

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace technologických faktorů obrábění těžkoobrobitelných nástřiků
experimentálními postupy zaměřenými na splnění funkčních vlastností

Autor: **Bc. Jan KAŠPAR**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Peter Pavol Monka Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KAŠPAR**
Osobní číslo: **S14N0075P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu: **Optimalizace technologických faktorů obrábění
těžkoobrobitelných nástřiků experimentálními postupy
zaměřenými na splnění funkčních vlastností**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Analýza současné poznatkové základny
3. Návrh metod pro provádění experimentů
4. Diskuse výsledků experimentů
5. Technické zhodnocení výsledků
6. Ekonomické zhodnocení výsledků
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Kráľ J. Řehoř J. a kol.: Technologické a informačné činitele obrábania, SjF TU v Košiciach, Košice, 2010, ISBN 978-80-553-0381-9
- Řasa J. a kol.: Výpočetní metody v konstrukci řezných nástrojů, SNTL/Alfa, Praha/Bratislava, 1986,
- Metals Handbook Volume 16 Machining, ASM International, ISBN 0-87170-007-7

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Peter Monka, PhD.**
TÚ Prešov, SK

Konzultant diplomové práce: **Prof. Ing. Peter Monka, PhD.**
TÚ Prešov, SK

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 19. října 2016

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

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Prof. Ing. Peteru Monkovi, Ph.D. za odborné vedení a trpělivý přístup, který mi v průběhu psaní této práce poskytl.

Dále děkuji také Ing. Jaroslavě Fulemové za pomoc při vyhodnocování experimentálního měření a výsledků.

A velké poděkování patří mé rodině za podporu a trpělivost při mém studiu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kašpar	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Monka, Ph.D.	Jméno Peter	
PRACOVISTĚ	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace technologických faktorů obrábění těžkoobrobitelných nástřiků experimentálními postupy zaměřenými na splnění funkčních vlastností		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	63	TEXTOVÁ ČÁST	63	GRAFICKÁ ČÁST	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato diplomová práce je zaměřena na vliv struktury tvrdého povlaku provedeného prostřednictvím žárových nástřiků nebo laserových návarů na jeho technologické vlastnosti při obrábění a na provozní stav vyrobených povrchů. Stěžejní částí této diplomové práce je experimentální ověřování v laboratorních podmínkách. Získané výsledky se posoudí v diskusi zaměřené na technické a ekonomické hodnocení dosažených výsledků.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Stellit 6, žárový nástřik, soustružení, VBD, Laser cladding

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kašpar	Name Jan	
FIELD OF STUDY	N2301 „Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Monka, Ph.D.	Name Peter	
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Optimization of technology factors for machining of coatings with high machinability by means of experimental approaches focused on meeting function properties		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	63	TEXT PART	63	GRAPHICAL PART	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis is focused on the effects of the structure of hard coating done by means of thermal spray or laser cladding on its technological properties when being machined and on maintenance properties of the produced surfaces. The key part of this diploma thesis is constituted by experimental testing in laboratory settings. The obtained results are evaluated and further discussed in terms of technical and economic perspective.
KEY WORDS	Stellite 6, Thermal spray, Turning, VBD, Laser cladding

Obsah

1	Úvod.....	11
1.1	Cíl diplomové práce.....	11
2	Analýza současné poznatkové základny	11
2.1	Slitiny na bázi kobaltu (Co) a chromu (Cr)	12
2.1.1	Stellite 6.....	13
2.2	Žárové nástřiky	15
2.2.1	Princip vytváření žárového nástřiku.....	15
2.3	Metody žárového nástřiku	16
2.3.1	Vysokorychlostní nástřik HVOF.....	17
2.3.2	Parametry HVOF.....	19
2.4	Výroba prášku pro nástřik HVOF	20
2.5	Struktura a vlastnosti žárového nástřiku.....	21
2.6	Laserové navařování (Laser cladding)	24
2.6.1	Metody laserového navařování	25
2.6.2	Parametry technologie laserového navařování.....	26
2.6.3	Přivádění přídavného materiálu	27
2.7	Porovnání HVOF s laserovým navařováním.....	28
3	Návrh metod pro provádění experimentů.....	29
3.1	Použitá technická zařízení	29
3.2	Použitá řezná nástroje.....	29
3.3	Použitá stroje a přístroje	32
3.3.1	Další použité přístroje	33
3.4	Použitá polotovary zkušebních vzorků.....	35
3.4.1	Parametry nástřiku HVOF.....	35
3.5	Určení řezných podmínek.....	37
4	Diskuze výsledků experimentů	37
4.1	Počáteční etapa experimentu	37
4.2	Druhá etapa experimentu.....	47
4.3	Opotřebením VBD a vzniklá tříška	54
5	Technické zhodnocení výsledků	55
6	Ekonomické zhodnocení výsledků.....	56
6.1	Soustružení	56
6.2	Broušení.....	57

6.3	Celkové náklady na jeden obrobek.....	58
7	Závěr.....	59
8	Zdroje	60
9	Seznam obrázků	62
10	Seznam tabulek	63
11	Seznam grafů.....	63

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky použité v textu

Ar	Argon
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Fcc	Plošně (kubicky) středěná mřížka
Fe	Železo
Hcp	Hexagonální (šesterečná) mřížka
He	Helium
HRC	Zkouška tvrdosti podle Rockwella
HV	Tvrdość podle Vickerse
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizování
Mn	Mangan
Mo	Molybden
N	Dusík
Ni	Nikl
Si	Křemík
Ta	Tantal
VBD	Vyměnitelná břitová destička
W	Wolfram

Použité symboly v textu

Symbol	Název	Jednotky
a_p	Axiální hloubka řezu	[mm]
f_{ot}	Posuv na otáčku	[mm/ot]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	[μ m]
Rk	Oblast jádra	[μ m]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
Rpk	Oblast hrotů	[μ m]
Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu	[μ m]
Rvk	Oblast rýh	[nm]
Rz	Střední hloubka drsnosti	[μ m]
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
α_p	Úhel hřbetu	[°]
γ_p	Úhel čela	[°]
λ_p	Úhel sklonu ostří	[°]

1 Úvod

Současné požadavky na spolehlivost ve všech průmyslových oblastech se stále zvětšují a určují hlavní hlediska pro volbu materiálu, druhu a způsobu výroby i provozu výrobků. V řadě uplatnění je to povrch součásti a jejich vlastnosti, jež jsou limitním faktorem. Začátek vytváření povlaků metodou žárového nástřiku sahá na počátek 20. století a otevřel tak novou cestu v technikách zpracování povrchů. Proudem času pokročila i tato metoda díky novým znalostem, konstrukcím a aplikačním možnostem. Ubírá se dál cestou rychlého rozvoje, jehož vzrůstající trend pokračuje do současnosti.

Žárové nástřiky představují perspektivní technologii, umožňující funkčně efektivní povlaky používané v mnoha oblastech průmyslu. Tyto pružné technologie dávají možnost optimálně přizpůsobovat povrchové vlastnosti součástí provozním podmínkám, a to vede k prodloužení životnosti, zvětšení spolehlivosti a bezpečnosti součástí, i k lepším ekonomickým výstupům daného procesu.

V současné době se žárové nástřiky hojně využívají nejen v leteckém a energetickém průmyslu, ale i v dalších odvětvích, kde se pracuje s materiály na bázi stelitových slitin. Jde o chrom–kobaltové slitiny, jež se v současné době obrábí hlavně metodou broušení. Vzhledem k lamelární struktuře stelitových slitin je obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií značně obtížné.

Tato diplomová práce se orientuje na žárový nástřik slitiny stellite 6 pomocí metody HVOF. Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část práce se věnuje teoretickému přehledu, v němž lze nalézt především informace o chrom – kobaltové slitině stellite 6. Poté je představena metoda nanesení žárového nástřiku a charakterizována její struktura. V druhé části se diplomová práce věnuje experimentální činnosti, jejím výsledkům a technicko–ekonomickému zhodnocení.

1.1 Cíl diplomové práce

Cílem práce je nejprve čtenářům představit problematiku obrábění těžkoobrobitelných žárových nástřiků a laserových návarů s důrazem na technologické faktory a později se pokusit o jejich optimalizaci v praktické části za pomoci využití experimentálních postupů zaměřených na funkční vlastnosti. Jednotlivé pokusy budou probíhat v laboratorních podmínkách a jejich výsledky budou následně podrobeny analýze a zhodnoceny z ekonomického a technického hlediska.

2 Analýza současné poznatkové základny

Kvůli rostoucí výkonnosti a účinnosti průmyslových zařízení se stále více a více setkáváme s rostoucími požadavky na kvalitu a funkčnost povrchů strojních dílů. K nadějně technologii umožňující funkčně výkonný povlak využívaný v mnohých oblastech průmyslu patří beze sporu žárové nástřiky. Žárové nástřiky patří mezi praktické a bezpečné řešení problémů povrchové ochrany součástí, které pracují v různorodých podmínkách. K těmto podmínkám patří korozní prostředí, vysoká teplota, různé druhy opotřebením a další. Aplikování žárových nástřiků se nepoužívá jen pro ochranu povrchů při výrobě součástí, může totiž najít své uplatnění i v oblastech renovací opotřebených součástí, a rovněž i při obnovování původních rozměrů funkčních ploch strojních součástí. Z toho důvodu se na některé strojní součásti nanáší žárový nástřik stellite 6, jež má schopnosti odolávat vysokým teplotám během provozu. Těchto vlastností se využívá především v leteckém, automobilovém a energetickém průmyslu.

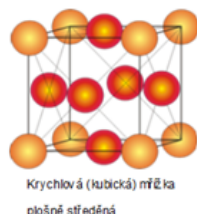
2.1 Slitiny na bázi kobaltu (Co) a chromu (Cr)

Stellit je slitina na základě prvků kobaltu (Co) a chromu (Cr) a obsahuje také složky dalších prvků. Ve stellitových slitinách je základním prvkem kobalt (Co). Tyto slitiny běžně obsahují mezi 45 – 55% kobaltu (Co). Druhý prvek, který tvoří základ stellitové slitiny je chrom (Cr), který je v ní zastoupen z 25 -35%. 5 – 25% slitiny patří wolframu (W) a potom nevelké, avšak podstatné množství uhlíku (C), jenž je v rozmezí 0,1 – 1,5%. Tento prvek hraje významnou roli pro vznik jednotlivých karbidů. Ve stellitových slitinách se rovněž nachází menší množství doprovodných prvků, jakými mohou být například nikl (Ni), tantal (Ta), molybden (Mo), mangan (Mn), křemík (Si), a v neposlední řadě i železo (Fe). Mnoho stellitových slitin v sobě obsahuje 4 – 6 odlišných prvků. Na základě jejich druhu a procentuálního zastoupení ve slitině se pak jednotlivé stellitové slitiny odlišují a nacházejí různá uplatnění. [1], [2], [3]

Kobalt se jako čistá složka může všeobecně vyskytovat v přírodě, ale i ve slitinách ve dvou různorodých alotropických modifikacích. V první řadě se jedná o vysokoteplotní fázi, která je označována v literaturách jako α – Co. V této modifikaci se atomy vyskytují v krychlové (kubicky) plošně středěné mřížce – fcc mřížka. Jako druhá možnost, v níž se kobalt může vyskytovat, je nízkoteplotní fáze, která je označována v literaturách jako β – Co, nebo ϵ – Co. U této modifikace se atomy vyskytují v hexagonální (šesterečné) mřížce – tzv. hcp mřížka.[1], [4], [5]

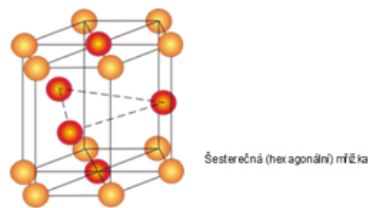
KRYCHLOVÁ (KUBICKÁ) PLOŠNĚ STŘEDĚNÁ MŘÍŽKA

Atomy jsou umístěny v rozích mřížky a ve středech jejich stěn.



ŠESTEREČNÁ (HEXAGONÁLNÍ) MŘÍŽKA

Atomy jsou umístěny v rozích šestibokého hranolu, ve středech podstavy a základny, tři atomy jsou uvnitř buňky.



Obrázek 1: Utřídění hcp mřížky a fcc mřížky[6]

Při běžné pokojové teplotě se kobalt vyskytuje v podobě fcc mřížky a jako transformační teplota pro jednotlivé modifikace je určena hodnota kolem 417°C, jenž je závislá na čistotě samotného kobaltu. Po překročení této hranice se kobalt vyskytuje v podobě hcp mřížky. Modifikace v podobě mřížky fcc je hodně vnímavá na napětím indukovanou martenzitickou přeměnu a současně tato přeměna vyvolává zřetelné zpevnění, a to poskytuje stellitovým slitinám vysokou odolnost vůči mechanickým formám opotřebení. [1], [4], [5]

Stellitové slitiny jsou navrženy tak, aby zaručovaly kvalitní odolnost proti opotřebení, oděru a rovněž proti korozi a zároveň odolností proti vysokým teplotám. Veškeré stellitové slitiny jsou rovněž plně magnetické. Jednotlivé složky stellitových slitin mají různorodé mechanické vlastnosti. Díky jednotlivým složkám Cr a W je u těchto slitin zaručena požadovaná tvrdost. Ke zvýšení odolnosti proti korozi a k zvýšené odolnosti proti oxidaci za zvýšených teplot přispívají karbidy Cr. Díky jednotlivým karbidům se stellitové slitiny řadí mezi těžkoobrobitelné materiály, protože obsahují tvrdé karbidy, které jsou příčinou vzniku abrazivního opotřebení rezného nástroje.[1], [2]

Stellitové slitiny disponují rovněž vysokým bodem tání; tento bod tání vzniká spojením prvků Cr a Co, které mají své vlastní body tání. Pohybuje se v rozmezí mezi teplotami 1200 – 1400°C a

závisí na samotném složení těchto dvou prvků. Mez pevnosti (R_m) se u těchto slitin pohybuje v rozmezí mezi 800 – 1200 MPa a tvrdost pak zhruba mezi 35 – 50 HRC, v závislosti na obsahu jednotlivých slitin. [1], [2]

Stellitové slitiny vznikají pomocí spojení dentritického tuhého roztoku a komplexních precipitačních karbidů. U stelitivých slitin se nacházejí 2 základní skupiny karbidů: [1], [7]

- a) Karbidy, které mají obecný vzorec M_7C_3 a $M_{23}C_6$ se ve většině případů prezentují jako Cr, avšak mohou rovněž ukazovat na Mo nebo W. Nejčastějším karbidem je u stelitových slitin karbid M_7C_3 , jenž ale může být po dobu procesu žárového nástřiku rozpuštěn, eventuálně se po dobu procesu může přeměňovat na jiný typ karbidu $M_{23}C_6$. U slitin jenž mají obsah uhlíku na horní hranici se nejčastěji vyskytuje karbid $M_{23}C_6$. Protože jsou slitiny s těmito karbidy vydatnější na Cr, vykazují, tak větší odolnost proti korozi, než slitiny s menším obsahem Cr, u nichž je Cr přítomen v karbidech Cr_6 . Podporou karbidů Cr_{23} a Cr_{27} se Cr podílí také na zpevnění stelitových slitin. Kromě těchto karbidů Cr přispívá také ke zpevnění těchto slitin utvářením tuhého roztoku. [1], [2], [7]
- b) Karbidy se vzorcem M_6C a MC jsou karbidy, u nichž M zastupuje Cr a jsou na Cr chudší než předešlý typ karbidů. Z toho důvodu se nacházejí u stelitových slitin, jenž mají obsah Cr na dolní hranici, eventuálně se tyto karbidy nacházejí ve stelitových slitinách, jenž obsahují Mo, a nebo v těch, které mají obsah W větší než 5%. (V rámci této práce obsahují slitiny karbidy W_6C a WC .) U karbidů molybdenu a wolframu je obdobný efekt jako u karbidu chromu a dohromady s intermetalickými fázemi vedou ke zpevnění stelitových slitin. [1], [2], [7]

Všeobecně je možné říci, že pevnost kubické plošně středěné mřížky je při pokojové teplotě podporována zvětšeným obsahem uhlíku železa a niklu. Přitom na druhé straně zvětšené množství molybdenu, chromu a wolframu má sklon k ustálení hcp mřížky a k ustálení kobaltu nad teplotou 417°C. [1], [4], [5]

2.1.1 Stellite 6

Nejčastější stelitovou slitinou určenou k procesu žárového nástřiku je stellite 6, která se s obsahem uhlíku 1,2% zařazuje k stelitovým slitinám s vysokým obsahem uhlíku. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tabulce 1 (viz níže). Jde o slitinu s dostatečnou rovnováhou mezi tvrdostí a houževnatostí, jenž je způsobena tvrdými karbidy chromu, a zároveň odolností vůči vysokým teplotám a korozi. U této slitiny můžeme pozorovat schopnost vzdorovat mnoha formám sesazení v relativně širokém teplotním rozsahu. V tabulce 2 jsou ukázány její základní mechanické vlastnosti a v grafu 1 je ukázána závislost tvrdosti na teplotě. [1], [2], [8]

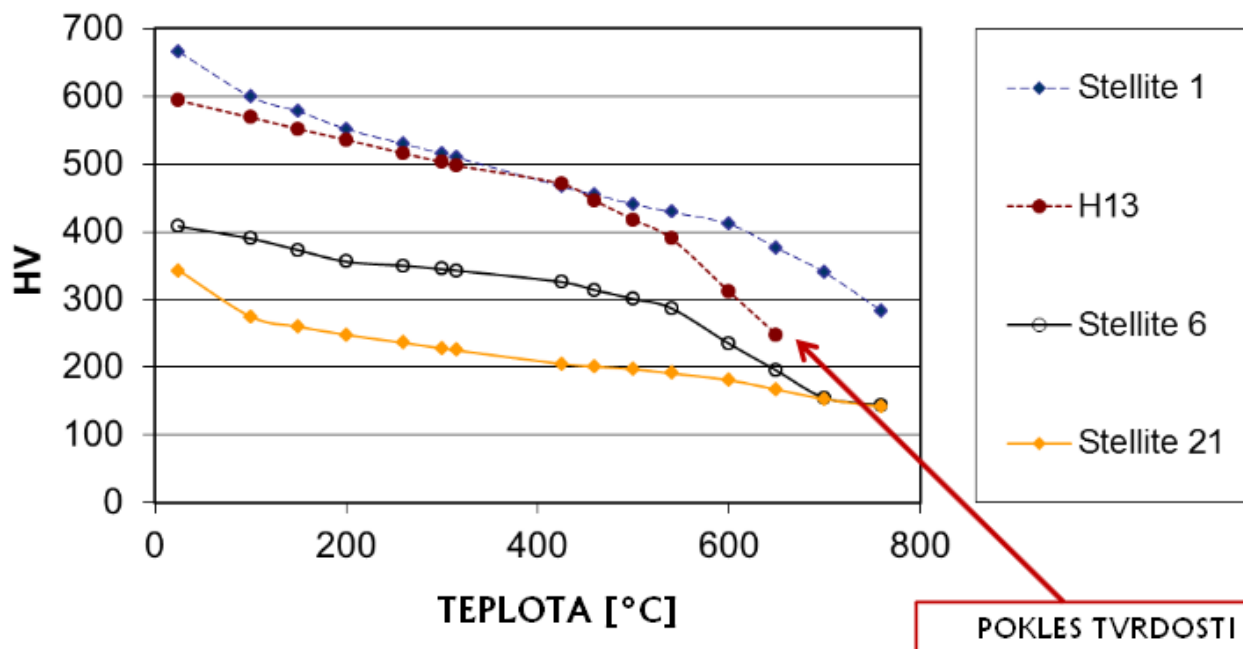
C	Si	W	Mn	Mo	Ni	Cr	Fe	Co
1,2%	max. 1,5%	4,5%	max. 1%	max. 1%	max. 3%	29%	max. 3%	Zbytek

Tabulka 1: Chemické složení stellite 6 [1]

Mez pevnosti v tahu-Rm [MPa]	Mez pevnosti v kluzu -Re[MPa]	Tažnost [%]	Yongův modul pružnosti [MPa]	Mikro tvrdost [HV _{0,3}]
850	700	<1	209	Cca 650-700

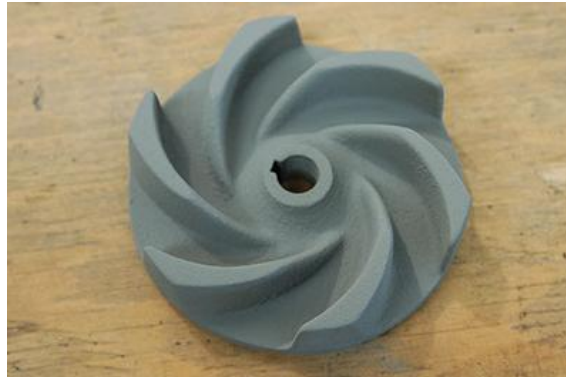
Tabulka 2: Základní mechanické vlastnosti stellite 6 při teplotě 20°C [1]

ZÁVISLOST TVRDOSTI NA TEPLOTĚ



Graf 1: Závislost tvrdosti stellite 6 na teplotě[2]

Na grafu 1 je možné vidět průběh křivky slitiny stellite 6 v porovnání s ostatními slitinami. Slitina si ponechává přiměřenou úroveň tvrdosti mezi 400 – 300 HV do přibližně 400°C, poté dochází k razantnějšímu poklesu tvrdosti. Díky většímu množství chromu ve slitině, je schopna lépe odolávat korozi, ale v případě koroze koroduje podobně jako korozivzdorné oceli bodovým mechanismem, když se vytvářejí různorodé hluboké důlky s poměrně úzkým hrdlem. [1], [2], [9] V průmyslu se tato slitina využívá v podobě žárového nástřiku, jenž má zpravidla tloušťku 450 μm . Tato slitina se naopak téměř vůbec nepoužívá ve formě celistvého objemového materiálu. Samostatné průmyslové využití se v oblasti žárových nástřiků využívá u hřídelí a hran lopatek čerpadel a hran lopatek parních turbín, aby byly způsobilé odolávat vysokým teplotám páry na výstupu, a tak zároveň odolávaly kavitační formě opotřebení. Dále se využívají například u výfukových ventilů spalovacích motorů nebo u zubů pil. V současné době se žárové nástřiky stellite 6 používají jako záměna za tvrdé chromování u strojních součástí jako jsou například tiskařské válce nebo kulové ventily a kulové písty. [2]



Obrázek 2: Žárový nástřik oběžného kola [10]



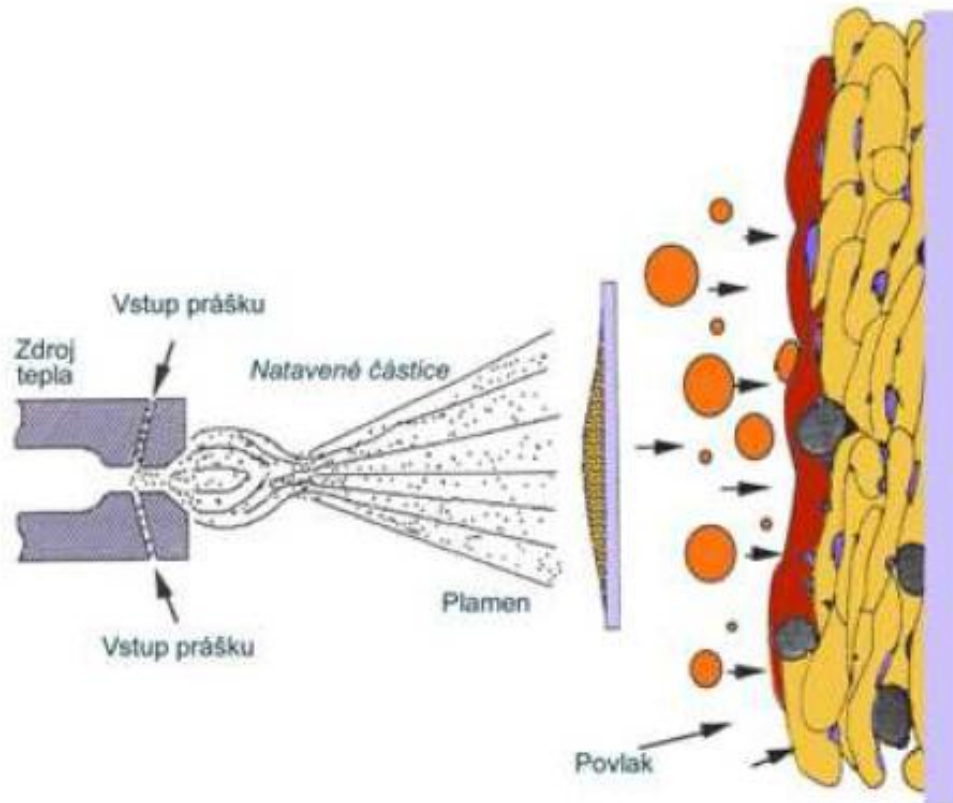
Obrázek 3: Žárový nástřik prořezávacího válce [11]

2.2 Žárové nástřiky

V současné době se navyšují nároky na životnost a kvalitu strojních součástí, jejichž povrch je značně namáhán mechanickým opotřebením. Žárové nástřiky jsou momentálně považovány za technologii s nadějnými vyhlídkami do budoucnosti. Technologie žárového nástřiku je povrchová úprava, která spočívá v nanášení roztavených částic přídavného materiálu na předem připravený povrch. Hlavním cílem žárových nástřiků je zlepšit vlastnosti povrchu a vytvořit souvislý povlak.[12]

2.2.1 Princip vytváření žárového nástřiku

Postup žárového nástřiku se zakládá na vytvoření nového povlaku vlivem tepelné energie, která zajistí natavení výchozího materiálu, který se po nastříkání na základní materiál součásti rozplyne po ploše, a poté se vlivem přilnavosti a tlaku mechanicky usadí. Jako počáteční materiálem pro žárový nástřik se používá buď prášek s přesným chemickým složením, nebo drát. Po rozložení následuje ztuhnutí jednotlivých částic, jenž na povrchu stříkané součásti vytváří osobitou lamelární strukturu (diskovitou), která je typická právě pro žárový nástřik. Může se však projevat proměnlivost samotné struktury povlaku, protože je do určité míry ovlivněna tzv. nástřikovými parametry, které ovlivňují kromě tvaru jednotlivých zrn struktury, také její pórovitost, odolnost proti abrazivnímu opotřebením, mikro tvrdost, a eventuálně také množství nenatavených, případně pouze částečně natavených částic. Princip žárového nástřiku je zobrazen na obrázku 4. [1], [13], [14]



Obrázek 4: Princip žárového nástřiku [12]

2.3 Metody žárového nástřiku

Metody žárového nástřiku je možno rozdělit do dvou stěžejních skupin podle použitého tepelného zdroje natavení přídavného materiálu. Tepelná energie se získává z elektrického zdroje a nebo z hoření směsi paliva a kyslíku. [1], [15]

Rozdělení metod žárového nástřiku:

- 1) Natavení elektrickým zdrojem
 - Nástřik elektrickým obloukem
 - Nástřik plazmou
- 2) Natavení spalováním směsi hořlavého paliva a kyslíku
 - Nástřik plamenem
 - Vysokorychlostní nástřik plamenem (Nástřik HVOF)
 - Detonační nástřik

Metoda nástřiku	Teplota zdroje [°C]	Rychlost dopadajících částic [ms ⁻¹]	Základní vlastnosti povlaku	Přilnavost [MPa]
Plazmatický nástřik	12000 – 20000	100 – 800	Snížená tvrdost vlivem rozpadu WC, dobrá adheze	70
Nástřik elektrickým obloukem	4000 – 8000	50 – 300	Vysoká hustota, Větší tloušťka	10-40
Nástřik studeným plynem	<900	500 -1500	Nízký obsah oxidů Větší tloušťka	-
Nástřik HVOF	2800 – 5000	300 - 1000	Vysoká hustota Tlakové pnutí	60-85

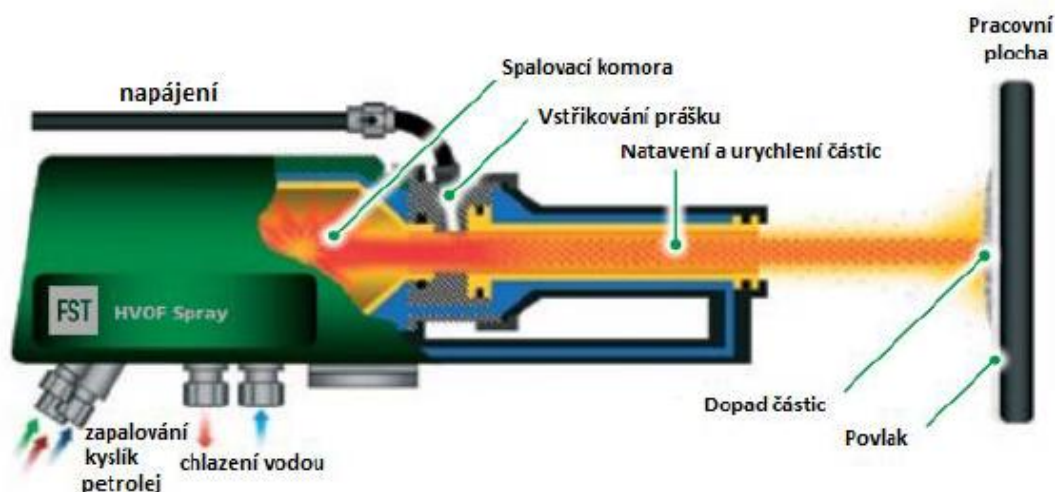
Tabulka 3: Porovnání jednotlivých metod žárového nástřiku [1]

Na základě údajů z tabulky 3 lze usoudit, že optimální metoda pro žárový nástřik a jeho následující obrábění reznými nástroji s definovanou geometrií břitu je metoda HVOF. Tato metoda je nejvhodnější zejména zásluhou tlakového pnutí, jenž při této metodě nastává, nízké pórovitosti a velké adheze.

Po rozdělení metod žárového nástřiku se v této kapitole diplomové práce podrobněji seznámíme s vysokorychlostním nástřikem plamenem metodou HVOF, která byla použita pro obráběný materiál při experimentu. Ostatní metody jsou podrobně popsány v odborné literatuře.

2.3.1 Vysokorychlostní nástřik HVOF

Zkratka HVOF v sobě skrývá anglické spojení **H**igh **V**elocity **O**xxygen **F**uel. Metoda HVOF je metodou na bázi vysokorychlostního nástřiku prostřednictvím plamene a můžeme ji chápat jako pokračování staré metody plamene na bázi hoření kyslíku a acetylenové směsi. Stěžejním principem vysokorychlostního nástřiku plamenem je souběžné koaxiální přivedení směsi kyslíku a paliva, jenž je mnohdy kerosin, do spalovací komory, kde dochází k jejich atomizaci a poté k zažehnutí směsi pomocí zapalovací svíčky. Finální plamen se blíží k teplotám v rozsahu 2800 – 5000°C a je tak tedy možné tímto způsobem vytvořit povlak ze slitiny stellite 6. Poměr mezi palivem a kyslíkem ovlivňuje samotnou teplotu plamene. Spalovací komora je obklopena pláštěm, v němž je přiváděna chladicí voda. Chladicí voda funguje jako chlazení směsi uvnitř spalovací komory. Počáteční (přídavný) materiál v podobě prášku je pomocí plynu dopraven do supersonického plamene, kde nastane jeho následující natavení a potom jsou jednotlivé částice rychlosti 300 – 1000 ms⁻¹ zrychleny na povrch součásti, kde se tvarují do jednotlivých splatů. Princip vytvoření HVOF nástřiku je ukázán na obrázku 5. [1], [16], [17]



Obrázek 5: Princip vytvoření nástřiku HVOF [17]

Obrovskou předností této metody u nanášení povlaku slitiny stelit 6 je poměrně vysoká adheze, jenž je schopna nabývat hodnot kolem 80 MPa. Mimořádnost této technologie si zakládá na tom, že finální povlak je vytvořen s tlakovým pnutím, jenž u obrábění řeznými nástroji s definovanou geometrií břítu garantuje kvalitní soudržnost, čili kohezi, v rozmezí jednotlivých částic, jenž se tedy nebudou v důsledku silového účinku řezného břítu tak často vytrhávat a bude garantována kvalitnější drsnost povrchu.[1], [13]

Použitím metody HVOF je možné dosáhnout vytvoření povlaků se soudržnou strukturou a s drobným zástupem tvrdých oxidů, jenž jsou schopny zvyšovat křehkost, následkem stejnoměrného rozložení, což by mohlo vést k narušení jednotlivých splatů. Samotnou četnost oxidů, jenž v průběhu procesu vznikají, je možno usměrnit procesními parametry. Metodou HVOF utvořené povlaky vykazují výtečnou odolnost vůči různým formám opotřebení, jakými jsou například abraze, případně kavitace. Na podstatě množství měření bylo u nás, a případně v zahraničí, rozpoznáno, že při nanesení žárového nástřiku slitiny stelit 6 je význam pórovitosti menší než 1% z kompletního rozsahu nástřiku. [1], [12], [13]

Protože se žárový nástřik slitiny stelite 6 používá v oborech, kde jsou na součásti kladeny velké nároky, jenž se vztahují hlavně k prvotřídní odolnosti proti jednotlivým mechanismům opotřebení a rovněž proti různým druhům koroze, je nezbytné, aby finální povlak měl co nejmenší pórovitost. Současně je rovněž nezbytné, aby byla zaručena dobrá adheze v rozmezí základního substrátu a povlaku. Dále také v rozmezí jednotlivých splatů, tak aby byla možnost obrobít součásti na žádaný rozměr povlaku, jenž si udrží dobré hodnoty parametrů drsnosti finálního povrchu. [1], [12], [13]

Finální struktura povlaku zhotoveného touto metodou je vázána hlavně na *ekvivalentním poměru*, jenž určuje kvantitavní zákonitosti chemických reakcí vznikajícího plamene, tzv. *stechiometrie plamene*. [1], [12], [13]

2.3.2 Parametry HVOF

Jedním z nejvýznamnějších parametrů HVOF nástřiku je tzv. ekvivalentní poměr, jenž působí na finální strukturu povlaku: [1], [12], [13]

$$\Phi = \frac{\left(\frac{F}{O}\right)}{\left(\frac{F}{O}\right)_{st}}$$

$\left(\frac{F}{O}\right)$ – je hmotnostní poměr kerosinu a kyslíku použitý pro nástřik,

$\left(\frac{F}{O}\right)_{st}$ - je stechiometrický poměr určený z rovnice chemické reakce hoření kyslíku a kerosinu (2057 l kyslíku / 1 litr kerosinu),

O – hmotnostní poměr kerosinu a kyslíku použitého pro žárový nástřik,

F - hmotnostní množství paliva použitého pro žárový nástřik (nejčastěji používané palivo pro hoření plamene se při metodě HVOF používá kerosin).

Ekvivalentní poměr stanovuje finální vlastnosti plamene, protože zvětšováním eventuálně zmenšováním hmotnostního poměru $\left(\frac{F}{O}\right)$ následkem zvětšeného, či zmenšeného hmotnostního množství kerosinu, přesněji kyslíku, dochází ke změně tlaku a teploty ve spalovací komoře. Stanovený tlak a teplota ve spalovací komoře pohromadě s dalšími parametry nástřikového zařízení a s depoziční vzdáleností stanovují finální vlastnosti žárového nástřiku. [1], [12], [13]



Obrázek 6: Žárový nástřik metodou HVOF [18]

Následkem zvětšeného hmotnostního množství kyslíku nastává zvětšení tlaku ve spalovací komoře. Tím dochází k zvýšení rychlosti unášených spalin, a následně je přídavný materiál dopraven na povrch v podobě prášku. Rychlost spalin nabývá na konci konvergentní trysky zhruba dvojnásobku rychlosti zvuku: [1], [13]

$$V_{spalin} \approx 2a$$

Naopak zmenšením hmotnostního množství kyslíku, případně zvětšením hmotnostního množství kerosinu dochází ke zvětšení teploty ve spalovací komoře, a tím ke kvalitnějšímu natavení jednotlivých částic. Účinek jednotlivých parametrů na vlastnosti plamene a na vlastnosti samotného finálního povlaku naneseného na základní materiál jsou popsány v tabulce 4. [1], [13]

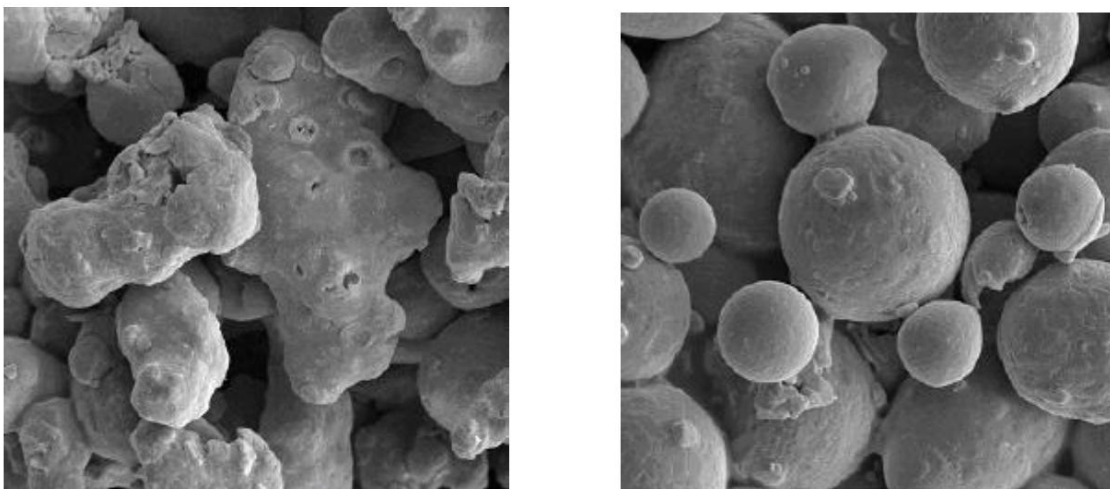
Změna parametrů nástřiku	Účinek změny parametrů na:
Zmenšení hmotnostního množství kerosinu → zmenšení ekvivalentního poměru	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zvětšení tlaku ve spalovací komoře → zvětšení rychlosti plamene → vyšší hustota povlaku ▪ Zmenšení teploty plamene → menší protavení částic ▪ Menší obsah oxidů ▪ Větší pórovitost
Zvětšení hmotnostního množství kerosinu → zvětšení ekvivalentního poměru	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zvětšení teploty plamene ▪ Zvětšení teploty částic a jejich protavení ▪ Větší obsah oxidů
Zvětšení depoziční vzdálenosti	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zvětšený obsah oxidů ▪ Zvětšená pórovitost ▪ Zvětšené ochlazení částic ▪ Zmenšení ohřátí substrátu
Protažení barelu	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zvětšená rychlost prášku ▪ Zvětšená hustota povlaku ▪ Zvětšené prohřátí povlaku ▪ Zvětšené prohřátí prášku ▪ Větší protavení částic

Tabulka 4: Účinek změny parametrů na vlastnosti žárového nástřiku slitiny stelit 6 [1]

2.4 Výroba prášku pro nástřik HVOF

Během výroby žárového nástřiku slitiny stelit 6 je použit přídavný materiál ve formě prášku a pro finální vlastnosti žárového nástřiku této slitiny je podstatný tvar a rozměry jednotlivých částic, z nichž je prášek tvořen. Zejména rozměry částic jsou podstatné, protože příliš velký rozměr jednotlivých částic může zapříčinit nevyhovující protavení těchto částic, a tím též porušení finální struktury následkem většího množství pórů, jenž jsou schopny během následujícího soustružení zapříčinit praskání a sloupávání povlaku a šíření tahových trhlin. Existují různé metody, jak vyrábět prášek. První metoda je tzv. výroba prášku atomizací, čili rozprašováním tekuté formy prášku do vodního, případně plynného prostředí. Hlavní zásada této metody spočívá v přechodu taveniny z kalibrovacího hrdla do trysky a zároveň následujícím rozstříkem do už uvedených prostředí. Jednotlivé částice pak tvrdnou pod vysokým tlakem. Atomizovaný prášek v plynném prostředí vykazuje globulárnější tvar, jenž je z pojetí kompletního protavení a tekutosti daleko lepší, než prášek, který je rozprašován do vodního prostředí, protože tento prášek v konečné fázi vykazuje ohledně tvaru vymezenou nepravidelnost a nerovnoměrnost, a to se může záporně ukázat během natavování jednotlivých částic.

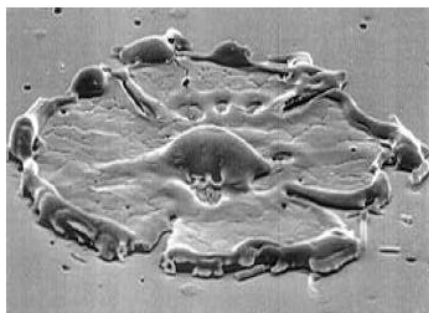
Konfrontace velikosti a tvaru jednotlivých částic u vodou a plynem atomizovaného prášku je zobrazena na obrázku 7. Nicméně také jednotlivé částice prášku, jenž byl vyroben pomocí atomizace ve vodním prostředí, je možné určitou metodou přetvořit na vhodnější, tudíž globulárnější tvar, za podpory přehřátí prášku na teplotu, jenž zřetelně přesahuje teplotu tavení. Rovněž z hlediska velikosti jednotlivých částic je příhodné produkovat prášek atomizací v plynném prostředí, protože jednotlivé částice tak produkovaného prášku mají zhruba čtyřikrát menší velikost než prášek, jenž je produkován metodou rozprašování ve vodním prostředí. Rozměry jednotlivých částic, které jsou atomizovány v plynném prostředí se blíží k hodnotám v rozhraní 25 – 100 μm . Prášek, který je rozprášen v plynném prostředí, má větší čistotu, a tudíž menší obsah oxidů, a to je podstatné z hlediska mechanických vlastností a finální struktury žárového nástřiku slitiny stellite 6. [1], [9], [13], [15]



Obrázek: 7 Vlevo vodou atomizovaný prášek a vpravo plynem atomizovaný prášek [1]

2.5 Struktura a vlastnosti žárového nástřiku

Finální povlak, jenž je vytvořen metodou HVOF, je charakteristický svou strukturou, jenž je tvořena tzv. splaty (deformovaná částice), které mají dokonalý tvar co se soudržnosti a funkčnosti povlaku týče. Tento tvar je diskovitý, a proto tato struktura určuje lamelární charakter.

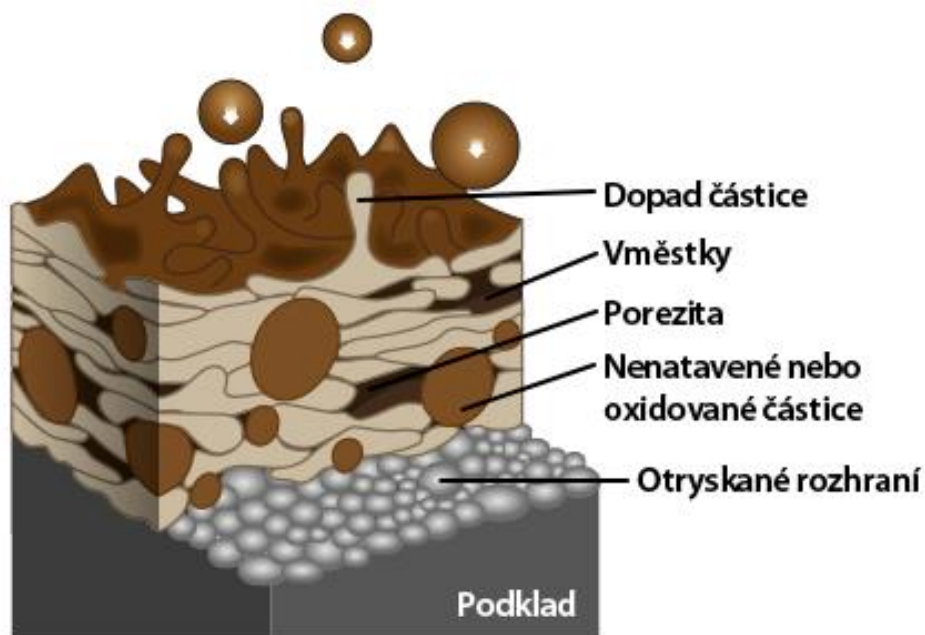


Obrázek 8: Splat [19]

Splat, jenž má diskovitý tvar, se dá upravit počátečními parametry, a to hlavně zvětšením ekvivalentního poměru. Tím nastane menší rychlost nastříkujících částic, a proto dojde

k menšímu rozstříku jednotlivých částic. To má za následek globulárnější tvar splatů, což však může vést k příčinám, které vedou k horším vlastnostem obráběného povrchu. Globulárnější tvary splatů mají menší dotykové plochy mezi jednotlivými splaty, a proto také menší soudržnost, jenž může mít za příčinu vytrhávání jednotlivých částic aspektem velkých řezných sil, jenž během obrábění těžkoobrobitelných nástřiků vznikají. Splaty s globulárnějším tvarem mají také větší možnost, že u nich vzniknou oxidy na povrchu součástí a na místech kde jsou póry. [1], [21], [22]

S výjimkou některých splatů je struktura žárového nástřiku vyrobeného metodou HVOF poté tvořena nenatavenými, případně jenom částečně natavenými částicemi, póry a rovněž částicemi, jenž v průběhu letu zoxidovali, tzv. oxidické obálky. Schéma struktury žárového nástřiku je možné vidět na obrázku 9. [1], [21], [22]



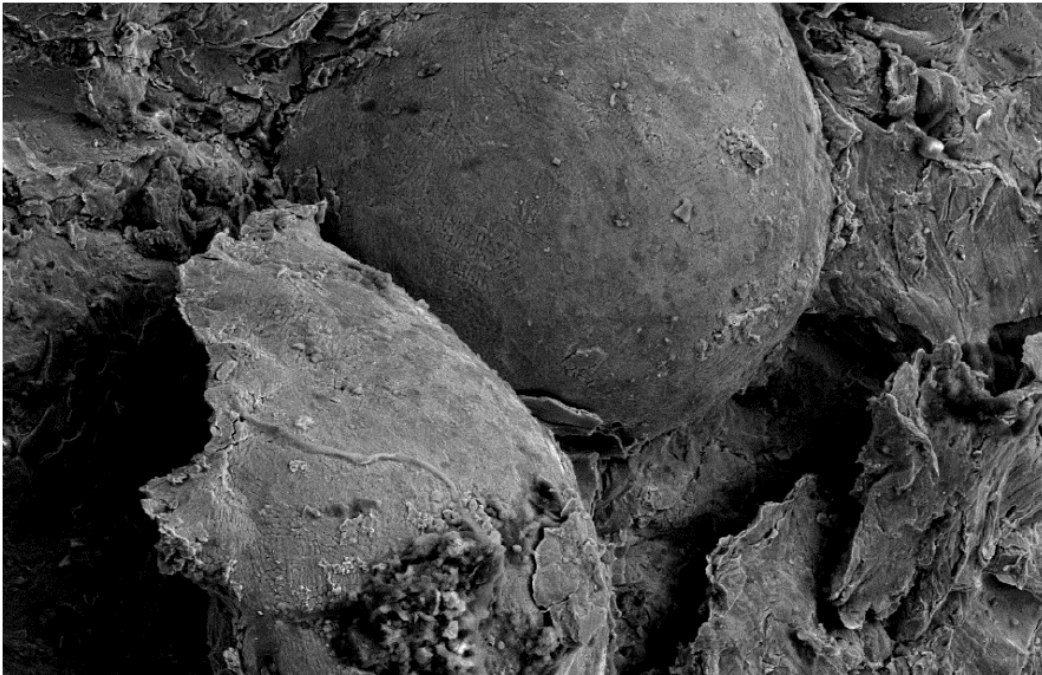
Obrázek 9: Schéma řezu žárové nastříkané vrstvy [20]

Vměstky (oxidické obálky) jsou schopny ve struktuře působit problémy, jenž nastanou za okolností, kdy tyto vměstky budou představovat větší obsah v povlaku, případně se budou nacházet jenom na určitých místech, a to povede ke zvětšení křehkosti a zmenšení kohezivity, lépe řečeno kohezivní pevnosti na rozhraní jednotlivých částic vlivem rovnoměrného rozložení oxidických vměstků. Obsah oxidických vměstků se ale ve struktuře může korigovat několika způsoby. Prvotním způsobem, jehož pomocí lze zmenšit obsah oxidických vměstků je zmenšení depoziční vzdálenosti v rozmezí výstupu ze vstřikovacího zařízení a základním substrátem. Tím dojde ke snížení času, v průběhu kterého mohou jednotlivé částice zoxidovat. Následujícími způsoby, jimiž můžeme snížit obsah vměstků (oxidických obálek) je zmenšení teploty plamene, případně povrchu podkladového substrátu, či zmenšení množství oxidů aspektem menší plochy částice. Konečnou možností, která dokáže zmenšit obsah oxidických vměstků ve struktuře, je realizování žárového nástřiku v ochranné atmosféře tak, aby se zamezilo vstupu kyslíku k letícím částicím. [1], [21], [22]

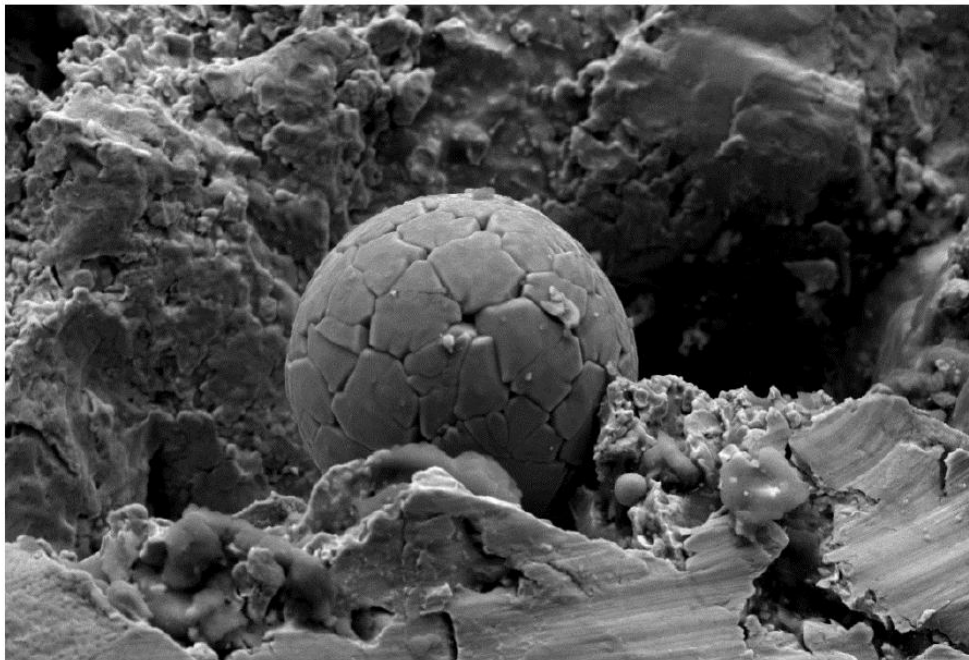
Počet póru ve struktuře je totožný s počtem a rozložením oxidických vměstků a představuje podstatný údaj, jenž je z části určen k hodnocení kvality žárových nástřiků. Má také dopad na

mechanické vlastnosti samotných nástřiků. Větší počet pórů, a tedy zvětšená pórovitost, napovídá, že se ve struktuře žárového nástřiku objevovalo větší množství nenatavených či jenom částečně natavených částic. To také záporně ovlivňuje kohezní pevnost mezi jednotlivými splaty. Zvětšená pórovitost se může vyznačovat také globulárnějším tvarem jednotlivých splatů, a to je možno usměrnit samotnými parametry nástřiku. Počet pórů způsobený globulárnějším tvarem splatů či větším množstvím nenatavených, popřípadě jen částečně natavených částic způsobuje zmenšení tvrdosti samotného nástřiku a rovněž odlupování a praskání povlaku. Tato vlastnost je velice negativní především u součástí, jenž byly získány žárovým nástřikem kvůli zvětšené odolnosti proti mechanickému a dalšímu druhu opotřebení, například abrazivní opotřebení, erozivní opotřebení, kavitační opotřebení, či únavové opotřebení. Zvětšený počet pórů způsobuje ve struktuře žárového nástřiku kanálky a cesty různé tloušťky, což vede ke vzniku tzv. otevřené pórovitosti. Ta má za následek pronikání provozních kapalin přes vzniklé kanálky až k základnímu substrátu. Tím vzniká zmenšení odolnosti základního substrátu proti korozi. U většiny příkladů žárových nástřiků je zvětšená pórovitost pokládána za špatnou vlastnost samotného žárového nástřiku, nicméně v praxi se objevují také případy, u nichž je zvětšená pórovitost pokládána za dobrou vlastnost. Jako příklad je možné uvést samomazná ložiska. Posuzování pórovitosti žárově stříkaného povlaku je velice náročné a ne vždy přesné, protože během přípravy metalografického výbrusu vzniká následkem brousících a leštících kotoučů k vytrhávání tvrdých částic na okrajích jednotlivých pórů, a v důsledku pak k jejich zvětšování. Dále dochází následkem vytrhávání jednotlivých částic k tvorbě naprosto nových pórů a následnému zhoršení hodnocení počtu a tvaru jednotlivých pórů. [1], [15], [23]

Nenatavené a jen částečně natavené částice se ve struktuře žárového nástřiku objevují z důvodu toho, že ne všechny částice proniknou barelem vstřikovacího zařízení rovně jeho středem, tedy středem plamene. Za předpokladu, že unášené částice budou procházet v průběhu svého letu ve vstřikovacím zařízení rovně středem plamene, nastane k jejímu celému natavení. V případě, že unášené částice letí po trajektorii na hraně plamene, či mimo něj, vystupuje částice na výstupu vstřikovacího zařízení jako jen částečně natavená, či úplně nenatavená. Na obrázcích 11 a 12 je ukázána částečně natavená částice, či nenatavená částice. [1], [13], [14]



Obrázek 10: Částečně natavená částice u struktury slitiny stellit 6 [1]

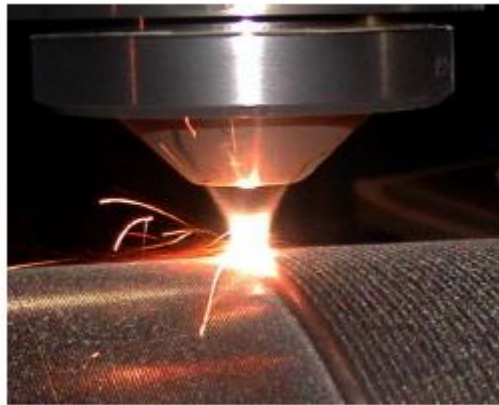


Obrázek 11: Nenatavená částice u struktury stellit 6 [1]

2.6 Laserové navařování (Laser cladding)

Spolu s rychlým vývojem technologií dosáhlo i laserové zpracování materiálu velké důležitosti v různých oborech. Letectví, automobilový průmysl, námořnictvo, obrana a mnoho dalších odvětví využívá laserovou technologii pro své účely. Technologie laserového navařování

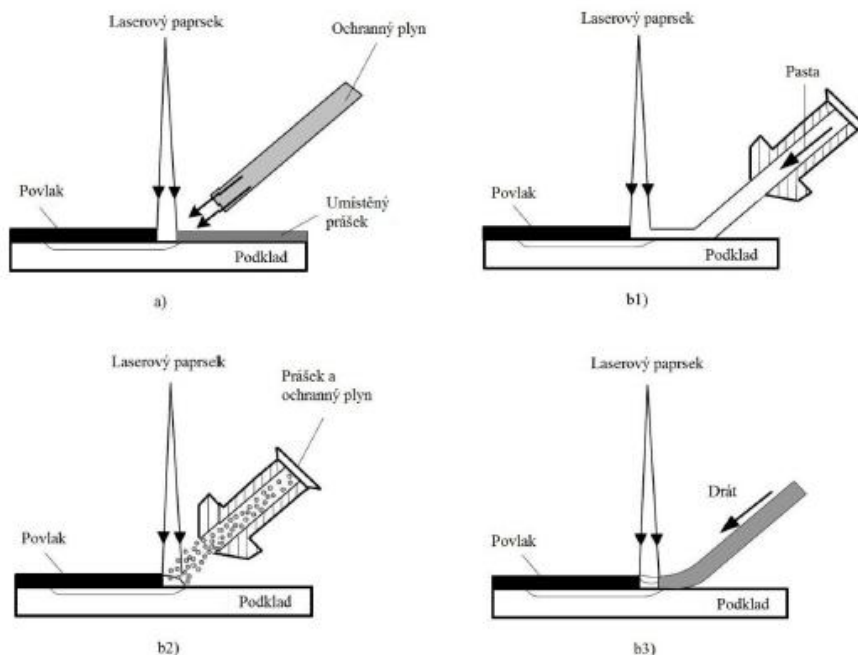
najdeme v anglických textech jako „laser cladding“. Jde o relativně moderní technologii. Laserový návar je výsledkem vlivu laserového paprsku na základní materiál. Materiál se nataví a přiložením přídavného materiálu vzniká tenká vrstva návaru. Přídavný materiál je přiváděn do místa návaru v závislosti na druhu vybrané metody (rozlišujeme dvou či jednostupňový postup). Touto metodou je možné vyrobit vrstvy různých materiálových vlastností s tloušťkou v rozsahu od 0,05 až do 2 mm, a tenké 0,4 mm. Po navaření se materiál zpravidla obrábí, popřípadě brousí do žádaného tvaru. Tato metoda se hodí pro renovace licích a lisovacích forem, ozubených kol a k ochraně vysoce namáhaných dílů. [24], [25]



Obrázek 12: Příklad laserového navařování (Laser Cladding) [24]

2.6.1 Metody laserového navařování

Pro laserové navařování existují dvě známé metody používané v praxi, známé také jako dvoufázový a jednofázový proces. Během dvoufázového procesu se na povrch výchozího materiálu předběžně položí přídavný materiál. Ten se poté vlivem laserového svazku taví i s podkladem. Během jednofázového procesu je přídavný materiál dopravován rovnou do tavné lázně na povrchu výchozího materiálu. Metody laserového navařování jsou ukázány na obrázku 13. [24], [26]

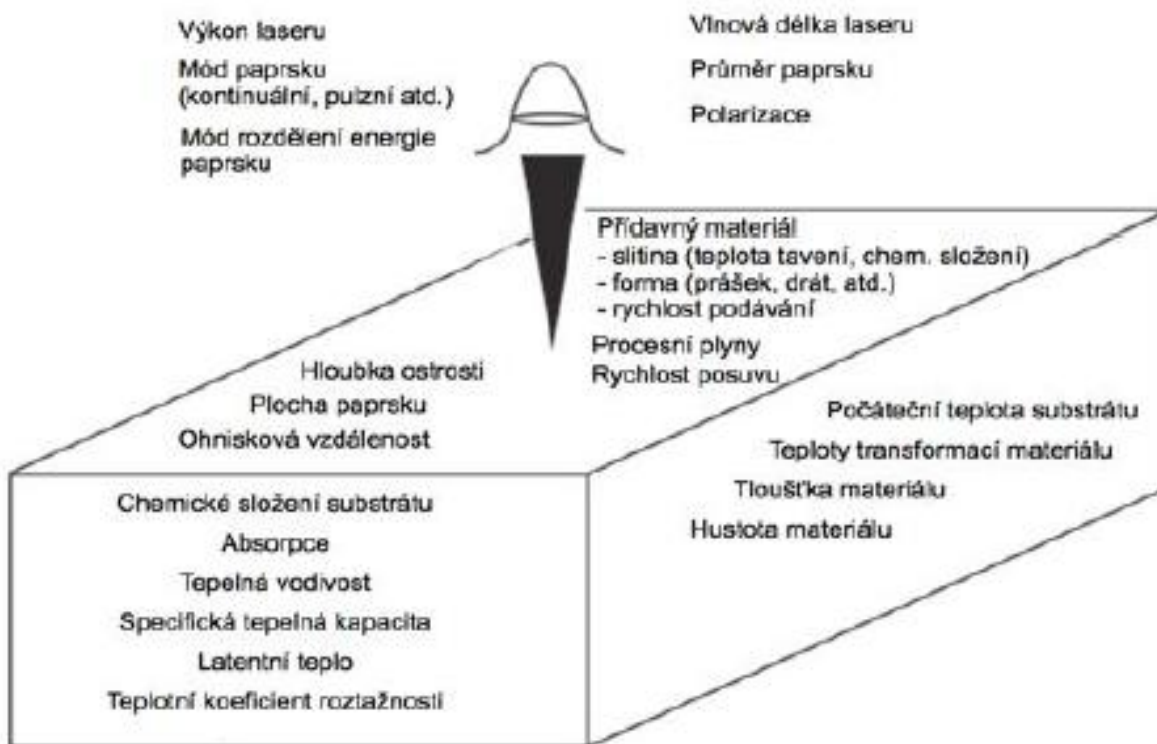


Obrázek 13: Metody laserového navařování: a) dvoufázové navařování, b) jednofázové navařování, zahrnující b1) vkládání pasty, b2) vstříkávání prášku, b3) podávání drátu [25]

Podávání drátu se využívá u ručních oprav ploch a povlakování rotačně symetrických ploch, jenž mohou být povlakovány jednou nepřetržitou drahou. Pasta je tvořená navařovacím práškem s vhodným pojivem a umísťuje se na výchozí materiál zpravidla kousek od laserového paprsku. Vstříkávání prášku je nejčastější a nejlepší metoda povlakování materiálu. Prášek je vyfukován tryskou navzájem s ochranným plynem a není v přímém kontaktu s taveninou. Paprsek může projít přes tok částic a není ohroženo přerušení tavné lázně. [24]

2.6.2 Parametry technologie laserového navařování

Vstupní parametry do procesu laserového navařování, které ho přímo i nepřímo ovlivňují, jsou ukázány na obrázku 14.



Obrázek 14: Parametry laserového navařování [26]

První kategorie parametrů se vyznačuje typem a technickým vybavením používaného laseru. Jako příklad lze uvést vlnovou délku laseru, polarizaci, průměr svazku na výstupu atd. Tyto parametry lze dle potřeby měnit.[26]

Další kategorií parametrů jsou vlastnosti přídavného materiálu, procesní plyn a rychlost posuvu paprsku. Procesní plyny mají u technologie laserového navařování několik funkcí. První funkce je ochranná. Inertní plyn je přiváděn do místa tavení materiálu a tím se chrání tavenina před oxidací. Procesní plyn pak také slouží jako nosné médium. Nejčastěji se jedná o argon (Ar). [26]

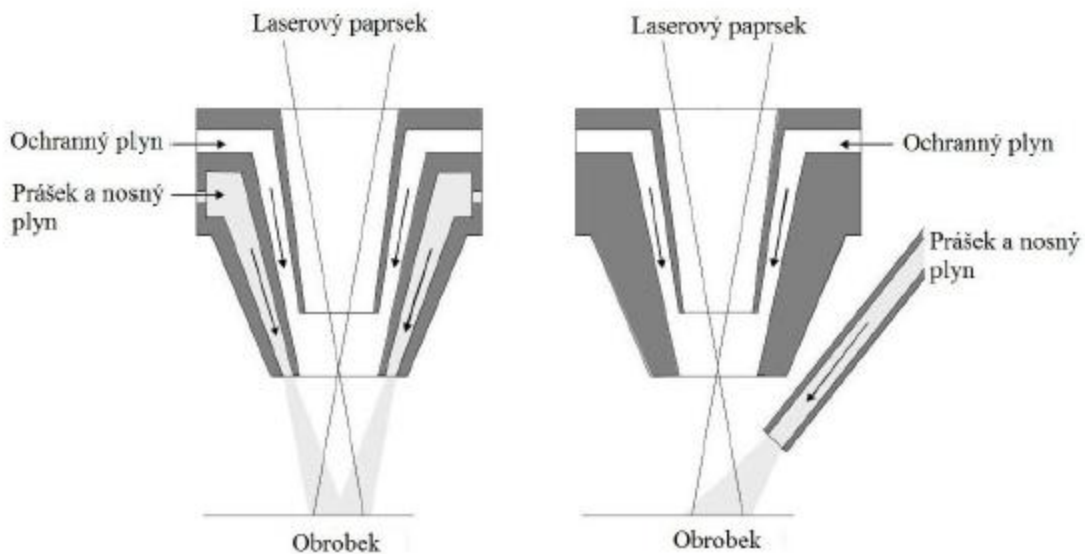
Jako poslední skupinu parametrů lze označit materiálové vlastnosti samotného substrátu. Používá-li se technologie laserového navařování pro zakázkovou výrobu, není možno prakticky změnit vlastnosti substrátu. Pro zabezpečení dobrého odvodu tepla a minimalizování deformací jsou důležité tloušťka a tepelná kapacita substrátu. Teploty transformace by měly být přibližně stejné jak u substrátu, tak i u přídavného materiálu. Pokud tomu tak není, využívá se předehřevů a dohřevů materiálu substrátu. Snížíme tím tak riziko vzniku nepříznivých pnutí a trhlin. [26]

2.6.3 Přivádění přídavného materiálu

Prášek je nutno dopravit z podavače do procesní oblasti. Tento druh operace lze provést použitím nosného plynu (argon, helium (He), dusík (N)), popřípadě zjednodušeně gravitací. Potom je prášek nanesen na taveninu za přispění práškové trysky. Prášková tryska je schopna použít pár kombinací. Dvě hlavní uspořádání jsou ukázána na obrázku 15. U obou případů je možno prášek předehřát během průchodu tryskou pro zvětšení účinnosti procesu. Zkušební práce dokazují, že prášková účinnost, což je poměr mezi dodávaným práškem ze zásobníku a uloženým práškem na substrátu, je u koaxiální trysky zřetelně větší, než u bočního dodávání prášku. [27]

- ✓ Boční trysky
Boční dodávání prášku dává možnost ošetření mnoha druhů tvarů a zužitkovává se u specializovaných práškových trysek. V základu boční práškové trysky se vyznačují jen trubky se správnou délkou, tvarem a průměrem.

- ✓ Koaxiální trysky
Objev koaxiální trysky měl obrovský vliv na technologii navařování vrstev. Koaxiální dodávání prášku je možno propojit s optickým systémem. Velkým kladem koaxiální trysky je sousost dodávání prášku s laserovým paprskem a samostatnost na směru pohybu.



Obrázek 15: Vlevo koaxiální a vpravo boční tryska [27]

2.7 Porovnání HVOF s laserovým navařováním

Vysokorychlostní nástřiky (HVOF) byly vytvořeny v 80. letech 20. století pro použití nástřiků karbidických povlaků. Dnes se tyto nástřiky používají pro velký rozsah kovových i keramických materiálů. HVOF je výkonná metoda pro navařování velkých ploch s tloušťkou nástřiku dosahující až 1,5 mm. Cena v porovnání s klasickým navařováním je poměrně nízká. Během procesu dochází uvolňování velké energii, což má za příčinu celkem nízkou poróznost (cca < 1%). Po dobu nástřiku nedochází téměř k promíchání nástřiku se substrátem. Jako klad tohoto procesu lze považovat to, že nástřik není kontaminován materiálem substrátu. Na druhou stranu lze však za nedostatek této metody považovat fakt, že vede k menší adhezi nástřiku se substrátem. Laserové navařování je lepší v porovnání s HVOF během navařování menších oblastí, kde menší vnesená energie zapříčiňuje menší deformace materiálu, zmenšuje nároky na obrábění a dosahuje menší poróznosti. [28]

Technologie/ Parametry návaru	Laser cladding	HVOF
Tloušťka návaru [mm]	0,2 - 2	0,3 – 1,5
Rychlost depozice [kg/h]	0,2 - 7	1 - 5
Deformace	Nízké	Nízké
Přesnost	Vysoká	Nízká
Celistvost	Vysoká	Střední
Promíšení [%]	1 - 5	Nízké

Tabulka 5: Porovnání HVOF s laser cladding [28]

3 Návrh metod pro provádění experimentů

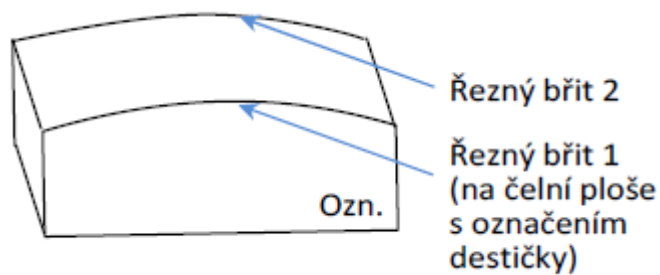
Tato část diplomové práce je určena pro experimentální činnost obrábění žárového nástřiku za použití řezných nástrojů s definovanou geometrií břitu, přesněji pro soustružení slitiny stellite 6 a zkoumání výsledných hodnot obrobeného povrchu a opotřebení použitých řezných nástrojů. Experimentální činnost byla rozdělena do tří částí. V první části bylo potřeba nejprve získat informace pro použití vhodných řezných podmínek a vhodné geometrie břitu řezného nástroje. Následně byly vybrány cermetové břitové destičky s imitací kruhové destičky. V druhé části experimentu došlo k samotnému obrábění žárového nástřiku slitiny stellite 6 za pomoci zvolených řezných podmínek a řezných nástrojů. Ve třetí části a zároveň poslední pak proběhla analýza a vyhodnocení obrobených vzorků a použitých řezných nástrojů.

3.1 Použité technické zařízení

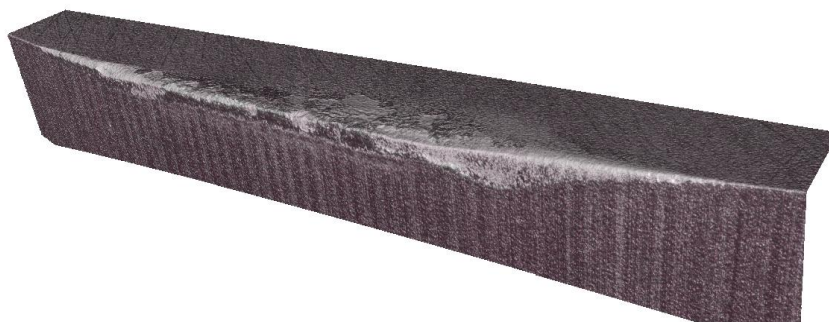
Všechna experimentální měření soustružení žárového nástřiku slitiny stellite 6 se prováděla na přístrojích a zařízeních, jimiž jsou zařízeny halové laboratoře katedry technologie obrábění a které i spadají pod Regionální technologický institut RTI.

3.2 Použité řezné nástroje

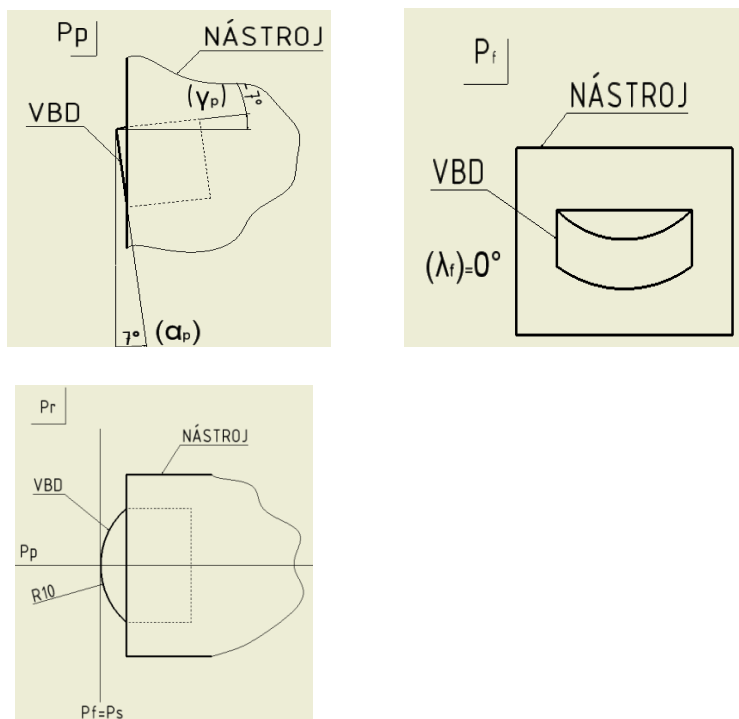
K experimentální činnosti soustružení žárového nástřiku slitiny stellite 6 byly použity cermetové VBD s imitací kruhové destičky, a to konkrétně destičky s průměrem $D = 20$ mm, úhlem čela v zadní rovině $\gamma_p = -7^\circ$ a úhlem hřbetu $\alpha_p = 7^\circ$. Během experimentu se měnil úhel sklonu řezné hrany $\lambda_f = 7^\circ/0^\circ/-7^\circ$. Skica destičky je ukázána na obrázku 16.



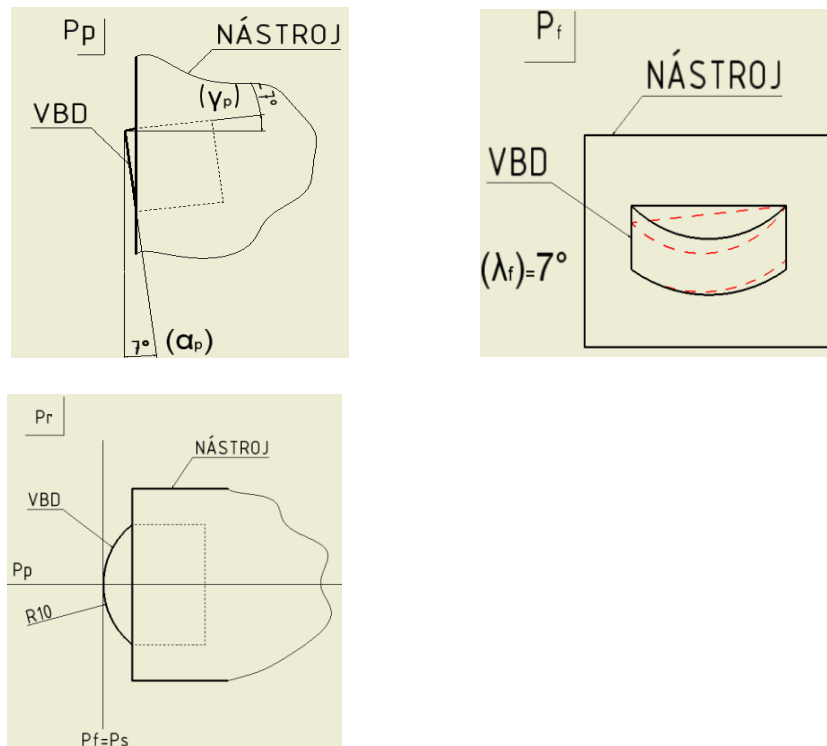
Obrázek 16: Zvolená VBD [29]



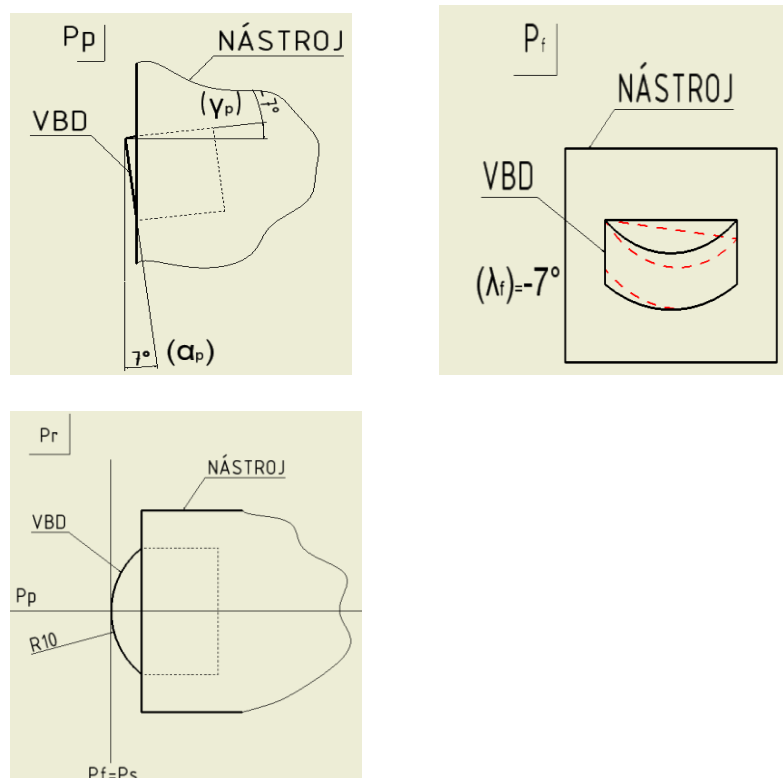
Obrázek 17: Scan řezné hrany VBD s označením 011 [30]



Obrázek 18: Ukázka geometrie VBD pro experiment s úhlem $\lambda_f = 0^\circ$



Obrázek 19: Ukázka geometrie VBD pro experiment s úhlem $\lambda_f = 7^\circ$



Obrázek 20: Ukázka geometrie VBD pro experiment s úhlem $\lambda_f = -7^\circ$

Jednotlivé VBD byly po dobu experimentální činnosti upínány do držáku nástroje s hydroplastickým předpětím označeného číslem 1. Držák je ukázán na obrázku 21.



Obrázek 21: Držák soustružnického nože označen číslem 1 s VBD [29]

3.3 Použité stroje a přístroje

Experiment byl prováděn na univerzálním hrotovém soustruhu od českého výrobce obráběcích strojů Kovosvit MAS, Sezimovo ústí. Soustruh má jako řídicí systém Heidenhain Manual plus. Soustruh má k dispozici kontinuální změnu pracovních otáček vřetene, a to dává možnost při obrábění různých průměrů obrobku dodržet konstantní řeznou rychlost. Soustruh CNC Kovosvit MT 50 je ukázán na obrázku 22.

Hlavní parametry stroje:

- ✓ Oběžný průměr nad ložem 500 mm
- ✓ Oběžný průměr nad suportem 350 mm
- ✓ Vzdálenost mezi hroty 800 mm
- ✓ Otáčky 20–3000 /min
- ✓ Max. hmotnost obrobku 350 kg



Obrázek 22: Soustruh CNC Kovosvit MT 50



Obrázek 23: Pracovní prostor soustruhu CNC Kovosvit MT 50

3.3.1 Další použité přístroje

Jako další měřicí zařízení byl použit plošný profilometr Alicona. Toto měřicí zařízení provádí opticko–skenovací měření. Při experimentu bylo použito k měření a následnému vyhodnocování finálního obrobeného povrchu žárového nástřiku z aspektu abbotovy křivky profilu, čili nosné křivky profilu. Zařízení bylo rovněž použito ke skenování jednotlivých VBD a k provedení

diferenčních analýz, pomocí kterých lze vidět úbytek či naopak nárůst materiálu VBD u výskytu různého druhu opotřebení. Zařízení je zobrazeno na obrázku 24.



Obrázek 24: Profilometr Alicona[31]

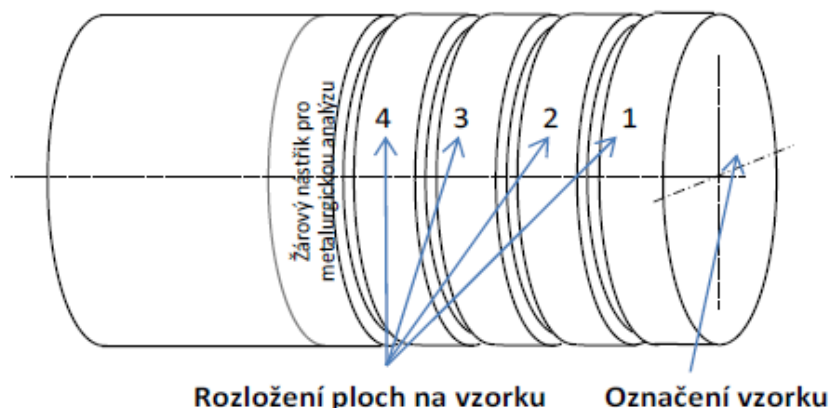
Dalším přístrojem, který byl použit je dílenský mikroskop Multicheck PC 500, který dokáže měřit s přesností 0,005 mm. Mikroskop je složen z několika hlavních částí. Skládá se ze základní granitové desky, pojezdové konzole s kuličkovými šrouby, CCD kamery a počítače. Coby příslušenství náleží k mikroskopu sada objektivů (10x, 30x, 75x, 105x), upínací přípravky, světelný zdroj a software. Dílenský mikroskop je ukázán na obrázku 25.



Obrázek 25: Dílenský mikroskop Multicheck PC 500 [32]

3.4 Použité polotovary zkušebních vzorků

Pro experiment byly použity čtyři válcové vzorky z oceli 12 050 o průměru cca 150 mm, na které byly od čela vzorku nastříkány pomocí metody HVOF žárové nástřiky slitiny stellite 6 na čtyři plochy o přibližné délce 20 mm. Každá plocha sloužila pro jednu určenou VBD a měla své určené označení. Celková délka válce byla 150 mm. Polotovar je ukázán na obrázku 26.



Obrázek 26: Polotovar pro použitý experiment [29]

3.4.1 Parametry nástřiku HVOF

Co se týče žárového nástřiku slitiny stellite 6, který byl použit k experimentální činnosti, byla použita metoda nástřiku HVOF. Princip metody i významnost nástřikových parametrů na finální vlastnosti žárového nástřiku jsou popsány v kapitole 2.3.2. Přesné nástřikové parametry použité pro žárový nástřik na zkušebních vzorcích pro experimentální činnost jsou ukázány v tabulce 6.

Slitina	Stellite 6
Délka barelu [mm]	150
Vzdálenost nástřiku [mm]	360
Přísun prášku [g/min]	46
Rychlost posuv[mm/s]	230
Průtok paliva (kerosinu) [l/hod]	27
Průtok kyslíku [l/min]	996

Tabulka 6: Parametry nástřiku HVOF [1]



Obrázek 27: Zkušební vzorky s žárovým nástřikem slitiny stelit 6

3.5 Určení řezných podmínek

Určení řezných podmínek pro žárový nástřik slitiny stellite 6 metodou HVOF pomocí řezných nástrojů s definovanou geometrií břitu byly stanoveny tak, že řezná rychlost v_c byla konstantní po celou dobu experimentu, tak byla určena i hloubka řezu a_p , jediné co se během experimentu měnilo, byl posuv f_{ot} . Během experimentu byla přiváděna řezná kapalina. Vlivem malé hodnoty řezné rychlosti nelze očekávat velké tepelné zatížení nástroje pomocí VBD, proto přívod řezné kapaliny snižoval tření mezi vznikající drobnou třískou a řezným materiálem a rychlejší odvod třísky z místa řezu, aby nedošlo k poškození povrchu obrobku a hodnot drsnosti obrobku. Použité řezné podmínky pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce 7. [1]

Označení vzorku	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv f_{ot} [mm/ot]	Hloubka řezu a_p [mm]	Chlazení	Typ VBD
1/1	15	0,5	0,2	ANO	011
1/2	15	0,75	0,2	ANO	013
1/3	15	1	0,2	ANO	015
1/4	15	1,25	0,2	ANO	017
2/1	15	1,5	0,2	ANO	019
2/2	15	0,5	0,2	ANO	701
2/3	15	0,75	0,2	ANO	703
2/4	15	1	0,2	ANO	705
3/1	15	1,25	0,2	ANO	707
3/2	15	1,5	0,2	ANO	709
3/3	15	0,5	0,2	ANO	711
3/4	15	0,75	0,2	ANO	713
4/1	15	1	0,2	ANO	715
4/2	15	1,25	0,2	ANO	717
4/3	15	1,5	0,2	ANO	719

Tabulka 7: Určené řezné podmínky pro experiment

4 Diskuze výsledků experimentů

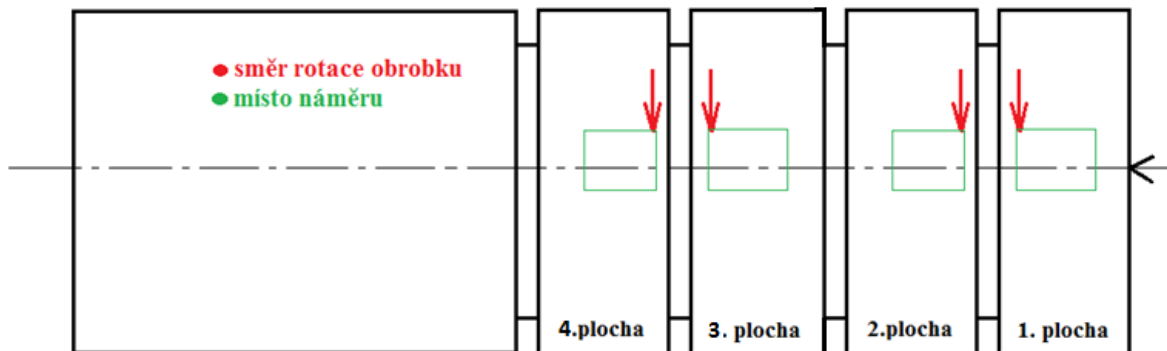
V této části diplomové práce je vypracován rozbor výsledků, jenž byly dosaženy v průběhu experimentu. Výsledkem této části diplomové práce jsou informace, jenž vystihují nejvhodnější řezné podmínky a geometrie řezného nástroje v závislosti na struktuře žárového nástřiku pro získání příhodného obrobku, jenž byl posuzován na podstatě abbottovy křivky a zvolených řezných podmínkách a profilové drsnosti.

4.1 Počáteční etapa experimentu

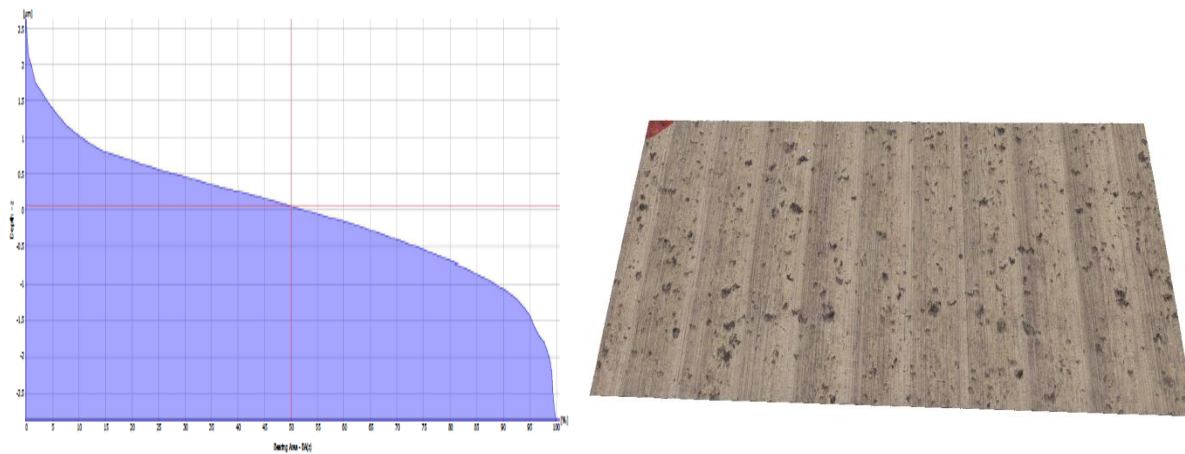
V průběhu počáteční etapy experimentu došlo k obrábění žárového nástřiku slitiny stellite 6 pomocí řezných nástrojů a řezných podmínek, které jsou představeny v tabulce 7. Jednotlivé zkušební vzorky byly posuzovány na podstatě abbottovy křivky profilu a profilové drsnosti a výsledky z tohoto měření jsou zobrazeny na obrázcích 29 až 44.

Parametry měření:

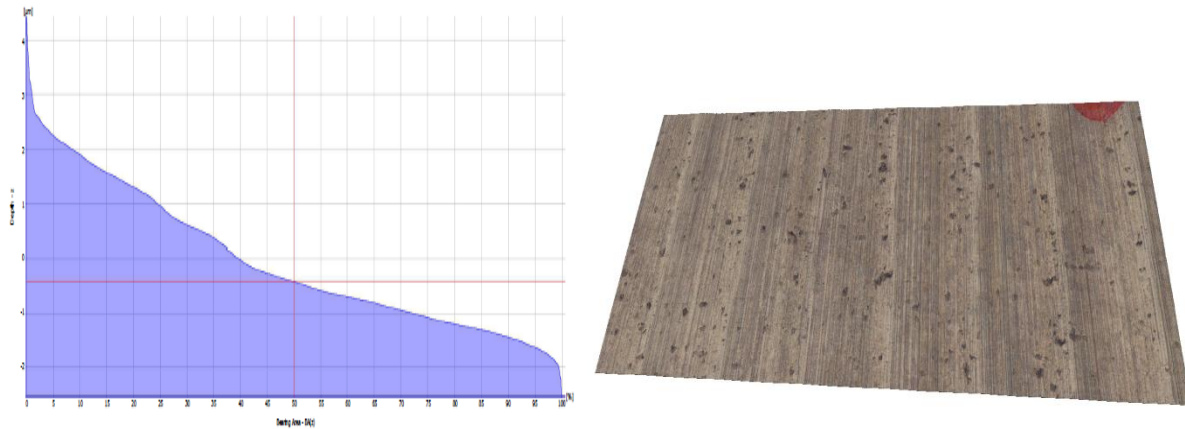
- Zvětšení: 20x
- Velikost skenované plochy: 4 X 1,5mm
- Vyhodnocení drsnosti odpovídá normě ISO 4288 (scan menší plochy neprokázal významné rozdíly)



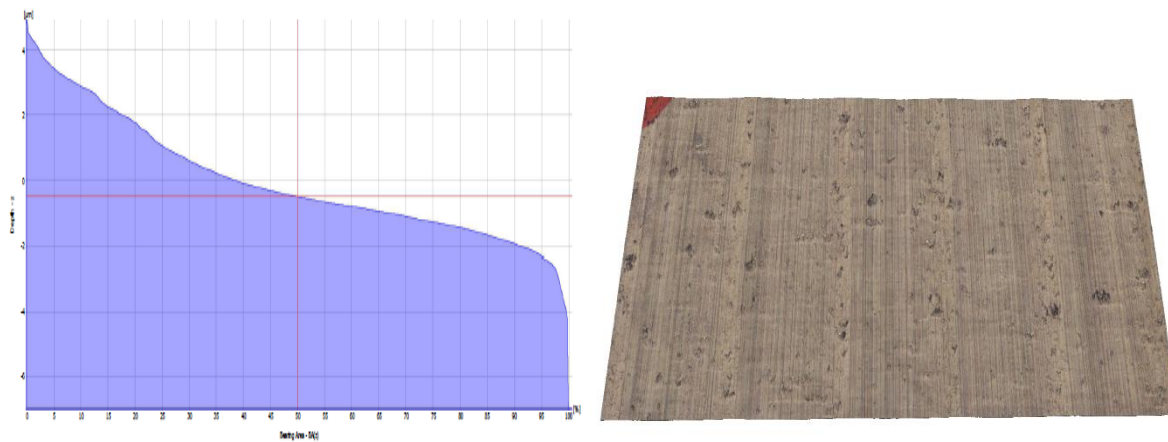
Obrázek 28: Zobrazení měřených ploch na obrobku [30]



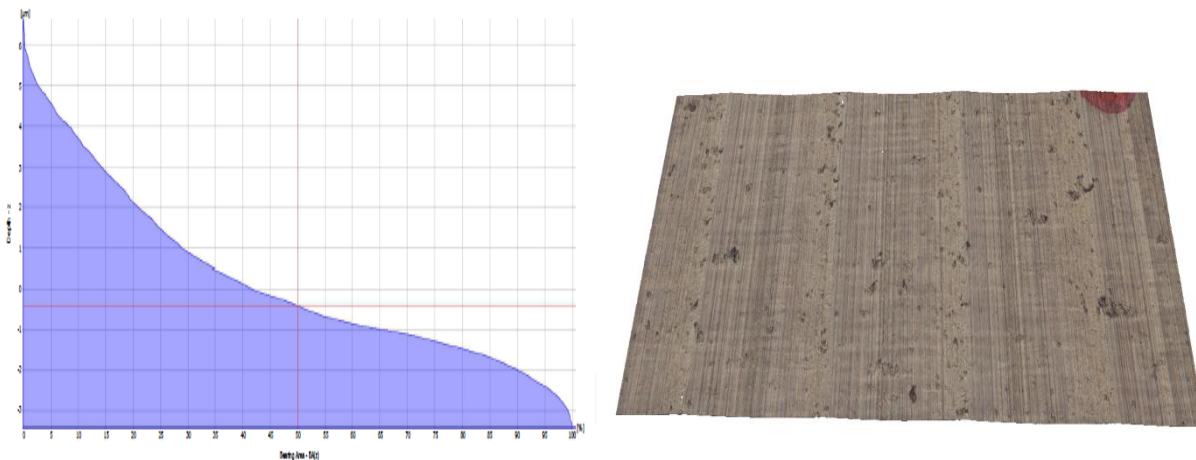
Obrázek 29: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/1 a vpravo finální obrobený povrch [30]



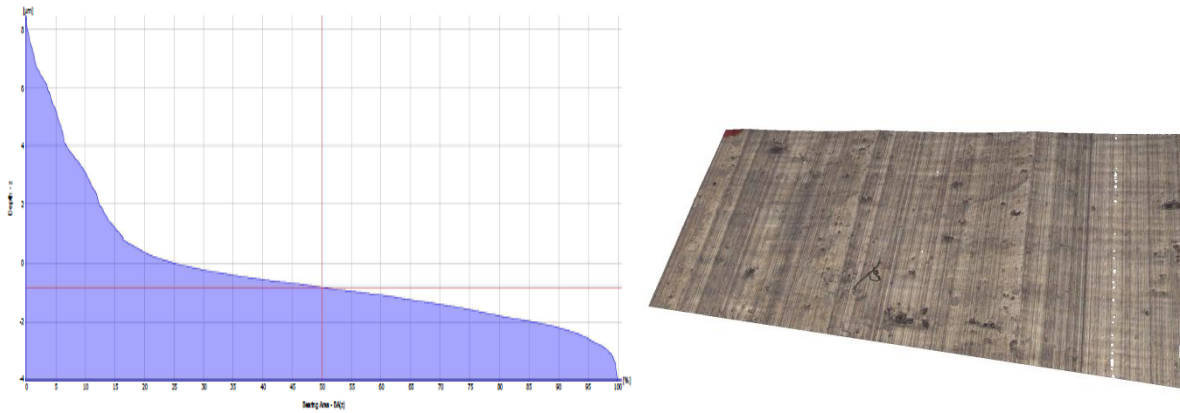
Obrázek 30: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/2 a vpravo finální obrobek [30]



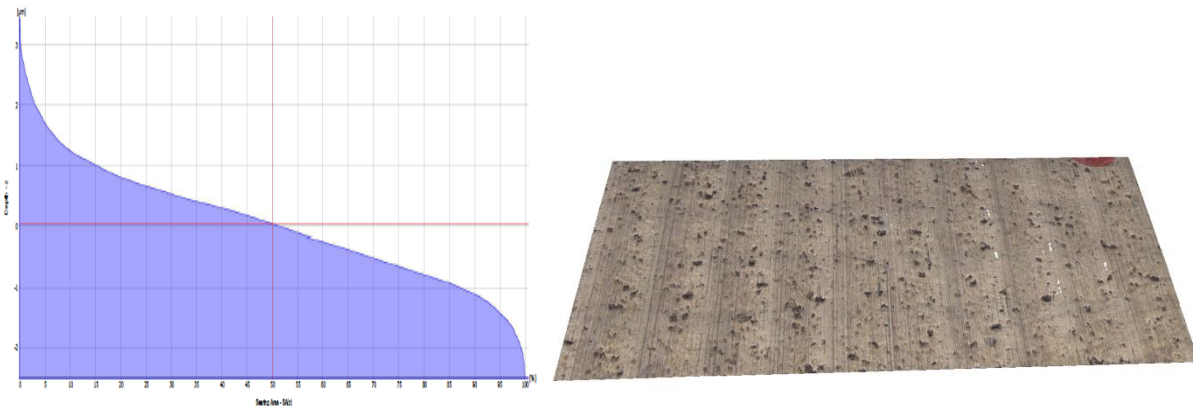
Obrázek 31: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/3 a vpravo finální obrobek [30]



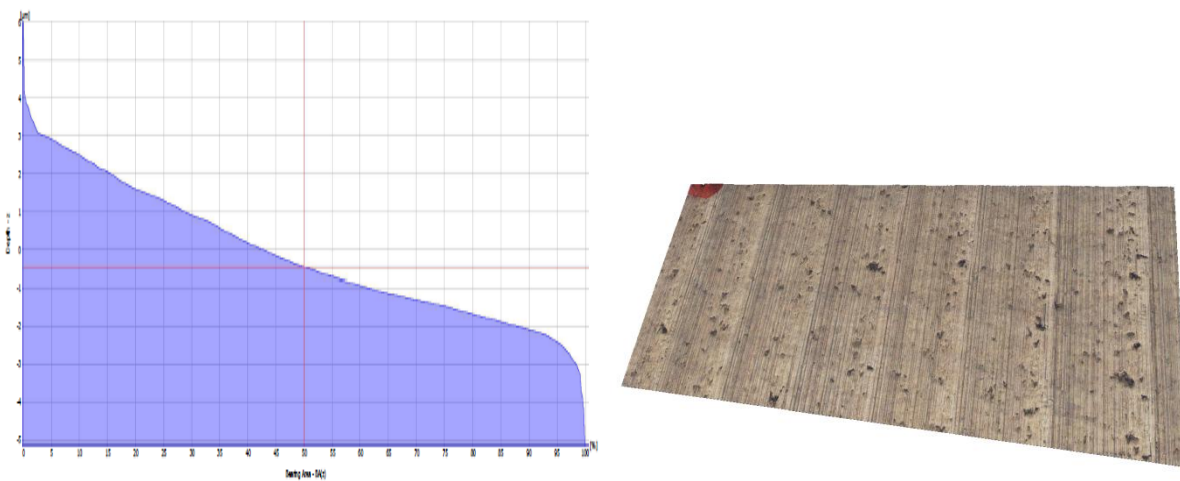
Obrázek 32: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/4 a vpravo finální obrobek [30]



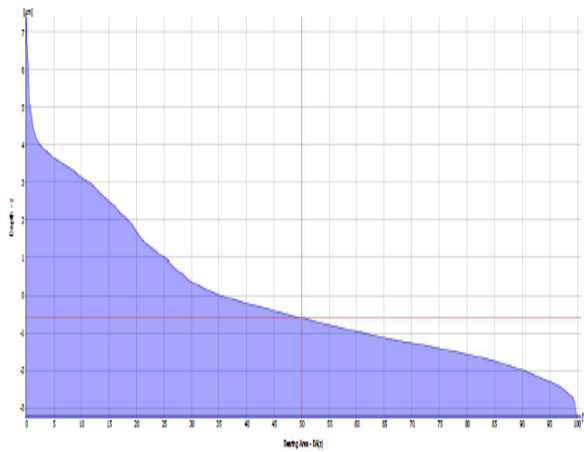
Obrázek 33: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/1 a vpravo finální obrobek



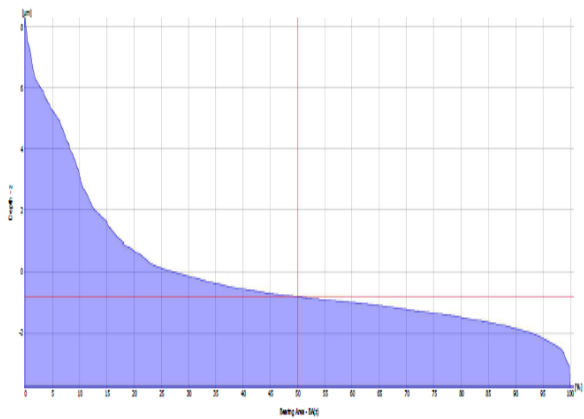
Obrázek 34: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/2 a vpravo finální obrobek [30]



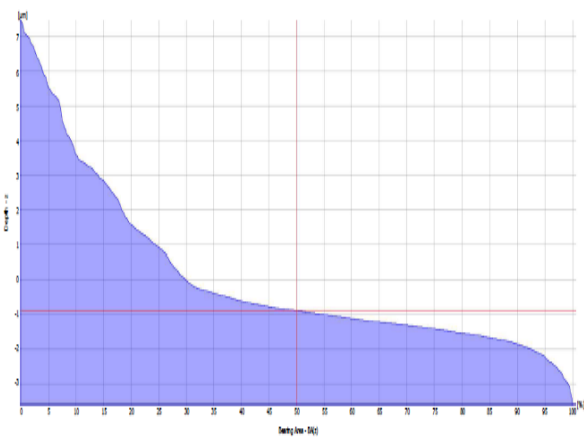
Obrázek 35: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/3 a vpravo finální obrobek



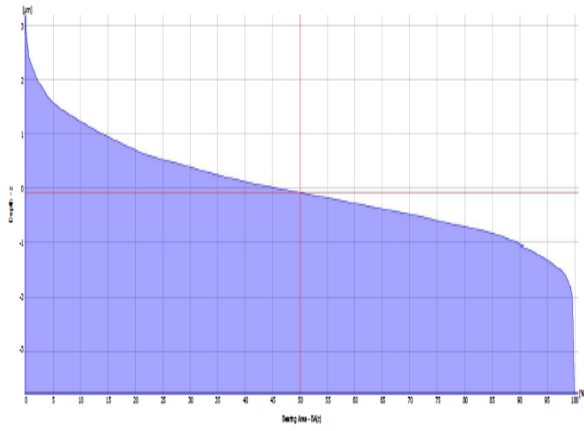
Obrázek 36: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/4 a vpravo finální obrobek [30]



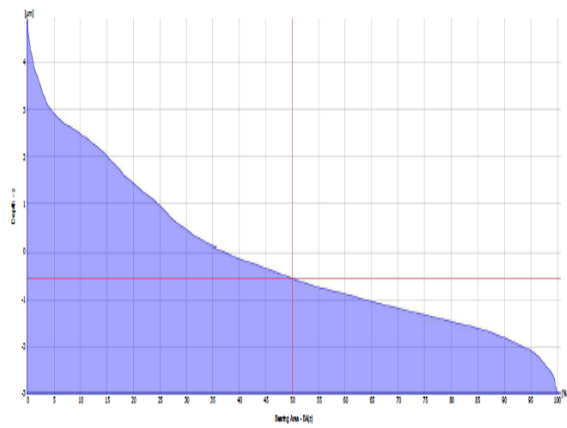
Obrázek 37: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/1 a vpravo finální obrobek [30]



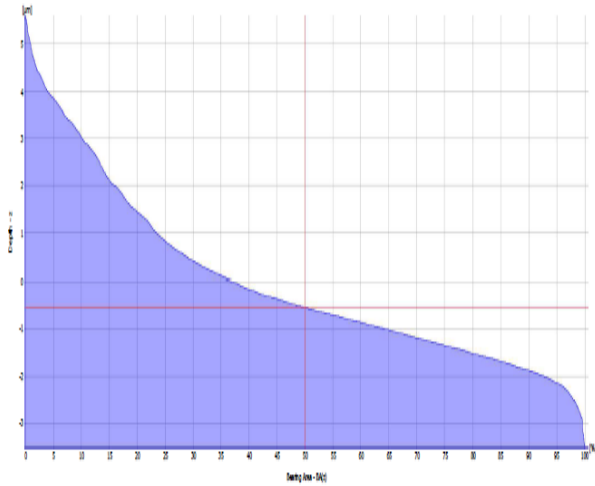
Obrázek 38: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/2 a vpravo finální obrobek [30]



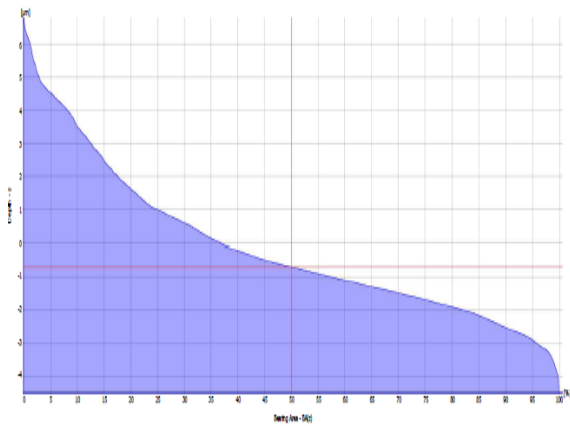
Obrázek 39: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/3 a vpravo finální obrobený povrch [30]



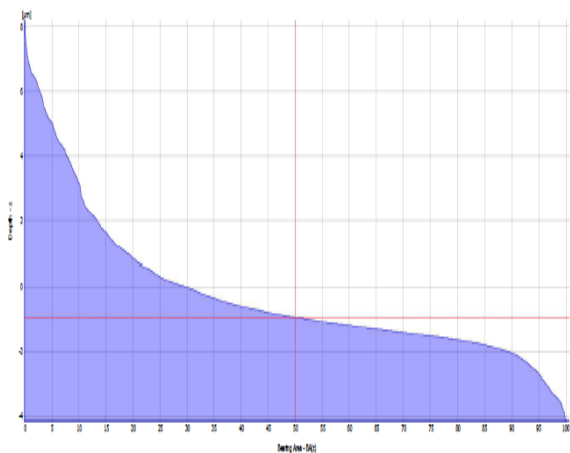
Obrázek 40: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/4 a vpravo finální obrobený povrch [30]



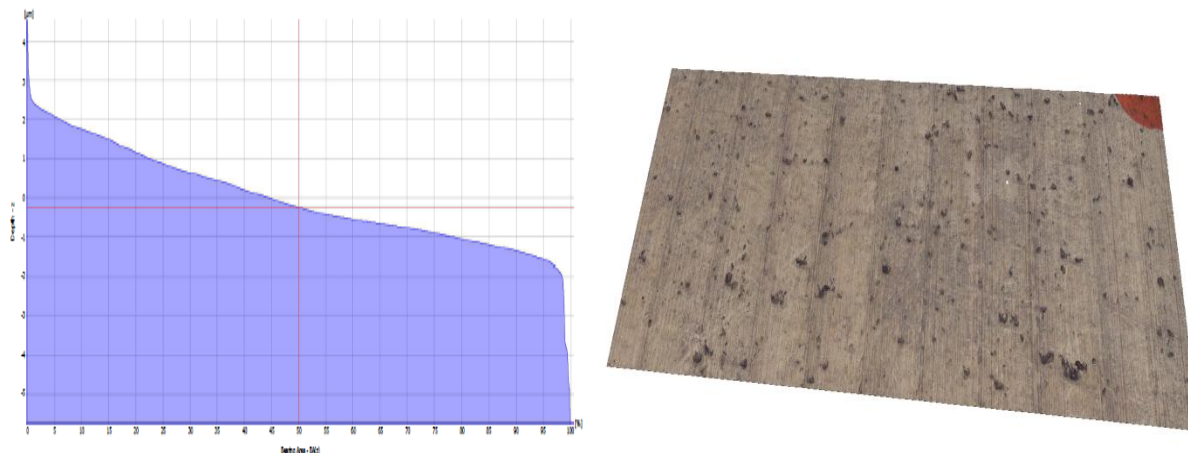
Obrázek 41: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 4/1 a vpravo finální obrobek [30]



Obrázek 42: Vlevo abbottova křivkaprofilu pro vzorek 4/2 a vpravo finální obrobek [30]



Obrázek 43: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 4/3 a vpravo finální obrobek [30]



Obrázek 44: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 4/4 a vpravo finální obrobek [30]

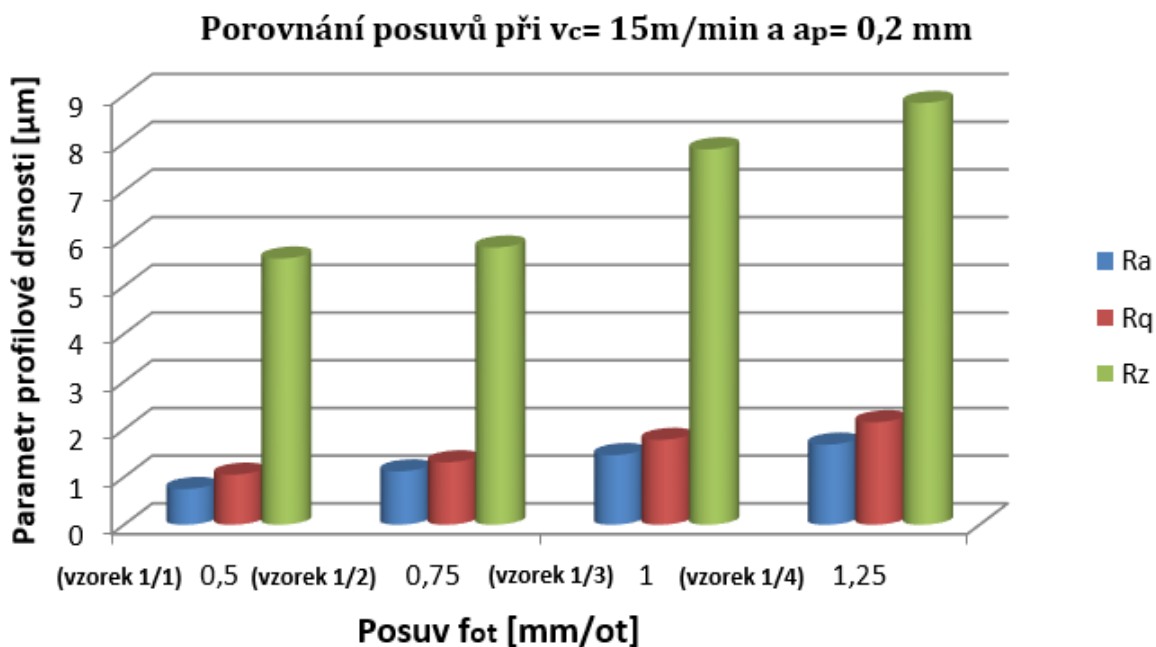
	Ra1	Ra2	Ra	Rq1	Rq2	Rq	Rz1	Rz2	Rz
1/1	0,67	0,82	0,75	0,85	1,24	1,05	4,55	6,61	5,58
1/2	1,10	1,14	1,12	1,28	1,34	1,31	5,51	6,11	5,81
1/3	1,47	1,44	1,46	1,81	1,75	1,78	8,33	7,41	7,87
1/4	1,67	1,69	1,68	2,13	2,17	2,15	8,56	9,11	8,84
2/1	1,62	1,64	1,63	2,20	2,22	2,21	7,98	7,83	7,91
2/2	0,76	0,81	0,79	0,95	1,01	0,98	5,05	5,75	5,40
2/3	1,49	1,51	1,50	1,74	1,76	1,75	8,06	7,50	7,78
2/4	1,51	1,48	1,50	1,88	1,77	1,83	7,75	7,06	7,41
3/1	1,53	1,67	1,60	2,12	2,29	2,21	7,97	8,40	8,19
3/2	1,79	1,78	1,79	2,34	2,35	2,35	8,70	8,94	8,82
3/3	0,69	0,73	0,71	0,89	0,92	0,91	4,84	5,02	4,93
3/4	1,34	1,39	1,37	1,61	1,66	1,64	7,12	6,85	6,99
4/1	1,45	1,47	1,46	1,82	1,82	1,82	8,38	7,75	8,07
4/2	1,80	1,79	1,80	2,25	2,22	2,24	9,17	10,03	9,6
4/3	1,68	1,70	1,69	2,20	2,19	2,20	7,63	7,52	7,58
4/4	1,02	0,95	0,99	1,24	1,12	1,18	5,65	4,85	5,25

Tabulka 8: Hodnoty obrobekových ploch

	Rk	Rpk	Rvk	Rmr1	Rmr2
1/1	2,06	1,69	2,69	9,03	88,18
1/2	2,55	1,83	1,05	25,94	96,14
1/3	3,35	2,98	1,36	23,60	92,89
1/4	3,77	3,75	1,21	24,31	92,85
2/1	2,92	5,97	1,17	17,87	91,41
2/2	2,56	1,17	1,28	9,14	92,93
2/3	4,00	1,91	1,21	21,48	95,75
2/4	3,34	3,51	1,75	23,76	94,09
3/1	2,28	5,51	1,32	22,51	91,50
3/2	2,22	5,91	1,48	28,45	92,00
3/3	2,06	1,10	1,54	15,22	91,85
3/4	3,12	2,54	1,39	24,11	95,09
4/1	3,27	3,48	1,53	22,65	95,35
4/2	4,15	4,16	1,27	21,53	93,50
4/3	2,50	5,06	1,49	24,70	91,26
4/4	2,76	1,36	1,93	21,00	96,31

Tabulka 9: Hodnoty abbotovy křivky obrobených ploch

Naměřené výsledky nabízejí závěr, že ideální povrch (označen 3/3) po obrobení z aspektu parametrů profilové drsnosti byl dosažen během obrábění s vyměnitelnou břitovou destičkou označenou jako 711 při stanovených řezných podmínkách tedy řezné rychlosti, hloubce řezu a posuvu.

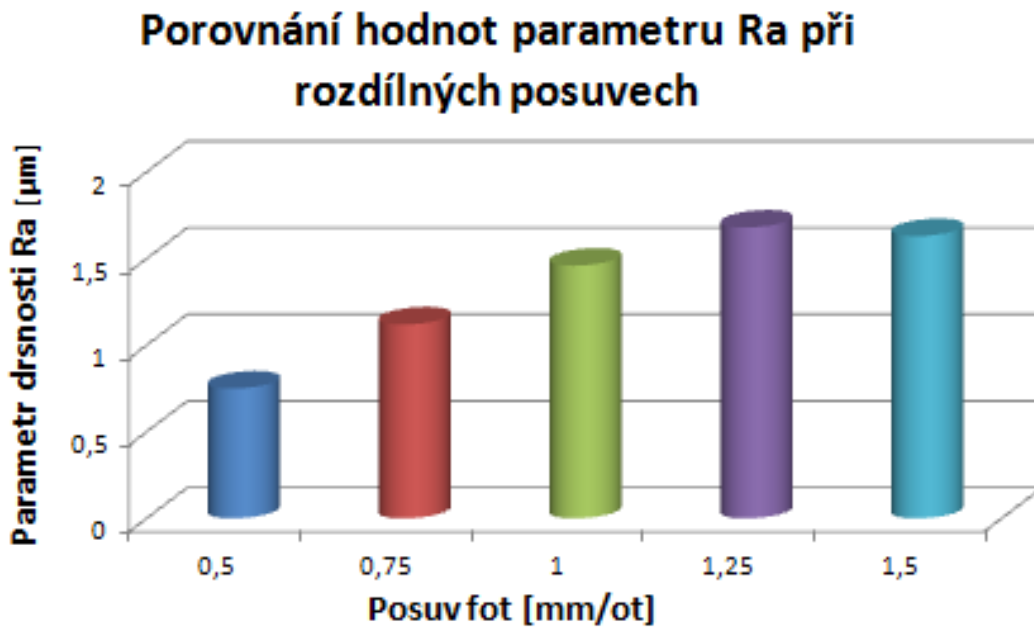


Graf 2: Porovnání parametrů profilové drsnosti v závislosti na rozdílných posuvech

Z hlediska parametrů abbotovy křivky profilu Rk, Rpk a Rvk se jako ideální vzorky ukazují 1/1, 3/1, 3/2 a 3/3, u nichž hloubka profilu jádra, zobrazena parametrem Rk, nepřechází hodnotu 2,3

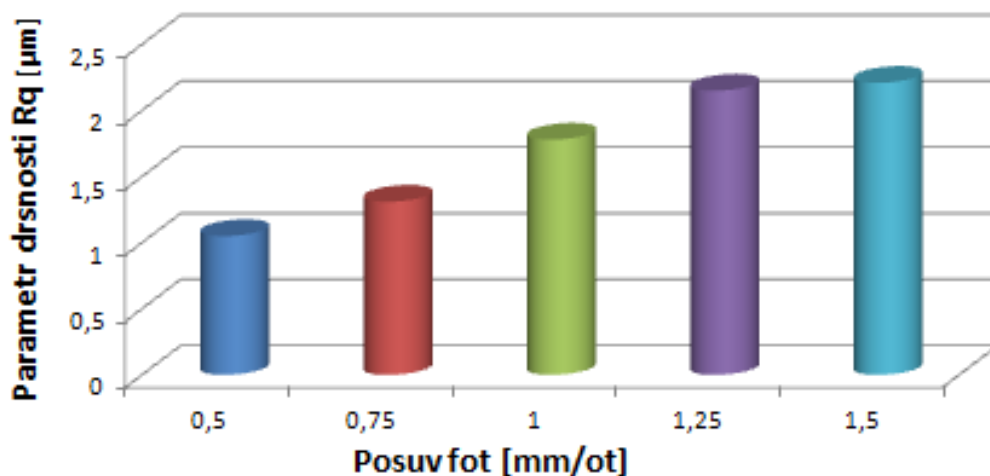
μm . Nejmenší redukované výšky údolí bylo dosaženo u vzorků 1/2 a 2/1, kde byla redukovaná výška údolí, znázorněna pomocí parametru Rvk. Všechny tyto vzorky byly soustruženy během řezné rychlosti $v_c = 15$ m/min. Z aspektu parametrů Rmr1 a Rmr2, jenž ukazují procentuální reprezentaci ploch špiček, případně údolí z celkového povrchu po obrobení, ukazuje nejlepší hodnoty vzorek 1/1, kde parametr Rmr1 ukazuje hodnotu 9,03%, a to ukazuje, že všechen povrch špiček představuje právě toto procentuální zastoupení z celého povrchu, parametr Rmr2 ukazuje hodnotu 88,18% a tudíž ukazuje, že celková plocha údolí je 11,82%.

Na základě níže uvedených grafů lze říci, že z hlediska zvyšujícího se posuvu f_{ot} docházelo u většiny případů ke zhoršení parametru drsnosti. K zhoršení mohlo dojít tím, jelikož se zvětšujícím posuvem dochází k zvětšování řezné síly F při soustružení a tím může docházet k nahodilému vytrhávání jednotlivých částic žárového nástřiku, jenž neměly s okolními částicemi dostačující kohezní pevnost.



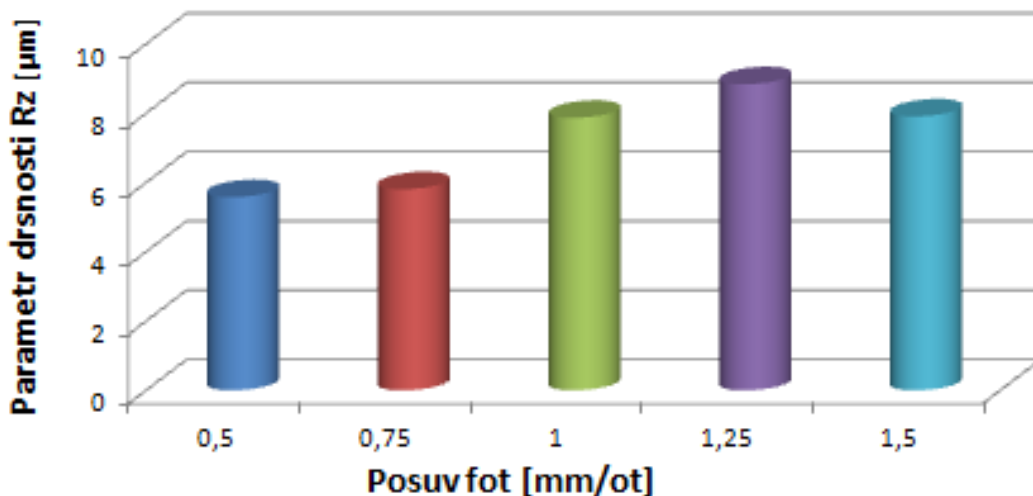
Graf 3: Porovnání parametru Ra profilové drsnosti v závislosti na rozdílných posuvech

Porovnání hodnot parametru R_q při rozdílných posuvech



Graf 4: Porovnání parametru R_q profilové drsnosti v závislosti na rozdílých posuvech

Porovnání hodnot parametru R_z při rozdílných posuvech



Graf 5: Porovnání parametru R_z profilové drsnosti v závislosti na rozdílých posuvech

4.2 Druhá etapa experimentu

Ve druhé části experimentu je vyhodnocená závislost sklonu břitu a posuvu na výsledné drsnosti obrobeneho povrchu a určení výsledků na základě dosažených hodnot. Pomocí statistických charakteristik.

P.č.	KTO	Hrana	Plocha obrobku	Držák	γ_p (°)	λ_f (°)	v Řezná rychlost (m.min ⁻¹)	f Posuv (mm)	a_p Hloubka řezu (mm)	Ra_{avr}	Rz_{avr}
21	11	1	1/1	1	7	0	15	0,50	0,2	0,74	5,58
25	13	1	1/2	1	7	0	15	0,75	0,2	1,12	5,81
29	15	1	1/3	1	7	0	15	1,00	0,2	1,46	7,87
34	17	2	1/4	1	7	0	15	1,25	0,2	1,68	8,83
37	19	1	2/1	1	7	0	15	1,50	0,2	1,63	7,91
41	701	1	2/2	1	7	7	15	0,50	0,2	0,79	5,40
45	703	1	2/3	1	7	7	15	0,75	0,2	1,50	7,78
49	705	1	2/4	1	7	7	15	1,00	0,2	1,50	7,40
53	707	1	3/1	1	7	7	15	1,25	0,2	1,60	8,18
57	709	1	3/2	1	7	7	15	1,50	0,2	1,78	8,82
61	711	1	3/3	1	7	-7	15	0,50	0,2	0,71	4,93
65	713	1	3/4	1	7	-7	15	0,75	0,2	1,37	6,98
69	715	1	4/1	1	7	-7	15	1,00	0,2	1,46	8,06
73	717	1	4/2	1	7	-7	15	1,25	0,2	1,80	9,60
77	719	1	4/3	1	7	-7	15	1,50	0,2	1,69	7,58

Tabulka 10: Hodnoty použité pro druhou část experimentu [33]

Výpočet závislosti Ra na sklonu břitu a posuvu [33]:

Uhel sklonu břitu (°)	λ_f	Posuv za otáčku f (mm)	Drsnost Ra Ra (μm)	$y = \log Ra$	$(y - \bar{y})^2$
-7	1	0,50	0,71	-0,1487	0,07439
-7	1	0,75	1,37	0,1367	0,00016
-7	1	1,00	1,46	0,1644	0,00163
-7	1	1,25	1,80	0,2553	0,01723
-7	1	1,50	1,69	0,2279	0,01079
0	2	0,50	0,74	-0,1308	0,06491
0	2	0,75	1,12	0,0492	0,00559
0	2	1,00	1,46	0,1644	0,00163
0	2	1,25	1,68	0,2253	0,01026
0	2	1,50	1,63	0,2122	0,00778
7	3	0,50	0,79	-0,1024	0,05125
7	3	0,75	1,50	0,1761	0,00271
7	3	1,00	1,50	0,1761	0,00271
7	3	1,25	1,60	0,2041	0,00642
7	3	1,50	1,78	0,2504	0,01598
Suma:				0,27344	

$$\begin{aligned} \bar{y} &= 0,1240 \\ N &= 15 \\ q &= 3 \\ f &= N - 1 = 14 \\ f_1 &= N - 1 = 14 \\ f_2 &= N - 3 = 12 \end{aligned}$$

Pro zkoumání výsledků experimentu a pro zpracování statistických charakteristik byla zvolená východisková rovnice [33]:

$$Ra = 10^{b_0} \cdot \lambda_f^{b_1} \cdot f^{b_2}$$

Regresní funkce v maticovém tvaru pro sérii zkoušek pro Ra [33]:

$$Y = \begin{bmatrix} \log 0,71 \\ \log 1,37 \\ \log 1,46 \\ \log 1,8 \\ \log 1,69 \\ \log 0,74 \\ \log 1,12 \\ \log 1,46 \\ \log 1,68 \\ \log 1,63 \\ \log 0,79 \\ \log 1,5 \\ \log 1,5 \\ \log 1,6 \\ \log 1,78 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log 10 & \log 1 & \log 0,5 \\ \log 10 & \log 1 & \log 0,75 \\ \log 10 & \log 1 & \log 1 \\ \log 10 & \log 1 & \log 1,25 \\ \log 10 & \log 1 & \log 1,5 \\ \log 10 & \log 2 & \log 0,5 \\ \log 10 & \log 2 & \log 0,75 \\ \log 10 & \log 2 & \log 1 \\ \log 10 & \log 2 & \log 1,25 \\ \log 10 & \log 2 & \log 1,5 \\ \log 10 & \log 3 & \log 0,5 \\ \log 10 & \log 3 & \log 0,75 \\ \log 10 & \log 3 & \log 1 \\ \log 10 & \log 3 & \log 1,25 \\ \log 10 & \log 3 & \log 1,5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = X \cdot b$$

$$X = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,0000 & -0,3010 \\ 1,0000 & 0,0000 & -0,1249 \\ 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 1,0000 & 0,0000 & 0,0969 \\ 1,0000 & 0,0000 & 0,1761 \\ 1,0000 & 0,3010 & -0,3010 \\ 1,0000 & 0,3010 & -0,1249 \\ 1,0000 & 0,3010 & 0,0000 \\ 1,0000 & 0,3010 & 0,0969 \\ 1,0000 & 0,3010 & 0,1761 \\ 1,0000 & 0,4771 & -0,3010 \\ 1,0000 & 0,4771 & -0,1249 \\ 1,0000 & 0,4771 & 0,0000 \\ 1,0000 & 0,4771 & 0,0969 \\ 1,0000 & 0,4771 & 0,1761 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} -0,1487 \\ 0,1367 \\ 0,1644 \\ 0,2553 \\ 0,2279 \\ -0,1308 \\ 0,0492 \\ 0,1644 \\ 0,2253 \\ 0,2122 \\ -0,1024 \\ 0,1761 \\ 0,1761 \\ 0,2041 \\ 0,2504 \end{bmatrix}$$

Vektor koeficientů regresní funkce podle inverzní matice [33]:

$$\mathbf{b} = [\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}]^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$$

Transponovaná matice \mathbf{X}^T k matici \mathbf{X} [33]:

$$\mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 & 1,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,3010 & 0,3010 & 0,3010 & 0,3010 & 0,3010 & 0,477121 & 0,477121 & 0,477121 & 0,477121 & 0,477121 \\ -0,3010 & -0,1249 & 0,0000 & 0,0969 & 0,1761 & -0,3010 & -0,1249 & 0,0000 & 0,0969 & 0,1761 & -0,30103 & -0,12494 & 0 & 0,09691 & 0,176091 \end{bmatrix}$$

Vzájemný součin matice \mathbf{X} a transponované matice \mathbf{X}^T [33]:

$$\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 15,00 & 3,89 & -0,46 \\ 3,89 & 1,59 & -0,12 \\ -0,46 & -0,12 & 0,44 \end{bmatrix}$$

Determinant matice $\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}$ vypočtený dle Sarussovo pravidla [33]:

$$|\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}| = 3,7184$$

Inverzní matice $[\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}]^{-1}$ je [33]:

$$[\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,184442 & -0,445585 & 0,071842 \\ -0,445585 & 1,717859 & 1,12E-16 \\ 0,071842 & 5,6E-17 & 2,348268 \end{bmatrix}$$

Kontrola správnosti inverze matice vykonána dle vztahu [33]:

$$\mathbf{E} = [\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}]^{-1} \cdot [\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}] = \begin{bmatrix} 1,000E+00 & 1,232E-16 & -2,082E-17 \\ -5,138E-17 & 1,000E+00 & 2,150E-17 \\ 0,000E+00 & 0,000E+00 & 1,000E+00 \end{bmatrix}$$

Protože ve výsledné jednotkové matici \mathbf{E} jsou prvky hlavní diagonály přibližně rovné 1 a prvky mimo diagonálu jsou přibližně rovné 0, znamená to, že inverze matice $[\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}]^{-1}$ byla vykonána správně. Odchytky od finálních hodnot jsou způsobené použitím logaritmické linearizace a chybami při zaokrouhlování hodnot. [33]

Ve všeobecnosti vektor koeficientů regresní funkce \mathbf{b} je [33]:

$$\mathbf{b} = [\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}]^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}$$

Protože pro maticový součin platí asociativnost, využije se tato vlastnost pro získání mezivýsledku [33]:

$$A = [X^T \cdot X]^{-1} \cdot X^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0,1628 & 0,1755 & 0,1844 & 0,1914 & 0,1971 & 0,0287 & 0,0413 & 0,0503 & 0,05727 & 0,062958 \\ -0,4456 & -0,4456 & -0,4456 & -0,4456 & -0,4456 & 0,0715 & 0,0715 & 0,0715 & 0,071542 & 0,071542 \\ -0,6351 & -0,2215 & 0,0718 & 0,2994 & 0,4854 & -0,6351 & -0,2215 & 0,0718 & 0,299412 & 0,485351 \end{bmatrix}$$

Vektor koeficientů regresní funkce **b** je [33]:

$$b = A \cdot Y = \begin{bmatrix} 0,1567 \\ -0,2459 \\ 0,5174 \end{bmatrix}$$

Hledaná regresní funkce pro logaritmické souřadnice má tvar [33]:

$$\hat{y} = \lg \hat{R}a = 0,15668 + (-0,24594) \cdot \log v + (0,51741) \cdot \log f$$

Vektor výpočtových hodnot Ra :

$$\hat{Y} = X \cdot b = \begin{bmatrix} 0,0009 \\ 0,0920 \\ 0,1567 \\ 0,2068 \\ 0,2478 \\ -0,0731 \\ 0,0180 \\ 0,0826 \\ 0,1328 \\ 0,1738 \end{bmatrix}$$

Rozdíl vektorů naměřených a vypočtených hodnot:

$$Y - \hat{Y} = \begin{bmatrix} -0,1497 \\ 0,0447 \\ 0,0077 \\ 0,0485 \\ -0,0199 \\ -0,0577 \\ 0,0312 \\ 0,0817 \\ 0,0925 \\ 0,0384 \end{bmatrix}$$

Transponovaná matice rozdílů vektorů naměřených a vypočtených hodnot [33]:

$$[Y - \hat{Y}]^T = \begin{bmatrix} -0,149662 & 0,04469 & 0,007678 & 0,048455 & -0,0199 & -0,05765 & 0,031223 & 0,081713 & 0,092528 & 0,038437 \end{bmatrix}$$

Pro reziduální rozptyl je [33]:

$$s_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - q}$$

q je počet statisticky významných koeficientů regrese
(v tomto experimentu 3)

Čitatel reziduálního rozptylu je možné určit násobením matic podle vztahu [33]:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = [Y - \hat{Y}]^T \cdot [Y - \hat{Y}] = 0,048213$$

Reziduální rozptyl je [33]:

$$s_r^2 = 0,004018$$

Vztah pro výpočtové rozptyly koeficientů – kovariační matice [33]:

$$\text{Var}(\mathbf{b}) = [\mathbf{X}^T \mathbf{X}]^{-1} \cdot s_r^2 = \begin{bmatrix} 0,00074 & -0,00179 & 0,00029 \\ -0,00179 & 0,00690 & 0,00000 \\ 0,00029 & 0,00000 & 0,00943 \end{bmatrix}$$

Rozptyl měřených hodnot \mathbf{Ra} [33]:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N-1} = 0,019532$$

Kvalita aproximace regresní funkce hodnocená Fisher – Snedocorovým testovacím kritériem [33]:

$$F = \frac{s_y^2}{s_r^2} = 4,861$$

$$F_{0,05} = 2,646$$

Vzhledom na splnění podmínky:
 $F > F_{0,05}(f)$
je adekvatnost regresní funkce splněná

Statistická významnost koeficientů regrese [33]: standardní odchylka i-tého koeficientu (b_i)

$$s_{bi} = s_r \sqrt{\frac{C_{ii}}{N}}$$

kde : C_{ii} diagonální prvek kovariační matice

$$s_{b0} = 0,0004$$

$$s_{b1} = 0,0014$$

$$s_{b2} = 0,0016$$

Významnost koeficientů regrese se posuzuje podle Studentova t-kritéria, když musí platit [33]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{s_{bi}} > t_{0,05}(f)$$

kde : $t_{0,05}(f)$ testové kritérium se stupněm voľnosti $f = N - 1$

$t_{0,05}(f) = 2,14$ pro $f = 14$ a 95% hladinu významnosti

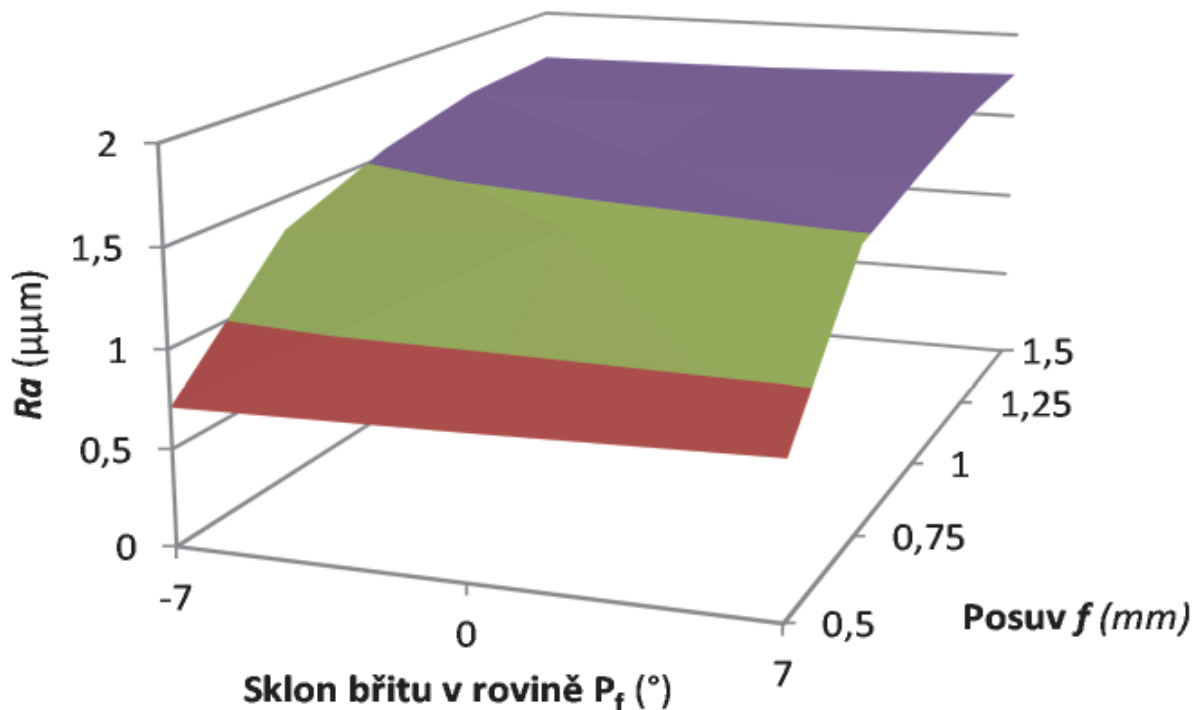
$$t_0 = 351,6672 > 2,14$$

$$t_1 = 180,8838 > 2,14$$

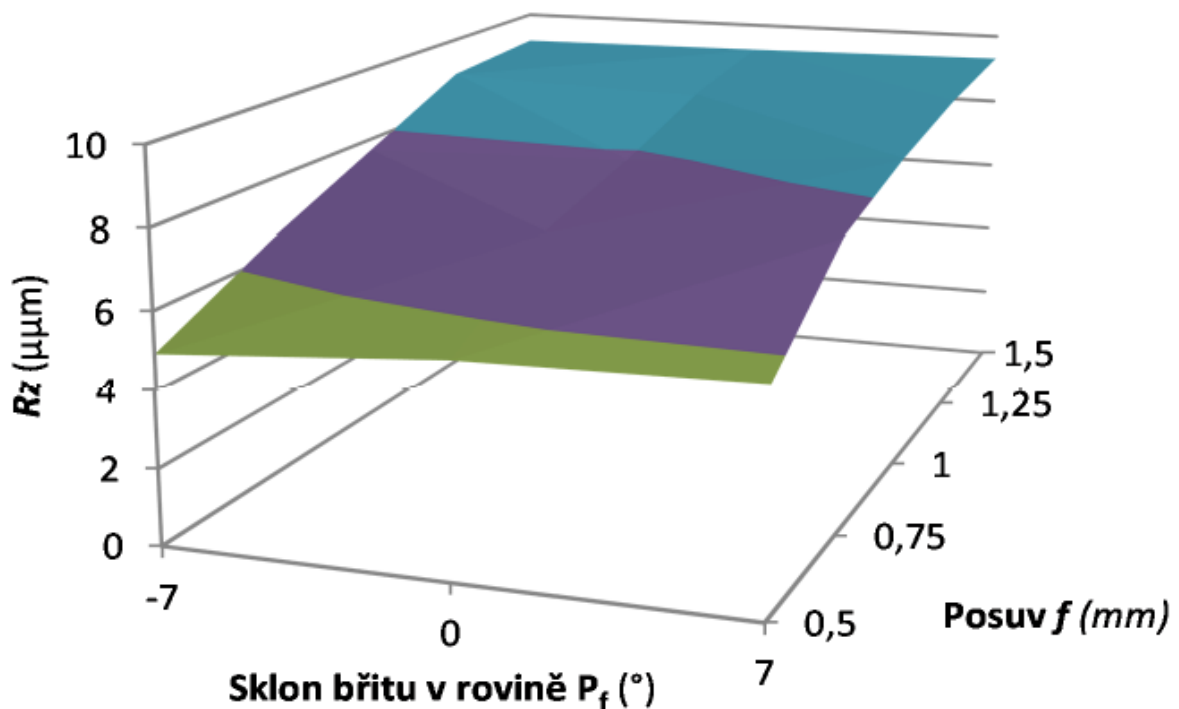
$$t_2 = 325,4772 > 2,14$$

Ze splnění nerovností vyplývá, že všechny koeficienty regrese jsou statisticky významné. Výsledky statistických charakteristik získané na základě prováděného experimentu ukazují, že zvyšující se posuv a měnící se úhel sklonu ostří významně neovlivňují výsledný parametr

profilové drsnosti Ra a Rz. Zvyšující posuv byl zvolen z důvodu úhlu nastavení hlavního ostří κ_r a produktivity respektive hospodárnosti. Dalším důvodem lze označit jako tvorbu minimální tloušťku odřezávané třísky. Výsledek závislosti parametru profilové drsnosti Ra na zvoleném posuvu a sklonu břitu je ukázán v grafu číslo 6. Výsledek závislosti parametru profilové drsnosti Rz na zvoleném posuvu a sklonu břitu je ukázán na grafu číslo 7. K výsledkům statistických charakteristik parametru profilové drsnosti Rz se došlo stejným způsobem jako u parametru profilové drsnosti Ra za pomoci statistických charakteristik. U obou případů je tedy zřejmé, že zvolený sklon břitu zásadně neovlivňuje výsledné hodnoty získané na základě provedené experimentální činnosti.



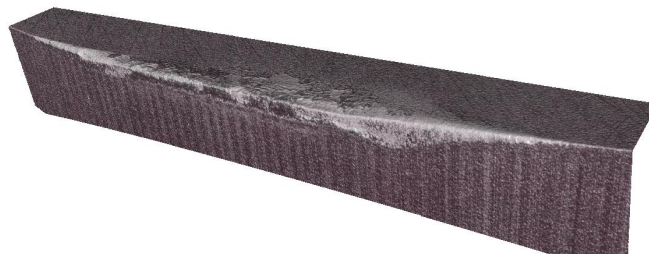
Graf 6: Porovnání parametrů profilové drsnosti Ra v závislosti na rozdílných posuvech a sklonu břitu [33]



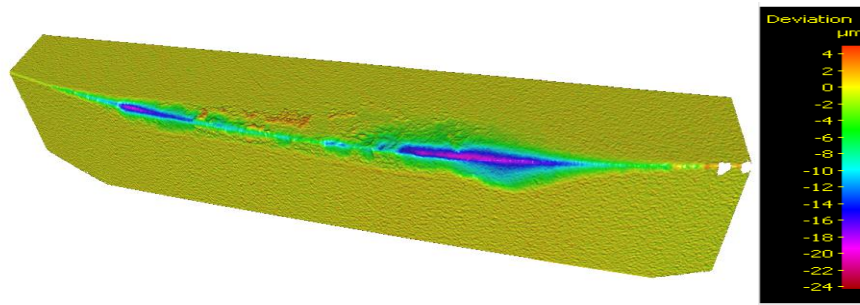
Graf 7: Porovnání parametrů profilové drsnosti Rz v závislosti na rozdílných posuvech a sklonu břitu [33]

4.3 Opotřebení VBD a vzniklá tříška

V průběhu experimentálního měření bylo pomocí profilometru Alicona ještě zkoumáno opotřebení vyměnitelných břitových destiček, jenž vzniklo v průběhu obrábění zkušebních vzorků. Ukázka opotřebené VBD s diferenční analýzou opotřebení je znázorněna na obrázku 45 a obrázku 46.

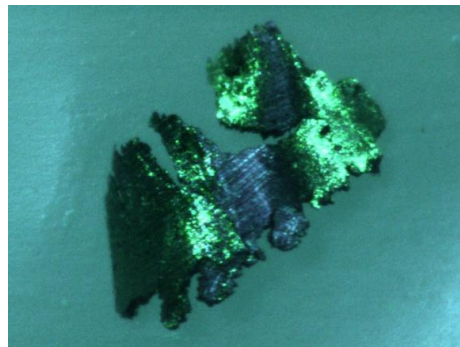


Obrázek 45: Opotřebení VBD č. 11 [30]



Obrázek 46: Diferenční analýza potřebení VBD č. 11 [30]

Během soustružení zkušebních vzorků nastříkanými metodou HVOF slitiny stellite 6 docházelo ke vzniku třísky. Charakter vzniklé třísky lze popsat jako poslepané kuličky, respektive vznikala minimální tříška připomínající prach. Vzniklá tříška je ukázána na obrázku 47.



Obrázek 47: Vzniklá tříška pořízená na Dílenském mikroskopu Multicheck PC 500, zvětšení 180X

5 Technické zhodnocení výsledků

V průběhu experimentální činnosti byly určeny výsledné hodnoty parametrů profilové drsnosti. Při stanovených řezných podmínkách:

- řezné rychlosti $v_c = 15$ m/min, která byla po celou dobu experimentální činnosti konstantní, hloubce řezu $a_p = 0,2$ mm, která byla také po celou dobu experimentální činnosti,
- posuvu $f = 0,5$ mm
- a sklonu břitu $\lambda_f = -7^\circ$

byla jako nejlepší vyhodnocena hodnota profilového parametru drsnosti $R_a = 0,71$ μm na povrchu označeném 3/3 při použité vyměnitelné břitové destičce s označením 711.

Je nutné říci, že parametry profilové drsnosti byly měřeny na profilometru Alicona, a z důvodu nedostatku času neproběhlo dostatečné množství měření, což může bohužel ve výsledném vyhodnocování hodnocení vést k určitým odchylkám a nepřesnostem.

Z hlediska hodnocení parametrů profilových drsností v závislosti na stejných posuvech nedošlo k výraznějším změnám a výkyvům při experimentální činnosti. Nejlepších parametrů se dosahovalo při posuvu $f = 0,5$ mm.

Co se hodnocení parametru drsnosti v závislosti na zvolených úhlech sklonu břitu týče, je možné říci, že sklony břitu výrazně neovlivnily vzniklé parametry drsnosti.

Nutné je také zahrnout parametry struktury samotného žárového nástřiku spolu se zvolenými řeznými podmínkami. Každá změna parametru žárového nástřiku má vliv na jeho změnu struktury, a tím po následném obrobení bude mít i dopad na výsledné hodnoty parametru drsnosti obrobeného žárového nástřiku. Dalším ovlivněním může být například změna přípravy prášku nebo i jiné prohřátí a následné natavení jednotlivých částic, jenž poté vytvářejí deformované částice žárového nástřiku. Na závěr můžeme uvést poslední ovlivnění hodnocených parametrů drsnosti, a to že na finálním povrchu obrobené součásti zůstávají malé částice žárového nástřiku, jenž mohou ovlivňovat naměřené hodnoty.



Obrázek 48: Scan obrobeného povrchu s nejlepším parametrem profilové drsnosti [30]

6 Ekonomické zhodnocení výsledků

Diplomová práce bude ekonomicky hodnocena na základě porovnání metod broušení a soustružení žárového nástřiku při optimálních řezných podmínkách. K porovnání obou metod je zapotřebí nejprve vypočítat jednotkový strojní čas pro obrobení jednoho kusu zkušební vzorku. Byly zvoleny 4 kusy. Poté bylo provedeno ekonomické porovnání na základě celkových nákladů na jeden obrobený zkušební vzorek.

6.1 Soustružení

Pro výpočet jednotkového strojního času u soustružení je počítáno s délkou přejezdu $l_p = 2$ mm. Vypočtení délky nájezdu l_n soustružnického nože s upnutou VBD kruhového tvaru bylo provedeno za pomoci Pythagorovy věty za zadaných řezných podmínek.

- d – průměr obrobku [mm]
- L – celková dráha nástroje [mm]
- v_c – řezná rychlost [m/min]
- i – počet přejezdů
- a_p – hloubka řezu [mm]
- f_{ot} – posuv na otáčku [mm/ot]
- i – počet přejezdů
- l_n – vzdálenost nájezdu [mm]
- l_p – vzdálenost přejezdu [mm]

Výpočet nájezdu:

$$l_n = \sqrt{r^2 - (r - a_p)^2} = \sqrt{10^2 - (10 - 0,2)^2} = \sqrt{3,96} = 1,989 \text{ mm}$$

Výpočet celkové dráhy nástroje:

$$L = l + l_n + l_p = 80 + 1,989 + 2 = 83,989 \text{ mm}$$

Výpočet jednotkového strojního času t_{as} :

$$t_{as} = \frac{\pi \times d \times L}{f_{ot} \times v_c \times 1000} \times i = \frac{\pi \times 150 \times 83,989}{0,5 \times 15 \times 1000} \times 1 = 5,27 \text{ min}$$

6.2 Broušení

Pro výpočet jednotkového strojního času pro broušení byl zvolen diamantový kotouč o šířce 15 mm a zvolená šířka byla zároveň rovna délce nájezdu i přejezdu, jelikož byla zvolena taková metoda broušení.

- d_p – průměr obrobku [mm]
- v_p – obvodová rychlost obrobku [mm/min]
- L – celková dráha brusného kotouče [mm]
- i – počet přejezdů
- f – posuv [mm]
- l_n – vzdálenost nájezdu [mm]
- l_p – vzdálenost přejezdu [mm]

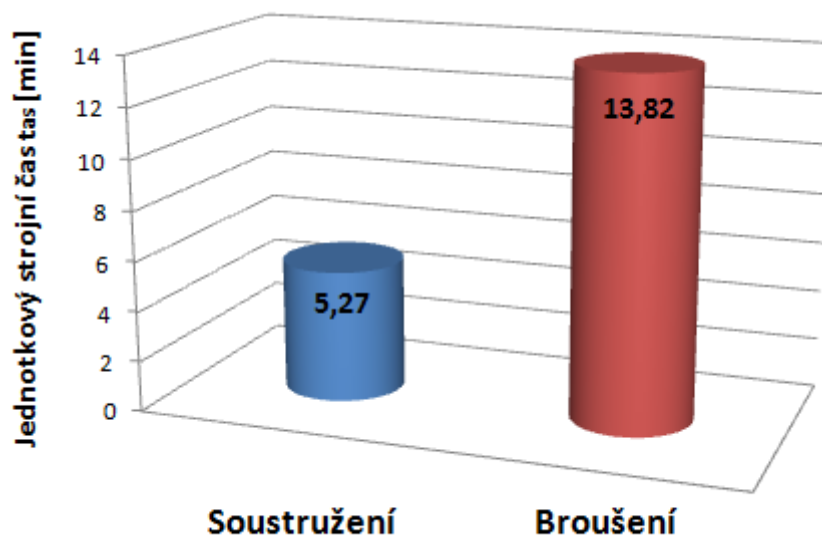
Výpočet celkové dráhy nástroje:

$$L = l + l_n + l_p = 80 + 15 + 15 = 110 \text{ mm}$$

Výpočet jednotkového strojního času t_{as} :

$$t_{as} = \frac{\pi \times d_p \times L}{f \times v_p \times 1000} \times i = \frac{\pi \times 150 \times 110}{1,5 \times 25 \times 1000} \times 10 = 13,82 \text{ min}$$

Výsledné hodnoty jednotkového strojního času pro obě metody jsou porovnány na grafu číslo 8.



Graf 8: Srovnání jednotkových strojních časů t_{as} pro soustružení a broušení

6.3 Celkové náklady na jeden obrobek

Po vypočtení jednotkových strojních časů obou metod došlo k porovnání celkových nákladů na jeden obrobek. Do výpočtu vstupují hodnoty uvedené níže. Po vypočtení celkových nákladů na jeden obrobek vychází lépe metoda soustružení, přičemž značnou roli ve finálním rozhodování hrají také vstupní náklady, na příklad pořizovací cena nástrojů.

- Hodinová sazba stroje soustružení: 1000 Kč
- Hodinová sazba stroje broušení: 1550 Kč
- Cena cermetové VBD: 325 Kč
- Cena diamantového kotouče: 1200 Kč
- Počet obráběných kusů: 4
- Jednotkový strojní čas soustružení t_{as}: 5,27 min
- Jednotkový strojní čas broušení t_{as}: 13,82 min

$$N_{s1} = \frac{325}{4} + 1000 \times \frac{5,27}{60} = 169 \text{ Kč}$$

$$N_{b1} = \frac{1200}{4} + 1550 \times \frac{13,82}{60} = 645,5 \text{ Kč}$$

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo nejprve čtenářům představit problematiku obrábění těžkoobrobitelných žárových nástřiků a laserových návarů s důrazem na technologické faktory a později se pokusit o jejich optimalizaci v praktické části za pomoci využití experimentálních postupů zaměřených na funkční vlastnosti. Cíl práce byl splněn v několika krocích.

V rámci rešeršní části byly popsány základní informace o chrom-kobaltové slitině stellite 6 a jejího použití v podobě žárového nástřiku v průmyslových oborech. Dále byly podrobněji popsány dvě metody používané pro žárový nástřik jejich parametry a následně byly vzájemně porovnány. Jedná se o metody HVOF a laserové navařování, laser cladding. Poté je v rešeršní části popsána samotná výroba prášku a její působení na vlastnosti struktury.

V experimentální činnosti bylo nutné nejprve získat informace pro použití vhodných řezných podmínek a vhodné geometrie břitu řezného nástroje. Následně byly vybrány cermetové břitové destičky s imitací kruhové destičky. V další části experimentu došlo k samotnému obrábění žárového nástřiku slitiny stellite 6 za pomoci zvolených řezných podmínek a řezných nástrojů. V poslední části experimentální činnosti pak proběhla analýza a vyhodnocení obrobených vzorků a použitých řezných nástrojů.

Z naměřených hodnot během experimentální činnosti bylo možné získat první vyhodnocení na základě abbotovy křivky a výsledných parametrů profilové drsnosti. Nejlepších parametrů drsnosti bylo dosaženo při zvoleném posuvu $f = 0,5$ mm. Druhé hodnocení bylo založeno na výpočtu parametru drsnosti na sklonu břitu a posuvu. Ze získaných výsledků lze hodnotit zvolené velikosti úhlu sklonu břitu jako výrazně neovlivňující výsledné parametry drsnosti obrobeného povrchu. Se zvětšujícím se posuvem docházelo k zvětšování hodnot parametrů drsnosti, což mohlo být příčinou zvětšující se řezné síly a docházení k vylamování jednotlivých částic žárového nástřiku. Dalším faktorem mohly být zbylé částičky žárového nástřiku na finálním obrobeném povrchu. Ohledně zvoleného sklonu břitu by se dalo do budoucna navrhnout několik způsobů pro zlepšení dosažených výsledků. Například pomocí laseru úprava břitu a řezné hrany, dále poté vytvoření například záporné fazetky a využití i v poslední době moderní technologie povlakování Dragonskin, jenž nabízí vysokou produktivitu a spolehlivost řezného procesu.

Během experimentální činnosti bylo také vyhodnocováno opotřebení používaných VBD na profilometru Alicona.

V poslední části bylo provedeno ekonomické hodnocení metod soustružení a broušení žárového nástřiku na základě porovnání výpočtu jednotkového strojního času t_{as} a celkových nákladů na výrobu jednoho kusu.

Text práce doplňuje několik obrázků, tabulek a grafů pro lepší názornost a přehlednost.

8 Zdroje

- [1] Morávek, M., „Vliv vstupních parametrů mikro a makro struktury vybraného typu povlaku na jeho obrobiteľnosť nástroji s definovanou geometrií břitu“, [diplomová práce], Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016
- [2] Deloro Stellite, „Stellite 6 alloy,“ [technical data], [online]
- [3] Ciubotariu, C.R, Frunzaverde, D., Marginean, G., Serban, V.A., Birdeanu, A.V., „Optimization of the laser remelting process for HVOF sprayed Stellite 6 wear resistant rating“, Optics and Laser Technolog, Volume 77, 2016
- [4] Remy, H., Anorganická chemie I.díl
- [5] Remy, H., Anorganická chemie II.díl
- [6] Černobila, L., Krystalizace kovů, [prezentace], Střední odborná škola Luhačovice
- [7] Houdková, Š., Smazalová, E., Pala, Z., „Effect of heat treatment on the Microstructure and Properties of HVOF – sprayed Co-Cr-W coating“, Journal of thermal spray technology, 2015
- [8] Sidhu, H.S., Sidhu, B.S., Prakash, S., „Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and stellite-6 coatings“, Surface and Coating Technology, Volume 02, 2007
- [9] Maldonado, S.G., Michler, S., Antoni, M., Chitty, W., Falcand, C., Hertz, D., „Mechanical and chemical mechanism in the tribocorrosion of a Stellite type alloy, Wear, Volume 308, Issue 1-2, 2013
- [10] <https://www.ts-tech.cz/obezna-kola-cerpadel-turbiny.html>, [Online]
- [11] <https://www.ts-tech.cz/pracovni-valce-podavaci-napinaci-lepici.html>, [Online]
- [12] Houdková Šimůnková, Šárka, Enžl, Radek, Bláhová, Olga, Žárové nástřiky: moderní technologie povrchových úprav, 2003
- [13] Česánek, Z., „Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí,“ [diplomová práce], Plzeň: Západočeská univerzita, 2015
- [14] Zahálka, F., „Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků,“ [diplomová práce], Plzeň: Západočeská univerzita, 2012
- [15] Houdková, Š., The introduction into technology of HVOF sprayed coating,“ Plzeň: NTC ZČU, VZÚ Plzeň, 2015
- [16] Prantnerová, M., “Hodnocení vztahu mikrostruktury a vlastností žárových nástřiků,“ [diplomová práce], Plzeň: Západočeská univerzita, 2014
- [17] What is thermal spray?, About Thermal Spray., [Online], http://www.fst.nl/upload/documents/PDF%20for%20download/FST-poster-2014_web.pdf
- [18] zarovenastriky.cz/technologie/vysokorychlostni-nastrik-hvof/
- [19] Mihulka, J., Másilko, M., UNZEITIG, L., Fyzikální týden [online], 2002, Fyztyd.fjfi.cvut.cz
- [20] www.plasmametal.cz/zarove-strikani
- [21] Metals HandBOOK-Volume 16-Machining, ASM International, ISBN 0-87170-007-7

- [22] DeVrise, W.R., „Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag, New York, 1919, ISBN 0-387-9778-7
- [23] Fulemová, J., Kultwašer, J., Matějka, J., Vilček, I., Porto, D.C., „Tests on the machinability of the thermal sprayed coatings and propaspal”, [prezentace], Plzeň, Regionální technologický institut, 2015
- [24] Laserové navařování. Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy – LaserTherm [online], 2013, Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/nabizene-sluzby/laseove-navarovani/>
- [25] TOYSERKANI, Ehsan, Amir KHAJEPOUR a Stephen CORBIN. Laser Cladding. CRC Press, 2005, ISBN 0-8493-2172-7
- [26] Šulc, Jan. Lasery a jejich aplikace [online], c2002, Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf/>
- [27] ION, John C., Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005, xviii, 556, p. ISBN 07-506-6079-1.
- [28] PAWLOWSKI, Lech., The Science and engineering of thermal spray coatings. 2nd ed., Chichester: John Wiley, 2008, xxx, 626 s. ISBN 978-0-471-49049-4
- [29] Prof.Ing. Monka, Peter, Ph.D., konzultace.
- [30] Fulemová Jaroslava, Ing.konzultace.
- [31] <http://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/mtl/index.html>, [Online]
- [32] [www. Blickle-tools.de/Kg](http://www.Blickle-tools.de/Kg), BlickleWerkzeugeGmbH. Multicheck PC 500. [Online]
- [33] Matějka Jan, Monka Peter P., Kašpar Jan: Správa experimentálního ověřování

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Utřídění hcp mřížky a fcc mřížky.....	12
Obrázek 2: Žárový nástřik oběžného kola.....	15
Obrázek 3: Žárový nástřik prořezávacího válce.....	15
Obrázek 4: Princip žárového nástřiku	16
Obrázek 5: Princip vytvoření nástřiku HVOF.....	18
Obrázek 6: Žárový nástřik metodou HVOF	19
Obrázek: 7 Vlevo vodou atomizovaný prášek a vpravo plynem atomizovaný prášek	21
Obrázek 8: Splat	21
Obrázek 9: Schéma řezu žárové nastříkané vrstvy.....	22
Obrázek 10: Částečně natavená částice u struktury slitiny stellit 6	24
Obrázek 11: Nenatavená částice u struktury stellit 6	24
Obrázek 12: Příklad laserového navařování (Laser Cladding)	25
Obrázek 13: Metody laserového navařování: a) dvoufázové navařování, b) jednofázové navařování, zahrnující b1) vkládání pasty, b2) vstřikování prášku, b3) podávání drátu	26
Obrázek 14: Parametry laserového navařování.....	27
Obrázek 15: Vlevo koaxiální a vpravo boční tryska	28
Obrázek 16: Zvolená VBD.....	30
Obrázek 17: Scan řezné hrany VBD s označením 011	30
Obrázek 18: Ukázka geometrie VBD pro experiment s úhlem $\lambda_f=0^\circ$	30
Obrázek 19: Ukázka geometrie VBD pro experiment s úhlem $\lambda_f=7^\circ$	31
Obrázek 20: Ukázka geometrie VBD pro experiment s úhlem $\lambda_f=-7^\circ$	31
Obrázek 21: Držák soustružnického nože označen číslem 1 s VBD	32
Obrázek 22: Soustruh CNC Kovosvit MT 50	33
Obrázek 23: Pracovní prostor soustruhu CNC Kovosvit MT 50	33
Obrázek 24: Profilometr Alicona	34
Obrázek 25: Dilenský mikroskop Multicheck PC 500.....	34
Obrázek 26: Polotovary pro použitý experiment	35
Obrázek 27: Zkušební vzorky s žárovým nástřikem slitiny stellit 6	36
Obrázek 28: Zobrazení měřených ploch na obrobku	38
Obrázek 29: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/1 a vpravo finální obrobený povrch...38	
Obrázek 30: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/2 a vpravo finální obrobený povrch...39	
Obrázek 31: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/3 a vpravo finální obrobený povrch...39	
Obrázek 32: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 1/4 a vpravo finální obrobený povrch ..39	
Obrázek 33: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/1 a vpravo finální obrobený povrch...40	
Obrázek 34: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/2 a vpravo finální obrobený povrch....40	
Obrázek 35: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/3 a vpravo finální obrobený povrch...40	
Obrázek 36: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 2/4 a vpravo finální obrobený povrch...41	
Obrázek 37: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/1 a vpravo finální obrobený povrch...41	
Obrázek 38: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/2 a vpravo finální obrobený povrch...41	
Obrázek 39: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/3 a vpravo finální obrobený povrch...42	
Obrázek 40: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 3/4 a vpravo finální obrobený povrch...42	
Obrázek 41: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 4/1 a vpravo finální obrobený povrch...43	
Obrázek 42: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 4/2 a vpravo finální obrobený povrch....43	
Obrázek 43: Vlevo abbottova křivka profilu pro vzorek 4/3 a vpravo finální obrobený povrch...43	

Obrázek 44: Vlevo abbotova křivka profilu pro vzorek 4/4 a vpravo finální obrobený povrch...44	
Obrázek 45: Opotřebenění VBD č. 11	54
Obrázek 46: Diferenční analýza potřebení VBD č. 11.....	55
Obrázek 47: Vzniklá třiska pořízená na Dílenském mikroskopu Multicheck PC 500, zvětšení 180X.....	55

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení stellitu 6	13
Tabulka 2: Základní mechanické vlastnosti stellitu 6 při teplotě 20°C.....	14
Tabulka 3: Porovnání jednotlivých metod žárového nástřiku.....	17
Tabulka 4: Účinek změny parametrů na vlastnosti žárového nástřiku slitiny stellit 6.....	20
Tabulka 5: Porovnání HVOF s laser cladding	29
Tabulka 6: Parametry nástřiku HVOF	35
Tabulka 7: Určené řezné podmínky pro experiment	37
Tabulka 8: Hodnoty obrobených ploch.....	44
Tabulka 9: Hodnoty abbotovy křivky obrobených ploch.....	45
Tabulka 10: Hodnoty použité pro druhou část experimentu	48

11 Seznam grafů

Graf 1: Závislost tvrdosti stellite 6 na teplotě	14
Graf 2: Porovnání parametrů profilové drsnosti v závislosti na rozdílných posuvech	45
Graf 3: Porovnání parametru Ra profilové drsnosti v závislosti na rozdílných posuvech.....	46
Graf 4: Porovnání parametru Rq profilové drsnosti v závislosti na rozdílných posuvech.....	47
Graf 5: Porovnání parametru Rz profilové drsnosti v závislosti na rozdílných posuvech.....	47
Graf 6: Porovnání parametrů profilové drsnosti Ra v závislosti na rozdílných posuvech a sklonu bříty	53
Graf 7: Porovnání parametrů profilové drsnosti Rz v závislosti na rozdílných posuvech a sklonu bříty	54
Graf 8: Srovnání jednotkových strojních časů t_{as} pro soustružení a broušení.....	58