoto hlediska je vliv jednoznačnější. Vyšší hodnota posuvu na otáčku (byl zkoumaný rozsah od 0,025 po 0,15 mm/ot s krokem 0,025 mm) vedla k vyšší dosahované drsnosti obrobenej plochy a skrze zvětšení průřezu odřezávané vrstvy také k nárůstu velikosti řezných sil. Nejhorší dosažená drsnost byla  $R_a 1,27 \mu\text{m}$ , nicméně se vzhledem ke struktuře žárového nástřiku opět dosahovaná drsnost značně lišila od kinematické drsnosti. Diference mezi skutečnou a kinematickou drsností je zobrazena v tabulce 6 a ukazuje, že rozdíl byl s vyšším posuvem

menší. Vliv na velikost zbytkových napětí opět není úplně jednoznačný. Obdobné výsledky jako [27, 42] ukázal i výzkum, jenž prováděl Grund a kol. [43], kteří se rovněž zaměřovali na zkoumání vlivu řezných podmínek při dokončovacím soustružení nástřiku FeCr17Ni2C0.2.

**Tabulka 6 Srovnání dosahované kinematické a skutečné drsnosti [27]**

Posuv [mm/ot]	$R_{z(kin)}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
0,025	0,2	3,79
0,05	0,78	3,23
0,075	1,76	3,85
0,1	2,97	4,52
0,125	4,29	6,19
0,15	5,71	6,92

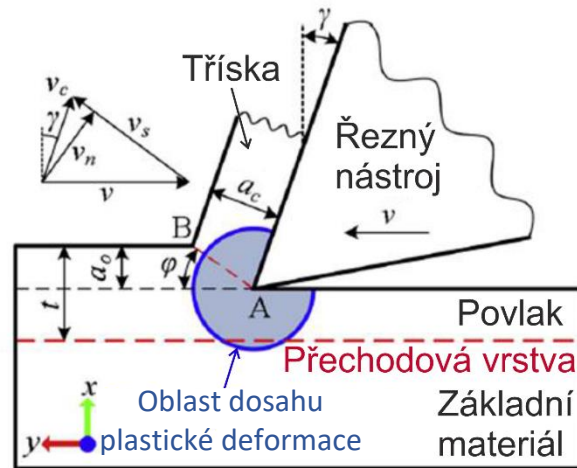
Výzkum [41] probíhal s využitím poznatků výše popsaných a se záměrem použití tohoto žárového nástřiku pro ošetření válců v hliníkovém bloku spalovacího motoru, a tedy byly požadované charakteristiky obrobené plochy obdobné jako při honování, které je doposud pro obrábění zmíněných ploch využíváno. Pro tyto účely byla navržen postup nejprve nástřik osoustružit a následně povrch dokončit zahlazením diamantovou kuličkou. Jelikož se v případě zmíněného článku jednalo pouze o „proof of concept“ byl obráběný namísto válce pouze nástříkaný váleček z hliníkové slitiny o průměru 50 mm s nástřikem o tloušťce 0,2 mm. Návazně na jejich předchozí výsledky [27, 42] zvolili Liborius a kol. pro účely před-dokončení žárového nástřiku pevnou řeznou rychlost 200 m/min, hloubku řezu 0,05 mm, posuv 0,05 mm/ot a nástroj z kubického nitridu boru, kteréžto podmínky dodávají dobré výsledky a dále se zaobírali především parametry zahlazování.

Výstupy ze zmíněných článků [27, 41–43] se volbou nejlepší řezné rychlosti příliš nevzdalují od hodnoty, jež se jeví jako nejlepších i na základě výzkumu provedeného za FST ZČU. Všechny tyto hodnoty se pohybují v rozmezí od 200 do 300 m/min.

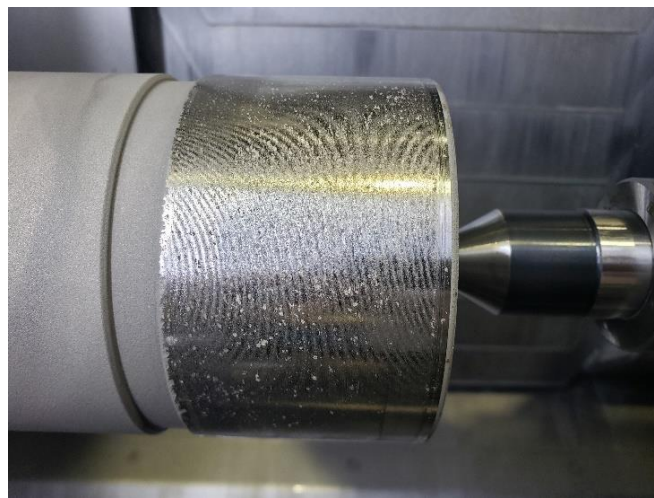
### 3.8 Shrnutí poznatků týkajících se obrábění žárových nástřiků

Největší překážkou při obrábění žárových nástřiků je zřejmě jejich struktura. Ta není z podstaty procesu homogenní, leč je lamelární (tvořená jednotlivými deformovanými částicemi – splaty) a obsahuje póry, vměstky a oxidy. Heterogenní struktura ve spojení se silami působícími při obrábění má pak za následek vytrhávání splatů a tím pádem zhoršení drsnosti obrobené plochy. Pokud není tloušťka nástřiku dostatečná, nebo jsou řezné síly příliš velké a plastická deformace zasáhne až do přechodové oblasti mezi nástřikem a základním materiálem (viz obrázek 24), může vlivem odlišného Youngova modulu pružnosti těchto dvou materiálů dojít k porušení soudržnosti a popraskání, nebo dokonce vytrhávání žárového nástřiku (extrémní případ zobrazený na obrázku 25).

Jak bylo zmíněno, heterogenní struktura obsahuje také oxidy a vměstky, které mohou při obrábění působit abrazivně na břit nástroje a zintenzivňovat tak otupení.



Obrázek 24 Dosah oblasti zasažené řeznou silou [36]



Obrázek 25 Vytrhaný žárový nástřik po obrábění

Malá tloušťka nástřiku znamená, že i hloubka řezu bude muset být velmi malá a tím pádem bude všechno zatížení koncentrováno do velmi malého úseku ostří. Z tohoto důvodu je vhodné využít například nástroj s lineární řeznou hranou, který si s touto situací lépe poradí.

Vysoká tvrdost nástřiku může však v kombinaci s využitím nástroje s lineární řeznou hranou, vyústit v odtlačení nástroje. Vzhledem k funkčnímu použití ploch opatřených žárovým nástřikem, kde jde často o kluzné plochy, či plochy pod ložiska, je nutné dosahovat relativně vysoké rozměrové přesnosti obráběných ploch. Problematické odtlačení tedy musí být bráno na zřetel a soustava SNOP musí být náležitě tuhá.

Z hlediska obvyklé vysoké tvrdosti a obtížné obrobitelnosti stojí za zvážení využití vysokých řezných rychlostí, respektive strategie vysokorychlostního obrábění, kde díky vysokému množství uvolněného tepla při řezání dojde k poklesu řezných sil. Zároveň má velký význam zvážit využití tvrdších řezných materiálů, jakými jsou například polykrystalický nitrid boru, či polykrystalický diamant.

## 4 Před-experiment – nedefinovatelné faktory ovlivňující řezný proces

Návazně na statistické vyhodnocení výsledků z předchozích experimentů týkajících se obrábění HVOF žárového nástřiku NiCrBSi bude část této kvalifikační práce zaměřena také na nedefinovatelné faktory ovlivňující řezný proces – konkrétně hloubku řezu, a s ní i velikost řezných sil. Při obrábění žárových nástřiků mohou mít i tyto činitele značnou hodnotu, neboť se zpravidla pohybujeme v hloubkách řezu o řád nižších než při běžném obrábění. Konkrétně v případě tohoto výzkumu může být hloubka řezu nastavena na hodnotu až 0,05 mm. Pro účel tohoto průzkumu byly předběžně vybrány následující vlivy.

- Teplotní chyba polohy
- Opakovatelnost najetí
- Síla opření protivřetena
- Skutečná velikost vyměnitelné břitové destičky
- Přesnost opakovaného vložení VBD
- Skutečný rozměr a profil žárově stříkaného povrchu

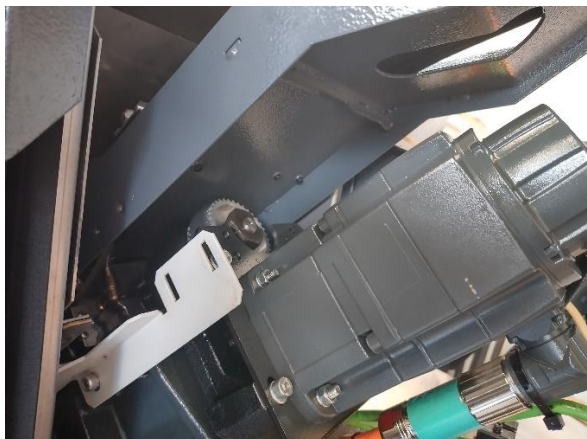
V následujících kapitolách budou rozebrány jednotlivé zmíněné faktory.

### 4.1 Teplotní dilatace

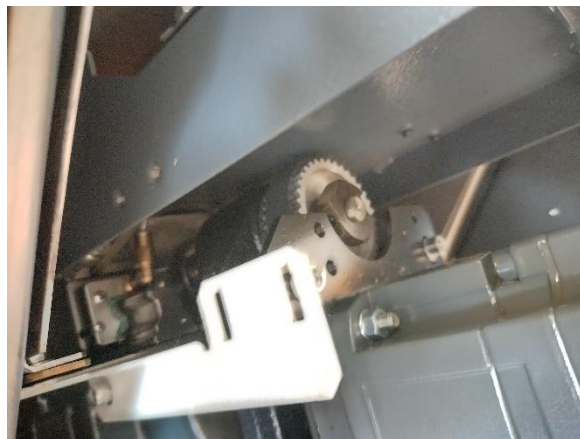
Všechny kovové materiály mají vzhledem ke své krystalické struktuře značnou teplotní roztažnost. U ocelí se obecně udává koeficient teplotní roztažnosti (též teplotní dilatace) v rozmezí 11–14  $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ . S vědomím, že všechny motory, tření mezi vedením a vozíky a také mezi pohybovým šroubem a maticí, a nakonec i samotný řezný proces jsou značnými zdroji tepla, může docházet k teplotní dilataci pohybového šroubu, nebo distorzi rámu stroje. Z hlediska rámu bývá tento problém zpravidla již při návrhu stroje eliminován jeho termo-symetrickou konstrukcí, tzn. že rám dilatuje souměrně a jednotlivé vznikající odchylky se navzájem kompenzují. Stran pohybového šroubu je kompenzace složitější, avšak vliv na chybu polohy nástroje větší. Nejspolehlivější metoda kompenzace této chyby je použití systému přímého odměřování polohy, nicméně tímto systémem není použitý stroj EMCO MAXXTURN 25 vybavený. Bez znalosti skutečné polohy v dané ose není exaktní kompenzace možná, a proto jsou další možnosti nápravy tepelné chyby empirické (na základě jednou změřené závislosti) a využívající buďto kontinuálně měřenou teplotu na daném zvoleném místě, nebo čas obrábění. [44–46]

Měření teplotní chyby obráběcích strojů je široce řešená problematika, které připadá i vlastní technická norma. ČSN ISO 230-3 [47] je norma uvádějící postupy měření tepelné distorze soustruhů a frézek. Postupy předepsané v této normě jsou však velice detailní a složité a pro informativní potřeby této práce příliš komplikované. Teplotní chyba byla v tomto případě měřena pouze ve směru osy X (osa určující hloubku řezu) a bude zkoumán pouze vztah motor, pohybový šroub. Ostatní zdroje teplotní chyby budou zanedbané.

Měření přesné teploty pohybového šroubu osy X na stroji EMCO MAXXTURN 25 je z konstrukčního řešení stroje velmi komplikované a jediný údaj týkající se této veličiny lze získat z PLC stroje. Tímto údajem je konkrétně teplota motoru, nicméně vzhledem k tomu, že kroučící moment je z motoru na pohybový šroub přenášen zubovým řemenem a jediné další spojení těchto dvou dílů je skrze masivní rám, je signifikantní přenos tepla nepravděpodobný. Konkrétní uložení motoru a pohybového šroubu osy X zobrazuje obrázek 26, potažmo 27.



Obrázek 26 Motor a řemenice pohybového šroubu osy X



Obrázek 27 Motor a řemenice pohybového šroubu osy X – detail

I kdybychom uvažovali znatelný přestup tepla mezi motorem a pohybovým šroubem (dokonce až teplotní rovnováhu) byla by situace následující. Stroj MAXXTURN 25 nabízí rozsah pohybu v ose X 100 mm. Při maximálním využití této délky, a tedy i celého pohybového šroubu a situaci maximální zaznamenané teploty motoru (45 °C), znamenalo by to, že se špička nástroje k ose vřetena přiblíží o 0,024 mm, viz následující rovnice (při uvažování teplotní roztažnosti pohybového šroubu 12  $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a okolní teplotě 25 °C).

$$\Delta l = a \cdot l \cdot \Delta T = 12 \cdot 0,1 \cdot (45 - 25) = 24 \mu\text{m}$$

Takový rozdíl v poloze je při obrábění s hloubkou řezu 0,05 mm zcela nezanedbatelný, ovšem bude-li před samotným experimentem proveden hrubovací řez pro přerovnění žárového nástřiku a vytvoření referenční plochy styku nástroj – obrobek, promítne se už teplotní dilatace pohybového šroubu pouze v jiném stoupání šroubu, a tedy při nastavení hloubky řezu (0,05 mm). Její vliv však teoreticky bude již jen 12 nm.

$$\Delta l = 12 \cdot 0,00005 \cdot (45 - 25) = 0,012 \mu\text{m}$$

Takový rozdíl je již zanedbatelný a znamená to, že za předpokladu, že se žárový nástřik před experimentem obrobí nahrubo, lze vliv teplotní dilatace pohybového šroubu zanedbat. Každopádně je zapotřebí si teploty stroje při experimentování hlídat, a pokud byl před započítáním experimentů stroj neaktivní, je nutné ho zahřát na pracovní teplotu, například spuštěním programu „naprázdno“.

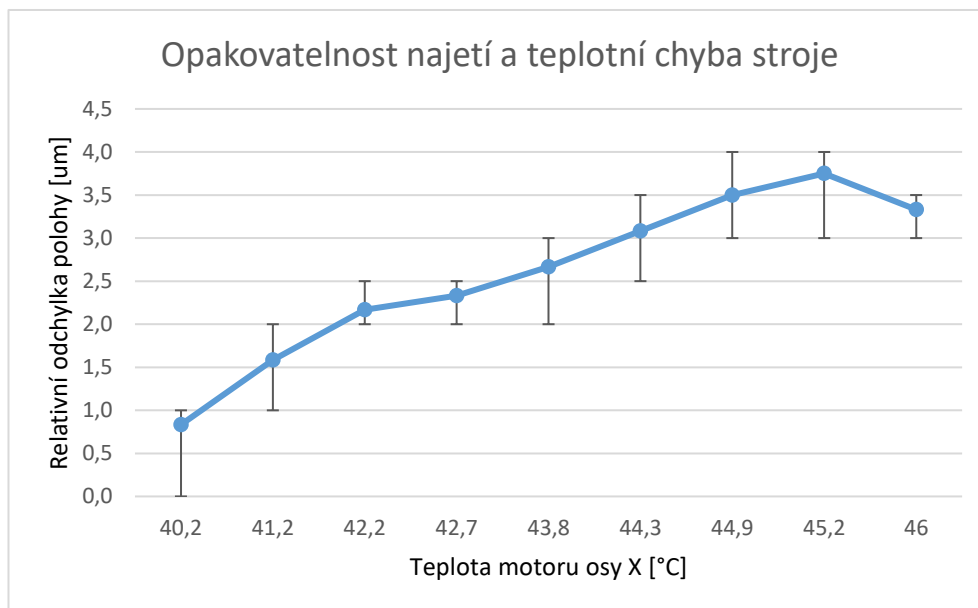
## 4.2 Opakovatelnost najetí

Opakovatelnost najetí je dalším faktorem, jehož vliv může být při velmi malých hloubkách řezu značný. Vzhledem ke všem tolerancím a vůlím vedení a pohybového ústrojí stroje se nástroj nikdy nevrátí na naprosto stejnou souřadnici dvakrát. Výrobci obráběcích strojů většinou opakovatelnost najetí udávají v rámci jednotek mikrometrů (většinou < 5  $\mu\text{m}$ ), nicméně vlivem opotřebení stěžejních součástí (vedení, vozíky, pohybový šroub a matice) bude tento údaj teoreticky narůstat. Jelikož se na rozdíl od tepelné dilatace snadno jeho vliv projeví i po prvotním přehrubování obráběného povrchu (najetí na dokončovací hloubku řezu), byl tento parametr pro orientaci otestován.

Pro účely měření přesné polohy v ose X byl vyroben přípravek pro upnutí úchylkoměru radiálně do vřetena stroje EMCO MAXXTURN 25 (viz obrázek 28). Samotné odměřování bylo pak prováděno pomocí číselníkového úchylkoměru s přesností 1  $\mu\text{m}$ .

Odchylka polohy byla pro účely průměru vztažena k teplotě motoru osy X, ačkoliv, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, je tepelné spojení pohybového šroubu a motoru velmi malé. Přímé měření teploty pohybového šroubu však vzhledem k nepřístupnosti nebylo možné. Na počátku experimentu byla teplota motoru 40,2 °C a nejvyšší dosažená teplota (na konci experimentu) byla 46 °C. Experiment se skládal ze dvou operací opakovaných 9krát po sobě. První operace cílila na zahřátí motoru a pohybového šroubu, přičemž šlo o opakované přejíždění osy X rychloposuvem tam a zpět po maximální možné dráze, aby docházelo k rovnoměrnému prohřívání pohybového šroubu (vlivem tření s pohybovou maticí). Druhá operace byla odměřovací, při níž stroj opakovaně nízkou posuvovou rychlostí najížděl na referenční pozici, načež bylo možné na stupnici úchylkoměru odečíst relativní odchylku oproti výchozímu stavu. Odměření bylo v každém cyklu provedeno šestkrát. Data získaná v průběhu tohoto experimentu jsou uvedena v příloze 1. Nejvyšší zaznamenaná odchylka byla 4 μm a opakovatelná přesnost najetí byla vždy menší nebo rovna 1 μm.

Pro větší názornost byla naměřená data vykreslena do grafu 6, z něhož je patrná odchylka polohy zvyšující se s teplotou motoru, a potažmo tedy i s teplotou pohybového šroubu. Kladná hodnota odchylky ukazuje na posuv referenční plochy směrem do osy vřetena stroje, tedy převedeno na situaci podélného vnějšího soustružení, směrem k větší hloubce řezu. Opakovatelnost najetí je v grafu vyobrazena pomocí chybových (rozptylových) úseček. Vliv chyby opakovatelného najetí je s hodnotou 1 μm zanedbatelný, ovšem u teplotní chyby tomu tak již nemusí být a záleží na cílené hloubce řezu. Čím větší bude požadované hloubka řezu, tím menší vliv bude mít chyba způsobená tepelnou dilatací.



**Graf 6 Opakovatelnost najetí a teplotní chyba stroje**





Obrázek 28 Držák úchylkoměru pro upnutí do vřetena

### 4.3 Síla opření protivřetena

Krom přímého odměřování není stroj EMCO MAXXTURN 25, ačkoliv disponuje řízeným protivřetenem, vybaven ani funkcí koníku pro opření obrobku pomocí otočného hrotu. Základním problémem, který z této skutečnosti vyplývá je, že ač lze protivřeteno upnutím pevného trnu a synchronizací s hlavním vřetenem použít jako koník, stroj nemá možnost přímo měřit sílu, jakou protivřeteno skrze trn na obrobek tlačí. PLC stroje však nabízí možnost zjistit proud protékající motorem osy Z2 (posuv protivřetena), mezi nímž a přítlačnou silou platí přímá úměra. Dodržováním jednotného motorového proudu při upínání obrobků by tedy měla i přítlačná síla být rovnoměrná.

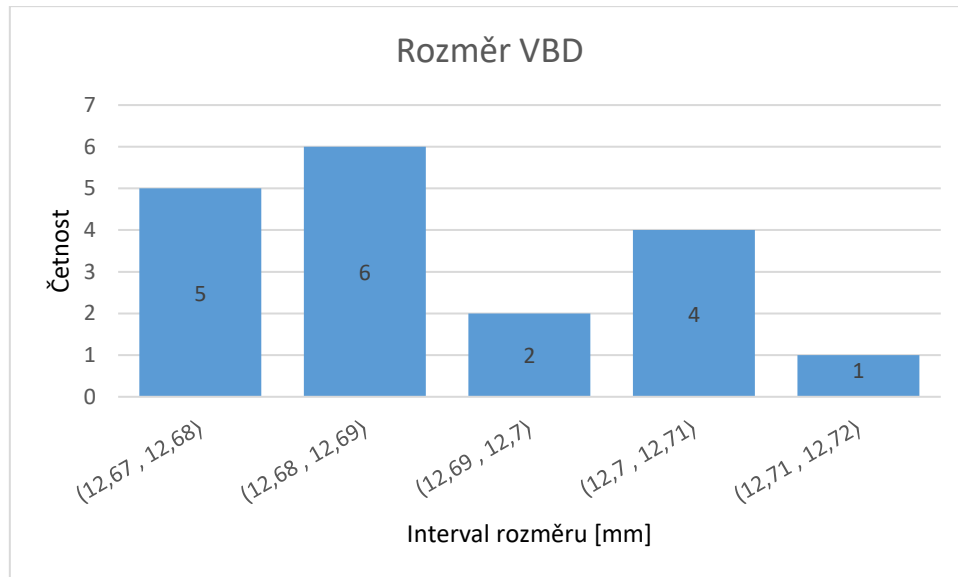
### 4.4 Skutečný rozměr a profil žárového nástřiku

Problematicke skutečnému profilu a rozměru žárového nástřiku bude věnována kapitola později, až přijde na řadu popis žárového stříkání vzorků (viz kapitola 5.3).

### 4.5 Skutečná velikost vyměnitelné břitové destičky

Krom obrobku je druhým stěžejním činitelem účastnícím se přímo procesu řezání nástroj, respektive samotná břitová destička. V případě tohoto experimentu budou, jak již bylo zmíněno, použity destičky z kubického nitridu boru. Ty se zhotovují technologií práškové metalurgie a následně jsou dobrušovány na přesné rozměry. V našem případě je na každé řezné hraně rovněž vybrušována fazetka. Všechny tyto procesy lze provádět jen s omezenou přesností, a proto není vždy jedna destička jako druhá. Přesné rozměry VBD bylo tedy nutno nejprve změřit. Měření bylo prováděno digitálním mikrometrem MITUTOYO s přesností na 1  $\mu\text{m}$ , přičemž každá strana destičky byla měřena třikrát. Měřené strany byly označeny podle čísel řezných hran, které jsou na čela destiček vypáleny laserem. Značení postupuje po směru hodinových ručiček, takže řezná hrana 1 a 3 leží proti sobě a 2 a 4 stejně tak.

Jmenovitý rozměr destičky udává výrobce jako 12,7 mm, nicméně skutečný průměrný rozměr byl menší, a sice 12,691 mm. Rozměry jednotlivých destiček se nechovaly podle žádného očividného klíče a zpravidla se velikost hran jedné VBD od sebe lišila alespoň o setinu mm. Největší zaznamenaný rozměr byl 12,716 mm a nejmenší 12,675 mm. Rozměr destiček se, jak napovídá průměrná hodnota, ve většině případů pohyboval pod jmenovitou hodnotou. Konkrétní rozpětí hodnot ukazuje následující histogram.



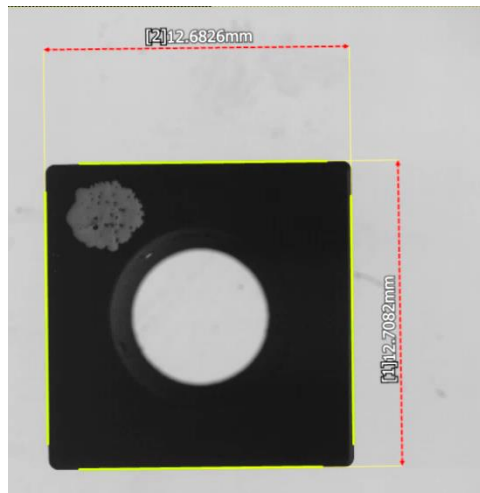
**Graf 7 Histogram rozměru VBD**

Tuto strannost lze přisoudit vybroušeným fazetkám. Ty se totiž dobrušují na zakázku a jako polotovary se nejspíš používají destičky standardního provedení, které již nesou jmenovitý rozměr. Vybroušením fazetky se následně vzdálenost hran mírně zmenší. Pro vyloučení chyby měření mikrometrem byly rozměry všech destiček ověřeny s využitím profilprojektoru KEYENCE IM7000 (viz obrázek 29), který má možnost automatického měření a detekce hran, čímž se minimalizuje chyba lidského faktoru. Hodnoty naměřené pomocí profilprojektoru se shodovaly s naměřenými mikrometrem s maximální odchylkou  $\pm 4 \mu\text{m}$  (viz vzorový příklad destičky číslo jedna na obrázku 30). Konkrétní rozměry vyměnitelných břitových destiček jsou uvedené v tabulce v příloze 2.



**Obrázek 29 Profilprojektor KEYENCE IM7000 [48]**

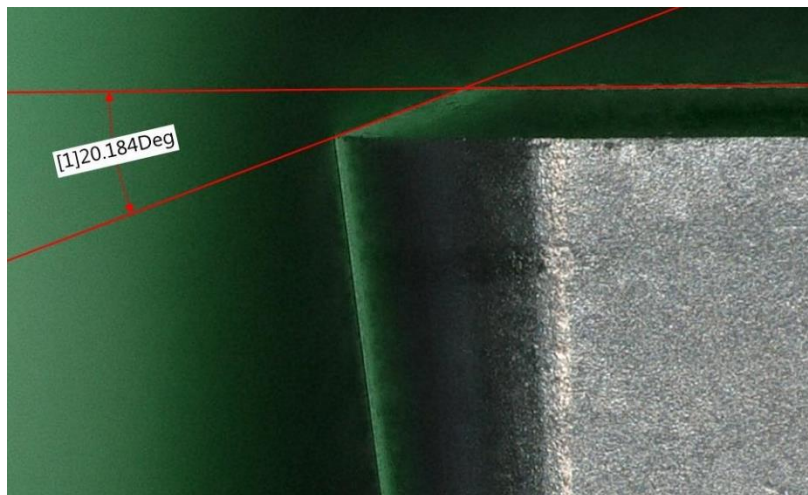




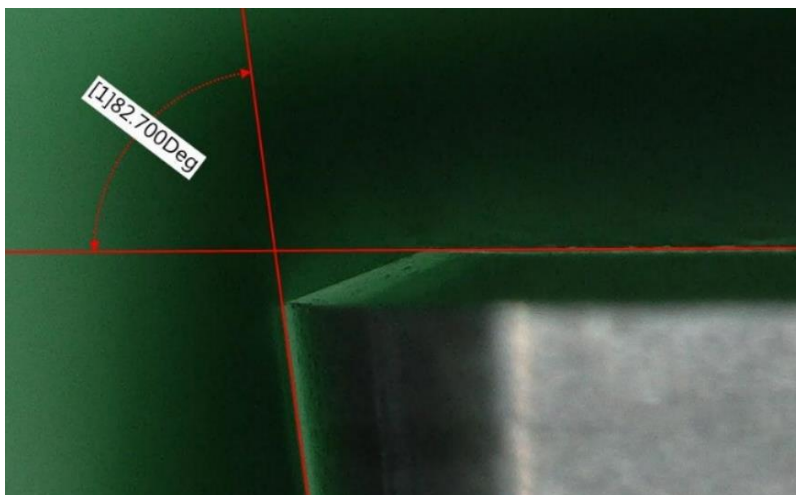
Obrázek 30 Měření VBD č. 1 pomocí profilprojektoru KEYENCE IM7000

Krom celkových rozměrů destiček byly zkontrolovány také úhly fazetky a hřbetu a také délka fazetky, a to pomocí mikroskopu KEYENCE VHX6000. Zároveň byly pořízeny detailní snímky (viz obrázek 34) všech destiček pro účely porovnání stavu před a po obrábění. Úhel fazetky ( $20^\circ$ ) a úhel hřbetu ( $7^\circ$ ) byly měřeny při pohledu od hřbetu destičky a jsou zachyceny na obrázcích 31 a 32. Rozměr fazetky (0,2 mm) byl odměřený z obrazového skenu bříty, jak ukazuje obrázek 33.

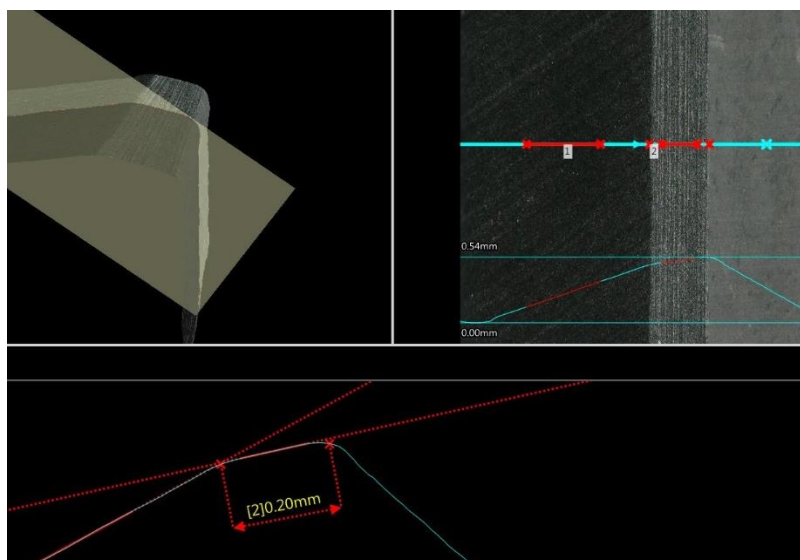
Destičky tedy odpovídají požadavkům a budou využity při hlavním experimentu.



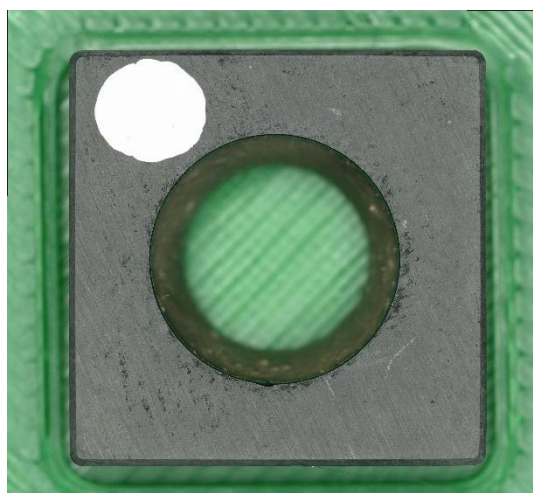
Obrázek 31 Skutečný úhel fazetky



Obrázek 32 Skutečný úhel hřbetu



Obrázek 33 Skutečná délka fazetky

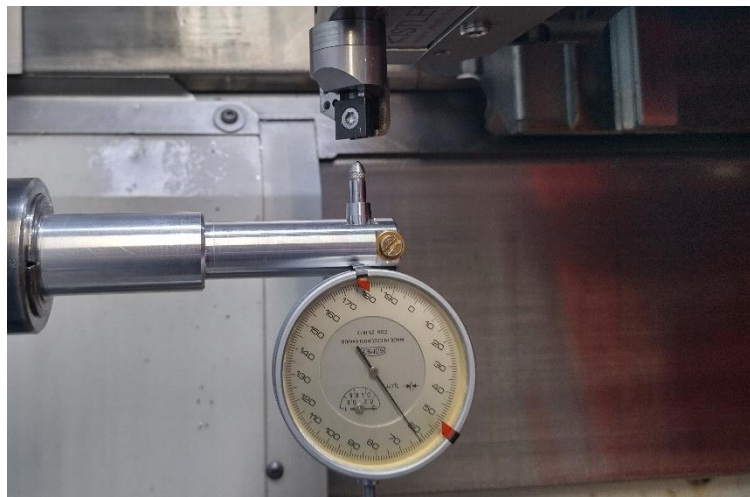


Obrázek 34 Břítová destička BONAR SCMW 120408 s fazetkou 0,2x20°

## 4.6 Přesnost opakovaného vložení VBD

Posledním vnějším činitelem, který by mohl ovlivňovat výsledky experimentu je opakované vložení vyměnitelné břitové destičky, a to hned ze dvou hledisek. Zprvé v případě, že se experiment sestává z více řezů, například hrubovacího a dokončovacího, které mají být oba provedeny stejnou řeznou hranou, je velmi vhodné z hlediska posouzení opotřebení změřit jaké bylo opotřebení po každém z řezů. To však vyžaduje destičku vyjmout z držáku, změřit pomocí mikroskopu opotřebení a znovu ji do držáku vložit s tím, že destička musí zapadnout do původní polohy, aby se nezměnila nastavená korekce nástroje, a tedy i hloubka řezu. Druhým hlediskem je potom možnost rychlé kompenzace rozdílné velikosti VBD, která byla zjištěna a popsána v předchozí kapitole.

Pre-experiment zkoumající opakované vložení VBD byl proveden s nástrojem, který byl následně využit i při hlavním experimentu. Do hlavního vřetena stroje byl opět vložen přípravek vyrobený pro měření opakovatelnosti najetí, nicméně nyní byl nastavený tak, aby dotek úchylkoměru dosedal na řeznou hranu destičky (viz obrázek 35). Destičky byla nejprve mimo kontakt s úchylkoměrem uchycena do držáku a následně byla osy X nastavena do referenční polohy a na danou hodnotu byl vynulován úchylkoměr. Postup celého experimentu byl podobný, jako při měření opakovatelnosti najetí s tím rozdílem, že po každém odjetí z měřicí pozice byla břitová destička povolena, vyjmuta a následně znovu vložena (ve stejné orientaci), načež následovalo další najetí s odměřením.



Obrázek 35 Sestava pro měření odchylny polohy bříty v ose X

Experiment byl proveden na pěti hranách VBD, přičemž každá hrana byla měřena třikrát (čili 3 vložení VBD a tři odměřovací najetí). Průměrná odchylna mezi jednotlivými upevněními (patrná v řádcích v tabulce 7) byla 4  $\mu\text{m}$ , což poukazuje na skutečnost, že v případě experimentu, kdy by bylo nutné měřit opotřebení mezi řezy by byla chyba vnesená opakovaným vložním VBD minimální. K druhému bodu zmíněnému v předchozím odstavci (možnost kompenzace rozměru VBD na základě předem naměřeného rozdílu jejich velikostí) se však rychle ukázalo, že nejen vnější rozměry použitých břitových destiček nejsou konstantní, ale i poloha upínací díry se liší, a proto si každá destička do lůžka nástroje sedne trochu jinak. Délkové odchylny (ve směru X, patrné ze sloupců v tabulce 7) totiž neodpovídali rozdílu v délkách porovnávaných hran. (např.: Vzdálenost rovnoběžných hran 1 a 3 destičky č. 1 byla referenční s hodnotou 12,708 mm. Vzdálenost hran 1 a 3 u destičky 2 byla 12,674, neboli rozdíl 34  $\mu\text{m}$  mezi těmito dvěma destička v tomto směru. Pokud by se tedy destička opřela do lůžka vždy stejně, měl by se zmíněný rozdíl promítnout do odměřované odchylny. Naměřená odchylna mezi těmito dvěma zmíněnými hranami však byla, jak je patrné z tabulky 9, 8-11  $\mu\text{m}$  – čili téměř čtvrtina očekávané hodnoty.)

**Tabulka 7** Odchylky při opakovaném vložení VBD

VBD	Hrana	Odchylka [mm]			Rozpětí [mm]
		1.	2.	3.	
1	1	referenční			
2	1	0,011	0,008	0,009	0,003
2	2	0,030	0,028	0,031	0,003
3	1	0,016	0,015	0,008	0,008
4	2	0,045	0,050	0,048	0,005
4	4	0,004	0,004	0,005	0,001
				<b>Průměr</b>	0,004

Tento výsledek poukázal na skutečnost, že používanou destičku sice lze vyjmout, změřit a znovu úspěšně vložit, nicméně při přechodu na jinou VBD musí být provedeno fyzické zaměření nového ostří. Rozdíl v jeho poloze nelze totiž korigovat na základě předem zjištěných rozměrů.

Zkoumání nedefinovatelných faktorů ukázalo, jaký může být jejich vliv a také jak s jejich vlivy pracovat. Opakovatelnost najetí stroje byla velmi dobrá a neočekává se, že by působila potíže. Naopak tepelná dilatace se prokazatelně projevila a měla by být nadále sledována. Zejména u malých hloubek řezu může totiž hrát významnou roli. Přítlak protivřetena není přímo měřitelný, nicméně skrze sledování proudu motoru Z2 (motor posuvu protivřetena) by mělo být možné udržovat ho na relativně konstantní úrovni. Měření velikosti a opakovatelnosti vložení destičky do držáku odhalili zdroj velkých nepřesností, který rozhodně nesmí být zanedbán. Každá destička musela být po vložení do držáku zaměřena přímo ve stroji, aby byla zmíněná chyba minimalizována.

## 5 Hlavní experiment

Stěžejní část práce, kterou byl hlavní experiment, navazovala na již provedenou část výzkumu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi. Předmětem tohoto uplynulého bylo prozkoumat obrobiteľnosť zmíněného materiálu při různých řezných podmínkách a navrhnout technologii soustružení tohoto nástřiku, která by nahradila časově a finančně náročné broušení. Dalším krokem v této cestě za poznáním problematiky obrábění nástřiku NiCrBSi bylo prozkoumat změnu obrobiteľnosti tohoto nástřiku, bude-li povlak vytvořen při jiných než standardně využívaných podmínkách.

Na základě rešerše a konzultace s firmou Plasmametal s.r.o. byly zvoleny 4 parametry procesu HVOF žárového stříkání, které by měly mít znatelný vliv na vlastnosti nástřiku. Pro tyto parametry byly následně určeny rozsahy jejich změny takové, aby byl při všech kombinacích proces žárového stříkání stále funkční. Všechny parametry byly upravovány o úroveň výše a níže, vzhledem k běžně využívané (nulové) hodnotě.

Nastříkané vzorky byly obroběny strategií a řeznými podmínkami vyplývající z doporučení předchozího výzkumu. Záměrem bylo změřit a vyhodnotit vliv parametrů žárového stříkání na obrobiteľnosť. Sledovanými veličinami bylo: opotřebenění břitu, velikost řezných sil, akustická emise a drsnost obroběné plochy.

### 5.1 Návrh hlavního experimentu

Aby byl experiment a jeho vyhodnocení co nejučelnější byla při prvotním návrhu celého experimentu využita metodika plánovaných experimentů (DoE, Design of Experiment) s jejíž pomocí byl utvořen plán experimentu. Díky využití DoE a následného statistického vyhodnocení bylo množství vzorků nutných k realizaci 4faktorového experimentu o 3 úrovních sníženo z 81 ( $3^4$  kombinací) na 26. Plán experimentu v kódovaném (bezrozměrném) tvaru je uveden v tabulce 8. V kódovaném tvaru odpovídá hodnota 0 standardně využívané hodnotě a hodnoty +1 a -1 horní, respektive dolní hranici rozsahu změny parametru.

Tabulka 8 Plán experimentu v kódovaném tvaru

Číslo vzorku	Vzor	Parametry			
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	----	-1	-1	-1	-1
2	----+	-1	-1	-1	1
3	---+-	-1	-1	1	-1
4	---++	-1	-1	1	1
5	--+-	-1	1	-1	-1
6	--++	-1	1	-1	1
7	-++-	-1	1	1	-1
8	-+++	-1	1	1	1
9	+---	1	-1	-1	-1
10	+---+	1	-1	-1	1
11	+--+	1	-1	1	-1
12	+--+	1	-1	1	1
13	++--	1	1	-1	-1
14	+++-	1	1	-1	1
15	+++-	1	1	1	-1
16	++++	1	1	1	1
17	a000	-1	0	0	0
18	A000	1	0	0	0
19	0a00	0	-1	0	0
20	0A00	0	1	0	0
21	00a0	0	0	-1	0
22	00A0	0	0	1	0
23	000a	0	0	0	-1
24	000A	0	0	0	1
26	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0

Zároveň byly využity i poznatky z obrábění (viz kapitola 3.6) pro zvolení jednotných řezných podmínek, za kterých se doposud proces obrábění choval stabilně a dodával uspokojivé výsledky. Řezné podmínky byly převzaty s tím rozdílem, že hloubka řezu byla zvýšena z 0,05 mm na 0,15 mm tak, aby byl snížen vliv teplotní dilatace ve směru osy X, přesnosti opakovatelného najetí a nepřesnosti zaměření řezné hrany VBD. Plánované řezné podmínky byly následující (viz tabulka 9) a na každém vzorku byl prováděn pouze jeden řez (dokončovací).

**Tabulka 9 Plánované řezné podmínky**

Řezná rychlost [m/min]	Úhel $\lambda_s$ [°]	Posuv [mm/ot]	Hloubka řezu [mm]
240	50	0,2	0,15

Aby byla eliminována variabilita přítlaku protivřetena, byl přítlak vycházející z polohy protivřetena (souřadnice Z2), vyvozován z proudu motoru osy Z2. Zároveň byla také zaznamenávána teplota motorů os X, Y a Z. Jak proud, tak teploty byly odečítány z diagnostického nástroje řídicího systému využitého stroje. Tvarová charakteristika žárového nástřiku byla při experimentu kompenzována pouze z hlediska skutečného průměru každého z vzorků.

Na základě tohoto kompletního plánu experimentu mohla započít příprava a výroba vzorků, která je popsána v následující kapitole.

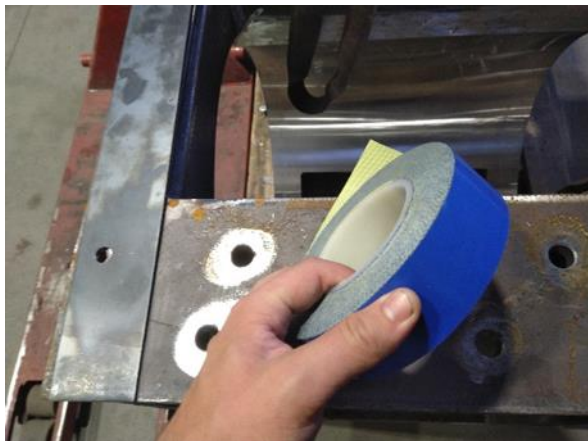
## 5.2 Proces žárového stříkání

Funkční princip žárového stříkání jako takového byl již popsán v předchozích kapitolách, nicméně zatím nebyl podrobněji popsán technologický postup při žárovém stříkání. Právě ten bude předmětem této kapitoly se zaměřením přímo na poznatky získané na stáži ve firmě Plasmametal s.r.o. (zhotovitel žárového stříkání pro účely této kvalifikační práce) v roce 2021.

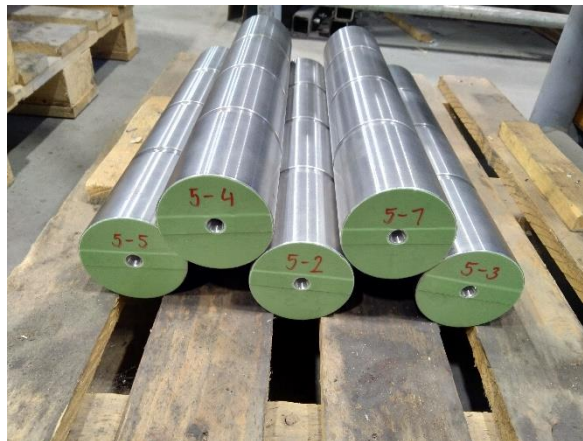
### 5.2.1 Příprava před nástřikem

Po přijetí polotovarů určených k žárovému stříkání je nejprve nutné zamaskovat plochy, které musí zůstat žárovým stříkáním a jinými technologickými procesy nezasažené. Pro tyto účely se využívá teflonová samolepící páska (na obrázku 36). Plochy jsou nejprve odmaštěné technickým benzínem a následně se na ně nalepuje tato páska. Po pokrytí všech ploch, které musí být chráněné se přebytečná páska na hranách ořízne. Důležité je oříznout pásku pod úhlem tak, aby na hraně nezbyl límec. Žárový nástřik by následně narážel na tento límec a v těchto místech by nebylo dosaženo dostatečného přilnutí nástřiku. Snazšímu oříznutí napomáhá přítomnost 45° sražení na všech těchto přechodových hranách. Obrázek 37 zobrazuje zamaskované vzorky (pro experimenty prováděné v roce 2021) připravené k otryskání. Na tomtéž obrázku je patrné zkosené oříznutí pásky po obvodu.





Obrázek 36 Teflonová maskovací páska



Obrázek 37 Vzorky připravené k otryskání

Po zamaskování je na řadě zdrsnění a očištění povrchu, které je prováděno tryskáním. Jako abrazivní médium je využívám oxid hlinitý (tzv. korund) v různých zrnitostech. Nejčastěji jde o zrnitost F36. Tryskání je prováděno v jednom z několika tryskacích boxů v závislosti na velikosti zpracovávaného polotovaru. Pro nejmenší a nerotační díly je určený ruční tryskací box ENETEX TM1500 (na obrázku 38). Rotační součásti o maximálním průměru 500 mm jsou otryskávány v boxu ENETEX TM3000/500. Ten je vybaven poháněným vřetenem, koníkem s otočným hrotem a automatickým podélným posuvem tryskače. Díky stabilním otáčkám a posuvu tryskače jsou dosahované výsledky stabilní. Pro ty největší polotovary je určený tryskací box s vnitřními rozměry 5x4x3 m. Zde je tryskání prováděno opět manuálně obsluhou, avšak tentokrát přímo uvnitř boxu. Obsluha musí být nutně vybavena ochranným oděvem a k tryskání slouží obouruční tryskací dělo.

U součástí určených k renovaci, které byly provozovány v mastném prostředí je nutné jako úplně první krok ošetřované plochy „vysušit“. Pomocí propanového hořáku jsou plochy určené k žárovému stříkání ohřívány, aby se ze všech pórů materiálu uvolnily zbytky maziva. Pokud by se tento krok neprovedl, mazivo by se uvolnilo při stříkání a zamezilo by kvalitnímu přilnutí nástřiku.



Obrázek 38 Ruční tryskací box ENETEX TM1500

Mezi další technologické procesy vykonávané před žárovým stříkáním patří předehřev základního materiálu, který má za následek snížení teplotního gradientu mezi tímto materiálem a nástřikem a tím pádem umožní lepší přilnutí. Tento krok však Plasmametal s.r.o. při svých činnostech zpravidla nezařazuje.

### 5.2.2 Žárové stříkání

Po dokončení příprav přichází neprodleně na řadu samotné žárové stříkání. Tryskáním očištěný povrch má totiž velkou tendenci korodovat, a tak je maximální dovolená prodleva mezi tryskáním a stříkáním procesně nastavena na 20 minut. S otryskanými díly je manipulováno pouze v čistých rukavicích, aby byl povrch chráněn před mastnotou. Stříkání je prováděno v boxech opatřených výkonnou ventilací pro odvod zplodin vznikajících při stříkání. V případě všech metod, vyjma nástřiku elektrickým obloukem manipuluje s aplikačním zařízením robot (patrné na obrázku 39). Nástřik elektrickým obloukem bývá občas prováděn i ručně. V případě robotické manipulace musí být před stříkáním naprogramována dráha ramena robotu. Krom délky dráhy, která zaručí pokrytí celé stříkané plochy jsou nejdůležitější rychlost posuvu ramena a již vícekrát zmíněná vzdálenost mezi ošetřovanou plochou a ústím aplikačního zařízení. Okraje stříkané plochy bývají překryté stínícími plechy, které chrání sousedící plochy před částicemi letícími mimo hlavní proud a v případě nástřiku válcových ploch chrání také hroty. Stínění zpravidla způsobí, že plochy nejsou nastříkané až k samotnému okraji (patrné na obrázku 40). Samotné stříkání pak probíhá ve více po sobě následujících přejezdech vždy striktně z jedné strany na druhou (nikoliv cik-cak). Ošetřovaný díl je v průběhu stříkání ochlazován proudem stlačeného vzduchu vyfukovaného z chladicích trysek (obrázek 41) a pravidelně je kontrolována jeho teplota. Přesáhne-li teplota dílu 180 °C, je stříkání přerušeno do doby, než materiál zchladne obvykle alespoň pod 80 °C. Průběžně je zároveň kontrolována tloušťka povlaku.

Po dokončení stříkání a zchladnutí dílu je hotový kus zabalený do strečové fólie a připraven k expedici.



Obrázek 39 Stříkání elektrickým obloukem a manipulační robot



Obrázek 40 Nenastríkaný okraj válcové plochy vzniklý stíněním





Obrázek 41 Trysky vzduchového chlazení

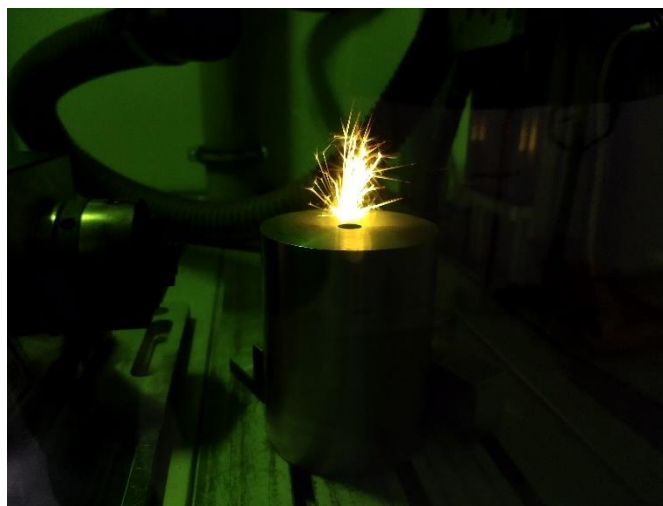
### 5.2.3 Proces žárového stříkání vzorků pro DP

Vzorky určené pro účely této kvalifikační práce byly zpracovány v Plasmametalu mezi 28. únorem a 2. březnem 2023. Výchozí průměr vzorků byl 78 mm a všechny vzorky byly opatřené nástřikem slitinou NiCrBSi v tloušťce 0,5 mm. Výkres vzorku je k nahlédnutí v příloze 3. Vzorky byly před expedováním k žárovému stříkání označeny laserem (viz obrázky 42 a 43), aby byla zaručena návaznost dat zaznamenaných ve všech fázích zpracování.

Při žárovém stříkání byly průběžně upravovány parametry: průtok paliva, průtok kyslíku, vzdálenost stříkání a množství přiváděného prášku a všechny tyto parametry byly variované v předem dohodnutých úrovních. Skutečné hodnoty však z důvodu ochrany know-how firmy Plasmametal s.r.o. nejsou uváděny. Ostatní proměnné byly zaznamenány a zachovány konstantní po celou dobu žárového stříkání.



Obrázek 42 Označené vzorky



Obrázek 43 Laserové značení vzorku

Postup zpracování vzorků byl shodný s postupem popsáním v kapitolách 5.2.1 a 5.2.2. Vzorky byly nejprve na čelech zamaskované ochranou páskou, aby nedošlo k zasažení čel při tryskání. Obvod válcových vzorků byl následně otryskán za účelem jeho zdrsnění a očištění a následně putovaly vzorky do stříkací komory. Otryskaný vzorek je zachycen na obrázku 44. Při stříkání byly vzorky upnuté mezi hroty a při tvorbě povlaku roztočené na 220 otáček za minutu. Válcová plocha těsně přilehlá k čelu byla kryta plechovým stíněním, aby byla před nástřikem chráněna samotná hrana vzorků a také unášecí hroty (viz obrázek 45) a celý díl byl neustále chlazen proudem stlačeného vzduchu.



Obrázek 44 Otryskaný vzorek připravený pro nástřik



Obrázek 45 Stínící plechy s nánosem žárového nástřiku

Při zpracování vzorků byly kromě proměnných parametrů zaznamenány také ty, které jsou konstantní, a to za účelem srovnání s hodnotami získanými při stáži v roce 2021. Nejvíce se lišila tlak vzduchu využívaného při tryskání. Ten stoupl ze 7,5 na 8,2 barů, což v kombinaci s „čerstvějším“ abrazivem mělo za následek vyšší drsnost, zejména prvních zpracovaných vzorků po otryskání (Ra 6,43 vs Ra 4). Čerstvá zásoba korundu se však rychle otupovala, a proto v průběhu prací dosahované drsnost klesala. Nikdy však neklesla pod úroveň z roku 2021, a jelikož na tehdejších vzorcích nebyl zaznamenán s adhezí nástřiku k základnímu materiálu žádný problém, neočekávají se potíže ani tentokrát.

Žárové stříkání bylo prováděno hořákem JP-5000 (obrázek 46) řízeným jednotkou HV-50 společně s podavačem PF-50 (obrázek 47), vše od firmy Flame Spray

Technologies BV, Duiven, Nizozemí. Dělo využívá 4palcový barel a při stříkání s ním manipuluje robot od firmy ABB.



Obrázek 46 HVOF hořák JP-5000



Obrázek 47 Řídicí jednotka HV-50 spolu s podavačem PF-50

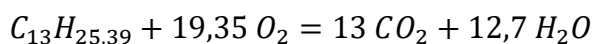
Značná pozornost byla při změnách parametrů věnována vizuálním charakteristikám plamene. Ve shodě s článkem [14], vykazoval plamen při použití palivové směsi bohaté na kerosin zbarvení více do žluta, zatímco směs bohatší na kyslík zabarvila plamen do bíla, respektive do modra. Na fotografiích se však naneštěstí kvůli vysokému jasů nepodařilo odlišnou barvu plamene zachytit.

Pozoruhodný byl menší přírůstek nástřiku při použití vyššího množství prášku. Při podávání většího množství (+1) prášku za minutu stoupl počet přejezdů potřebných pro vytvoření povlaku v požadované tloušťce (0,5 mm) z obvyklých 14-ti až na 18. Větší množství přídavného materiálu mělo nejspíš za následek horší trajektorii částic a jejich větší rozptyl.

#### 5.2.4 Stechiometrie spalování směsi kerosinu a kyslíku [49]

Jak bylo již dříve zmíněno, posuzuje se charakter plamene vznikajícího při spalování zpravidla z hlediska stechiometrického poměru. Ten vychází z chemické reakce hoření

kerosinu. Kerosin však nelze označit za jeden uhlovodík, leč pouze za směs vícero z nich, a tedy je nutno jeho chemický vzorec aproximovat a u výsledku pak uvažovat s možnou odchylkou. Pro orientaci by však měl být takto získaný výsledek dostačující. Obecně se kerosin označuje jako  $C_xH_{1,953 \cdot x}$  kde  $X$  nabývá hodnoty mezi 10 a 15. Uvažujeme-li pro  $X$  prostřední hodnotu intervalu, tedy 13, dostaneme vzorec  $C_{13}H_{25,39}$ . Rovnice spalování tohoto uhlovodíku pak vypadá následovně.



Z této rovnice tedy vyplývá, že k shoření 1 molu kerosinu je zapotřebí 19,35 molu kyslíku. V přepočtu na hmotnost je to:

$$1 \cdot (13 \cdot 12 + 25,39 \cdot 1) = 181,4 g_{kerosinu}$$

$$19,35 \cdot 32 = 619,2 g_{kyslíku}$$

(Molární hmotnost uhlíku je 12 g/mol, vodíku 1 g/mol a kyslíku 32 g/mol.)

Přepočteno na objem obou látek (uvažujeme hustotu kerosinu 820 kg/m<sup>3</sup> a kyslíku 1,35 kg/m<sup>3</sup>):

$$\frac{181,4}{820 \cdot 1000} = 2,212195 \cdot 10^{-4} m^3 kerosinu$$

$$\frac{619,2}{1,35 \cdot 1000} = 0,45867 m^3 kyslíku$$

Na 1 m<sup>3</sup> kerosinu pak připadá:

$$\frac{1}{2,212195 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,45867 \doteq 2073 m^3 kyslíku$$

Stechiometrický poměr tedy činí 2073 litrů kyslíku na 1 litr kerosinu.

Skutečný plamen byl pak vždy bohatší na kyslík, jak ukazuje následující vzorový výpočet pro parametry nástřiku vzorku 4:

$$Průtok paliva = 22,5 \frac{l}{hod} \rightarrow \frac{22,5}{60} = 0,375 \frac{l}{min}$$

$$Průtok kyslíku = 840 \frac{l}{min}$$

$$Poměr: \frac{1}{0,375} \cdot 840 = 2240 : 1$$

Poměr 2240:1 ukazuje, že ve směsi je více kyslíku, než je potřeba k úplnému spálení dodávaného paliva. Následující tabulka ukazuje poměr složení směsi pro všechny použité kombinace množství paliva a kyslíku. Zároveň obsahuje také vypočtený ekvivalentní poměr složek, který vyjadřuje vztah skutečného složení směsi k tomu stechiometrickému. Vypočte se jako:

$$\frac{\frac{v_{kyslíku_{stech}}}{v_{paliva_{stech}}}}{\frac{v_{kyslíku_{skut}}}{v_{paliva_{skut}}}} \rightarrow \frac{\frac{2073}{1}}{\frac{2240}{1}} = 0,925 [-]$$



**Tabulka 10 Složení palivové směsi**

Palivo	Kyslík	Poměr [-]	Ekvivalentní poměr [-]
-1	-1	2585:1	0,802
-1	0	2769:1	0,749
-1	+1	2954:1	0,702
0	-1	2400:1	0,864
0	0	2571:1	0,806
0	+1	2743:1	0,756
+1	-1	2240:1	0,925
+1	0	2400:1	0,864
+1	+1	2560:1	0,810

Z tabulky 10 je patrné, že palivová směs nebyla nikdy nad-stechiometrická (ekvivalentní poměr nebyl větší než 1), neboli bohatá na palivo. Došlo k tomu proto, že aby mohla být data a poznatky tohoto experimentu navázané na ty získané již v předchozích letech, musela být prostřední úroveň všech faktorů (úroveň 0) zachována stejná, a tedy i poměr pro hodnoty 0 byl zachován stejný. Aby pak byla dodržena ortogonalita plánu experimentu, musely být hodnoty +1 a -1 od nulové hodnoty stejně vzdálené, a přitom musel být při všech kombinacích podmínek proces žárového stříkání stále funkční. Výsledkem bylo, že nebylo možné nastavit tak široké rozpětí podmínek, aby dosáhly až do nad-stechiometrické oblasti. Každopádně by tento fakt ale neměl bránit tomu, aby se projevil změny ve struktuře nástřiku (jaké byly popsány v kapitole 3.3.1.), jelikož by se celý proces měl chovat spojitě.

Tímto byly popsány úkony a náležitosti spojené s přípravou a samotným žárovým stříkáním vzorků a dále budou již vyhodnocovány charakteristiky, které z žárového stříkání při upravovaných parametrech vyplývají.

### 5.3 Tvarová charakteristika žárově stříkaného povlaku

Prvním krokem po přijetí nastříkaných vzorků zpět na FST ZČU bylo měření. Předmětem měření byly zejména průměr, válcovitost, drsnost a házení nastříkaných ploch, přičemž válcovitost a průměr byly změřeny i před expedicí vzorků pro nástřik, aby bylo možné se při vyhodnocování zaměřit na charakteristiky samotného povlaku a vyloučit vliv základního materiálu. Válcovitost byla měřena na kruhoměru TAYLOR HOBSON TALYROND 585LT (na obrázku 48) a byla vyhodnocována v několika řezech. Z více řezů vycházel také naměřený průměr vzorků, který byl zkoumaný pomocí tří-souřadnicového měřicího přístroje ZEISS PRISMO 7 respektive ZEISS ECLIPSE. Drsnost byla měřena na drsnoměru HOMMEL ETAMIC T-8000 (na obrázku 49).



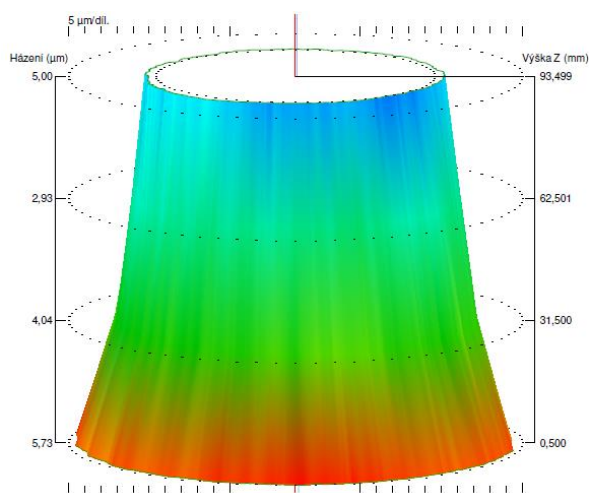
Obrázek 48 Kruhoměr TAYLOR HOBSON  
TALYROND 585LT



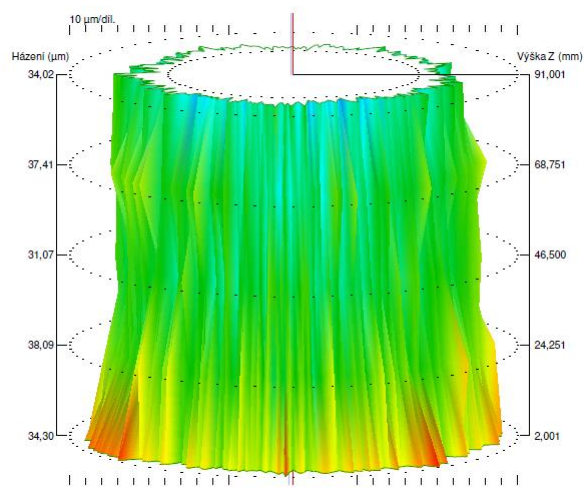
Obrázek 49 Drsnoměr HOMMEL ETAMIC  
T-8000

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, rotační plochy se stříkají při konstantních otáčkách, což by mělo zajistit rovnoměrné utváření povlaku a tím pádem i jeho konstantní tloušťku. Předchozí experimenty prováděné na fakultě strojní ZČU však ukázaly, že profil nastříkaných válcových vzorků válcový není – tedy ani tloušťka nástřiku není rovnoměrná. Za účelem analýzy profilu žárového nástřiku byly tedy všechny vzorky změřeny před a po žárovém stříkání. Před nástřikem vykazoval povrch vzorků mírně kuželovitý charakter (viz obrázek 50), který by se v ideálním případě měl promítnout přes nástřik. Válcovitost vzorků po obrobení byla v průměru  $28,7 \mu\text{m}$  a střední hodnota průměru byla  $77,977 \text{ mm}$ . Vzorky tedy byly o trochu menší, než jaký byl předepsaný jmenovitý rozměr, nicméně byly vyrobené ve zvolené toleranci. Radiální házení vzorků mezi hroty musela být před stříkáním korigována, a nakonec se u všech vzorků pohybovala v rozmezí 2–3 setiny mm.

Po žárovém stříkání stoupla, vzhledem ke stochastické povaze tvoření povlaku, válcovitost na průměrnou hodnotu  $60,67 \mu\text{m}$ . Charakter povrchu základního materiálu čili mírná kuželovitost, byl i přes žárový nástřik stále mírně patrný, jak ilustrují obrázky 50 a 51 zobrazující stejný vzorek před a po nástřiku. Z obrázku 51 je rovněž patrné, jak se do měření válcovitosti, potažmo kruhovitosti promítl hrubý povrch nástřiku. Drsnost povlaku byla změřena s průměrnou hodnotou  $R_a 9,44$  a  $R_z 60,91 \mu\text{m}$ . Na základě průměru, jehož střední hodnota po nástřiku byla  $79,025 \text{ mm}$ , a znalosti průměru před nástřikem bylo možné pro každý vzorek určit skutečnou tloušťku nastříkaného povlaku. Ta byla předepsána  $0,5 \text{ mm}$  s tolerancí  $\pm 0,1 \text{ mm}$ . Skutečná tloušťka byla v průměru  $0,524$  a tolerance byla překročena pouze u vzorku 22, kdy byla skutečná tloušťka nástřiku o  $0,105 \text{ mm}$  větší. Překročení nastavené tolerance o  $5 \mu\text{m}$  může být ovšem způsobeno i nejistotou samotného měření, a proto lze konstatovat, že všechny vzorky vyhovely požadované toleranci.



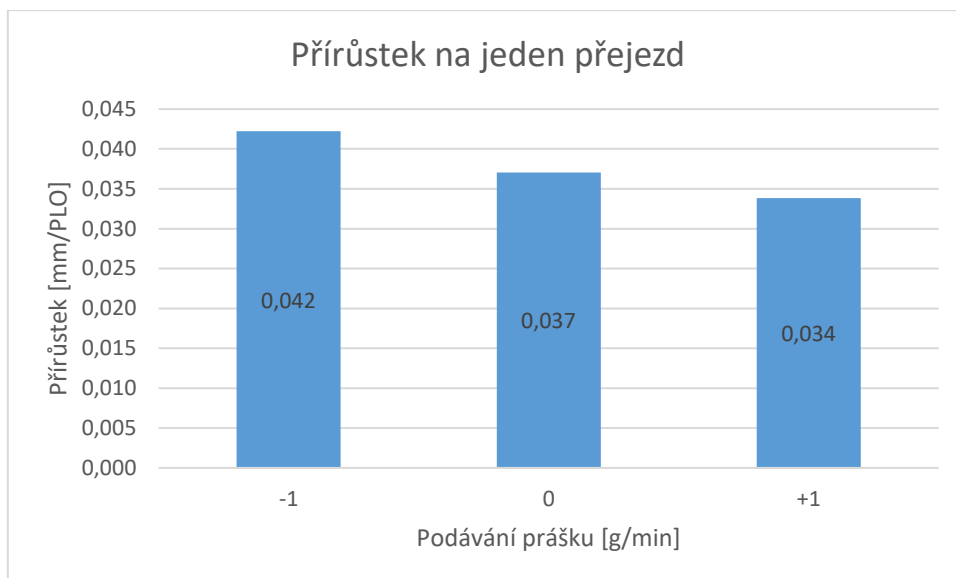
Obrázek 50 Vzorek 1 před nástřikem



Obrázek 51 Vzorek 1 po nástřiku

Skutečnou tloušťku nástřiku bylo možné spojit se zaznamenaným počtem přejezdů nástřikového zařízení, díky čemuž bylo možné odvodit přírůstek nástřiku připadající na jeden přejezd. Tabulka v příloze 3 zahrnuje průměr vzorku po nástřiku, skutečnou tloušťku nástřiku, počet přejezdů a přírůstek nástřiku pro každý vzorek.

Po rozřídění vzorků do skupin podle dodávaného množství prášku (se zanedbáním hodnoty všech ostatních parametrů) se ukázalo, že s větším dodávaným množstvím přírůstek nástřiku klesl (viz graf 8). Zatímco při nejmenším množství prášku byl průměrný přírůstek připadající na jeden přejezd 0,042 mm/PLO, u úrovně +1 to bylo už jen 0,034 mm/PLO. Tento trend odporuje očekávanému vlivu tohoto parametru a ukazuje, že systém žárového stříkání je silně spřažený a některé parametry (zejména ty týkající se podávání prášku) se navzájem velmi ovlivňují. Jako příčina této reakce procesu žárového stříkání se nabízí, že množství nosného plynu nebylo pro hodnoty +1 a -1 správně nastavené, a prášek ulpíval na stěnách barelu (jak bylo zmíněno v kapitole 3.3.3), nicméně při vizuální kontrole barelu nebyl žádný nalepený prášek k nalezení. Jako další příčina se u většího množství nabízelo, že větší množství materiálu se nestačilo dostatečně natavit, a tak se při dopadu mohli méně plastizované částice odrážet. Poslední alternativní příčinou by mohlo být, že větší množství prášku způsobí turbulentnější pohyb částic a tím i jejich větší rozprach a nižší účinnost utváření povlaku. Všechny tyto příčiny jsou však pouze domnělé a vyžádali by si detailnější prozkoumání.



Graf 8 Vývoj přírůstku povlaku se změnou množství prášku

Po dokončení žárového stříkání a druhé sady měření všech vzorků mohla započít příprava a realizace hlavních testů zaměřených na vliv parametrů žárového stříkání na obrobitelnost nástřiku.

## 5.4 Samotné testy obrobitelnosti

Hlavní experiment proběhl v laboratoři experimentálních metod obrábění. Pro účely obrábění byl, stejně jako při předchozím výzkumu této problematiky, použit stroj EMCO MAXXTURN 25 (na obrázku 52). Na předchozí výzkum bylo navázáno i použitým řezným nástrojem (držákem vyměnitelné břitové destičky).



Obrázek 52 CNC obráběcí centrum EMCO MAXXTURN 25 a měřící aparatura

### 5.4.1 Použitý řezný nástroj

Pro účely hlavního experimentu byl využit držák břitové destičky (viz obrázek 53) s nastavitelným úhlem sklonu hlavního ostří, který byl navržen pro předešlé experimenty s variovaním řezných podmínek. Úhel  $\lambda_s$ , byl po celou dobu experimentu nastavený na hodnotu  $50^\circ$ , která se stejně jako použitá břitová destička BONAR SCMW 120404 ( $0,2 \times 20^\circ$ ) v předešlých experimentech ukázala jako nejvhodnější. Upínací část nožového držáku je kvadrát  $12 \times 12$  mm, aby bylo držák možné pohodlně upnout do dostupného dynamometru. Z



prostorové hlediska nebylo možné umístit senzor akustické emise přímo na nástroj, a proto byl tento senzor v průběhu experimentu uchycen magnetickou příložkou k dynamometru.

Držák břitové destičky byl upevněný do tříložkového dynamometru KISTLER TYPE 9119AA2, který byl v revolveru stroje upnutý pomocí rozhraní VDI 16. Výstup z dynamometru byl následně přiveden do osmi-kanálového nábojového zesilovače KISTLER TYPE 5080A a následně do analogově digitálního převodníku KISTLER TYPE 5697A1. Konec datového řetězce byl v notebooku, na němž přicházející data zaznamenával software KISTLER DYNOWARE. Vzorkovací frekvence měření byla 10 kHz. Pro úplnost je obecný princip měření řezných sil popsán v následující kapitole.



Obrázek 53 Držák VBD s hlavičkou s ploškou pro senzor AE

#### 5.4.2 Měření řezných sil

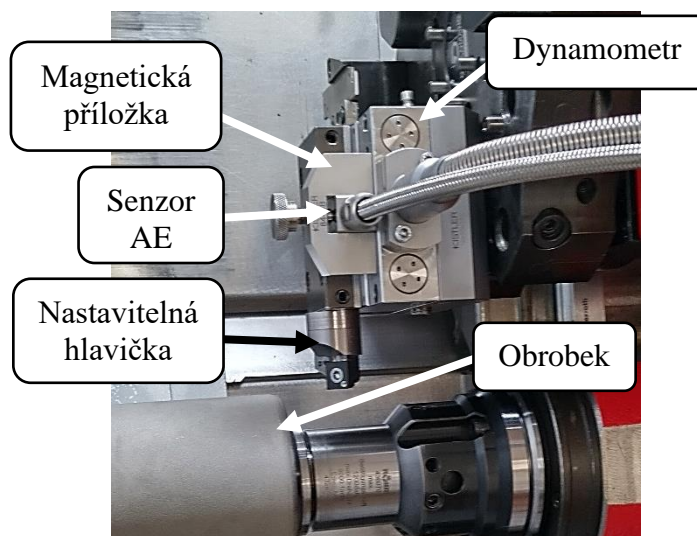
Síly působící v průběhu řezání lze měřit vícero způsobu. Základní rozdělení je na nepřímé a přímé měření. Nepřímé měření spočívá v měření dodávaného příkonu (wattmetrem) a následně zpětném přepočtu na působící sílu. Pro přímé se využívají dynamometry a zde je již zaznamenávána samotná působící síla. Z hlediska působiště sil může být dynamometr osazený jak na straně nástroje, tak na straně obrobku, přičemž obě varianty by měly přinášet stejné výsledky, avšak například při soustružení je umístění dynamometru na straně obrobku těžko realizovatelné. V hlediska principu měření existuje široká škála možností (mechanická, hydraulická, pneumatická a elektrická čidla) z nichž nejčastěji se využívají elektrická, respektive přesněji piezoelektrická čidla. Princip použití piezoelektrického čidla spočívá v přenosu působící síly na piezoelektrický krystal (vybroušený krystal křemene), jehož deformací vzniká na povrchu krystalu elektrický náboj proporcionální k působící síle. Měřením velikosti vznikajícího náboje lze určit velikost působící síly. Pokud se pak krystaly umístí v ortogonálních směrech, je možné měřit všechny tři složky řezné síly (vzniká tříložkový piezoelektrický dynamometr), případně je s využitím dalších krystalů možné měřit i působení krouticích momentů. V praxi bývá výstup dynamometru připojen do nábojového zesilovače, kde je zesílen a převeden na napětí, načež putuje toto napětí do analogově digitálního převodníku (ADC), který jej s určitým rozlišením převede na digitální hodnotu. Až ta je zaznamenávána softwarem a na základě nastaveného zisku zesilovače přepočítávána zpět na působící sílu. [50]

### 5.4.3 Měření akustické emise

Piezeoelektrického jevu se využívá také při měření akustické emise. To spočívá ve sledování energetické vlny putující materiálem. Původ takové vlny může být různý, od pohybu dislokací a vzniku trhlin, přes vibrace nástroje a tření mezi nástrojem a obrobkem, po utváření třísky a vznik a uvolnění nárůstku. Při všech těchto procesech se uvolňuje mechanická energie, která ve formě vlny prochází materiálem. Když přijde tato vlna do kontaktu se senzorem akustické emise, je skrze deformaci piezeoelektrického členu převedena na elektrický náboj. Ten následně opět putuje do zesilovače a převodníku a končí jako záznam dat v počítači.

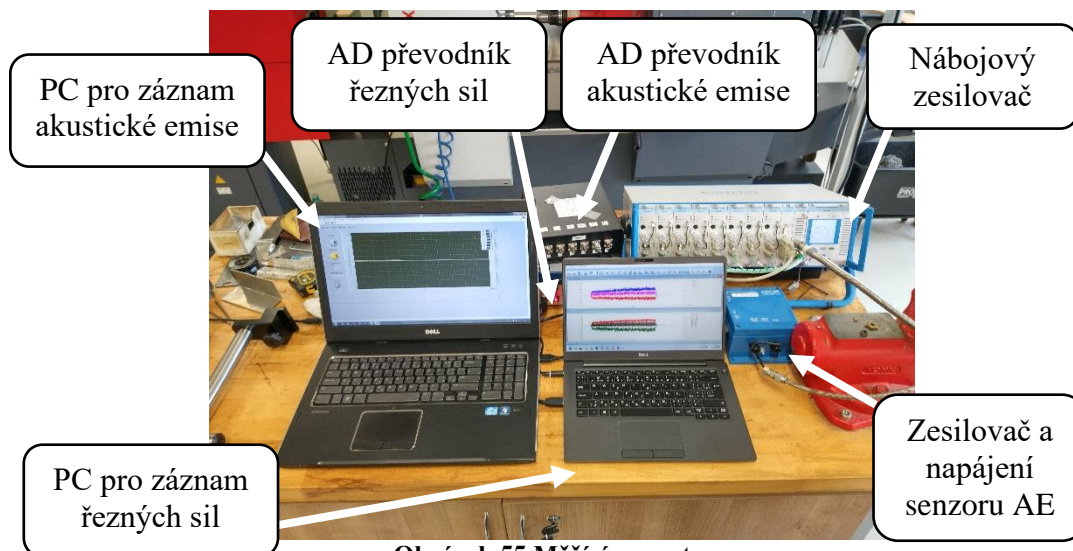
Pro měření akustické emise byl při hlavním experimentu využit senzor KISTLER TYPE 8152C se zesilovačem KISTLER TYPE 5125C. Pro záznam dat byl využit software LABVIEW od společnosti NATIONAL INSTRUMENTS.

Fotografie celé snímací soustavy na straně nástroje (obrázek 54) ukazuje, jak byl v průběhu měření ukotven senzor akustické emise. Jak bylo naznačeno výše, průměr obrobku v kombinaci s delší nastavitelnou hlavičkou držáku VBD uzpůsobenou k upevnění senzoru AE způsobily, že nebylo možné nastavit vhodnou korekci v ose Y (posunutí oblasti řezání podél ostří), jelikož stroj hlásil vybavení koncového spínače v ose X. Nakonec tedy musela být využita hlavička držáku VBD bez plošky pro senzor AE, která byla ve směru osy X o 3,5 mm kratší, a tento senzor musel být přichycen až k dynamometru. Po této úpravě již bylo možné nastavit požadovanou polohy v ose Y, bez současného dosažení limitu v ose X.



Obrázek 54 Snímací soustava na straně nástroje

Snímače na straně nástroje (viz obrázek 54) byly pomocí opletených kabelů vyvedených z pracovního prostoru stroje následně připojené k potřebné měřicí aparatuře (viz obrázek 55).



Obrázek 55 Měřicí aparatura

Po dokončení všech přípravných činností, které zabrali jeden celý den, mohlo konečně začít samotné testování. Prvním krokem bylo zaměřit nástroj a první hranu břitové destičky a provést zkušební řez ke zjištění hodnoty odtlačení nástroje a posouzení stability řezu při dané  $a_p$ . Zkušební řez byl proveden na vzorku č. 28, který nebyl dále zařazen do vyhodnocení. Po zaměření první VBD pomocí optického přípravku byla na základě změřeného průměru vzorku nastavena hloubka řezu na hodnotu 0,15 mm. První VBD byla zaměřena s úhlem  $\lambda_s = 0^\circ$ , aby byl obraz v optickém zaměřovacím přípravku co nejpřesnější. Po zaměření byl nastaven úhel  $50^\circ$ , který již zůstal po zbytek experimentu neměnný. Aby bylo možné skloněnou řeznou hranu zaměřovat pomocí optického přípravku, byla zvolena pevná odměřovací poloha ve směru osy Z taková, že část ostří, která protínala ohniskovou rovinu zaměřovacího zařízení se vždy v okuláru nacházela na stejném místě. Průsečík této zaostřené oblasti ostří byl pak při každé změně řezné hrany (čili u každého vzorku) korigován tak, aby těsně přiléhal k nitkovému kříži okuláru.

Po provedení prvního zkušebního řezu byla ze skutečného obrobeného průměru odvozena hodnota odtlačení nástroje 0,15 mm, která byla opět zachována po zbytek všech experimentů. S touto korekcí odtlačení byl proveden druhý zkušební řez s hloubkou řezu 0,15 mm při němž se ukázalo, že soustava SNOP má působením vysokých řezných sil tendenci vibrovat. Rozhodlo se tedy pro všechny zkoumané řezy využít nižší hloubku řezu 0,1 mm, a i tato hloubka zůstala po zbytek hlavního experimentu neměnná. Všechny zkoumané vzorky byly tedy obrobené s následujícími řeznými podmínkami (viz tabulka 11).

Tabulka 11 Skutečné použité řezné podmínky

Řezná rychlost [m/min]	Úhel $\lambda_s$ [°]	Posuv [mm/ot]	Hloubka řezu [mm]
240	50	0,2	0,1

Posloupnost činností při experimentu byla následující:

1. Otočit/vyměnit VBD a ustavit novou řeznou hranu.
2. Pomocí optického přípravku zaměřit a zakorigovat novou řeznou hranu postupem zmíněným výše.
3. Změřit výchozí průměr obráběného vzorku a do programu zaneš nový cílový průměr. (cílový průměr = výchozí průměr –  $2 \cdot a_p$ )
4. Upnout obráběný vzorek – nastavit přítlak protivřetena na základě hodnoty proudu osy Z2 odečítané z PLC stroje. Cílová hodnota proudu motoru protivřetena byla 2 – 2,5 A.
5. Zaznamenat teplotu motorů os X, Y a Z.
6. Spustit program a najet nástrojem před začátek řezu.
7. Spustit záznam řezných sil a akustické emise
8. Pustit nástroj do řezu.
9. Po dokončení řezu zastavit záznam.
10. Sebrat vzorek třísek a uložit do označeného pytlíku.
11. Vyjmout vzorek a změřit konečný průměr.

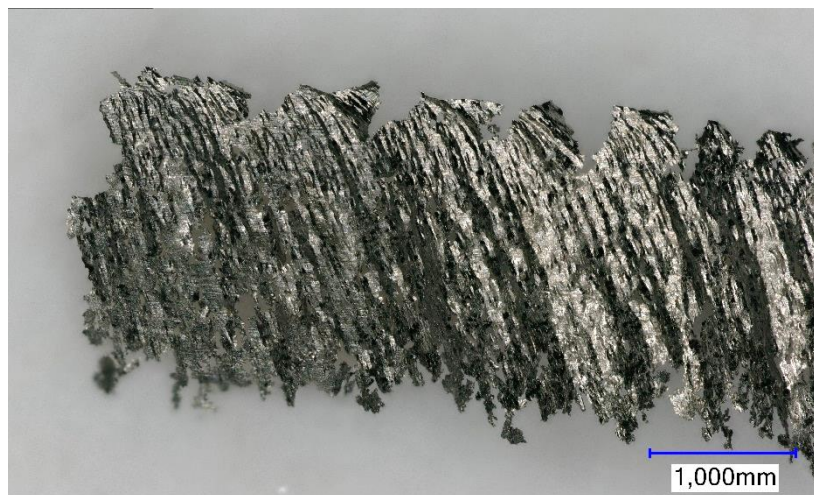
Takto byly provedeny testy na všech 26ti zkoumaných vzorcích, načež následovala další série měření, která opět zahrnovala charakteristiky obrobených ploch (drsnot, válcovitost, průměr) a také opotřebení použitých VBD.

## 6 Výsledky

Experiment proběhl a během dvou dnů se podařilo úspěšně obrobit všech 26 připravených vzorků. Tato kapitola bude zaměřena na popis získaných dat a poznatků, které budou následně souhrnně vyhodnocovány.

### 6.1 Vznikající tříška

Samotný řezný proces probíhal zpravidla stabilně s výjimkou několika vzorků, kde se soustava SNOP v části řezu rozechvěla a na obrobeném povrchu tak vznikla pro chvění typická textura. Klidná část řezu pak nezněla tak hladce, jak by tomu bylo například při obrábění oceli, což ale bylo nejspíš způsobeno heterogenním charakterem žárového nástřiku. Navzdory tomuto jevu byla ale vznikající tříška (viz obrázek 56) soudržná. Charakterizovala ji velmi malá tloušťka a velice nízká měrná hmotnost. Navíc při sebemenším stlačení ztratila tříška soudržnost a rozpadla se. Na první pohled nebyl v charakteru vznikající třísky napříč vzorky patrný žádný rozdíl. Při prozkoumání třísky pod mikroskopem je na jedné straně (obrázek 57 nahore) patrný pravidelný vzor „pilového zubu“ a v celé délce třísky je vidět článkovitý charakter. Článkovitost je nejspíše projevem heterogenní struktury materiálu, zatímco jednostranný pilovitý profil (který při svém výzkumu obrábění lineární řeznou hranou pozorovali také například Filipov a kol. [51] a Monka a kol. [52]) bude nejspíše důsledkem neustálého mírného chvění taktéž vycházejícího ze struktury materiálu a také z větší tendence lineární řezné hrany sklouznout k vibracím. Hrubý povrch žárového nástřiku je patrný i na odříznuté třísce, ve které se, zejména ve spodní polovině (opět obrázek 57), vyskytuje velké množství děr. Při pohledu na zmíněný obrázek se tedy tříška při posunu zesponu nahoru stává více souvislou, což naznačuje, že řez v povrchové oblasti (spodní část třísky) byl ovlivněn její strukturou a byl nerovnoměrný.



Obrázek 56 Vzniklá tříška pod mikroskopem (200x)

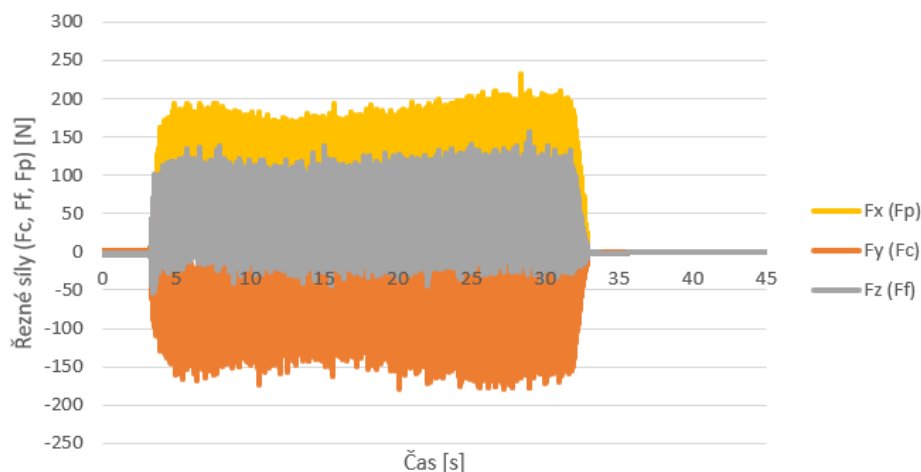




Obrázek 57 Tříška vzniklá při soustružení žárového nástřiku

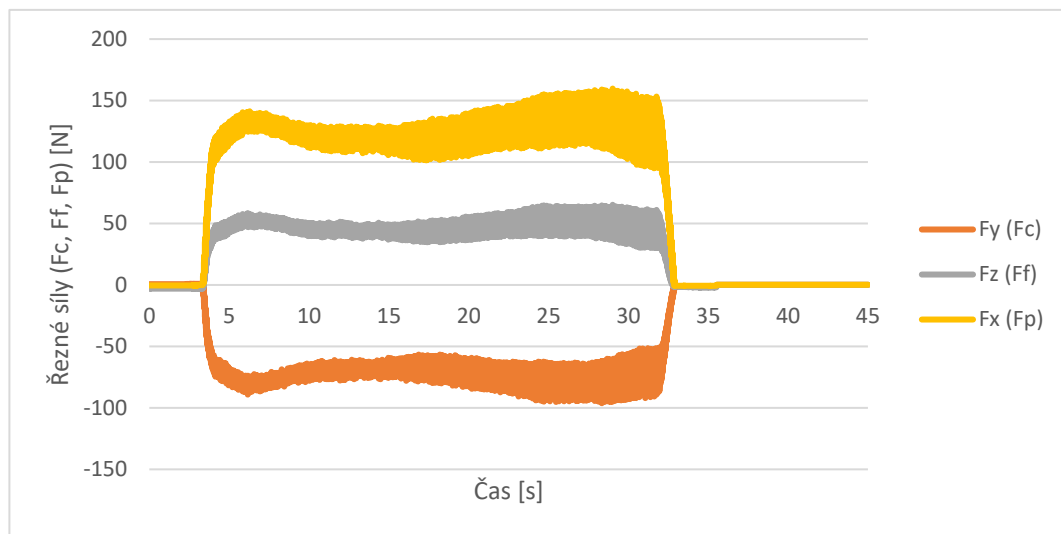
## 6.2 Řezné síly

Ačkoliv po sluchové stránce se proces choval stabilně i řezné síly ukazují na vibrace při obrábění. Jejich průběh byl totiž, stejně jako u všech předešlých experimentů s obráběním žárových nástřiků, velice rozechvělý. Tuto skutečnost lze přisoudit dvěma činitelům. Prvním z nich je zmíněná heterogenita nástřiku, který má z povahy procesu žárového stříkání lamelární strukturu tvořenou jednotlivými deformovanými částicemi – splaty. Řez tudíž neprobíhá stabilně, ale smyková rovina může skokově uhýbat podél hranic mezi splaty, kde se zároveň bude i rychleji šířit. Druhý činitel nesouvisí tolik s žárovým nástřikem, jako s použitou strategií obrábění a sice s využitím lineární řezné hrany. Všechny dříve provedené experimenty ukazují, že dominantní složkou řezné síly z hlediska velikosti je pasivní (příusuvová) síla. To znamená, že celá soustava SNOP je při řezání pod velkým tlakem a je elasticky deformována. V kombinaci s malou hloubkou řezu, která se ovšem rozkládá na velké délce ostří (což stabilizaci nástroje v řezu nijak nepomáhá) může být soustava SNOP náchylná i k vlastním vibracím. Pro názornost, korekce odtlačení (v ose X), stanovená na základě testovacích řezů na vzorku 28, byla po celou dobu nastavena na hodnotu 0,15 mm na průměr. To znamená, že se nástroj působením pasivní síly vychýlil o 0,075 mm. Z hlediska velikostního srovnání řezných sil byla, jak bylo zmíněno, největší síla  $F_p$ , za ní následovala hlavní složka  $F_c$  a nejmenší byla posuvová síla  $F_f$ . Graf 9 zobrazuje průběh velikosti řezných sil při obrábění vzorku 26 a jak je z obálky jednotlivých křivek patrné, působící síly byly silně rozechvělé.



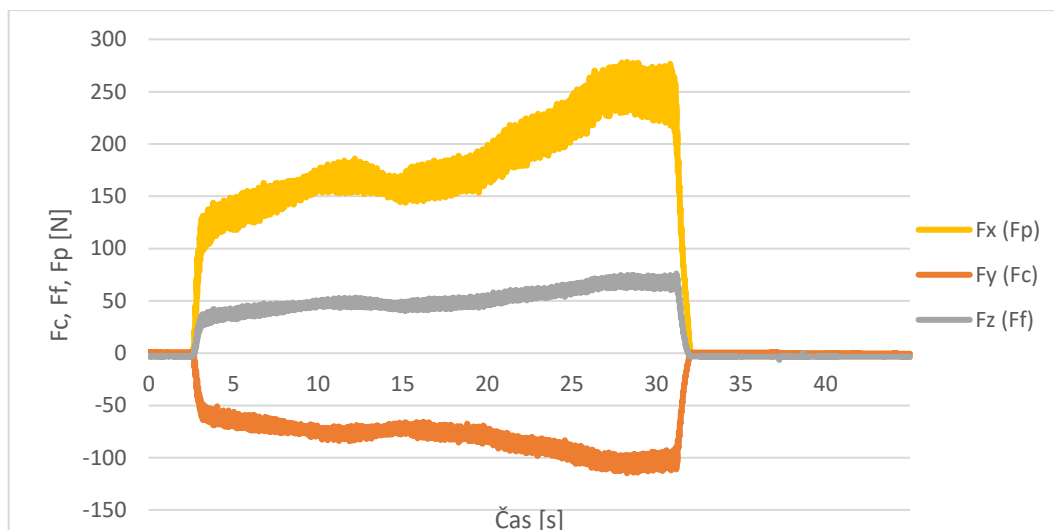
Graf 9 Záznam řezných sil (vzorek 26) – raw

Zobrazená data jsou přímo v podobě, v jaké byla naměřená čili se vzorkovací frekvencí 10 kHz. V této podobě je dobře patrný rozkmit a nestabilita sil, ovšem vyvození makroskopického vývoje a průběhu řezných sil není z tohoto grafu dobře možné. Tato data byla proto po skupinách o 100 číslech filtrována (každých 100 po sobě jdoucích čísel bylo nahrazeno jedním číslem rovným průměru čísel ve skupině), čímž vznikl graf 10. Ten má rozlišení 100 Hz a díky průměrování došlo k vyhlazení špiček. Z průběhu sil na grafu vyznačeném se již dá odvozovat průběh řezu. Všechny tři složky jsou svým průběhem totožné a liší se pouze velikostně, přičemž největší, a tedy i nejlépe čitelná je síla  $F_p$ . Na ní je vidět, že na počátku řezu byla působící síla větší, načež po pár sekundách klesla. Dále síla opět pomalu narůstala s tím, že se zvětšoval také její rozkmit. Tento trend pokračoval až do posledních vteřin obrábění, kdy síla nejprve pozvolně a následně prudce klesla, jak břit vyjel z řezu.



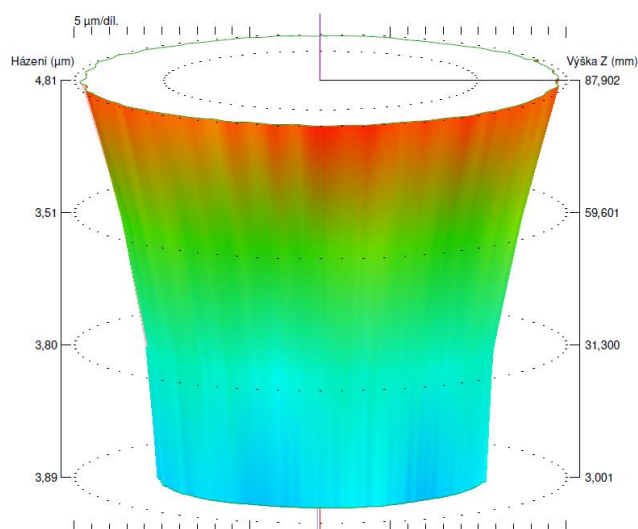
Graf 10 Záznam řezných sil (vzorek 26) – filtrovaný

Počáteční vrcholek ve velikosti řezné síly lze přisoudit dvěma vlivům. Prvním bylo, že každý řez byl prováděn úplně novým břitem VBD a vyšší řezné síly mohli být projevem neopotřebeného ostří. Každý čerstvý břit si totiž musí projít primární fází opotřebením, kdy dojde k poměrně rychlému ale velmi malému otupení spočívajícím v odstranění oblastí, které stojí odcházejícím materiálu v cestě a zároveň jsou moc slabé, aby snesly působící síly. V této fázi mohou být působící síly větší, a když se břit „zajede“, klesnou. Druhou příčinou může být mírně větší průměr na úplných koncích nástřiku. Jak bylo zmíněno v kapitole popisující průběh žárového stříkání vzorků, byly konce ošetřované plochy zastíněné plechy. Na těchto plechách se postupem času utvářel silný nános žárového nástřiku, který měl tvar krápníku (k vidění dříve na obrázku 45). Když bylo aplikační zařízení v krajní pozici (přímo před stínícím plechem), odvracel tvar krápníku dopadající částice do svého okolí, což na vnitřní straně znamenalo na okraj ošetřovaného povrchu. V těchto místech mohl mít tedy nástřik o trochu větší průměr, ale výška této oblasti je tak malá, že nebyla při měření zachycena. Tuto domněnku lze potvrdit při pohledu na průběh obrábění jiných vzorků, a to zejména vzorku 2. Žárové stříkání vzorků pro tuto kvalifikační práci muselo být totiž jednou přerušeno kvůli jiné zakázce. Když se mělo po jejím dokončení s výrobou vzorků pokračovat, bylo vše znovu ustaveno, a i stínící plechy byly očištěny od vzniklých krápníků. První vzorky, které byly vyrobené po této odstavce by tedy měly být tímto jevem zasažené naprosto minimálně, což je patrné z grafu 11, který ukazuje průběh řezných sil při obrábění vzorku 2 (prvního vzorku stříkaného po přerušení a očištění plechů). Vrcholek, který se nacházel na počátku řezu na grafu 10 se na grafu 11 nenachází. Stejně tak tomu je i u vzorků 4 a 6, které byly zpracovávány po vzorku 2.



Graf 11 Záznam řezných sil (vzorek 2)

Po právě objasněném prvotním nárůstu a rychlém poklesu síly přichází oblast opětovného pozvolného zvyšování velikosti řezných sil doprovázeného jejich větším rozkmitem. Tato fáze je společná pro úplně všechny vzorky a nejspíše již nevychází z procesu žárového stříkání, nýbrž vychází z tuhosti soustavy SNOP a může být také podpořena kuželovitostí vzorků. Co se týče soustavy SNOP, řezání probíhalo od protivřetena směrem k hlavnímu vřetenu, přičemž protivřeteno je oproti hlavnímu vřetenu mnohem více vyložené (dáno konstrukcí stroje) a tedy i méně tuhé. Nižší tuhost následně znamená větší odtlačení a menší hloubku řezu (tedy i menší síly), zatímco vyšší tuhost u hlavního vřetena, znamená menší odtlačení, větší hloubku řezu (možná ještě umocněnou kuželovitostí vzorků) a tedy i větší síly a ty zase podněcují soustavu SNOP k větším vibracím a tedy rozkmitu sil. Nárůst hloubky řezu potvrzuje i naměřená kuželovitost obrobenej plochy (viz obrázek 58), kde strana protivřetena je vždy nahoře.



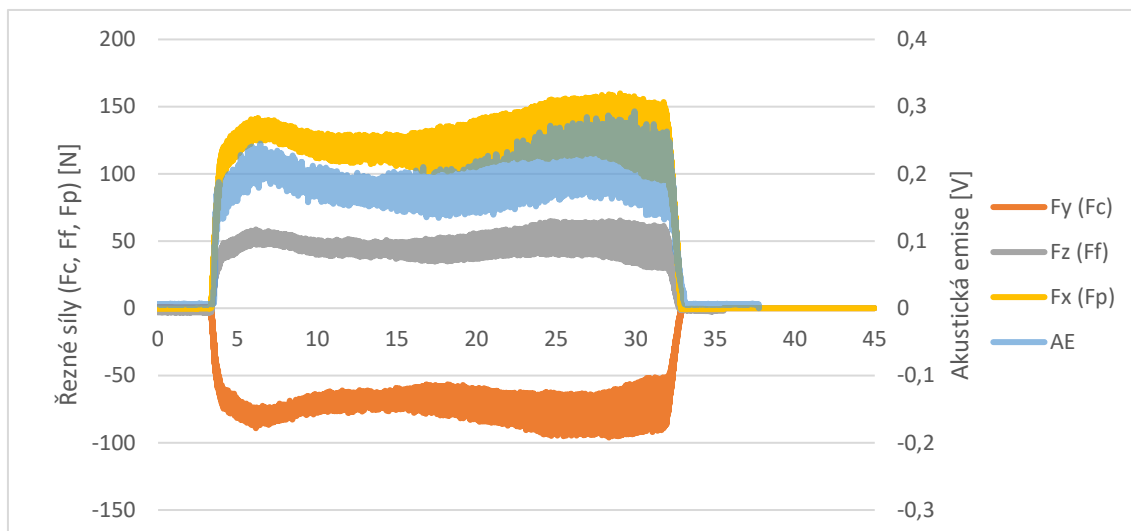
Obrázek 58 Válcovitost vzorku po obrobení

Poslední fáze řezání, tedy pozvolný a pak prudký pokles sil, je důsledkem vyjíždění nástroje z řezu v kombinaci s klesající tloušťkou nástřiku (okraj žárového nástřiku není ostrý, ale je oblý).



### 6.3 Akustická emise

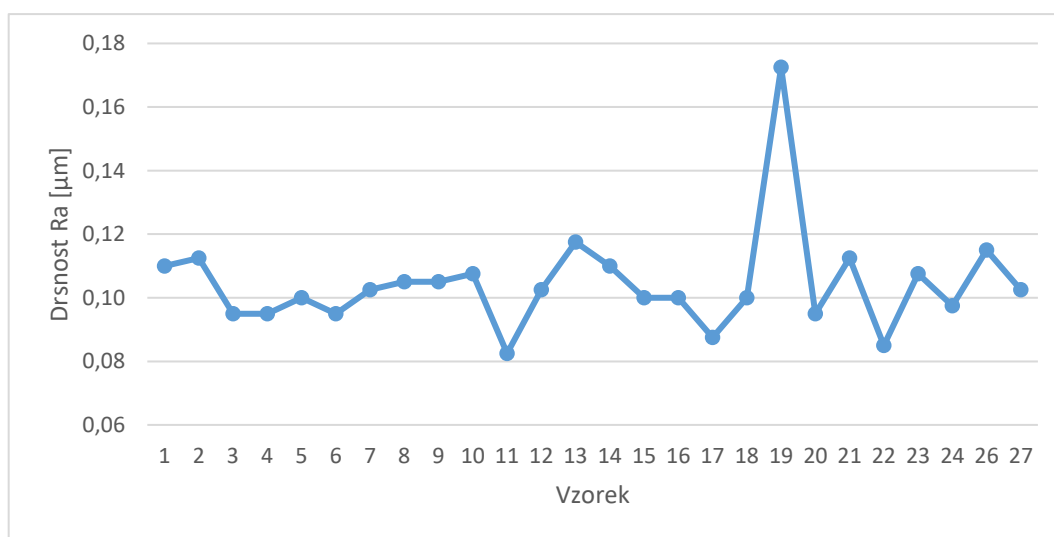
Co se týče akustické emise, tak ta se svým průběhem velice podobala průběhu řezných sil, zejména průběhu síly  $F_p$  (viz graf 12). I poloha vystupujících vrcholků se mezi záznamem řezných sil a záznamem akustické emise shodují. Vzhledem k tomu, že akustická emise je schopná zaznamenat pouze vlny, tzn. dynamické jevy, vychází nejspíše podobnost mezi křivkami sil a akustické emise právě z chvění, které doprovázelo, ač ve většině případů jen s malou amplitudou, celý řezný proces.



Graf 12 Záznam řezných sil a akustické emise (vzorek 26)

### 6.4 Drsnost obrobenej plochy

Řezný proces se choval napříč všemi vzorky velice podobně čemuž nasvědčuje drsnost obrobenej plochy. Ta měla průměrně hodnotu  $R_a$  0,1  $\mu\text{m}$ , přičemž nejnižší dosažená drsnost byla  $R_a$  0,08 a nejvyšší byla u vzorku 19  $R_a$  0,17  $\mu\text{m}$ . Hodnotu  $R_a$  všech obrobenej vzorků reprezentuje graf 13. Drsnost obrobenej plochy byla vyhodnocována ze čtyř měření podél osy vzorku vzájemně odsazených o  $90^\circ$  a měřena byla opět na drsnoměru HOMMEL ETAMIC T-8000.



Graf 13 Drsnost na obrobenej vzorcích

Jak bylo zmíněno v teoretické části práce, odborné zdroje řešící obrábění žárových nástřiků predikují u takto obrobenej ploch výslednou drsnost výrazně horší, než

kinematickou (geometricky určenou). Při obrábění lineární řeznou hranou by však při stejném posuvu měla být výsledná drsnost obecně lepší ve srovnání v konvenčních nástroji. Očekávána tedy byla dobrá hodnota drsnosti, ovšem hodnota horší, než jaká vychází ze vzorců pro kinematickou drsnost při obrábění lineární řeznou hranou. Vzorec pro kinematickou drsnost při obrábění lineární řeznou hranou uvádějí ve svých člancích například Grzesik a kol. [37], Manokhin a kol. [38] a Monka a kol. [52], přičemž všechny tři tyto vzorce jsou uvedené zde.

$$\text{Grzesik: } R_t = \sqrt{\left(\frac{D}{2} - a_p\right)^2 + \frac{f^2 \cdot \tan^2 \lambda_{sf}}{4 \cdot \sin^2 \lambda_{sp}}} - \left(\frac{D}{2} - a_p\right)$$

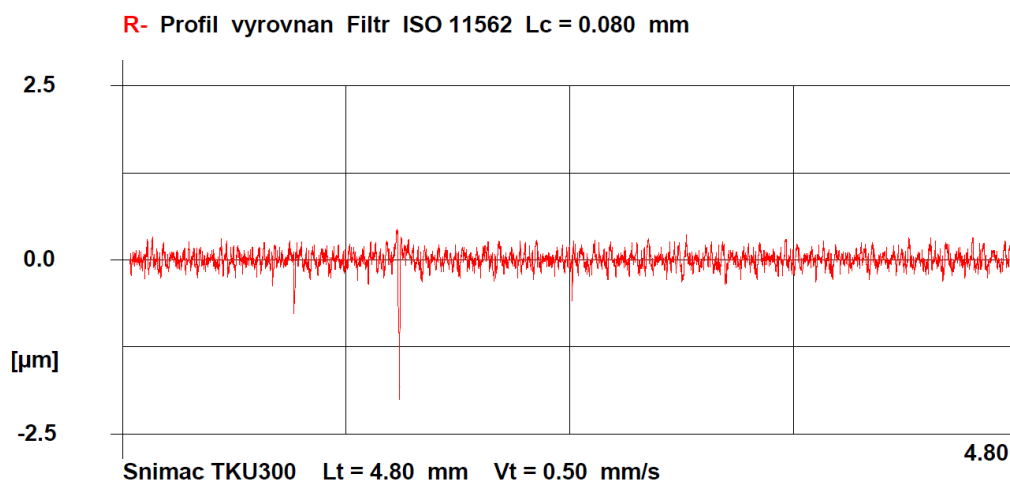
$$\text{Manokhin: } R_{z_t} = \frac{D}{2} \cdot \left( \sqrt{\frac{f^2}{D^2} \cdot \tan^2 \lambda_s + 1} - 1 \right)$$

$$\text{Monka: } R_z = \sqrt{\frac{f^2 \cdot \tan^2 \lambda_s}{4 \cdot \left(1 - \tan \lambda_s \cdot \frac{f}{2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2}}\right)^2} + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - \frac{D}{2}$$

U všech těchto rovnic platí:  $D$  = obráběný průměr,  $f$  = posuv,  $\lambda_s$  = úhel sklonu hlavního ostří,  $a_p$  = hloubka řezu. V případě výpočtu podle Grzesika [37] jsou uváděny dvě hodnoty a sice  $\lambda_{sf}$  a  $\lambda_{sp}$ , které vychází z průmětu přímky ostří do rovin  $P_f$  a  $P_p$ , ke kterému dojde v případě, že úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r \neq 0^\circ$ . V případě zde zkoumané situace obrábění je však úhel  $\kappa_r$  roven nule a tím pádem splyne rovina  $P_f$  s rovinou  $P_s$  a rovina  $P_p$  s rovinou  $P_o$ . Ostří se do roviny  $P_p$  následně promítne pod úhlem  $90^\circ$  a celá hodnota  $\lambda_s$  se z roviny ostří ( $P_s$ ) promítne do totožné roviny  $P_f$ . Ve výpočtu podle Grzesika [37] je tedy hodnota  $\lambda_{sf} = \lambda_s$  a  $\lambda_{sp} = 90^\circ$ . Zbylé dvě rovnice uvažují s  $\kappa_r = 0^\circ$ .

Ačkoliv byly publikace, z nichž pocházejí výše popsané vztahy vydány v rozpětí 30 let, ve výsledku výpočtu na základě parametrů obrábění použitých v této práci se všechny tři shodují na hodnotě  $R_z = 0,18 \mu\text{m}$ . Skutečná dosahovaná  $R_z$  byla však v průměru  $1,25 \mu\text{m}$  čili se skutečně objevuje několikanásobný rozdíl mezi vypočtenou a skutečnou drsností, kdy skutečná drsnost je o poznání horší.

Z pohledu dalších parametrů drsnosti stojí za povšimnutí také hodnoty  $R_p$  a  $R_v$ . Při pohledu na profil drsnosti (příklad na obrázku 59) je patrné, že hodnota  $R_z$ , tedy maximální výška profilu drsnosti, vychází z údolí, která se však vyskytují velice zřídka. Vliv údolí pak dokládají parametry  $R_p$  a  $R_v$ , tedy výška nejvyššího vrcholu a nejhlubšího údolí. Hodnota  $R_v$  je ve všech případech měření větší než  $R_p$ , což ukazuje, že největší nerovnosti na povrchu mají spíše charakter údolí. Tato skutečnost se shoduje s poznatky z teoretické části, které říkají že při obrábění žárového nástřiku dochází k vytrhávání částic, načež vzniknuvší výmoly zhoršují naměřenou drsnost. V tomto případě není stop po vytrhaných částicích mnoho, a proto je naměřená  $R_a$  velice nízká. Jejich přítomnost však stále odráží parametry  $R_z$  a  $R_v$ .

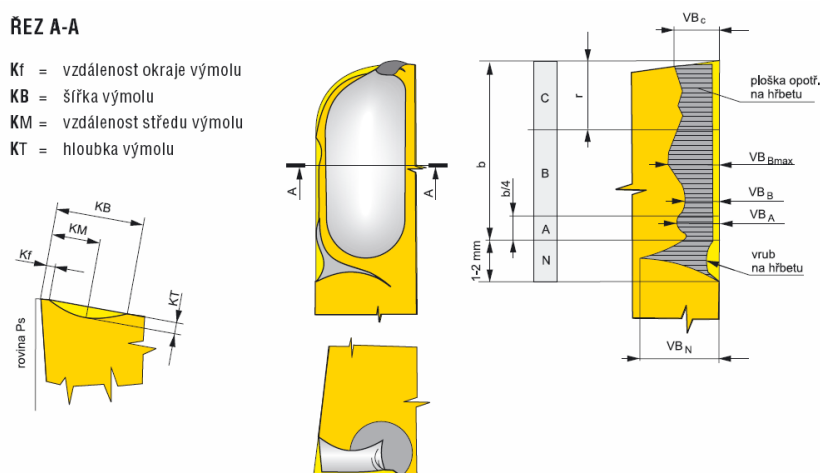


**Obrázek 59** Profil drsnosti jednoho z náměrů na vzorku 17 ( $R_z$  1,16  $\mu\text{m}$ )

Z hlediska průměrné aritmetické hodnoty drsnosti se potvrdilo, že strategie obrábění vycházející z předcházejícího výzkumu je zcela vyhovující. Při jejím návrhu byla požadována výsledná drsnost maximálně  $R_a$  0,2, což, jak je patrné z výše uvedených výsledků, bylo a je splněno.

## 6.5 Opotřebení břitu VBD

Primárním mechanismem opotřebení řezného břitu se u použitých břitových destiček ukázalo být abrazivní opotřebení, přičemž se projevil také nárůstek. Opotřebení destiček bylo kvantifikováno na základě hodnoty VB – čili výška opotřebení na hřbetě (viz obrázek 60 vpravo). Abrazivní opotřebení, a to zejména na hřbetě, bylo v odborných zdrojích (viz kapitola 3.5) uváděno jako jeden z nejběžnějších mechanismů opotřebení projevujících se při obrábění niklových slitin, a navíc je hodnota VB i dobře měřitelná. Měření opotřebení proběhlo na mikroskopu KEYENCE VHX6000 (viz obrázek 61), přičemž snímky byly pořízené se zvětšením 200x. Naměřená hodnota VB se pohybovala v rozsahu od 0 (neměřitelná) po 78  $\mu\text{m}$  s průměrnou hodnotou 39  $\mu\text{m}$ .



**Obrázek 60** Opotřebení břitu nástroje [53]



Obrázek 61 Mikroskop KEYENCE VHX6000

Nejvíce opotřeбенá část ostří se vždy nacházela na začátku aktivní oblasti břitu (při pohledu do stroje nejbliže k hlavnímu vřetenu, nebo také část ostří s nejnižší polohou ve směru osy Y), načež směrem doprava abrazivní opotřeбенí velmi rychle klesalo a spíše se objevoval nárůstek. Typický profil opotřeбенí při pohledu od čela a od hřbetu ukazují obrázky 62 a 63.



Obrázek 62 Opotřeбенé ostří (VBD 5, hrana 2) - čelo



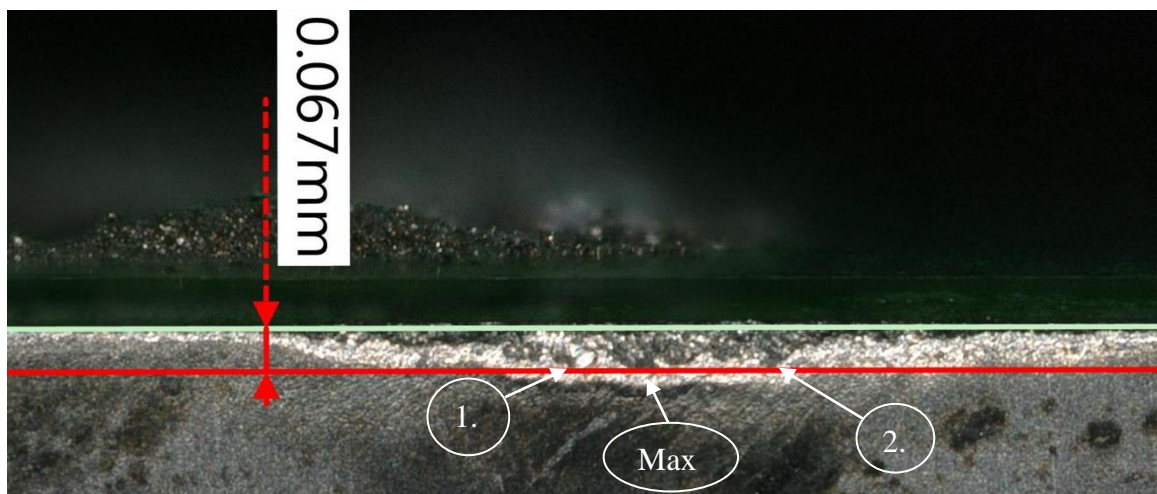
Obrázek 63 Opotřeбенé ostří (VBD 5, hrana 2) - hřbet

Levá část aktivní oblasti břitu při obrábění vstupovala do řezu jako první a jelikož se při obrábění lineární řeznou hranou rozkládá hloubka řezu pozvolně na velkou délku ostří, je levá část ta, která odebírala povrchovou vrstvu obráběného materiálu. Nadměrné opotřeбенí v této části tedy nejspíš vycházelo z obrábění velmi hrubého povrchu už tak tvrdého žárového nástřiku. Části břitu, které již odebíraly materiál pod hrubým povrchem byly otěrem zasažené již mnohem méně a spíše je v těchto místech patrný nárůstek (nalepený materiál). Porovnání nového a použitého břitu ukazuje obrázek 64.



Obrázek 64 Porovnání nového (vlevo) a použitého (vpravo) břítu

Odměřovaná hloubka charakterizující VB byla vždy volena jako nejhlubší místo opotřebení, které se na opotřebovaném břítu vyskytuje alespoň dvakrát. Tímto místem byla následně vedena rovnoběžka s přímkou ostří, načež vzdálenost těchto rovnoběžek je rovna VB. Volba odměřované hloubky je patrná z obrázku 65, kde je vidět, že červená přímka neprochází maximem opotřebení, ale prochází až lehce nad ním, kde se vyskytují dva výmoly o stejné hloubce.



Obrázek 65 Odměřování VB

## 6.6 Materiálové charakteristiky

Materiálové charakteristiky byly kvůli nedostatku času změřeny pouze na pěti vybraných vzorcích. Zvolené byly vzorky číslo 3, 5, 16, 19 a 26. Vzorky 3 a 5 byly zvoleny proto, že reprezentují extrémní hodnoty ekvivalentního poměru palivové směsi se zachováním zbylých dvou proměnných. Vliv jiného chování plamene by tedy měl být mezi těmito dvěma vzorky patrný. Vzorky 16 a 19 byly zvoleny, neboť při jejich obrábění došlo z neznámého důvodu k největším odchylkám hloubky řezu. A nakonec vzorek 26 byl podroben materiálovým analýzám jako referenční, neboť byl nastříkaný při standardních podmínkách. Těchto pět vzorků bylo podrobeno základním analýzám za účelem zjištění pórovitosti nástřiku, jeho tvrdosti a prozkoumání jeho struktury a chemického složení.



### 6.6.1 Pórovitost

Pórovitost žárového nástřiku byla měřena pomocí grafické analýzy snímku pořízeného na optickém mikroskopu. Stejně jako pro ostatní zkoumání musel být vzorek nejprve rozřezán a následně byl vybroušen a vyleštěn tak, aby bylo možné pozorovat povlak v celé své tloušťce a zároveň bylo možné se podívat i na základní materiál, respektive přechodovou vrstvu.

Procento zastoupení pórů v povlaku se mezi měřenými vzorky pohybovalo od 3,95 po 6,07 % s tím, že podle očekávání byla u vzorku 5 pórovitost nejvyšší (viz obrázek 66). V tomto případě se totiž jedná o využití krátké vzdálenosti a nejvíce pod-stechiometrické palivové směsi. Vysoká pórovitost a podíl oxidů byly za těchto podmínek zmíněné již v teoretické části. Nejnižší pórovitost mezi zkoumanými vzorky byla zjištěna u čísla 19 (na obrázku 67), kde ji lze vysvětlit využitím střední vzdálenosti a směsi druhé nejbohatší na palivo. Pórovitost byla v tomto případě nižší, než u vzorku 26, který byl stříkán při stejné vzdálenosti, ale s využitím směsi s větším podílem kyslíku. I zde se tedy potvrzují nežádoucí účinky většího množství kyslíku.



Obrázek 66 Struktura vzorku 5 pod světelným mikroskopem (100x)



Obrázek 67 Struktura vzorku 19 pod světelným mikroskopem (100x)

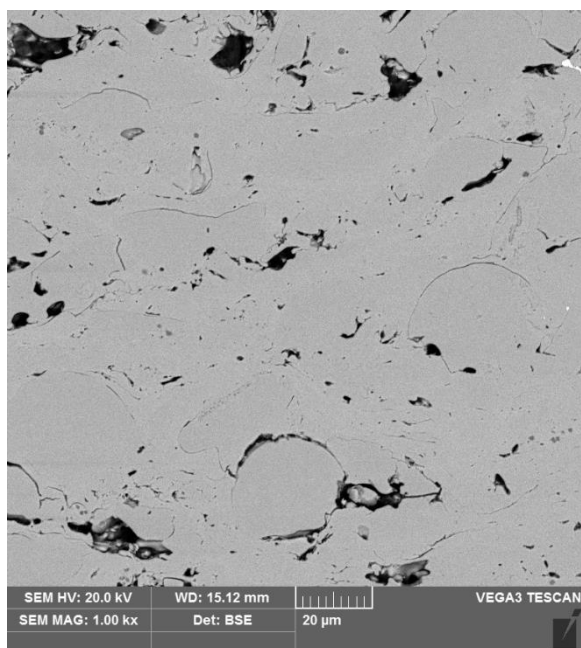
### 6.6.2 Mikrotvrdoost

K získání informací o tvrdosti bylo zvoleno měření HV0,1, které bylo provedeno po krocích 0,05 mm v celé tloušťce nástřiku. Naměřené hodnoty neukazovaly žádný klesající trend, který by indikoval výrazné deformační zpevnění povrchové vrstvy, nýbrž zůstávaly poměrně konstantní v celé tloušťce povlaku. Rozsah průměrné tvrdosti napříč zkoumanými vzorky byl od 644 po 784 HV (57-62 HRC). Pozoruhodné bylo, že vzorek č. 3 dosáhl druhé nejnižší pórovitosti (4,65 %) při druhé nejvyšší tvrdosti (782 HV), která byla o 9 % vyšší než při standardních podmínkách.

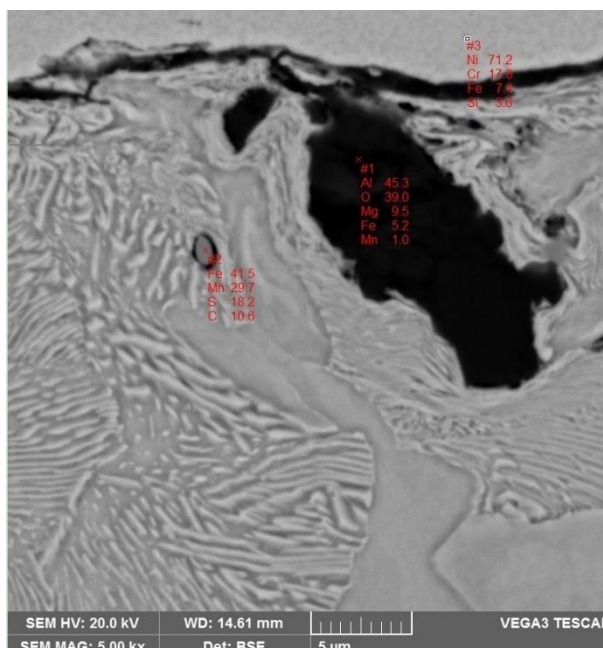
### 6.6.3 Mikrostruktura a EDX analýza

Snímky mikrostruktury, stejně jako EDX analýza chemického složení byly získané prostřednictvím elektronového mikroskopu TESCAN v kombinaci s rentgenovým zářičem. Metalografické vzorky byly před měřením naleptané, aby byly lépe patrné změny ve struktuře. Fotografie mikrostruktury (viz obrázek 68) prokázaly u všech zkoumaných vzorků různé množství nenatavených částic. Kromě těch byly na snímcích patrné póry různých velikostí a také oxidační vrstvy mezi splaty. Pozoruhodné byly také nečistoty nalezené v nástřiku. V přechodové vrstvě byly nalezené částice oxidů hliníku (na obrázku 69), které nejspíše představovali  $Al_2O_3$  použitý při tryskání před nástřikem. Uvnitř nástřiku pak byly

nalezené elementy karbidu wolframu (bílá stopa na obrázku 68 vpravo nahoře), které byly nejspíš pozůstatkem zbytkového množství jiného prášku v podavači po předchozí zakázce.

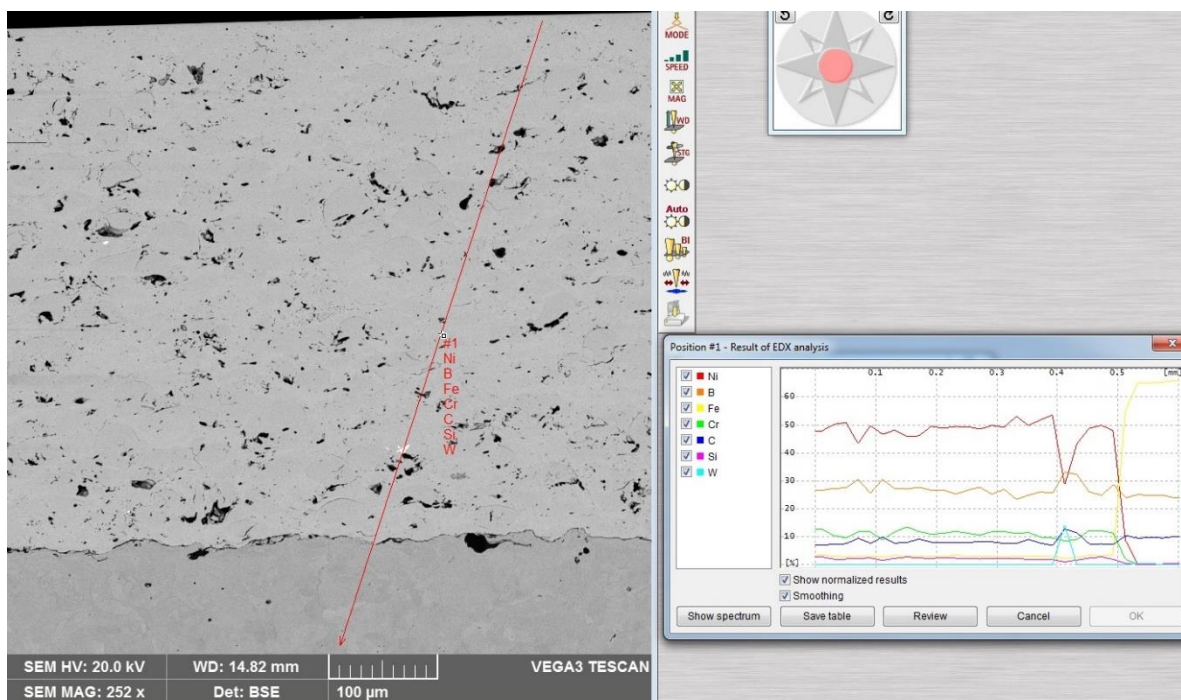


Obrázek 68 Snímek vzorku 5 z elektronového mikroskopu



Obrázek 69 EDX analýza na úrovni přechodové vrstvy

Na obrázku 70 je zobrazena liniová analýza chemického složení, která potvrzuje přítomnost očekávaných prvků v nástřiku. Analyzovaná čára prochází až do základního materiálu, díky čemuž je vidět ostrý přechod chemického složení v přechodové vrstvě, a také prochází jednou z nalezených částic WC, která je rovněž na průběhu chemického složení vidět (zhruba v úrovni 0,4 mm).



Obrázek 70 Liniová analýza chemického složení (vzorek 3)

## 7 Vyhodnocení

Veškerá data získaná v průběhu vypracování celé práce byla nakonec podrobena vyhodnocení z hlediska jejich vlivu na obrobiteľnosť. Data, u kterých se předpokládá signifikantní vliv byla následně vyhodnocena pomocí statistických metod.

### 7.1 Vyhodnocení plánovaného experimentu

Od počátečního návrhu parametrů žárového stříkání po výběr měřených veličin v průběhu hlavního experimentu byly všechny kroky prováděné s ohledem na plán experimentu navržený metodou DoE. Plánovaný experiment si kladl za úkol naleznout vliv parametrů nástřiku na obrobiteľnosť, přičemž vstupní proměnné tvořily: aplikační vzdálenost ( $x1 - Vz d$ ), průtok kyslíku ( $x2 - Pr K$ ), průtok paliva ( $x3 - Pr P$ ), a přiváděné množství prášku ( $x4 - Mn P$ ). Výstupními proměnnými zvolenými pro zhodnocení obrobiteľnosti byly primárně: velikost řezných sil, drsnost obrobené plochy a opotřebení břitů VBD.

#### 7.1.1 Vyhodnocení celkové řezné síly

Při vyhodnocování řezných sil byl prvním krokem jejich export z prostředí softwaru KISTLER DYNOWARE do prostředí Microsoft excel. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.2, byly při exportu síly filtrovány (každých 100 záznamů bylo nahrazeno jejich průměrem), čímž bylo dosaženo rozlišení 100 záznamů za sekundu. V takto získaných datech byla následně vyhledána stabilní oblast řezu a z ní byla vypočtena střední hodnota. Tento proces zpracování byl proveden pro každou složku řezné síly zvlášť, načež byly takto získané průměrné hodnoty vektorově sečteny za účelem vypočtení velikosti celkové řezné síly. Tímto byly pro každý experiment získány reprezentativní číselné hodnoty řezných sil.

Dalším krokem bylo statistické zpracování dat vždy s ohledem jen na jeden výstupní parametr. Z hlediska velikosti celkové řezné síly byl regresní analýzou nalezen model schopný popsat 74 % variability dat (hodnota  $R^2_{adj}$  neboli Rsquare Adj) – viz tabulka 12. Ze stejné tabulky je patrné, že střední hodnota (celkové) řezné síly je podle tohoto modelu 193,315 N (což odpovídá skutečnému průměru) s chybou rozptylu 20,181 N.

Tabulka 12 Shrnutí vhodnosti modelu pro Fcelk

Source	Value
RSquare	0,778231
RSquare Adj	0,741556
Root Mean Square Error [N]	20,18117
Mean of Response [N]	193,3153
Observations (or Sum Wgts)	26

Aby mohl být však získaný model považovaný za relevantní, musí být nejprve zhodnocen. Prvním nástrojem hodnocení je analýza rozptylu dat – ANOVA. Na základě jejich výsledků (viz tabulka 13) je možné usoudit, že variabilita dat způsobená chybou je výrazně menší než variabilita vysvětlená posuzovaným modelem. Z hlediska Fisher-Snedecorova kritéria ( $p < \alpha$ ) navržený model adekvátně popisuje zkoumaná data (nulová statistická hypotéza říkájící, že žádný vstupní faktor nemá signifikantní vliv, je vyvrácena).



**Tabulka 13** Tabulka výsledků analýzy ANOVA – Fcelk

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p
Model	2	12842,44	6421,22	15,7661	<0,0001*
Error	23	9367,428	407,28		
C. Total	25	22209,87			

\* Pozn.: Zvolená hladina významnosti  $\alpha = 0,05$

Druhou zkouškou, ve které musí získaný model obstát je zkouška nedostatečného přizpůsobení modelu (angl. Lack of fit), která zkoumá rozdíl mezi naměřenými hodnotami a hodnotami vycházejícími ze zkoumaného modelu. Z velikosti parametru  $p$  je možné usoudit, že chyba nedostatečného přizpůsobení modelu není statisticky významná ( $p > \alpha$ ). Model tedy adekvátně sleduje skutečný vývoj řezné síly.

**Tabulka 14** Tabulka výsledku analýzy nedostatečného přizpůsobení modelu – Fcelk

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p	Max RSq
Lack Of Fit	6	1654,934	275,822	0,608	0,7208	0,6527
Pure Error	17	7712,495	453,676			
Total Error	23	9367,428				

Jelikož model v prvních dvou analýzách obstál, je možné nyní posoudit statistický význam vstupních faktorů a jejich regresní koeficienty. Z tabulky 15 vyplývá, že statisticky významné ( $p < \alpha$ ) byly faktory  $x_1$  a  $x_4$ , a to v obou případech ve druhé mocnině. Konkrétně reprezentuje  $x_1$  aplikační vzdálenost a  $x_4$  množství dodávaného prášku.

**Tabulka 15** Tabulka určení parametrů modelu – Fcelk

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	p	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	156,4888	7,660017	20,43	<0,0001*	140,6428	172,3347
$x_1 \cdot x_1$	26,26145	11,14696	2,36	0,0274*	3,202202	49,3207
$x_4 \cdot x_4$	26,93245	11,14696	2,42	0,0240*	3,873202	49,9917

\* Pozn.: Stále platí zvolená hladina významnosti  $\alpha = 0,05$

Na základě regresních údajů z tabulky 19 je možné sestavit regresní funkci v kódovaném (bezrozměrném) tvaru, která vypadá takto:

$$\hat{y} = 156.489 + 26.261 \cdot x_1^2 + 26.932 \cdot x_4^2$$

Vliv členů výsledné rovnice je na základě údajů z tabulky 19 takový, že absolutní člen tvoří 81,039 % výsledku, zatímco členy  $x_1$  a  $x_4$  se na výsledku podílejí z 9,361, respektive 9,599 %. Těchto cca 18 % celkové hodnoty vztahu však ovlivňuje výsledná data mírou výše zmíněných 74 %. Absolutní člen rovnice pak v sobě zahrnuje vliv všech proměnných, které v modelu nejsou zahrnuté, ovšem nejsou nutně neznáme (např. řezné podmínky).

Vztah v kódovaném tvaru lze následně převést na přirozenou míru, čímž vznikne finální podoba funkce popisující vliv aplikační vzdálenosti a množství prášku na velikost celkové řezné síly jako:

$$F_{celk} = 2346.661 - 7.983 \cdot Vz d + 1.050 \cdot 10^{-2} \cdot Vz d^2 - 26.932 \cdot MnP + 0.269 \cdot MnP^2$$

Pozn.:  $Vz d$  = aplikační vzdálenost [mm];  $MnP$  = množství prášku [g/min]

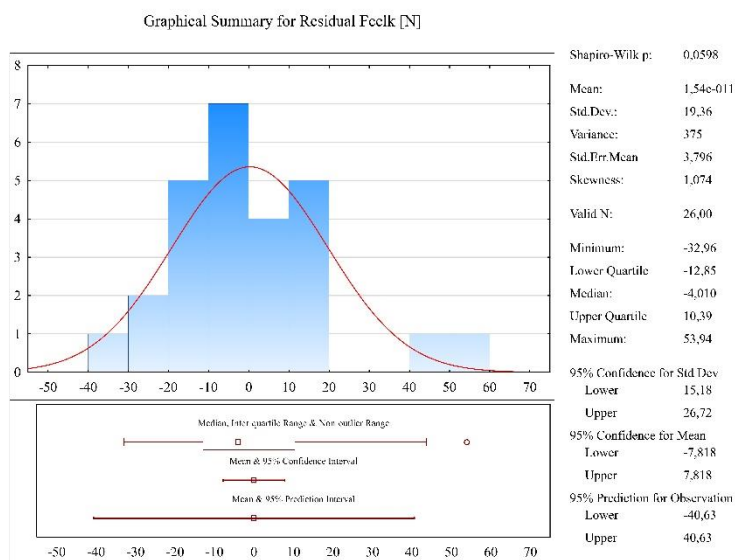
Převod z kódovaného tvaru do přirozené míry je prováděn na základě následujícího vztahu, kde  $x_d$  je normovaná proměnná podle DoE,  $x(i)$  je původní normovaná proměnná s tím, že  $i = 1, 2, \dots, n$  kde  $n$  je počet základních faktorů,  $x_{max}$  je maximální hodnota původní proměnné a  $x_{min}$  zase její minimální hodnota.

$$x_d(i) = \frac{x(i) - \frac{x_{max} + x_{min}}{2}}{\frac{x_{max} - x_{min}}{2}}$$

Posledním krokem nezbytným k tomu, aby mohl být model přijat za vyhovující je analýza reziduí neboli rozdílů mezi skutečnou a vypočtenou hodnotou. Ta musí vyhovět ze dvou hledisek:

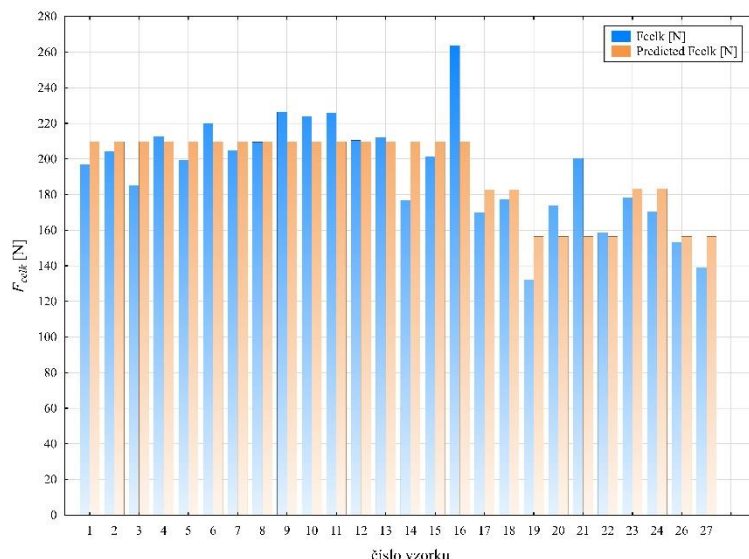
1. Průměrná hodnota reziduí musí být rovna 0
2. Rozložení reziduí musí odpovídat Gaussovu normálnímu rozložení

Jak ukazuje obrázek 71 shrnující hodnoty reziduí pomocí histogramu, jejich průměrná hodnota (v obrázku hodnota „mean“) se velice blíží nule a hodnota významnosti Shapiro-Wilkova testu ukazuje na vyhovující Gaussovo rozdělení ( $0,0598 > \alpha$ ).



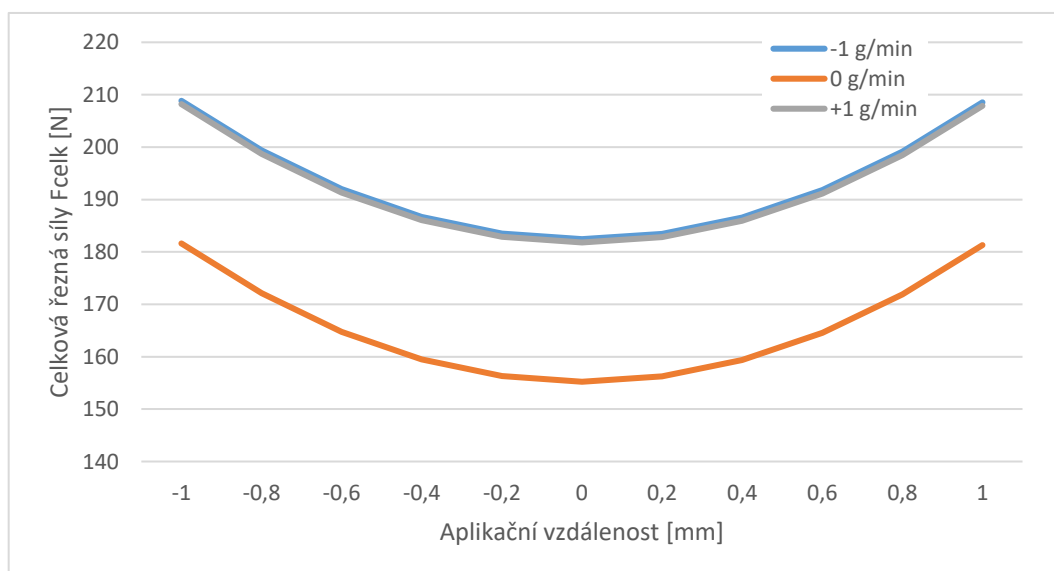
Obrázek 71 Analýza reziduí – Fcelk

S přihlédnutím ke všem provedeným analýzám regresního modelu tedy lze říci, že model je statisticky i numericky korektní. Jeho podobnost s naměřenými hodnotami řezné síly při obrábění každého vzorku je patrná z obrázku 72.

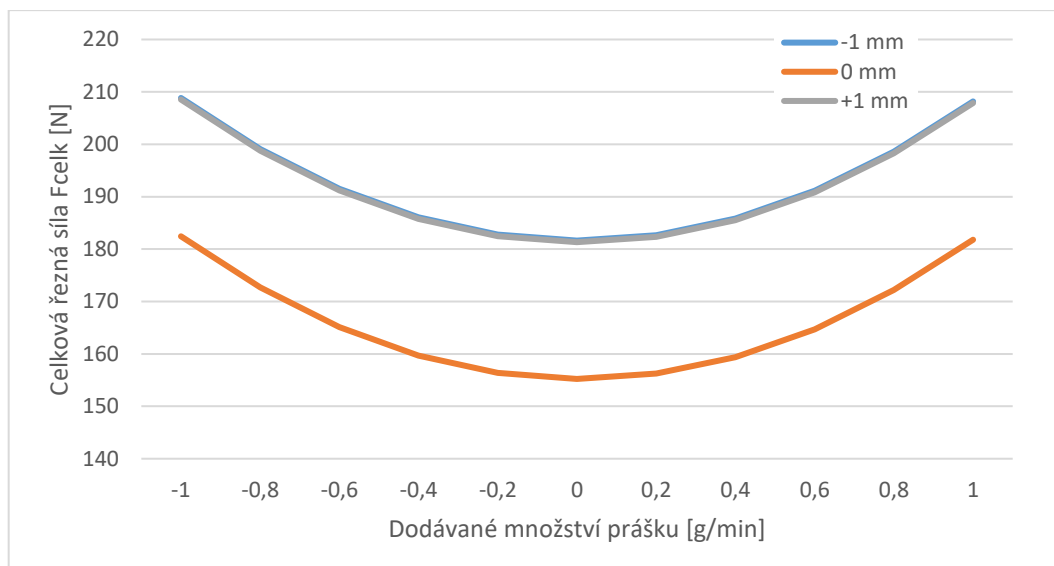


Obrázek 72 Porovnání skutečné a teoretické F<sub>celk</sub>

Nyní, když byla objasněna cesta, která vedla k získání matematického modelu je možné se přesunout k analýze modelu z praktického hlediska. Jak je patrné z grafů níže, a jak napovídá už matematická podoba regresní funkce, vliv obou vstupních parametrů má parabolický průběh s minimem pro obě proměnné v úrovni 0. Toto rozložení napovídá, že standardní podmínky žárového stříkání, které odpovídají u všech parametrů úrovni 0, jsou z hlediska minimalizace řezných sil nastavené optimálně. Oboustranně stoupající trend z hlediska optimální vzdálenosti nástřiku byl zmíněn již v kapitole 3.3.2 a rovněž dodávané množství prášku může mít podle nulové hodnoty souměrný vývoj. V případě prášku je nejspíše klíčový průtok nosného plynu, který nebyl upravován a jehož souhra s množstvím prášku mohla vést k tomu, že částice neměly z hlediska osy plamene optimální trajektorii.

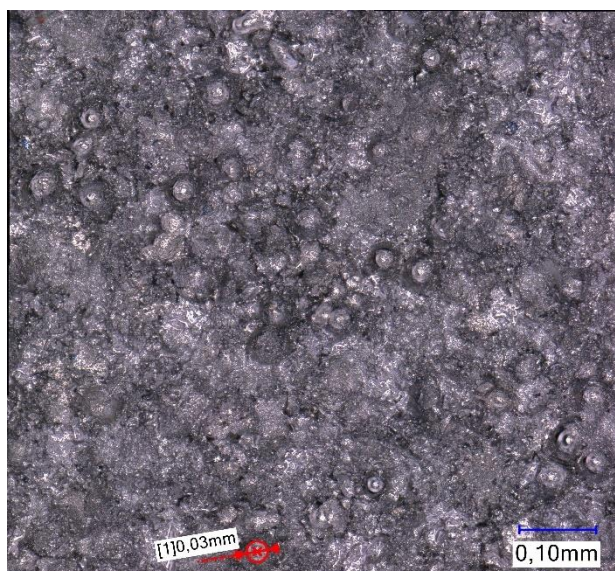


Graf 14 Závislost velikosti celkové řezné síly na aplikační vzdálenosti při konstantním množství prášku



**Graf 15** Závislost velikosti celkové řezné síly na množství prášku při konstantní aplikační vzdálenosti

Projevem, který spojuje obě zmíněné proměnné v jejich extrémních hodnotách (-1 a +1), a tedy by mohl vysvětlovat chování popisovaného modelu, je množství nenatavených částic. Při malé vzdálenosti nástřiku sice částice za svého letu nezchladnou, ovšem i prostup tepla je časově závislý. Krátká dráha letu znamená i kratší čas a to znamená, že se některé částice nemusí dostatečně prohřát v celém svém objemu a pod povrchem zůstanou nenatavené. Z hlediska dlouhé dráhy letu pak k prohřátí již dojde, ovšem částice stihnou znovu chladnout, a tak opět dopadají nenatavená. Ze strany druhého parametru je rozhodující správné rozložení proudu částic, který však patrně neprocházel středem plamene, tedy jeho nejteplejší oblastí, a některé částice opět nebyly dostatečně natavené. Přítomnost nenatavených částic v nástřiku potvrzuje i obrázek povrchu nástřiku pořízený s 1000násobným zvětšením při pohledu na neobrobený povrch vzorku 4 (obrázek 73) a rovněž je ukazují snímky mikrostruktury pořízené elektronovým mikroskopem.



**Obrázek 73** Nenatavené částice pod optickým mikroskopem (1000x)

Celková řezná síla je však vždy pouze výsledkem součtu jejich složek, a proto bude i příčiny jejího chování vhodnější vysvětlovat spíše z tohoto dílčího hlediska.

### 7.1.2 Vyhodnocení pasivní síly

Pasivní síla je ze všech složek největší, a proto má regresní rovnice popisující vývoj její velikosti tvar a členy velmi podobné jako u celkové řezné síly. I příčina jejího chování bude tedy s nejvyšší pravděpodobností stejná – tedy nenatavené částice. Fp bude totiž na jejich přítomnost nejvíce citlivá. Kulový tvar a vyšší tvrdost [17] nenatavených částic ztěžuje jejich rozříznutí, takže částice budou spíše vystupovat v celku, a to buďto tak, že budou svým středem pod úrovní obrobené plochy, a tak budou muset být (především právě působením pasivní síly) do ní zatlačeny, nebo budou středem nad touto úrovní a pak budou vytrženy a budou odcházet v tříse. Negativní úhel čela tvořený fazetkou však nutí materiál odcházet proti směru řezné síly, čímž roste tlak na fazetku, který se opět přenesa až do pasivní síly. Tření třísky, a hlavně nenatavených částic na ploše fazetky mohlo být také příčinou vzniku nárůstku. Popisující schopnost modelu pro Fp je 67,5 % (viz příloha 5).

Kroky provedené k získání a ověření následující regresivní funkce byly stejné jako u celkové řezné síly a stejně tak i model popisující pasivní sílu obstál ve všech třech analýzách, jak potvrzují data v příloze 5.

$$\hat{y} = 131.572 + 23.049 \cdot x_1^2 + 25.183 \cdot x_4^2$$

$$F_p = 2092.499 - 7.007 \cdot Vz d + 9.219 \cdot 10^{-3} \cdot Vz d^2 - 25.183 \cdot MnP + 0.252 \cdot MnP^2$$

### 7.1.3 Vyhodnocení řezné síly Fc

Do modelu řezné síly Fc se již promítly do jisté míry všechny vstupní proměnné, ovšem je důležité si na regresní funkci tohoto modelu všimnout, že stěžejní byl stále vliv aplikační vzdálenosti ( $x_1$ ), který se opět projevil kvadraticky. Zbylé proměnné pak vystupovaly pouze ve vzájemné interakci, která byla rovněž ovlivňována vzdáleností.

$$\hat{y} = 73.459 + 14.342 \cdot x_1^2 + 6.614 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 4.924 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Následující regresní funkce pro velikost řezné síly Fc objasňuje 69,2 % celkové variability dat, jak je patrné z tabulky 1 v příloze 6. Tabulky 2, 3 a obrázek 1 (rovněž z přílohy 6) opět prokazují splnění všech testovacích analýz a tabulka 4 poukazuje na váhu a vliv jednotlivých členů následujícího modelu.

$$\begin{aligned} F_c = & 29635.405 + 1.520 \cdot PrK \cdot PrP - 31.927 \cdot PrK - 1368.285 \cdot PrP - 79.976 \cdot Vz d - \\ & - 785.811 \cdot MnP + 2.068 \cdot MnP \cdot Vz d + 8.402 \cdot 10^{-2} \cdot PrK \cdot Vz d + 3.601 \cdot PrP \cdot Vz d + \\ & + 5.737 \cdot 10^{-3} \cdot Vz d^2 + 0.873 \cdot MnP \cdot PrK + 37.419 \cdot MnP \cdot PrP - 4.158 \cdot 10^{-2} \cdot MnP \cdot PrK \cdot PrP - \\ & - 2.298 \cdot 10^{-3} \cdot MnP \cdot PrK \cdot Vz d - 9.847 \cdot 10^{-2} \cdot MnP \cdot PrP \cdot Vz d - 4.000 \cdot 10^{-3} \cdot PrK \cdot PrP \cdot Vz d + \\ & + 1.094 \cdot 10^{-4} \cdot MnP \cdot PrP \cdot PrK \cdot Vz d \end{aligned}$$

Grafy 16 a 17 níže ukazují základní chování řezné síly Fc (potažmo později i Ff) v závislosti na průtoku kyslíku a paliva, což jsou proměnné, které se v modelech předchozích vyšetřovaných sil nevyskytovaly. Při pohledu na zmíněné dva grafy je patrné, že mají přesně opačný průběh a faktorem, který tuto změnu způsobuje je aplikační vzdálenost. Množství prášku se do průběhu grafů propisuje pouze rozpětím sil a to tak, že čím je větší množství prášku, tím větší je rozpětí.

Pro nejsnazší vysvětlení chování tohoto modelu jsou podstatné rohové body grafu a uvědomění si změn v procesu vyplývající od změny průtoku kyslíku a paliva, potažmo také aplikační vzdálenosti. Pro lepší orientaci v následujícím popisu jsou rohové body označené indexy jejich úrovně v pořadí: průtok kyslíku, průtok paliva.

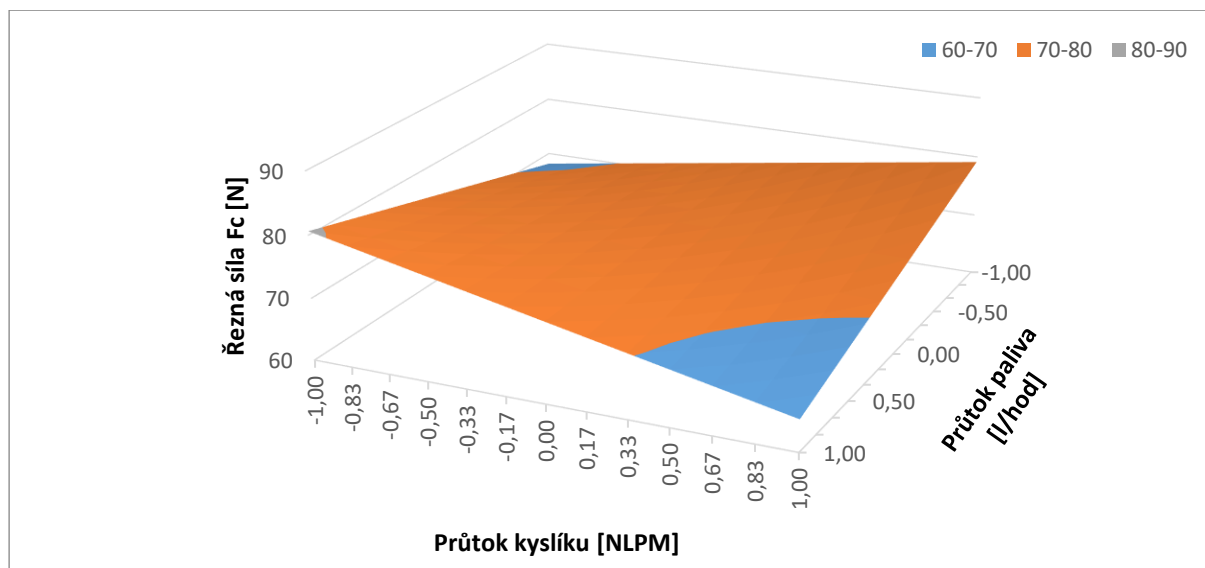
Na úhlopříčce podstavy grafu, tedy spojnicí bodů +1,+1 a -1,-1 se současně stejným směrem mění jak průtok kyslíku, tak paliva, což znamená, že ekvivalentní poměr je podél této úsečky zachováván víceméně konstantní (cca 0,8). To, co se mění, je tlak ve spalovací komoře, který směrem k bodu +1,+1 roste (roste totiž objem látek přiváděných do spalovací komory). Tlak ve spalovací komoře má největší dopad na rychlost stříkaných částic. [49] Podél druhé úhlopříčky téže roviny neboli spojnice bodů +1, -1 a -1,+1, dochází poté naopak ke změně ekvivalentního poměru, který roste ve směru od bodu +1, -1 (hodně kyslíku, málo paliva) k bodu -1, +1 (málo kyslíku, hodně paliva). Podél této přímky by mělo docházet ke změně teploty plamenu, která bude v bodě +1, -1 nejvyšší a v jeho protějšku nejnižší. Nyní, když je popsán orientační systém a základní mechanismy bude odůvodněna výška každého rohového bodu pro situaci jak malé (-1), tak velké (+1) aplikační vzdálenosti.

Nejprve bude popisován původ grafu 16, tedy chovní  $F_c$  při aplikační vzdálenosti -1. V tomto případě jsou nejvyšší řezné síly zaznamenány v bodech +1,-1 a -1,+1, zatímco ve zbývajících dvou rozích jsou síly minimální. Důvodem velké hlavní složky řezné síly při podmínkách +1,-1 je vysoká teplota částic a jejich střední rychlost. Vysoká teplota jim umožňuje se při dopadu dostatečně deformovat, zatímco rychlost zkracuje dobu možné oxidace částic za letu a také jim díky kinetické energii umožňuje rozbít oxidací vrstvu na povrchu vzorku, která může kvůli oxidačnímu charakteru plamenu a krátké aplikační vzdálenosti vznikat. Výsledkem je tedy dobře kohezní povlak, který klade silám překonávajícím jeho soudržnost ( $F_c$  a  $F_f$ ) větší odpor.

Druhou kombinací průtoku paliva a kyslíku vykazující vysoké hodnoty  $F_c$  je bod -1, +1. V tomto bodě má plamen nejnižší teplotu a vysokou rychlost. Vysoká rychlost je do jisté míry schopna vyrovnat deficit teploty, a navíc otevírá částicím možnost se deformačně zpevnovat. Vzniká tedy dobře protvářený a soudržný nástřík tvořený deformačně zpevněnými splatey, díky kterým je mírně tvrdší než v případě podmínek +1,-1.

Co se týče bodů s minimální  $F_c$ , tak v bodě -1,-1 ji způsobuje tepelné ovlivnění stříkaného povrchu, kde mohou vznikat zoxidované vrstvy, v kombinaci s nejnižší rychlostí částic. Nízká kinetická energie částicím již neumožní oxidy rozbít, a tak nemůže vzniknout dobře kohezní povlak.

Opačně na tom z hlediska kinetické energie je poslední zkoumaný bod, a sice +1,+1. V tomto případě mají částice vlivem vysokého tlaku ve spalovací komoře nejvyšší rychlost což v kombinaci s krátkou vzdáleností, na které částice zpomalí jen mírně znamená, že jejich dopadová energie bude enormní. Výsledkem je, že jsou částice velmi silně protvářené a zpevněné, a to až do takové míry, že se mohou začít objevovat praskliny. Jejich přítomnost má pak významný dopad na horší soudržnost povlaku, a tedy na pokles velikosti hlavní složky řezné síly.



Graf 16 Vývoj velikosti  $F_c$  se změnou PrP a PrK (při  $MnP = 0$  a  $Vzd = -1$ )

V situaci s větší aplikační vzdáleností (+1) se chování modelu zcela obrátí, jak je patrné ze srovnání grafů 16 a 17. Tuto skutečnost lze s ohledem na výše popisované rohové body odůvodnit následovně.

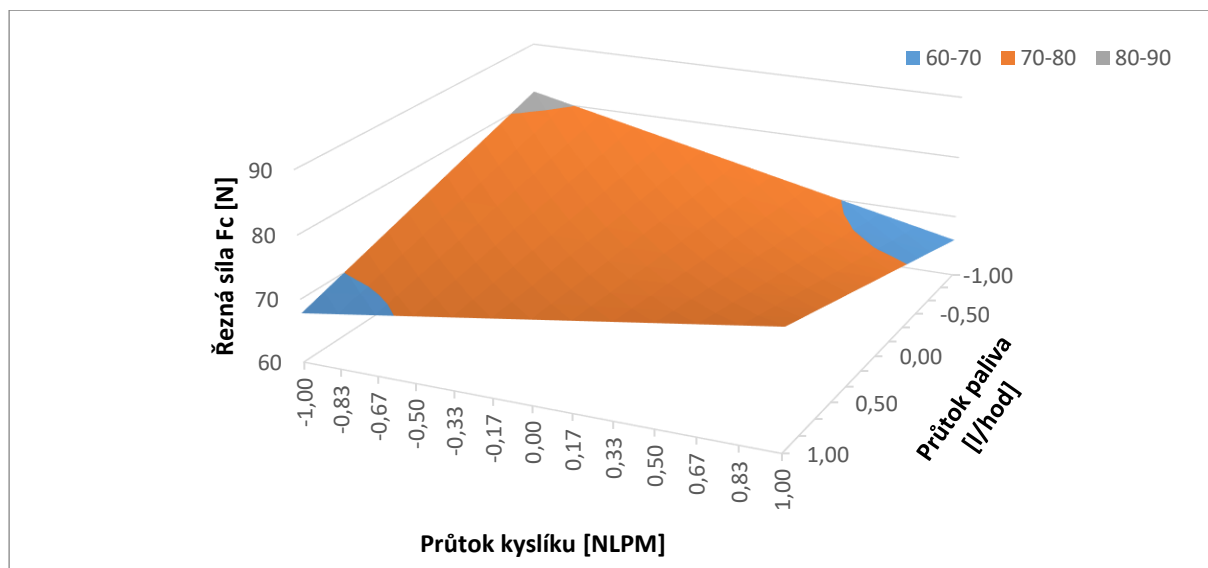
Bod +1,-1 vykazuje nyní nejnižší hodnotu  $F_c$ , což v tomto případě lze připsat delší dráze částic (takže společně s větší vzdáleností také delší době letu) v kombinaci se silně oxidačním plamenem. Výsledkem této kombinace podmínek je, že částice za letu zoxidují a nevznikne mezi nimi dostatečně soudržné spojení.

Na opačné straně (tedy bod -1,+1) je síla  $F_c$  také velmi malá, ovšem zde je nejspíše důvodem příliš nízká teplota částic a jen střední rychlost, která na delší vzdálenosti klesá. Výsledkem je, že se částice navzájem nezaklesnou dostatečně.

Mohlo by se zdát, že obdobný výsledek by měl nastat i v bodě -1,-1, ovšem zde je důležité, že ekvivalentní poměr mezi body -1,+1 a -1,-1 klesne z 0,925 na 0,8, neboli teplota plamene vzroste. Rychlost sice působením nižšího tlaku poklesne, ovšem nárůst teploty umožní částicím zachovat si plastický stav po delší dobu, a tak jsou ještě při dopadu schopné se úspěšně deformovat a tvořit kohezní povlak.

Posledním bodem, který je nutné pospat k objasnění chování modelu změny síly  $F_c$ , potažmo i  $F_f$ , je bod +1,+1. V případě krátké aplikační vzdálenosti docházelo za těchto podmínek k příliš velké deformaci částic a k jejich popraskání k čemuž již nadále nedochází. Důvodem je právě větší vzdálenost, na které částice ztratí část své rychlosti, a tudíž nebude jejich dopadová energie již tak vysoká. Částice se zdeformují a úspěšně zachytí, ovšem již nedojde k vzniku prasklin, a tak není koheze vrstvy ohrožena.





Graf 17 Vývoj velikosti  $F_c$  se změnou PrP a PrK (při  $MnP = 0$  a  $Vzd = +1$ )

#### 7.1.4 Vyhodnocení posuvové síly

Regresní funkce pro posuvovou sílu má velmi podobný tvar i průběh, jako právě popsaná hlavní složka řezné síly. Vzhledem k tomu, že obě tyto síly působí v rámci obráběného povlaku (na rozdíl od  $F_p$ , která z něj vystupuje), budou příčiny jejich chování pravděpodobně stejné – tedy převážně soudržnost nástřiku. Všechny analýzy proběhly opět úspěšně (viz podklady v příloze 7) a získaný model objasňuje 71,4 % variability dat. Zmíněná podobnost chování je patrná z obou tvarů regresní funkce pro  $F_f$  a  $F_c$ .

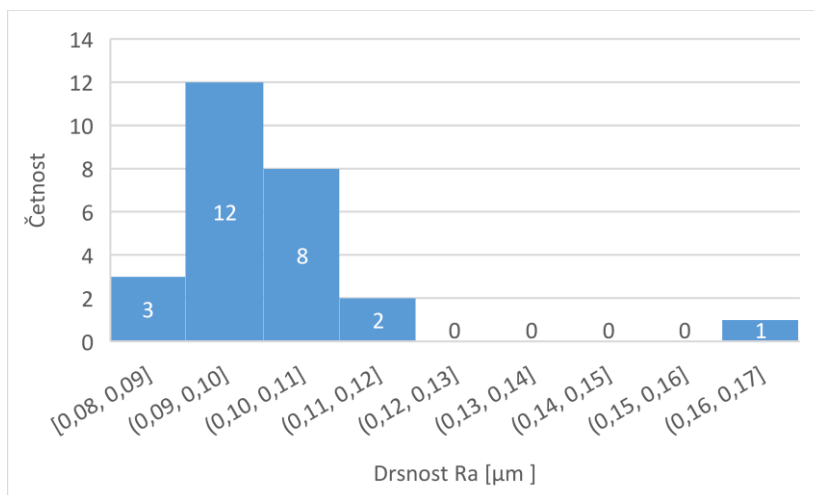
$$\hat{y} = 46.884 + 12.974 \cdot x_1^2 + 5.457 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 4.426 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$\begin{aligned} F_f = & 27402.405 + 1.408 \cdot PrK \cdot PrP - 29.562 \cdot PrK - 1266.958 \cdot PrP - 73.960 \cdot Vzd - \\ & -706.309 \cdot MnP + 1.859 \cdot MnP \cdot Vzd + 7.779 \cdot 10^{-2} \cdot PrK \cdot Vzd + 3.334 \cdot PrP \cdot Vzd + \\ & + 5.189 \cdot 10^{-3} \cdot Vzd^2 + 0.785 \cdot MnP \cdot PrK + 33.634 \cdot MnP \cdot PrP - 3.737 \cdot 10^{-2} \cdot MnP \cdot PrK \cdot PrP - \\ & - 2.065 \cdot 10^{-3} \cdot MnP \cdot PrK \cdot Vzd - 8.851 \cdot 10^{-2} \cdot MnP \cdot PrP \cdot Vzd - 3.705 \cdot 10^{-3} \cdot PrK \cdot PrP \cdot Vzd + \\ & + 9.834 \cdot 10^{-5} \cdot MnP \cdot PrP \cdot PrK \cdot Vzd \end{aligned}$$

S ohledem na průběh všech výše popsaných modelů lze tvrdit, že nulové podmínky jsou tedy s největší pravděpodobností nastavené na optimální hodnotu z hlediska homogenity nástřiku (minimalizace množství pórů, oxidů a nenatavených částic), jeho soudržnosti a zbytkového napětí, načež se i nástřik jeví jako dobře obrobitelný.

#### 7.1.5 Vyhodnocení dosahované drsnosti

Drsnost obrobené plochy měla průměrnou hodnotu napříč všemi vzorky  $Ra$  0,1  $\mu m$  s rozpětím od 0,08 po 0,17  $\mu m$ , přičemž hodnota 0,17 se vyskytla pouze u jednoho vzorku, kdy byla skutečná hloubka řezu z neznámého důvodu nižší (0,075 mm namísto 0,1 mm) a řez nedosáhl pod úroveň všech povrchových nerovností. Dna některých údolí z původního povrchu tedy přetrvala a jejich přítomnost vedla k nárůstu drsnosti. Jak ukazuje histogram níže (graf 18), naprostá většina hodnot se pohybovala v rozmezí  $Ra$  0,10  $\pm$  0,02  $\mu m$ .

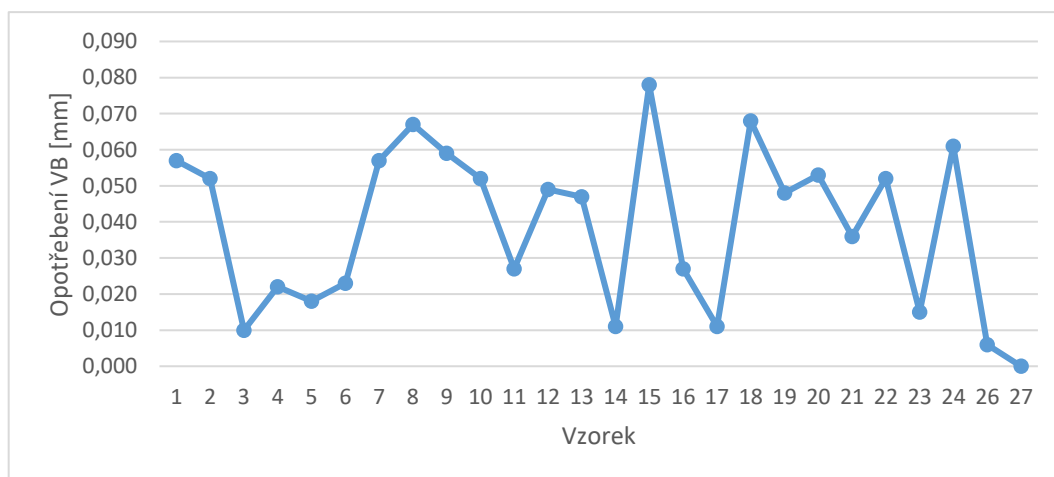


**Graf 18 Histogram drsnosti po obrobení nástřiku**

Z hlediska statistického vyhodnocení nebyl nalezen významný vztah mezi parametry žárového stříkání a drsností obrobené plochy (ani z hlediska Ra, ani Rz). Zároveň i velmi úzké rozpětí hodnot dosahované drsnosti ukazuje na odolnost použité technologie obrábění vůči variaci obráběného povlaku, a tedy širší možnou oblast využití této strategie obrábění. Navíc nejen že byla dosahovaná drsnost vždy lepší, než jaká byla kritériální hodnota při vývoji této technologie (požadavek byl na Ra 0,2 a lepší), ale výsledná drsnost několikanásobně předčila drsnosti běžně dosahované při broušení žárového nástřiku NiCrBSi, kdy se hodnota Ra nejčastěji pohybuje mezi 0,4 a 0,6  $\mu\text{m}$ .

### 7.1.6 Vyhodnocení opotřebení břitu nástroje

Z hlediska opotřebení rovněž nebyla nalezena žádná významná přímá vazba na podmínky žárového stříkání. Za povšimnutí však stojí, že nejnižšího opotřebení (VB) bylo dosaženo při obrábění vzorků č. 26 a 27 – tedy vzorků nastříkaných při nulových (standardních) podmínkách (viz graf 19), což opět ukazuje na jejich výhodnost z hlediska obrobitelnosti.



**Graf 19 Opotřebení VB po obrábění jednotlivých vzorků**

## 7.2 Strukturální rovnice

Doposud byly vyhodnocovány pouze vztahy přímo navázané na podmínky žárového stříkání. Ty budou nyní s využitím strukturálního modelu rozšířeny o další měřené vlivy. Statistická analýza strukturálního modelu posuzuje na základě hypotetického modelu, který reprezentuje předpokládané vztahy mezi proměnnými, jeho shodu s experimentálně získanými údaji. V rámci modelu lze rozlišovat více druhů proměnných. První jsou přímo měřené proměnné (v obdélníkovém rámečku), druhé jsou myšlené proměnné (v elipse, zakládají se na přímo měřených proměnných) a poslední jsou chyby (v kroužku), které nejsou přímo měřené, ale systém s nimi dokáže uvažovat. Šipky mezi prvky pak vyjadřují očekávaný vztah a směr působení.

Po shrnutí všech naměřených dat byl tedy navržen strukturální model předpokládaného chování vztahu nástřik – obrobiteľnosť, avšak nyní také se zahrnutím řady dalších okolních činitelů, jejichž hodnoty byly v průběhu celého experimentu sledovány. Výsledný model je zobrazen na obrázku 74. Obdobně jako u regresního modelu získaného podle DoE musí i strukturální model obstát z hlediska ověřovacích kritérií. Postup ověření včetně výsledků je uveden v příloze 8.

Do virtuální skupiny proměnných „Nástřik“ vstupují všechny variované parametry žárového stříkání, ke kterým je přidána nově proměnná „Rund“ reprezentující počet přejezdů k dosažení požadované tloušťky nástřiku. Tato proměnná však není nezávislá a je funkcí množství prášku. Druhá virtuální skupina „Teploty“ zaštiťuje teploty motorů stroje odměřované v průběhu experimentu a poslední virtuální proměnná „Obrobiteľnosť“ zahrnuje všechny měřené projevy obrobiteľnosti. V dolní části grafické reprezentace modelu jsou připojené další faktory, u kterých je očekáván vliv na obrobiteľnosť. Zároveň je brán v úvahu vzájemný vliv znaků obrobiteľnosti.

Z výsledků analýzy strukturálního modelu (příloha 8) je patrné, že navržený model je vhodný a odpovídá skutečnému chování procesu, respektive proces odpovídá chování modelu. Vliv všech předem definovaných vztahů je uveden v tabulce 17, kde nejdůležitější je hodnota  $p$ , která určuje, jestli je nebo není vztah statisticky významný ( $p < 0,05$  – vztah je statisticky významný) a pak také hodnota „Estimate“, která vyjadřuje míru působení vztahu.

*Pozn.: Označení proměnných na obrázku 74 je udáváno ve zkratkách, jejichž význam lze dohledat v následující tabulce.*

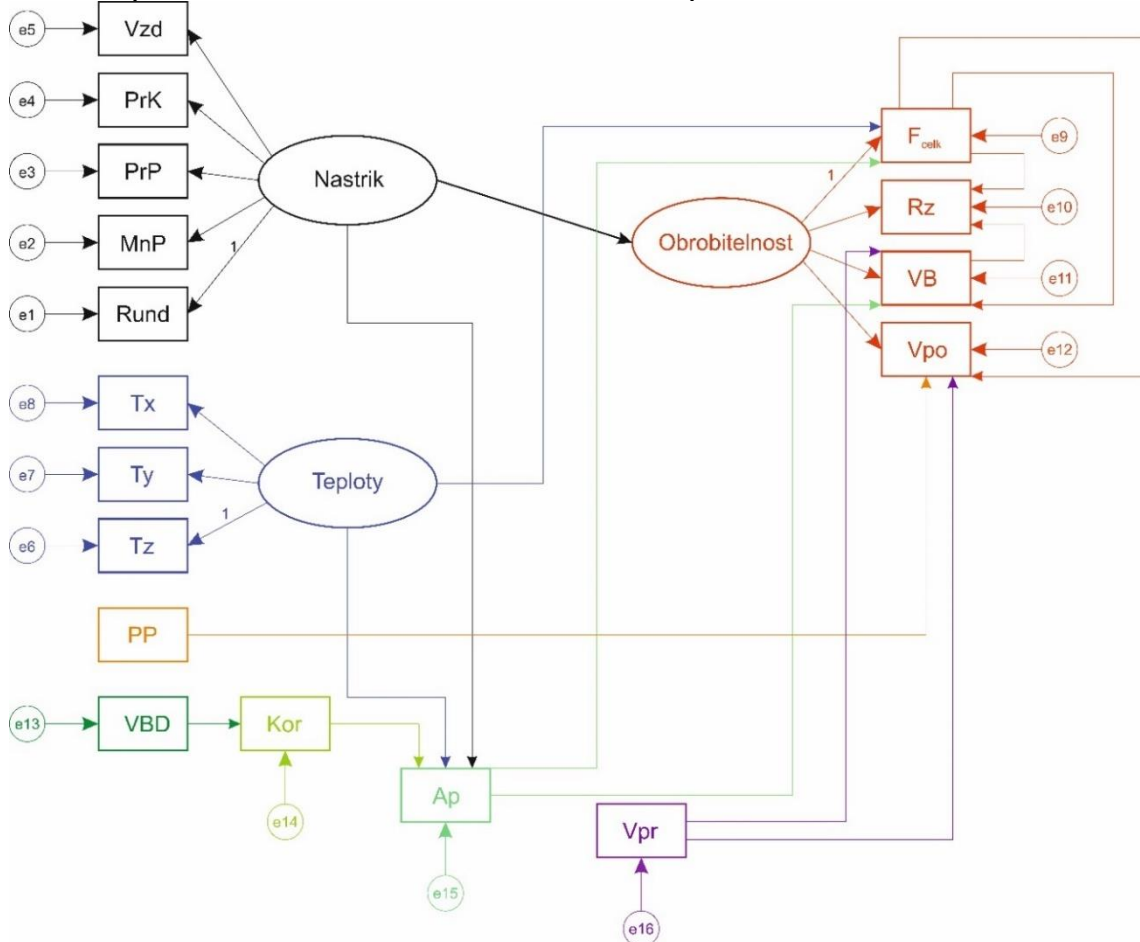
**Tabulka 16 Zkratky ve strukturálním modelu**

Vzd	Aplikační vzdálenost	VBD	Rozměr VBD
PrK	Průtok kyslíku	Kor	Korekce
PrP	Průtok paliva	Vpr	Válcovitost před experimentem
MnP	Množství prášku	Dpr	Průměr před experimentem
Rund	Počet přejezdů	Ap	Skutečná hloubka řezu
Tx	Teplota x	Fcelk	Celková řezná síla
Ty	Teplota y	Rz	Drsnost Rz
Tz	Teplota z	VB	Opotřebenění VB
PP	Přítlak protivřetena	Vpo	Válcovitost po experimentu

Z hodnot ve zmíněné tabulce 17 je patrné, že hned první navržený vztah se prokázal jako statisticky významný. Korekce nástroje vyplývající ze zaměření destičky měla prokazatelný vliv na skutečnou hloubku řezu. Rovněž hloubku řezu ovlivnily vlastnosti nástřiku, kde se dá předpokládat vliv odlišné tvrdosti nástřiku, a tudíž jiné odtlačení. Naopak teplota stroje se ve vztahu k hloubce řezu neprokázala jako významná, jelikož dilatace byla

nepoměrně menší. Zdaleka nejsilnější vztah ze všech měla velikost řezné síly a hloubka řezu. Toto chování bylo očekávané, neboť hloubka řezu je jedna ze základních řezných podmínek a významně ovlivňuje průřez odřezávané vrstvy. Řeznou sílu rovněž prokazatelně ovlivnily teploty, což by se dalo vysvětlit tepelnou dilatací ve směru hloubky řezu. Změna, kterou způsobila dilatace byla tak malá, že nebyla při měření průměru (po obrobení) mikrometrem zaznamenatelná, takže se její vliv na skutečnou  $a_p$  neukázal, avšak vzhledem k velkému vlivu hloubky řezu se stále mohla promítnout do řezné síly. Její vliv však nedosahuje ani jednoho procenta vlivu hloubky řezu samotné. Skutečná  $a_p$  společně s řeznou silou měly pak prokazatelný vliv na opotřebení. Zatímco s rostoucí  $F_{celk}$  opotřebení rostlo, což je očekávatelná změna, s nárůstem hloubky řezu klesalo (viz záporné znaménko hodnoty „Estimate“ u  $A_p$ ). Tento pokles byl nejspíš výsledkem poklesu přetvárného odporu se zvýšením tloušťky odřezávané vrstvy.

Souhrnné nepozorované proměnné nebudou ve vztahu na své vnitřní činitele rozebírané. Jejich vnitřní vazby jsou nepopíratelné, pouze vlivy se nemusí promítnout jako významné. To, jak ovlivňují parametry nástřiku jeho vlastnosti, bylo popsáno v předchozích kapitolách a předmětem této kapitoly je zkoumat proces jako celek. Nově se totiž také potvrzuje, že samotné znaky obrobitelnosti se navzájem ovlivňují. Především se jedná o vliv řezné síly na drsnost, který lze vztáhnout k výše zmíněnému vytrhávání částic při obrábění žárových nástřiků. Pozoruhodné je, že úměra mezi zmíněnými dvěma faktory je nepřímá, což ukazuje, že větší silové působení drsnost snižuje. Vysvětlit to lze skrze větší terciální plastickou deformaci, která uzavírá póry a zahlašuje údolí. Posledním prokázaným vlivem byl vztah válcovitosti před a po obrobení. Ten lze vysvětlit různou hloubkou řezu způsobenou válcovitostí po stříkání v kombinaci s měnící se tuhostí při obrábění.



Obrázek 74 Navržený strukturální model

Tabulka 17 Výsledky významnosti jednotlivých vztahů

Relationship		Estimate	Std. Estimate	Std. error	t – statistic	p – value	
Ap	<---	Kor	-0,298	-0,618	0,077	-3,862	0,000*
Ap	<---	Teploty	0,000	0,016	0,002	0,153	0,878
Ap	<---	Nastrik	0,002	0,131	0,001	2,172	0,030*
Kor	<---	VBD	0,666	0,410	0,225	2,968	0,003*
Fcelk	<---	Ap	1865,011	0,611	349,498	5,336	0,000*
Fcelk	<---	Teploty	11,204	0,253	4,753	2,357	0,018*
VB	<---	Vpr	0,000	-0,118	0,001	-0,524	0,600
VB	<---	Ap	-0,865	-0,388	0,617	-1,401	0,031*
VB	<---	Fcelk	0,000	0,514	0,000	1,530	0,026*
Rund	<---	Nastrik	1,000	0,333	0,254	3,615	0,042*
MnP	<---	Nastrik	32,839	0,218	56,088	0,585	0,558
PrP	<---	Nastrik	0,360	0,182	0,161	2,237	0,025*
PrK	<---	Nastrik	-0,544	-0,007	2,609	-0,209	0,835
Vzd	<---	Nastrik	0,835	0,013	2,498	4,335	0,038*
Tz	<---	Teploty	1,000	0,689	2,231	5,692	0,000*
Ty	<---	Teploty	3,009	0,855	0,541	5,559	0,000*
Tx	<---	Teploty	4,024	0,850	0,681	5,911	0,000*
Rz	<---	Obrobitelnost	0,022	0,779	0,008	2,698	0,007*
Vpo	<---	Obrobitelnost	-0,389	-0,892	0,136	-2,858	0,004*
Fcelk	<---	Obrobitelnost	1,000	0,368	0,111	3,574	0,002*
VB	<---	Obrobitelnost	0,000	0,025	0,000	0,100	0,920
Vpo	<---	PP	1,441	0,030	6,297	0,229	0,819
Rz	<---	Fcelk	-0,006	-0,538	0,002	-2,456	0,014*
Vpo	<---	Fcelk	0,055	0,340	0,038	1,432	0,152
Rz	<---	VB	0,450	0,031	2,236	0,201	0,841
Vpo	<---	Vpr	-0,213	-0,310	0,106	-2,022	0,043*
<b>Obrobitelnost</b>	<---	<b>Nastrik</b>	<b>2,595</b>	<b>0,248</b>	<b>1,523</b>	<b>1,704</b>	<b>0,048*</b>

Celou analýzu strukturálního modelu uzavírá vztah nástřik → obrobitelnost, který je popsán v posledním řádku tabulky 17. Stejně jako výsledky vyhodnocení plánovaného experimentu, i strukturální rovnice ukazuje na signifikantní vliv nástřiku na obrobitelnost (především na celkovou řeznou sílu). Nižší hodnota „Estimate“ a vyšší hodnota ukazatele významnosti  $p$  však naznačují, že strukturální model, který bere v potaz i faktory mimo plánovaný experiment, odhalil další významné činitele ovlivňující obrobitelnost. Zejména mezi ně spadá skutečná hloubka řezu. Na přítomnost dalších důležitých činitelů nepřímo ukázala již regresní funkce pro celkovou řeznou sílu získaná z vyhodnocení plánovaného experimentu, a to konkrétně hodnotou absolutního členu. Oba tyto výsledky naznačují, že ačkoliv má obráběný materiál nezanedbatelný vliv na obrobitelnost, existují i další faktory, které ji mohou ovlivnit víc (např.: řezné podmínky, použitý nástroj, jeho materiál a geometrie atd.). Analýza strukturálního modelu také ukazuje, které nedefinovatelné faktory by bylo vhodné dále řešit a které jsou naopak zcela pod kontrolou. Výsledky ukazují hlavně na přetrvávající vliv teploty (tepelné dilatace) stroje a také na vliv skutečné hloubky řezu, přičemž obojí by mělo být řešitelné průběžnou korekcí polohy nástroje. Naopak vliv přítlaku protivřetená nebyl statisticky významný a tento faktor byl pod kontrolou.

## 8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo prozkoumat vliv hlavních parametrů tvorby žárového nástřiku NiCrBSi metodou vysokorychlostního nástřiku plamenem na jeho obrobiteľnosť. Poznatky z hlediska volby technologie obrábění byly převzaté z předcházejícího výzkumu na Západočeské Univerzitě. Na podnět některých z těchto poznatků byl jako doplňující cíl práce stanoven průzkum nedefinovatelných faktorů působících na řezný proces. Oba zmíněné cíle byly v rámci zpracování práce úspěšně splněné. Praktickou část práce předcházela teoretická, převážně rešeršní, část řešící základy žárového stříkání, parametry stříkání metodou vysokorychlostního nástřiku plamenem a jejich vliv na vlastnosti povlaku, nástřikové slitiny a niklové slitiny obecně, jejich vlastnosti a jejich obrobiteľnosť a v neposlední řadě také problematiku obrábění žárových nástřiků.

V otázce vedlejších činitelů ovlivňujících proces obrábění byly prozkoumány: opakovatelnost najetí stroje a jeho teplotní dilatace, přítlak protivřetena, tvar a opakované vložení vyměnitelné břitové destičky a také profil žárového nástřiku. Při měření opakovatelnosti najetí se ukázalo, že stroj je schopen danou polohu (měřeno pouze ve směru osy X, neboť ta ovlivňuje při podélném soustružení skutečnou hloubku řezu) dosáhnout s přesností na 1  $\mu\text{m}$ , a to nezávisle na teplotě servopohonu. Současně s opakovatelností byla měřena teplotní dilatace, kde výsledek prokázal trend rostoucí s teplotou motoru. Naměřená odchylka byla cca 4  $\mu\text{m}$  ve směru do osy při ohřátí ze 40 na 45 °C. Posledním zkoumaných vlivem na straně stroje byla síla přítlaku protivřetena. Tu nebylo možné přímo měřit, ale její hodnota byla udržována „neměnná“ na základě jednotného nastavení motorového proudu. Jeho hodnota byla v průběhu hlavního experimentu udržována mezi 2 – 2,5 A. Při pohledu na profil žárového nástřiku nebyl nalezen žádný trend společný pro všechny vzorky. Nejvíce do profilu zasáhla kuželovitost vzorků před stříkáním, která se promítla i do samotného nástřiku a dále byly patrné pouze stochastické nerovnosti. Poslední dva zkoumané faktory se týkaly vyměnitelné břitové destičky. Byly změřeny její největší rozměry (vzdálenost rovnoběžných ostří) s myšlenkou, že by na základě těchto informací mohlo být možné korigovat nástroj při výměně VBD. Velikost destiček o jmenovitém rozměru 12,7 mm se pohyboval v rozmezí  $12,69_{-0,015}^{+0,026}$ . Při zkoušení opakovatelnosti vložení VBD do lůžka držáku se však ukázalo, že ani upínací díra není v očekávané pozici, a proto každá destička po utažení do lůžka zapadla trochu jinak. Kompenzace proměnlivého rozměru VBD tedy nebyla na základě naměřených velikostí možná a každá destička musela být v průběhu hlavního experimentu ručně zaměřena přímo ve stroji. Samotná opakovatelnost vložení jedné VBD ve stejné orientaci pak byla velice dobrá – průměrná odchylka v rámci tří testovacích vložení byla 4  $\mu\text{m}$ . Výsledkem těchto vedlejších experimentů bylo buďto prokázání zanedbatelného vlivu daného činitele (jako u opakovatelnosti najetí), nebo navržení způsobu, jak jeho vliv minimalizovat.

V rámci hlavního experimentu byly zvoleny parametry žárového stříkání, u kterých byl očekávaný velký vliv na vlastnosti nástřiku a byly navrženy rozsahy jejich změny. Po výrobě polotovarů a jejich změření mohlo být zahájeno žárové stříkání. To bylo následováno další sérií měření, než se mohlo přistoupit k samotnému experimentu.

Na základě jeho provedení a vyhodnocení naměřených veličin z hlediska jejich vazby na podmínky žárového stříkání byly získány regresní modely chování jednotlivých složek řezných sil a celkové řezné síly. Jako nejvýznamnější vstupní parametr se ve všech případech ukázala aplikační vzdálenost, která se vždy chovala symetricky vzhledem k nulové úrovni podmínek. Na druhém místě pak vystupovalo množství prášku, respektive množství paliva a kyslíku. Regresní funkce pro pasivní sílu  $F_p$  byla vždy ze všech složek řezné síly největší, a proto se nejvíce podobala vztahu popisujícímu celkovou řeznou sílu  $F_{\text{celk}}$ . U obou těchto sil byl druhý nejdůležitější parametr množství prášku a zbylé proměnné byly statisticky



nevýznamné. Zbývající dvě síly ( $F_c$  a  $F_f$ ) si z hlediska jejich chování byly opět velice podobné a jako druhý nejdůležitější faktor u nich vystupoval průtok paliva a kyslíku s tím rozdílem, že minoritní vliv mělo i množství prášku. Z hlediska drsnosti, ani opotřebením nebyl nalezen přímý vztah mezi vstupními parametry a výslednými hodnotami, avšak záležitost drsnosti lze uzavřít s tím, že u všech pokusů byla dosahovaná velmi dobrá hodnota (kolem  $R_a 0,1 \mu\text{m}$ ) a její variabilita byla malá.

Obrobitelnost nástřiku NiCrBSi tedy ovlivnily všechny testované parametry žárového stříkání, a to zejména z hlediska velikosti řezných sil. V případě celkové řezné síly a její majoritní složky  $F_p$  se standardní podmínky (úroveň 0) ukázaly jako optimální (síly byly nejmenší). Avšak úpravou složení palivové směsi tak, aby byl zachován ekvivalentní poměr, ale vzrostl tlak ve spalovací komoře, by mělo být možné ještě snížit velikost sil  $F_c$  a  $F_f$ . Musel by však být důkladně sledován vliv této změny na strukturu a soudržnost nástřiku, aby nedošlo ke ztrátě jeho mechanických vlastností. Zdá se totiž, že s ohledem na ně je proces v aktuálním standardním stavu dobře optimalizován a jejich degradace by nemusela být vykoupena mírným poklesem řezné síly.

Analýza navrženého strukturálního modelu potvrdila vliv parametrů nástřiku, nicméně ukázala také, že některé faktory mimo žárové stříkání rovněž značně ovlivnily obrobitelnost. Tento výsledek však není znevažující, ale pouze potvrzuje, že obrobitelnost je komplexní vlastnost vycházející nejen z obráběného materiálu, ale také z použitých řezných podmínek a vlastností soustavy SNOP.

Dalším nabízejícím se krokem při zkoumání vlivu parametrů žárového stříkání na vlastnosti nástřiku by mohlo být prozkoumání chování procesu a vlastností nástřiku s využitím nad-stechiometrické palivové směsi (směs bohatá na palivo). Taková směs nemohla být v této práci otestována, ovšem výsledky by mohly být zajímavé, jelikož by se s přechodem od oxidačního k redukčnímu plamenu měl razantně snížit podíl oxidů. Dále by bylo vhodné změřit zbytkové napětí a obecně materiálové charakteristiky napříč všemi obrobenými vzorky, aby bylo možné sledovat jejich vývoj se změnou parametrů žárového stříkání. Z hlediska procesu experimentálního obrábění by pak bylo záhodno pro využívaný stroj navrhnout způsob rychlého a přesného zaměrování břitu nástroje v ose X. Optická metoda, která byla nově v této práci využita není pro tuto aplikaci nejvhodnější a spoléhá na osobní úsudek. Vhodnějším řešením by mohlo být využití přípravku s úchylkoměrem, který by se kotvil na stejnou plochu, jako optické zařízení, avšak poloha ostří by byla reprezentována číselně.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] KUBÍČEK, Jaroslav. Renovace a povrchové úpravy - žárové nástřiky. In: . B.m.
- [2] *Použité technologie | PLASMAMETAL, spol. s r.o.* [online]. [vid. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie#zakladni-metody>
- [3] COATINGS, A&A. The History of Thermal Spray in a Nutshell | A&A Thermal Spray Coatings. *A&A Coatings* [online]. 21. březen 2018 [vid. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.thermalspray.com/the-history-of-thermal-spray-in-a-nutshell/>
- [4] *History and Evolution of Thermal Spray Coatings*. B.m.: APS Materials inc.
- [5] SIEGMANN, Stephan a Christoph ABERT. 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2013, **220**, 3–13 [vid. 2022-12-09]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2012.10.034
- [6] VARACALLE, D. J., M. G. ORTIZ, C. S. MILLER, T. J. STEEPER, A. J. ROTOLICO, J. NERZ a W. L. RLGGS. HVOF Combustion spraying of inconel powder. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 1993, **2**(2), 151–158 [vid. 2022-11-08]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/BF02652023
- [7] Žárové nástřiky. *VZÚ Plzeň* [online]. [vid. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.vzuplzen.cz/sluzby/zarove-nastriky/>
- [8] *TRIBO Engineering, s.r.o. | Nástřik plamenem* [online]. [vid. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/nastrik-plamenem.html>
- [9] SPRAVCA1. *Technologie žárových nástřiků* [online]. [vid. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3864-technologie-zarovych-nastriku>
- [10] LÍBAL, Martin. *Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem*. Plzeň, 2013. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] KOSINOVÁ, Pavla. *Aplikace technologií žárového nástřiku v oblasti zvyšování životnosti a spolehlivosti u namáhaných součástí silničních vozidel*. B.m., 2010. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [12] CHECH TAN, Jit. *Optimisation of the HVOF Thermal Spray Process For Coating, Forming and Repair of Components*. Dublin, 1997. School of Mechanical & Manufacturing Engineering.
- [13] YIN, Shuo, Pasquale CAVALIERE, Barry ALDWELL, Richard JENKINS, Hanlin LIAO, Wenya LI a Rocco LUPOI. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**, 628–650 [vid. 2021-04-18]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.04.017

- [14] VALAREZO, Alfredo, Wanhuk B. CHOI, Weiguang CHI, Andrew GOULDSTONE a Sanjay SAMPATH. Process Control and Characterization of NiCr Coatings by HVOF-DJ2700 System: A Process Map Approach. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2010, **19**(5), 852–865 [vid. 2022-11-15]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-010-9492-1
- [15] RUIZ-LUNA, H., D. LOZANO-MANDUJANO, J. M. ALVARADO-OROZCO, A. VALAREZO, C. A. POBLANO-SALAS, L. G. TRÁPAGA-MARTÍNEZ, F. J. ESPINOZA-BELTRÁN a J. MUÑOZ-SALDAÑA. Effect of HVOF Processing Parameters on the Properties of NiCoCrAlY Coatings by Design of Experiments. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2014, **23**(6), 950–961 [vid. 2022-11-11]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-014-0121-2
- [16] OKSA, M. a J. METSÄJOKI. Optimizing NiCr and FeCr HVOF Coating Structures for High Temperature Corrosion Protection Applications. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2015, **24**(3), 436–453 [vid. 2022-11-08]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-014-0192-0
- [17] SAAEDI, J., T. W. COYLE, H. ARABI, S. MIRDAMADI a J. MOSTAGHIMI. Effects of HVOF Process Parameters on the Properties of Ni-Cr Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2010, **19**(3), 521–530 [vid. 2021-04-17]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-009-9464-5
- [18] GIL, L. E. a M. H. STAIA. Effects of HVOF Parameters on Adhesion and Microstructure of Thermal Sprayed NiWCrBSi Coatings. *Surface Engineering* [online]. 2002, **18**(4), 309–315 [vid. 2022-11-11]. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/026708401225005377
- [19] LI, Chang, Xing GAO, Dacheng ZHANG, Hexin GAO, Xing HAN a Baogui ZHANG. Numerical Investigation on the Flame Characteristics and Particle Behaviors in a HVOF Spray Process Using Kerosene as Fuel. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2021, **30**(3), 725–738 [vid. 2023-01-09]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-021-01165-3
- [20] ENŽL, Radek. *Vysokorychlostní nástřík povlaků na bázi karbidu wolframu*. Plzeň, 2001. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [21] VALEAN, Petru Cristian, Dragos PASCAL, Norbert KAZAMER a Roxana MUNTEAN. Characteristics of Thermally Sprayed Nicrbsi Coatings before and after Electromagnetic Induction Remelting Process. *Acta Polytechnica Hungarica* [online]. 2019, **16**(3) [vid. 2023-01-16]. ISSN 17858860. Dostupné z: doi:10.12700/APH.16.3.2019.3.1
- [22] BUYTOZ, Soner, Mustafa ULUTAN, Serkan ISLAK, Bülent KURT a O. NURI ÇELİK. Microstructural and Wear Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed NiCrBSi–SiC Composite Coating on SAE 1030 Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering* [online]. 2013, **38**(6), 1481–1491 [vid. 2021-04-17]. ISSN 1319-8025, 2191-4281. Dostupné z: doi:10.1007/s13369-013-0536-y

- [23] YAO, S. H. Tribological behaviour of NiCrBSi–WC(Co) coatings. *Materials Research Innovations* [online]. 2014, **18**(sup2), S2-332-S2-337 [vid. 2021-05-10]. ISSN 1432-8917, 1433-075X. Dostupné z: doi:10.1179/1432891714Z.000000000436
- [24] YANG, X., J. ZHANG a G. LI. Cavitation erosion behaviour and mechanism of HVOF-sprayed NiCrBSi–(Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr) composite coatings. *Surface Engineering* [online]. 2018, **34**(3), 211–219 [vid. 2021-04-17]. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1080/02670844.2016.1258770
- [25] VERDIAN, M. M. Characterisation and corrosion performance of HVOF sprayed Ni–10 wt-%Ti coatings. *Surface Engineering* [online]. 2014, **30**(9), 670–674 [vid. 2021-05-10]. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/1743294414Y.0000000310
- [26] VERDIAN, M. M., M. SALEHI a K. RAEISSI. Microstructure formation and properties of HVOF sprayed NiTi coatings prepared from amorphous/nanocrystalline NiTi powders. *Surface Engineering* [online]. 2010, **26**(6), 491–496 [vid. 2021-05-10]. ISSN 0267-0844, 1743-2944. Dostupné z: doi:10.1179/026708410X12593178265823
- [27] LIBORIUS, H., A. NESTLER, G. PACZKOWSKI, A. SCHUBERT, T. GRUND a T. LAMPKE. SURFACE INTEGRITY IN TURNING OF FE17CR2NI0.2C IRON BASED THERMALLY SPRAYED COATINGS WITH SPECIAL RESPECT TO THE INFLUENCE OF THE FEED. *MM Science Journal* [online]. 2019, **2019**(04), 3220–3227 [vid. 2021-04-17]. ISSN 18031269, 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019\_11\_2019074
- [28] SANDVIK COROMANT, ed. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Sandviken: Sandvik Coromant, 1996. ISBN 978-91-972299-4-4.
- [29] EZUGWU, E. O. a C. I. OKEKE. Behavior of Coated Carbide Tools in High Speed Machining of a Nickel Base Alloy. *Tribology Transactions* [online]. 2002, **45**(1), 122–126 [vid. 2023-01-12]. ISSN 1040-2004. Dostupné z: doi:10.1080/10402000208982530
- [30] HAYNES C 263 Super Alloy. *AZoM.com* [online]. 4. červenec 2013 [vid. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9540>
- [31] EZUGWU, E. O., Z. M. WANG a A. R. MACHADO. Wear of Coated Carbide Tools When Machining Nickel (Inconel 718) and Titanium Base (Ti-6Al-4V) Alloys. *Tribology Transactions* [online]. 2000, **43**(2), 263–268 [vid. 2023-01-12]. ISSN 1040-2004, 1547-397X. Dostupné z: doi:10.1080/10402000008982338
- [32] SANTHANAM, A.T. *Development of an Advanced Carbide Cutting Tool for Nickel-based Alloy Machining*. B.m.: Kennametal Inc. 31. srpen 2006
- [33] FRICKE, Kilian, Richard ZIMMERMANN, Philipp GANSER, Sascha GIERLINGS a Thomas BERGS. Life-Cycle-Assessment for Rough Machining of Inconel 718 Comparing Ceramic to Cemented Carbide End Mills. 2022.

- [34] KHIDHIR, Basim A. a Bashir MOHAMED. Study of cutting speed on surface roughness and chip formation when machining nickel-based alloy. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2010, **24**(5), 1053–1059 [vid. 2022-10-30]. ISSN 1738-494X, 1976-3824. Dostupné z: doi:10.1007/s12206-010-0319-2
- [35] ŘEHOŘ, Jan. *Výzkumná zpráva\_NCKS\_TN0100001508\_OK*. Výzkumná zpráva. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni. nedatováno.
- [36] ZATLOUKAL, Tomas, Jan REHOR, Jaroslava FULEMOVA a Michal POVOLNY. Optimization of the Machining Process of NiCrBSi Thermal Spraying. In: Branko KATALINIC, ed. *DAAAM Proceedings* [online]. 1. vyd. B.m.: DAAAM International Vienna, 2020 [vid. 2023-03-20], s. 0632–0637. ISBN 978-3-902734-29-7. Dostupné z: doi:10.2507/31st.daaam.proceedings.087
- [37] GRZESIK, Wit. Stereometric and kinematic problems occurring during cutting with single-edged tools. *International Journal of Machine Tool Design and Research* [online]. 1986, **26**(4), 443–458 [vid. 2023-03-27]. ISSN 00207357. Dostupné z: doi:10.1016/0020-7357(86)90034-X
- [38] MANOKHIN, A. S., N. E. STAKHNIV a S. A. KLIMENKO. Irregularities of the surface machined by oblique single-edged tools equipped with cBN-based polycrystalline superhard material. *Journal of Superhard Materials* [online]. 2009, **31**(2), 118–125 [vid. 2023-03-27]. ISSN 1063-4576, 1934-9408. Dostupné z: doi:10.3103/S1063457609020099
- [39] MIKOLAJCZYK, Tadeusz, Hubert LATOS, Tomasz PACZKOWSKI, Danil Y. PIMENOV a Tomasz SZYNKA. Innovative tools for oblique cutting. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **22**, 166–171 [vid. 2023-03-27]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.03.026
- [40] ZATLOUKAL, Tomáš. *Moderní metody v obrábění žárových nástřiků*. B.m., nedatováno. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [41] LIBORIUS, Hendrik, Thomas GRUND, Andreas NESTLER, Gerd PACZKOWSKI, Andreas SCHUBERT a Thomas LAMPKE. Influence of the finish-machining by turning and diamond smoothing on the tribological properties of Fe<sub>17</sub>Cr<sub>2</sub>Ni<sub>0.2</sub>C thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2021, **405**, 126731 [vid. 2023-01-12]. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126731
- [42] LIBORIUS, H., G. PACZKOWSKI, A. NESTLER a T. GRUND. Influence of Cutting Speed on the Surface Properties in Turning of Fe<sub>17</sub>Cr<sub>2</sub>Ni<sub>0.2</sub>C Iron Based Thermally Sprayed Coatings, Conference Proceedings. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPETITIVE MANUFACTURING*. 2019, s. 570. ISBN 978-0-7972-1779-9.
- [43] GRUND, T., G. PACZKOWSKI, T. LAMPKE, H. LIBORIUS, A. NESTLER a A. SCHUBERT. Finish Turning of FeCr<sub>17</sub>Ni<sub>2</sub>C<sub>0.2</sub> Iron-based Sprayed Coatings: Influences of Substrate Preparation, Cutting Speed and Feed on the Coating and Surface Properties. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2020, **29**(1–2), 308–318 [vid. 2023-02-04]. ISSN 1059-9630, 1544-1016. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-019-00930-9

- [44] LI, Tie-jun, Chun-yu ZHAO a Yi-min ZHANG. Adaptive real-time model on thermal error of ball screw feed drive systems of CNC machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, **94**(9–12), 3853–3861 [vid. 2022-11-24]. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-1076-5
- [45] XU, Mengtao, Bing CAI, Changyou LI, Hongzhuang ZHANG, Zhendong LIU, David HE a Yimin ZHANG. Dynamic characteristics and reliability analysis of ball screw feed system on a lathe. *Mechanism and Machine Theory* [online]. 2020, **150**, 103890 [vid. 2022-11-24]. ISSN 0094114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.103890
- [46] TSENG, P.-C. a J.-L. HO. A Study of High-Precision CNC Lathe Thermal Errors and Compensation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2002, **19**(11), 850–858 [vid. 2022-11-24]. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s001700200096
- [47] *Norma ČSN ISO 230-3: Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 3: Určení tepelných vlivů*. říjen 2021
- [48] *Praktika experimentálního obrábění* [online]. [vid. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.kto.zcu.cz/cs/Department/Utilities/Praktika/>
- [49] FIALA, Petr. *Žárový nástřik povlaků na bázi karbidu chromu*. Plzeň, 2000. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [50] FULEMOVÁ, Jaroslava a Jan KUTLWAŠER. Měření řezných sil. In: . Cvičení z předmětu KTO/TO. Plzeň.
- [51] FILIPPOV, A.V., A.Y. NIKONOV, V.E. RUBTSOV, A.I. DMITRIEV a S.Yu. TARASOV. Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **246**, 224–234 [vid. 2023-05-06]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030
- [52] MONKA, Peter, Katarina MONKOVA, Milan BALARA, Sergej HLOCH, Jan REHOR, Andrej ANDREJ a Matej SOMSAK. Design and experimental study of turning tools with linear cutting edges and comparison to commercial tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **85**(9–12), 2325–2343 [vid. 2021-05-02]. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8065-3
- [53] POVOLNÝ, Michal a Jaroslava FULEMOVÁ. Opatření řezného nástroje. In: . Cvičení z předmětu KTO/TO. Plzeň.



## **PŘÍLOHA č. 1**

**Data z měření opakovatelnosti najetí a teplotní dilatace osy X**

**Tabulka 1 Data z měření opakovatelnosti najetí a teplotní dilatace osy X**

		Cyklus									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Teplota [°C]		40,2	41,2	42,2	42,7	43,8	44,3	44,9	45,2	46	
Odchyška [μm]	Najetí	1	0	1	2	2	2	2,5	3	3	3
		2	1	2	2	2,5	2,5	3	4	3,5	3,5
		3	1	1,5	2,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4	3,5
		4	1	1,5	2,5	2,5	3	3,5	3,5	4	3,5
		5	1	1,5	2	2,5	3	3	3,5	4	3,5
		6	1	2	2	2	3	3	3,5	4	3
	Průměr	0,833	1,583	2,167	2,333	2,667	3,083	3,500	3,750	3,333	
Rozpětí [μm]		1	1	0,5	0,5	1	1	1	1	0,5	

## **PŘÍLOHA č. 2**

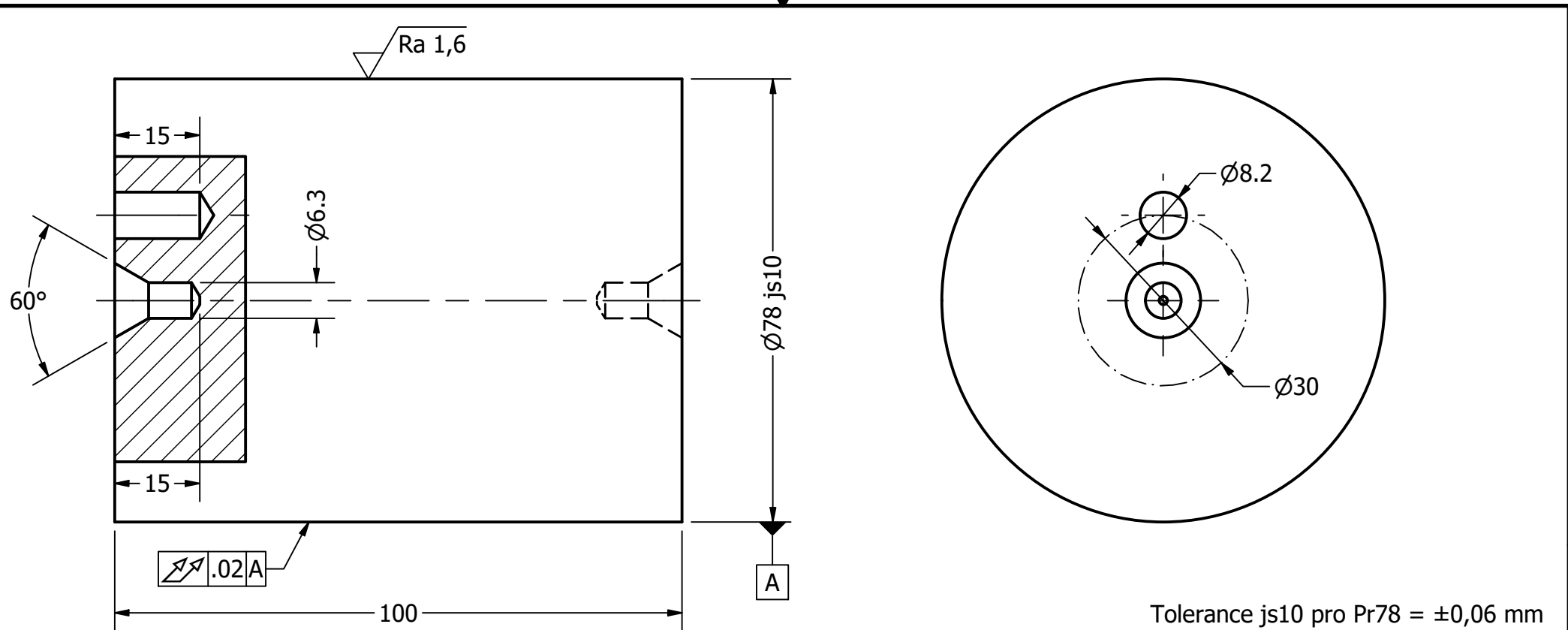
### **Tabulka skutečných rozměrů VBD**

**Tabulka 1 Skutečné rozměry VBD**

<b>Destička</b>	<b>Hrana</b>	<b>Rozměr mikrometrem [mm]</b>	<b>Rozměr profilprojektorem [mm]</b>
1	1-3	12,710	12,708
	2-4	12,686	12,683
2	1-3	12,676	12,674
	2-4	12,688	12,688
3	1-3	12,690	12,692
	2-4	12,707	12,710
4	1-3	12,676	12,677
	2-4	12,695	12,697
5	1-3	12,685	12,684
	2-4	12,705	12,707
6	1-3	12,704	12,700
	2-4	12,681	12,684
7	1-3	12,679	12,682
	2-4	12,716	12,718
8	1-3	12,682	12,681
	2-4	12,680	12,678
9	1-3	12,700	12,700
	2-4	12,675	12,673
<b>Průměr</b>		12,691	12,691

## **PŘÍLOHA č. 3**

### **Výkres polotovaru vzorku**



Tolerance js10 pro Pr78 =  $\pm 0,06$  mm  
 Při obrábění všech kusů zachovat stejné řezné podmínky.

Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 3,83	Tolerování ISO 8015
Materiál - Polotovár ČSN 12 050 - Žárově stříkaná		Promítání 	
Formát A4		Kreslil Jan Mezuliánik	
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Datum 23.11.2022		
	Schválil		
KTO KATEDRA TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	Datum		Název Vzorek Pr80x100
	Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES		Číslo dokumentu DP_1

## **PŘÍLOHA č. 4**

**Tabulka průměrů po nástřiku a přírůstků tloušťky**



**Tabulka 1 Průměr po nástřiku a přírůstek tloušťky**

Vzorek	Průměr [mm]	Tloušťka nástřiku [mm/PLO]	Počet přejezdů	Přírůstek na přejezd [mm/PLO]
1	78,991	0,504	13	0,039
2	78,959	0,493	16	0,031
3	79,086	0,560	13	0,043
4	79,019	0,521	13	0,040
5	79,072	0,542	13	0,042
6	78,957	0,489	18	0,027
7	79,042	0,528	13	0,041
8	79,033	0,528	13	0,041
9	79,013	0,520	14	0,037
10	78,995	0,513	18	0,029
11	79,023	0,533	11	0,048
12	79,023	0,559	14	0,040
13	79,004	0,521	12	0,043
14	78,997	0,518	18	0,029
15	79,090	0,540	12	0,045
16	79,048	0,529	14	0,038
17	78,983	0,502	14	0,036
18	79,056	0,535	13	0,041
19	79,040	0,521	14	0,037
20	78,982	0,498	15	0,033
21	78,997	0,519	15	0,035
22	79,224	0,605	15	0,040
23	78,988	0,500	12	0,042
24	78,977	0,495	16	0,031

## **PŘÍLOHA č. 5**

### **Výsledky analýz statistického vyhodnocení – Fp**

**Tabulka 1 Shrnutí analýzy modelu pro Fp**

Source	Value
RSquare	0,709199
RSquare Adj	0,675217
Root Mean Square Error	17,16416
Mean of Response	164,9638
Observations (or Sum Wgts)	26

**Tabulka 2 Tabulka výsledků analýzy ANOVA – Fp**

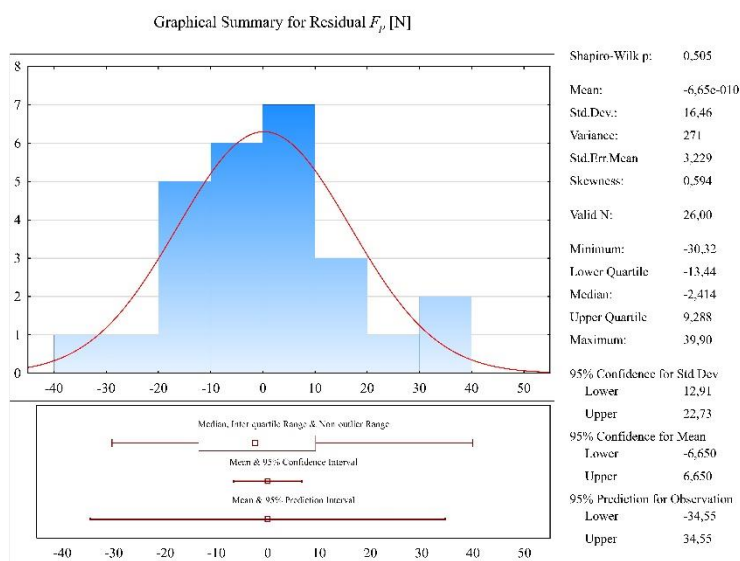
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	p	Prob > F
Model	2	10562,75	5281,37	17,9268	<0,0001
Error	23	6775,993	294,61		
C. Total	25	17338,74			

**Tabulka 3 Tabulka výsledku analýzy nedostatečného přizpůsobení modelu – Fp**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p	Max RSq
Lack Of Fit	6	1525,299	254,216	0,8231	0,5675	0,6972
Pure Error	17	5250,694	308,864			
Total Error	23	6775,993				

**Tabulka 4 Tabulka určení parametrů modelu – Fp**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	p	Lower 95%	Upper 95%
<i>Intercept</i>	131,5721	6,514874	20,2	<0,0001	118,095	145,0491
$x_1 \cdot x_1$	23,0498	9,480534	2,43	0,0232	3,437818	42,66178
$x_4 \cdot x_4$	25,1828	9,480534	2,66	0,0141	5,570818	44,79478



**Obrázek 1 Analýza reziduí – Fp**

## **PŘÍLOHA č. 6**

### **Výsledky analýz statistického vyhodnocení – Fc**

**Tabulka 1 Shrnutí analýzy modelu pro Fc**

Source	Value
RSquare	0,752919
RSquare Adj	0,691954
Root Mean Square Error	9,047327
Mean of Response	83,38758
Observations (or Sum Wgts)	26

**Tabulka 2 Tabulka výsledků analýzy ANOVA – Fc**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	p	Prob > F
Model	3	2227,095	742,365	9,0694	0,0004
Error	22	1800,791	81,854		
C. Total	25	4027,886			

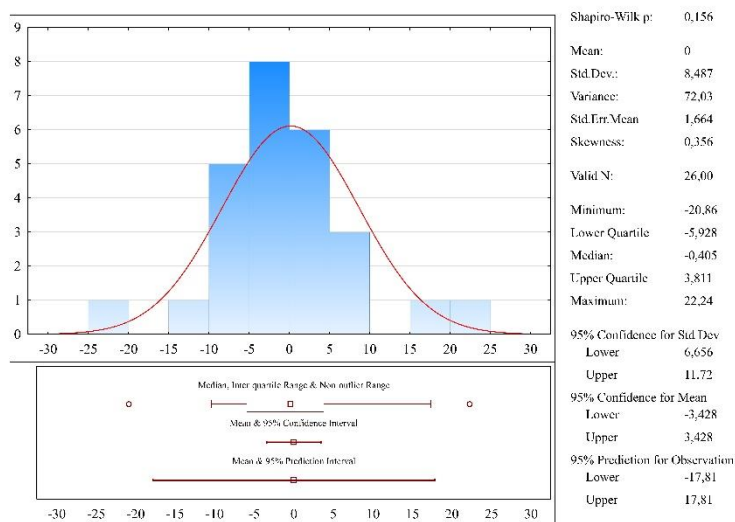
**Tabulka 3 Tabulka výsledku analýzy nedostatečného přizpůsobení modelu – Fc**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p	Max RSq
Lack Of Fit	21	1746,7	83,1762	1,5377	0,571	0,9866
Pure Error	1	54,0904	54,0904			
Total Error	22	1800,791				

**Tabulka 4 Tabulka určení parametrů modelu – Fc**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	p	Lower 95%	Upper 95%
<i>Intercept</i>	73,4585	3,198713	22,97	<0,0001	66,82478	80,09223
$x_1 \cdot x_1$	14,342	3,844375	3,73	0,0012	6,369255	22,31475
$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	6,614375	2,261832	2,92	0,0079	1,923623	11,30513
$x_1 \cdot x_4 \cdot x_2 \cdot x_3$	4,923625	2,261832	2,18	0,0405	0,232873	9,614377

Graphical Summary for Residual Fc [N]



**Obrázek 1 Analýza reziduí – Fc**

## **PŘÍLOHA č. 7**

### **Výsledky analýz statistického vyhodnocení – Ff**

**Tabulka 1 Shrnutí analýzy modelu pro Ff**

Source	Value
RSquare	0,772357
RSquare Adj	0,714042
Root Mean Square Error	7,647699
Mean of Response	55,86581
Observations (or Sum Wgts)	26

**Tabulka 2 Tabulka výsledků analýzy ANOVA – Ff**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	p	Prob > F
Model	3	1722,146	574,049	9,8149	0,0003
Error	22	1286,721	58,487		
C. Total	25	3008,867			

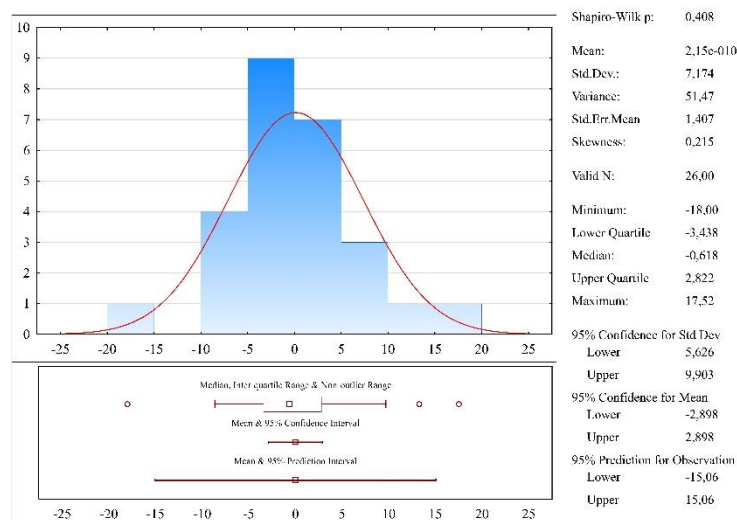
**Tabulka 3 Tabulka výsledku analýzy nedostatečného přizpůsobení modelu – Ff**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p	Max RSq
Lack Of Fit	21	1243,838	59,2304	1,3812	0,5956	0,9857
Pure Error	1	42,8831	42,8831			
Total Error	22	1286,721				

**Tabulka 4 Tabulka určení parametrů modelu – Ff**

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	p	Lower 95%	Upper 95%
<i>Intercept</i>	46,8835	2,70387	17,34	<,0001	41,27602	52,49098
$x_1 \cdot x_1$	12,97444	3,249647	3,99	0,0006	6,235088	19,7138
$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	5,457	1,911925	2,85	0,0092	1,491911	9,422089
$x_1 \cdot x_4 \cdot x_2 \cdot x_3$	4,4255	1,911925	2,31	0,0304	0,460411	8,390589

Graphical Summary for Residual Ff [N]



**Obrázek 1 Analýza reziduí – Ff**



## **PŘÍLOHA č. 8**

### **Výsledky analýz strukturálního modelu**

V prvním kroku byla na základě teoretického konstruktů a výsledků zahraničních studií definována hypotetická struktura dat – faktory, manifestní proměnné a vztahy mezi nimi. Pro testování vhodnosti ověřovaného modelu byly použity následující procedury a indexy: chi-kvadrát statistiky a následující celkové indexy shody s optimálními hodnotami: ( $\chi^2/df < 2$ ,  $RMSEA < 0,08$ , komparativní index  $TLI > 0,90$ ,  $CFI > 0,90$ ,  $SRMR < 0,08$ ) a částečných indexů (statistická významnost parametrů modelu). Indexy CFI a TLI mohou nabývat hodnot od 0 do 1, přičemž hodnoty vyšší než 0,90 indikují vhodnost aplikovaného modelu. Index RMSEA – odmocnina z průměrného čtverce chyby odhadu (root mean square error of approximation) je pro dobré modely nižší než 0.08 a při hodnotě nad 0.1 by se měl model zamítnout. Test chi-kvadrátu bere v úvahu poměr chi-kvadrátu a počtu stupňů volnosti. Ideální chi-kvadrát se velikostí blíží shora počtu stupňů volnosti a při více modelech je za vhodnější model považován ten s nejnižším chi-kvadrátem. U dobrých modelů je chi-kvadrát statisticky nevýznamný, což se však považuje za dosti přísné kritérium zejména při větších vzorcích. Základní doporučené hodnotící ukazatele (Torun, 2020) a jejich skutečně dosažené hodnoty na aplikovaném faktorovém modelu jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Kritéria vhodnosti strukturálního modelu

Fit Indices Used	Perfect Fit Indices	Acceptable Fit Indices	CFA Results	References
$\chi^2/df$	$0 \leq \chi^2/df \leq 2$	$2 \leq \chi^2/df \leq 3$	1.000	Hu and Bentler (1998)
GFI	$0.95 \leq GFI \leq 1.00$	$0.90 \leq GFI \leq 0.95$	0.984	Jöreskog and Sörbom (1993), Marsch, Balla, and McDonald (1988), Schermelleh-Engel and Moosbrugger (2003).
AGFI	$0.90 \leq AGFI \leq 1.00$	$0.85 \leq AGFI \leq 0.90$	0.966	
CFI	$0.95 \leq CFI \leq 1.00$	$0.90 \leq CFI \leq 0.95$	1.000	Bentler and Bonnett, (1980), Bentler (1980), Marsch, Hau, Artelt, Baumertv, and Peschar, (2006)
NFI	$0.95 \leq NFI \leq 1.00$	$0.90 \leq NFI \leq 0.95$	0.978	
TLI	$0.97 \leq TLI \leq 1.00$	$0.95 \leq TLI \leq 0.97$	1.000	Browne and Cudeck (1993), Byrne and Campbell (1999), Hu and Bentler (1999), Schermelleh-Engel, and Moosbrugger (2003)
RMSEA	$0.00 \leq RMSEA \leq 0.05$	$0.05 \leq RMSEA \leq 0.08$	0.004	
SRMR	$0.00 \leq SRMR \leq 0.05$	$0.05 \leq SRMR \leq 0.10$	0.0112	
<i>p</i>	<i>p</i> > 0.05		0.482	

$\chi^2$  - Chi-square, *df* - Degrees of freedom, GFI - goodness of fit index, AGFI - adjusted goodness of fit index, CFI - comparative fit index, NFI - The Bentler-Bonnett normed fit index, TLI - Tucker-Lewis coefficient, RMSEA - root mean square error of approximation, SRMR – standardized root mean square residual

Z tabulky 1 je zřejmé, že doporučené indexy hodnocení faktorového modelu jsou přijatelné a opravňují nás konstatovat, že vytvořený hypotetický model představuje dobrou míru shody s reálnými daty a je v takovéto podobě aplikovatelný. Dalšími ukazateli jsou  $\chi^2 = 99.968$  a  $df = 100$ .

- Původní zdroj:** Torun, E.D. (2020). Educational Use of Social Media in Higher Education: Gender and Social Networking Sites as the Predictors of Consuming, Creating, and Sharing Content. *Acta Educationis Generalis*, 10 (2),112-132 , DOI: 10.2478/atd-2020-0013
- Bentler, P. M. (1980). Multivariate analysis with latent variables: Casual modeling. *Annual Review of Psychology*, 31, 419-456.
- Bentler, P. M., & Bonett, D. G. (1980). Significance tests and goodness of fit in the analysis of covariance structures. *Psychological Bulletin*, 88, 588-606.
- Browne, M. W., & Cudeck, R. (1993). Alternative ways of assessing model fit. In K. A. Bollen, & J. S. Long (Eds.), *Testing Structural Equation Models* (pp.136-162). Beverly Hills, CA: Sage.
- Hu, L. T., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff Criteria for Fit Indexes in Covariance Structure Analysis: Conventional Criteria versus New Alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6, 1-55.  
<http://dx.doi.org/10.1080/10705519909540118>
- Hu, L.-t., & Bentler, P. M. (1998). Fit indices in covariance structure modeling: Sensitivity to underparameterized model misspecification. *Psychological Methods*, 3(4), 424–453.  
<https://doi.org/10.1037/1082-989X.3.4.424>
- Marsh, H. W., Balla, J. R., & McDonald, R. P. (1988). Goodness-of-fit indexes in confirmatory factor analysis: The effect of sample size. *Psychological Bulletin*, 103(3), 391–410. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.103.3.391>
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., & Müller, H. (2003). Evaluating the Fit of Structural Equation Models: Tests of Significance and Descriptive Goodness-of-Fit Measures. *Methods of Psychological Research*, 8(2), 23–74.
- Marsh, H. W., Hau, K.-T., Artelt, C., Baumert, J., & Peschar, J. L. (2006). OECD's Brief Self-Report Measure of Educational Psychology's Most Useful Affective Constructs: Cross-Cultural, Psychometric Comparisons Across 25 Countries. *International Journal of Testing*, 6(4), 311–360. [https://doi.org/10.1207/s15327574ijt0604\\_1](https://doi.org/10.1207/s15327574ijt0604_1)
- Byrne, B. M., & Campbell, T. L. (1999). Cross-cultural comparisons and the presumption of equivalent measurement and theoretical structure: A look beneath the surface. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 30(5), 555–574. <https://doi.org/10.1177/0022022199030005001>