

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv vstupních parametrů mikro a makro struktury vybraného typu
povlaku na jeho obrobitelnost nástroji s definovanou geometrií břítu

Autor: **MICHAL MORÁVEK**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Peter MONKA, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a k 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

Na tomto místě bych chtěl především poděkovat panu doc. Ing. Peteru Monkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a cenné rady, které mi během zpracování této diplomové práce poskytl.

Velké poděkování patří také Ing. Jaroslavě Fulemové za práci konzultanta, paní Ing. Šárce Houdkové – Šimůnkové, Ph.D. za odborné rady a paní doc. Ing. Ludmile Kučerové, Ph.D. a jejímu pracovnímu kolektivu za ochotu při zpracování metalografickým rozborů.

V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za trpělivost a vytvoření potřebného zázemí během studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Morávek	Jméno Michal		
STUDIJNÍ OBOR	2303T004/ Strojírenská technologie – technologie obrábění			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Monka, Ph.D.	Jméno Peter		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv vstupních charakteristik mikro a makro struktur vybraného typu povlaku n jeho obrobitelnost nástroji s definovanou geometrií břítu			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	81	TEXTOVÁ ČÁST	65	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Tato diplomová práce je zaměřena na obrobitelnost žárového nástřiku slitiny stelit 6, tak aby bylo možno nahradit dosud používanou neproduktivní metodu broušení, produktivnější metodou soustružení s cílem dosažení podobných parametrů drsnosti obrobeného povrchu. Práce je rozdělena na dvě části, přičemž první část je rešeršní a druhá část je zaměřena na experimentální činnost výběru nejvhodnějších řezných podmínek.
KLÍČOVÁ SLOVA	Žárový nástřik, stelit 6, soustružení, drsnost povrchu, řezná rychlost, struktura

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Morávek	Name Michal	
FIELD OF STUDY	2303T004/ Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Monka, Ph.D.	Name Peter	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The influence of the micro and macro input parameters of the selected type of coating to his machinability tools with defined geometry of cutting edge		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	81	TEXT PART	65	GRAPHICAL PART	16
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is focused on a machinability of thermal spray stellite 6 so to be able to replace the previously used an unproductive method of grinding, productive method turning to achieve simile roughness parameters of the machina surface. Thesis is devided into two parts, the first part is literature search and the sekond part is aimed at experimental activities selection of the most suitable cutting condition
KEY WORDS	Thermal spray, stellite 6, turning, roughness of surface, cutting speed, structure

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Zkratky použité v textu	10
Použité symboly v textu	10
1. Úvod	11
1.1 Cíle diplomové práce	11
2. Analýza současné poznatkové základny	12
2.1 Stelitové slitiny	12
2.1.1 Stelit 6	14
2.2 Princip vytváření žárového nástřiku	17
2.3 Metody vytváření žárového nástřiku	18
2.3.1 Metody využívající tepelnou energii z elektrického zdroje	18
2.3.2 Metody využívající tepelnou energii hořením směsi paliva a kyslíku	20
2.3.3 Porovnání jednotlivých metod	22
2.3.4 Parametry HVOF nástřiku	23
2.4 Příprava prášku pro nástřik	25
2.5 Struktura žárového nástřiku	26
2.6 Úprava povrchu před nástřikem povlaku	31
2.7 Obrábění žárových nástřiků metodou broušení	32
3. Návrh faktorů a parametrů experimentu	33
3.1 Použité technické vybavení	34
3.2 Použité řezné nástroje	34
3.3 Použité stroje a přístroje	38
3.4 Další použité přístroje	39
3.4.1 Měřicí zařízení HOMMEL ETAMIC T8000	39
3.4.2 Měřicí zařízení IFM G4	39
3.4.3 Řádkovací mikroskop SEM – FIB CrossBeamAuriga	40
3.5 Polotovary zkušebních vzorků	40
3.5.1 Nástřikové parametry metody HVOF	41
3.5.2 Chemické složení nastříkaného žárového nástřiku	42
3.6 Stanovení řezných podmínek	43
4. Diskuze experimentů	45
4.1 První fáze experimentu	45
4.2 Druhá fáze experimentu	54

4.3	Opotřebenění VBD	62
5.	Technické hodnocení.....	63
6.	Ekonomické hodnocení	64
6.1	Hodnocení na základě jednotkového strojního času t_{AS}	64
6.1.1	Výpočet jednotkového strojního času t_{AS} při metodě soustružení	64
6.1.2	Výpočet jednotkového strojního času t_{AS} při metodě broušení.....	66
6.2	Hodnocení na základě pracnosti výroby H_w	67
6.2.1	Výpočet pracnosti výroby H_w při metodě soustružení.....	68
6.2.2	Výpočet pracnosti výroby H_w při metodě broušení.....	69
7.	Závěr.....	71
	Zdroje	73
	Seznam obrázků	76
	Seznam tabulek	79
	Seznam grafů.....	80

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky použité v textu

VBD	Vyměnitelná břitová destička
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
CBN	Kubický nitrid boru
HV	Tvrdomost dle Vickerse

Použité symboly v textu

a_p	Axiální hloubka řezu	mm
v_c	Řezný rychlost	m/min
f_{ot}	Posuv na otáčku	mm/ot
R_a	Střední aritmetická úchylka profilu	μm
R_z	Střední hloubka drsnosti	μm
R_t	Celková výška profilu drsnosti	μm
r_n	Poloměr zaoblení řezné hrany	μm
t_{AS}	Jednotkový strojní čas	min
t_{BC}	Dávkový čas s přírážkou času směnového	Nmin/dávka
t_{AC}	Jednotkový čas s přírážkou času směnového	Nmin/kus
H_w	Pracnost výroby	nH
n_t	Technologický počet kusů	----
l_n	Délka nájezdu	mm
l_p	Délka přejezdu	mm
l	Délka obrobku	mm
L	Celková dráha nástroje	mm
v_p	Obvodová rychlost obrobku	m/min
i	Počet přejezdů	----
D	Počet dávek	----
k_{opt}	Koeficient vyjadřující optimální velikost dávky	----
r	Poloměr kruhové VBD	mm

1. Úvod

Strojírenský průmysl klade neustále zvyšující se požadavky na kvalitu strojních součástí tak, aby byly schopny v provozu odolávat různým formám opotřebení, vysokým teplotám a korozi. Proto se v současné době rozšiřuje využívání žárových nástřiků, které jsou díky svým vlastnostem schopny odolávat jednak vysokým teplotám, ale také kombinacím napětí a opotřebení. Jednou ze skupin žárových nástřiků, které se nyní využívají v energetickém, tiskařském nebo např. leteckém průmyslu je skupina stelitových slitin. Jedná se o chrom – kobaltové slitiny, které jsou v současné době obráběny výhradně pomocí metody broušení. Obrábění žárových nástřiků těchto slitin pomocí nástrojů s definovanou geometrií břitu je vzhledem k jejich lamelární struktuře velmi problematické, neboť může docházet k delaminaci jednotlivých splatek, ze kterých je struktura stelitových slitin a obecně žárových nástřiků tvořena.

Diplomová práce se konkrétně zaměřuje na slitinu stelit 6 a je rozdělena do tří částí. První část je zaměřena na rešeršní činnost, přičemž na úvodních stránkách této části lze získat informace o vlastnostech slitiny stelit 6. Dále je zde vytipována vhodná metoda k nanesení žárového nástřiku této slitiny a je zde popsána její struktura z hlediska možnosti jejího obrábění pomocí metody jemného soustružení. Druhá část se zabývá experimentální činností, konkrétně nalezení vhodných parametrů řezných podmínek a mikro a makro geometrie řezného nástroje. V poslední části jsou shrnuty výsledky z experimentální činnosti a je zde provedeno technické a ekonomické zhodnocení metody jemného soustružení vzhledem k současně používané metodě broušení.

1.1 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem této diplomové práce je posouzení struktury žárového nástřiku slitiny stelit 6 vzhledem k jejímu obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií břitu a nalezení vhodných parametrů řezných podmínek a mikro a makro geometrie řezného nástroje tak, aby bylo možno nahradit dosud používanou neproduktivní metodu broušení produktivnější metodou jemného soustružení při dosažení podobných parametrů obrobeného povrchu. Dílčím cílem je posouzení metody jemného soustružení z ekonomického hlediska vzhledem k používané metodě broušení.

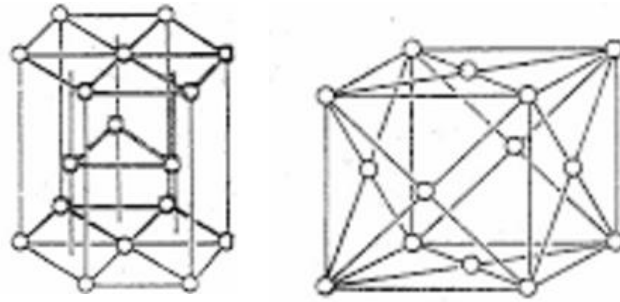
2. Analýza současné poznatkové základny

Strojírenský průmysl je v současné době zahlcen celou řadou výrobků, od kterých se kromě požadované kvality, rozměrové a geometrické přesnosti vyžaduje také vysoká odolnost proti opotřebení a odolnost proti vysokým teplotám v podmínkách, kde je to nutné. Proto je na některé součásti využívané v automobilovém, leteckém, popřípadě v energetickém nebo tiskařském průmyslu nanášen žárový nástřík slitiny stelit 6, který má schopnost odolávat vysokým teplotám během provozu.

2.1 Stelitové slitiny

Jedná se o chrom-kobaltové slitiny, ve kterých je základním prvkem Co. Typicky tyto slitiny obsahují kobalt (Co) mezi 50 – 60%. Dále tyto slitiny obsahují okolo 20 – 30% chromu (Cr), 5 – 20% wolframu (W) a malé, ale důležité množství uhlíku (C), které je v rozmezí 0,1 – 1,5 % a které je důležité pro vytvoření jednotlivých karbidů. Ve stelitových slitinách se také vyskytuje malé množství doprovodných prvků, kterými mohou být molybden (Mo), nikl (Ni), niob (Nb), tantal (Ta), křemík (Si), mangan (Mn) nebo železo (Fe). Velké množství stelitových slitin obsahuje 4 – 6 různých prvků a podle jejich druhu a obsahu jsou jednotlivé stelitové slitiny určeny pro odlišné použití. [15], [18]

Čistý kobalt se může obecně v přírodě a ve slitinách vyskytovat ve dvou různých alotropických modifikacích – nízkoteplotní fáze, která se často označuje jako α – Co a atomy v této modifikaci zaujímají místa v kubické plošně středěné mřížce – fcc mřížka. Druhou možností, ve které se kobalt může vyskytovat je vysokoteplotní fáze, které se označuje buď jako β – Co, nebo ε – Co a atomy kobaltu tvoří v této modifikaci hexagonální mřížku – hcp mřížka. V fcc mřížce se kobalt vyskytuje při běžné pokojové teplotě a transformační teplota jednotlivých modifikací je okolo 417°C v silné závislosti na čistotě samotného kobaltu, tedy nad touto teplotou se již kobalt vyskytuje v modifikaci hcp. Fcc modifikace je velmi náchylná na napětím indukovanou martenzitickou transformaci, přičemž tato transformace způsobuje výrazné zpevnění, což dává stelitovým slitinám vysokou odolnost proti erozi a mechanickým formám opotřebení. [22], [23]



Obrázek 1 Uspořádání hcp a fcc mřížky [22], [23]

Stelitové slitiny jsou navrženy tak, aby zajišťovaly dobrou odolnost proti opotřebení, oděru a také proti korozi se současnou odolností proti vysokým teplotám. Všechny stelitové slitiny jsou také zcela nemagnetické. Jednotlivé složky stelitových slitin podporují různé mechanické vlastnosti. Co zvyšuje houževnatost těchto slitin a jednotlivé karbidy Cr a W zajišťují těmto slitinám požadovanou tvrdost. Cr, respektive jeho karbidy, vedou ke zvýšení odolnosti proti korozi a k zvýšené odolnosti vůči oxidaci za zvýšených teplot. Stelitové slitiny se díky jednotlivým karbidům řadí mezi materiály s obtížnou obrobitelností, neboť díky tvrdým karbidům způsobují abrazivní opotřebení rezného nástroje. [15]

Stelitové slitiny mají také vysoký bod tání, který je dán kombinací bodů tání prvků Cr a Co a který je v rozmezí 1200 – 1400 °C a závisí na samotném obsahu těchto dvou prvků. Mez pevnosti je u těchto slitin v rozsahu 800 – 1200 Mpa a tvrdost je u těchto slitin přibližně v rozmezí 35 - 50 HRC, v závislosti na složení jednotlivých slitin. [15]

Stelitové slitiny jsou obecně kombinací dendritického tuhého roztoku a komplexních precipitačních karbidů. Existují 2 základní skupiny karbidů, které se ve stelitových slitinách vyskytují: [1]

- 1) Karbidy s obecným vzorcem M_7C_3 a $M_{23}C_6$, kde M ve většině případů představuje Cr, ale může také vyjadřovat W nebo Mo. Nejběžnějším karbidem ve stelitových slitinách je karbid M_7C_3 , který však může být během procesu žárového nástřiku rozpuštěn, popřípadě může v průběhu procesu transformovat na typ karbidu $M_{23}C_6$. Karbid $M_{23}C_6$ se nejčastěji vyskytuje u slitin, jejichž obsah uhlíku je na horní hranici. Jelikož jsou slitiny s těmito karbidy bohatší na Cr, vykazují také vyšší odolnost proti korozi, než slitiny, které obsahují Cr méně a ve kterých je Cr přítomen v karbidech Cr_6C . Pomocí karbidů $Cr_{23}C_6$ a Cr_7C_3 přispívá také chrom k zpevnění stelitových slitin, avšak kromě těchto karbidů přispívá ke zpevnění těchto slitin také vytvoření tuhého roztoku. [1], [15], [21]

- 2) Karbidy typu M_6C a MC . Tyto karbidy jsou v případě, že M představuje Cr , na Cr chudší než karbidy předchozí a proto se vyskytují u stelitových slitin, které mají obsah Cr na dolní hranici, nebo se tyto karbidy vyskytují ve stelitových slitinách, které obsahují Mo , popřípadě ve slitinách, kde je obsah W větší jak 5%. V tomto případě se ve slitině vyskytují karbidy W_6C a WC . Karbidy wolframu a molybdenu mají podobný efekt jako karbidy chromu a společně s intermetalickými fázemi vedou k zpevnění stelitových slitin. [1], [15], [21]

Obecně lze říci, že stabilita kubické plošně středěné mřížky je při pokojové teplotě podporována zvýšeným obsahem uhlíku, niklu a železa. Na druhé straně zvýšené množství chromu, molybdenu a wolframu má tendenci ke stabilizaci hcp mřížky, tedy ke stabilizaci kobaltu nad teplotou $417^\circ C$. [22], [23]

2.1.1 Stelit 6

Nejběžnější stelitovou slitinou určenou k procesu žárového nástřiku je stelit 6, jež se s obsahem uhlíku 1,2% řadí mezi vysoce uhlíkovou stelitovou slitinu. Celkové chemické složení je ukázáno v tabulce 1. Jedná se o slitinu, která má dobrou rovnováhu mezi houževnatostí a tvrdostí, která je zapříčiněna tvrdými karbidy chromu, se současnou odolností proti korozi a vysokým teplotám. Tato slitina má schopnost odolávat mnoha formám degradace v poměrně širokém teplotním rozsahu. Základní mechanické vlastnosti a závislost tvrdosti na teplotě jsou ukázány v tabulce 2 a v tabulce 3, respektive v grafu 1. [1], [15], [20]

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

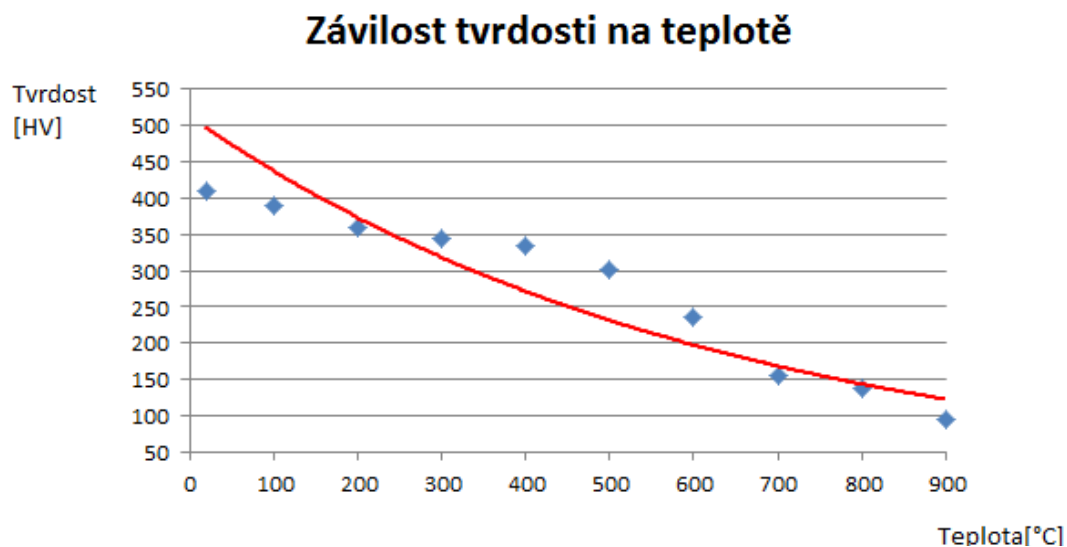
Tabulka 1 Chemické složení slitin stelit 6 [15]

Mez pevnosti v tahu – R_m [MPa]	Mez pevnosti v kluzu – R_e [MPa]	Tažnost [%]	Youngův modul pružnosti [MPa]	Mikro tvrdost [$HV_{0,3}$]
850	700	< 1	209	Přibližně 650-700

Tabulka 2 Základní mechanické vlastnosti slitiny stelit 6 při teplotě $20^\circ C$ [15]

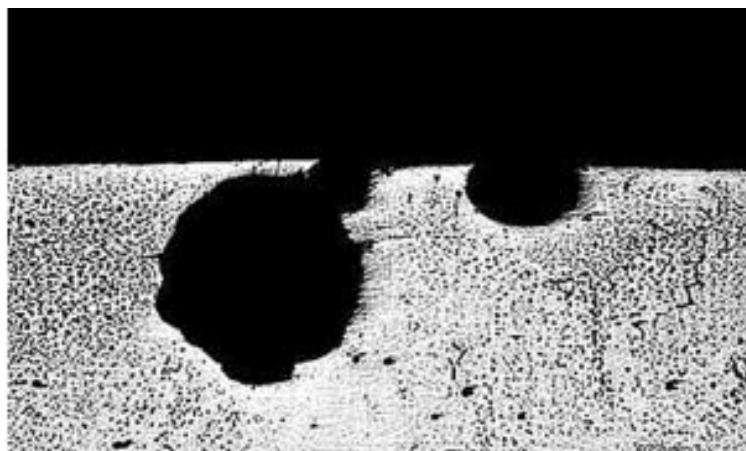
Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Tvrdość [HV]	410	390	356	345	334	301	235	155	138	95

Tabulka 3 Závislost tvrdosti na teplotě [15]



Graf 1 Závislost tvrdosti slitiny stelit 6 na teplotě [15]

Z exponenciálního průběhu křivky je možné vidět, že si slitina zachovává přiměřenou úroveň tvrdosti až do 500°C, kdy dochází k razantnějšímu poklesu tvrdosti. Slitina je vlivem velkého množství chromu schopna dobře odolávat korozi, avšak v případě koroze koroduje podobně jako korozivzdorné oceli důlkovým neboli bodovým mechanismem, kdy vznikají různě hluboké důlky s relativně úzkým hrdlem. [15], [21]



Obrázek 2 Důlková (bodová) koroze [15]

Průmyslové využití této slitiny je ve formě žárového nástřiku, který má obvykle tloušťku v rozmezí 50 – 300 μm , maximální tloušťka žárového nástřiku této slitiny dosahuje hodnoty 450 μm . Prakticky vůbec se tato slitina nepoužívá ve formě kompaktního objemového materiálu. Samotné průmyslové využití je v oblasti žárových nástřiků na hřídele a hrany lopatek čerpadel, hrany lopatek parních turbín, aby byly schopny odolávat vysokým teplotám páry na výstupu a tím dobře odolávaly kavitační formě opotřebení, zuby pil nebo výfukové ventily spalovacích motorů. Žárové nástřiky povlaku slitiny stelit 6 se také v současné době využívají jako náhrada tvrdého chromování u součástí jakou jsou například tiskařské válce, popřípadě ventilová sedla nebo kulové ventily a kulové písty. [15]



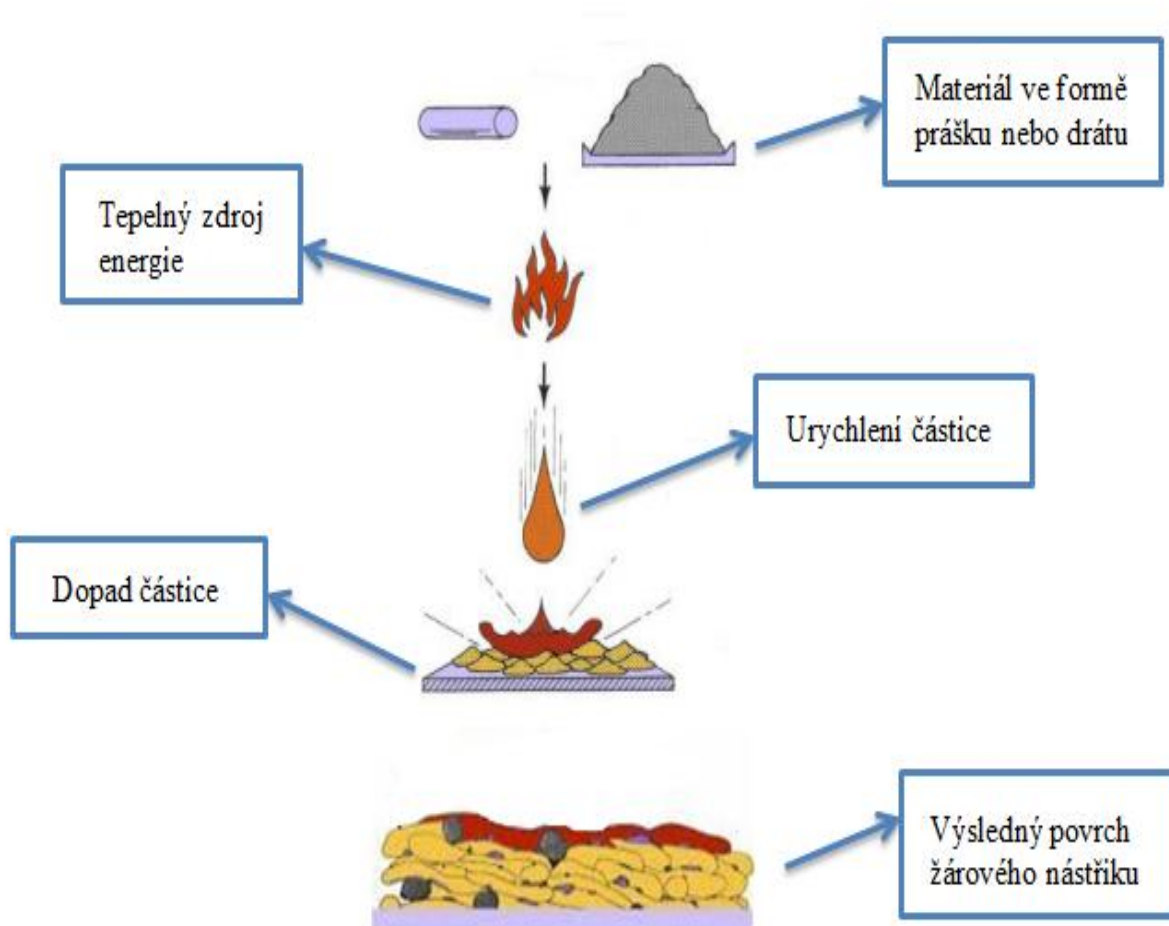
Obrázek 3 Průmyslové využití slitiny stelit 6 ve formě žárového nástřiku - kulové ventily a ventilová sedla [15]



Obrázek 4 Nástřik slitiny stelit 6 na kulový píst [15]

2.2 Princip vytváření žárového nástřiku

Proces žárového nástřiku spočívá ve vytvoření nového povlaku vlivem tepelné energie, která zaručí natavení výchozího materiálu, který se po nanesení na základní substrát součásti rozptýlí po ploše a následně se vlivem přilnavosti a tlaku mechanicky ukotví. Výchozím materiálem pro žárový nástřik může být buď prášek přesného chemického složení, nebo drát. Po rozprostření dojde k následnému ztuhnutí jednotlivých částic, které nám na povrchu součásti určené pro žárový nástřik vytváří typickou diskovitou neboli lamelární strukturu, kterou je žárový nástřik charakterizován. Samotná struktura povlaku však může být proměnlivá, neboť je do jisté míry ovlivněna tzv. nástřikovými (procesními) parametry, jež ovlivňují nejen tvar jednotlivých zrn struktury, ale také její pórovitost, mikro tvrdost a odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, popřípadě množství nenatavených nebo pouze částečně natavených částic. Princip žárového nástřiku je znázorněn na obrázku 5. [2], [4], [16]



Obrázek 5 Princip žárového nástřiku [16]

2.3 Metody vytváření žárového nástřiku

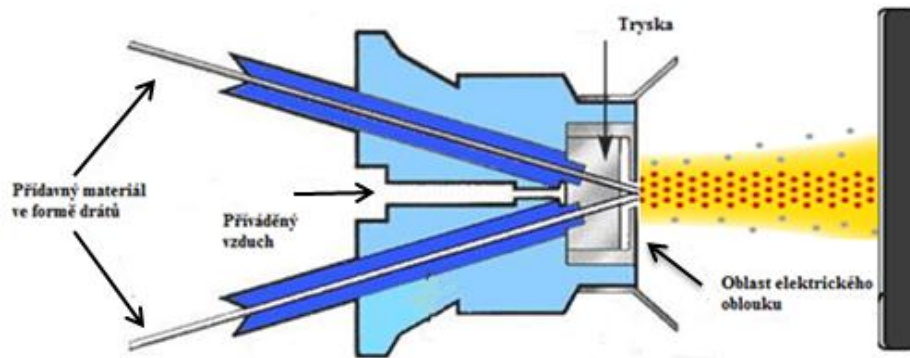
Jednotlivé metody vytváření žárového nástřiku stelitových slitin lze rozdělit podle zdroje tepelné energie na metody využívající tepelnou energii elektrického zdroje, respektive metody založené na hoření směsi paliva a kyslíku jakožto zdroj energie, popřípadě lze pro vytvoření nástřiku stelitových slitin využít metodu nástřiku studeného plynu, která je charakterizována vysokou rychlostí nanášených částic.[7], [19]

2.3.1 Metody využívající tepelnou energii z elektrického zdroje

2.3.1.1 Nástřik elektrickým obloukem

Princip metody využívající zdroj tepelné energie z elektrického oblouku spočívá v natavení výchozího (přídavného) materiálu, který je ve formě vodivých drátů stejného nebo rozdílného složení přiváděn do stříkací trubice, kde se následně mezi oběma dráty zapálí elektrický oblouk a dochází k souvislému natavování obou drátů. Roztavené částice výchozího materiálu jsou poté pomocí stlačeného plynu urychleně rozprašovány na základní substrát, kde tyto částice tuhnou a vytváří jednotlivé splaty. Hlavní roli v kvalitě stelitového nástřiku hraje stabilita elektrického oblouku mezi oběma přídavnými dráty, neboť zmenšující se elektrický oblouk vede k horšímu roztavení drátu a to může následně vést k horší přilnavosti jednotlivých částic, zvýšené pórovitosti, popřípadě k rozdílné mikro tvrdosti v jednotlivých oblastech nástřiku vlivem nerovnoměrného složení natavených a méně natavených částic. [7]

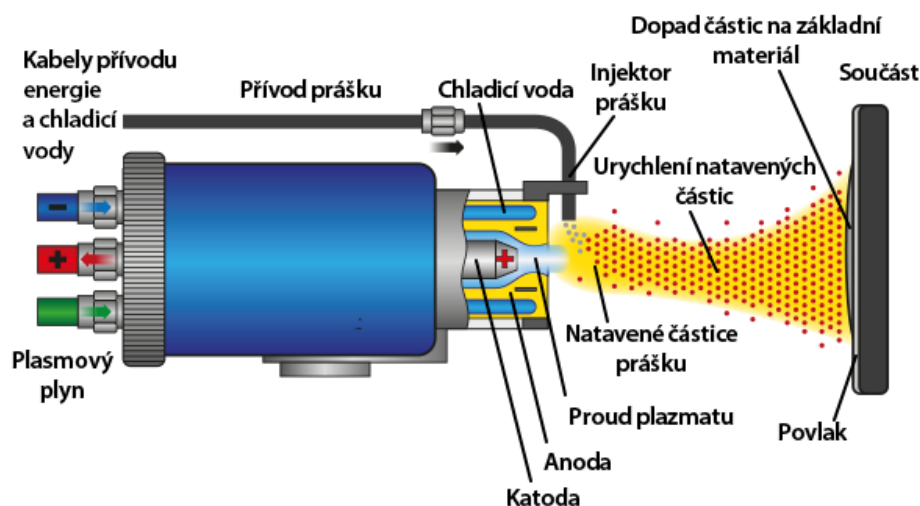
Teplota elektrického oblouku zapáleného mezi dvěma výchozími dráty je v rozmezí 4000 – 8000°C, avšak teplota roztavených částic je vlivem studeného hnacího plynu o 10 – 50% nižší. Teplota těchto částic se tedy v závislosti na teplotě elektrické oblouku pohybuje v rozmezí hodnot 3600 – 4000°C. Jednotlivé roztavené částice, které jsou vlivem hnacího plynu urychleny, dopadají na základní substrát současně rychlostí mezi 100 – 150 ms⁻¹. Nevýhodou této metody je rozdílná velikost jednotlivých částic v povlaku, která je způsobena natavováním základního (výchozího) materiálu, a která může následně vést k horší drsnosti povrchu a k větší pórovitosti povlaku vlivem rozdílně velkých dotykových ploch mezi jednotlivými částicemi splatek. Další nevýhodou této metody je větší množství oxidů ve struktuře vytvořeného povlaku, které se vytvoří na rozprašovaných částicích vlivem okolní atmosféry a které mohou následně způsobovat křehkost povlaku. [7]



Obrázek 6 Princip vytváření nástřiku elektrickým obloukem [7]

2.3.1.2 Nástřik Plazmou

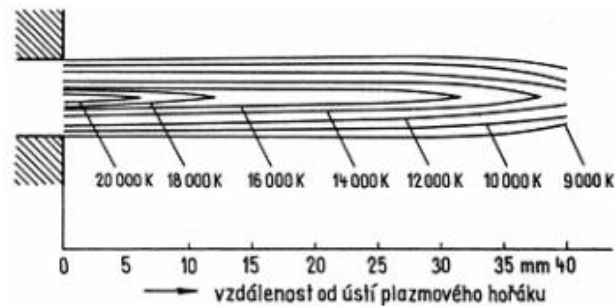
Principem nástřiku pomocí plazmy je elektrický oblouk, který hoří mezi vodou chlazenou katodou z wolframu a měděnou anodou, která současně plní funkci trysky plazmového hořáku. Samotný elektrický oblouk je zapálen v plazmovém plynu, kterým může být argon, popřípadě jiný inertní plyn společně s přídavnými plyny, které zvyšují energii plazmy, potřebnou pro nástřik touto metodou. Během procesu je do středem přiváděného plazmového plynu přiváděn přídavný materiál ve formě prášku, který je následně vysokou teplotou plazmy, která je obvykle v rozmezí 12000 – 20000°C, roztaven a přiveden na základní substrát materiálu. [7]



Obrázek 7 Princip vytváření žárového nástřiku pomocí plazmy [7]

Výsledný povrch stelitové slitiny dosahuje adhezní pevnosti okolo 70 MPa, což může mít pozitivní vliv na výslednou drsnost po procesu obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií, neboť jednotlivé splaty povlaku budou lépe držet u sebe a nemusí vlivem této pevnosti docházet k jejich vytržení z povrchu. Velký vliv na výsledný povrch má také

vzdálenost základního substrátu od výstupu urychleného prášku v plazmovém paprsku z trysky, neboť teplota plazmy s rostoucí vzdáleností klesá a výsledný povrch může mít ve větší vzdálenosti menší mikro tvrdost než ve vzdálenosti bližší k výstupu plazmové paprsku z trysky. Změna teploty plazmového paprsku je vidět na obrázku 8. [7]



Obrázek 8 Změna teploty plazmového paprsku vlivem zvětšující se vzdálenosti od plazmového hořáku [7]

2.3.2 Metody využívající tepelnou energii hořením směsi paliva a kyslíku

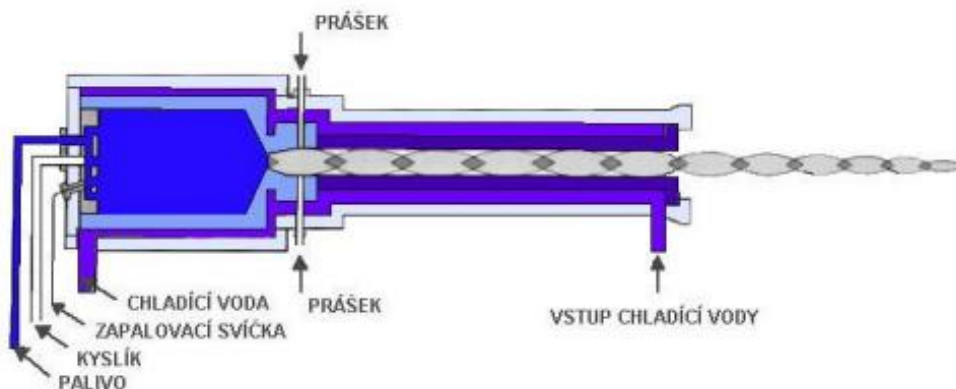
2.3.2.1 Nástřik plamenem

Principem této metody je přivedení výchozího (přídavného) materiálu ve formě prášku nebo drátu do plamene, který vznikne hořením směsi kyslíku a paliva, jenž je ve většině případů acetylen. Vlivem tohoto plamenu dojde k natavení výchozího materiálu na jednotlivé částice, které jsou následně vlivem čistého stlačeného vzduchu urychleny na základní substrát. Urychlení částic pomocí stlačeného vzduchu se využívá z důvodu, že samotný plamen nemá dostatečnou energii, aby dovolil roztaveným částicím dosahovat požadovaných rychlostí, jež zaručí dobrou adhezi na základní substrát součásti. [7]

Hlavní nevýhodou této metody je to, že výsledný povrch nemá dostatečnou hustotu, tudíž je zde větší pravděpodobnost zvýšené pórovitosti, která by snižovala požadovanou tvrdost, respektive požadovanou mikro tvrdost povlaku. Hlavní nevýhodou, která způsobuje nepoužitelnost této metody pro výrobu slitiny stelit 6 je fakt, že teplota hoření kyslíku s acetylenem dosahuje maximální hodnoty 3100°C, což nezaručí natavení wolframových částic, neboť bod tání wolframu je 3422°C.

2.3.2.2 Nástřik HVOF

Metoda HVOF – **H**igh **V**elocity **O**xxygen **F**uel je metoda na základě vysokorychlostního nástřiku pomocí plamene a dá se říci, že je následovníkem klasické metody plamenu na základě hoření kyslíko- acetylenové směsi. Základním principem vysokorychlostního nástřiku plamenem je současné koaxiální přivedení směsi kyslíku a paliva, kterým je často kerosin, do spalovací komory, kde následuje jejich atomizace a poté zažehnutí směsi pomocí zapalovací svíčky. Výsledný plamen dosahuje teploty v rozmezí 2800 – 5000°C a tudíž je možné touto metodou připravovat povlak ze slitiny stelit 6. Samotná teplota plamene je ovlivněna poměrem mezi palivem a kyslíkem. Spalovací komora je obklopena mezi pláštěm, kam je přiváděna voda, která slouží k chlazení směsi uvnitř spalovací komory. Výchozí (přídavný) materiál ve formě prášku je pomocí plynu přiveden do supersonického plamene, kde dojde k jeho následnému natavení a poté jsou jednotlivé částice rychlostí 300 – 1000 ms⁻¹ urychleny na povrch součásti, kde se formují do jednotlivých splatek. Znázornění hořáku pro nástřik pomocí metody HVOF je ukázán na obrázku 9. [2], [3], [4], [7]



Obrázek 9 Hořák pro nástřik pomocí metody HVOF [2]

Velkou výhodou této metody je při nanášení povlaku slitiny stelit 6 relativně vysoká adhezní pevnost, která může dosahovat hodnot přes 80 MPa. Výjimečnost této technologie spočívá v tom, že výsledný povlak je vytvořen s tlakovým pnutím, které při obrábění řeznými nástroji s definovanou geometrií břitu zaručí dobrou soudržnost neboli kohezi mezi jednotlivými částicemi, které se tedy nebudou vlivem silového působení řezného břitu tolik vytrhávat a bude zajištěna lepší drsnost povrchu. [2], [4]

Metodou HVOF lze docílit vytvoření povlaků s kompaktní strukturou a s malým množstvím tvrdých oxidů, které by mohly zvyšovat křehkost, vlivem rovnoměrného rozložení a tím by mohlo docházet k narušení jednotlivých spletek. Samotné množství oxidů, které se

během procesu tvoří, lze ovlivnit procesními parametry. Povlaky vytvořené procesem HVOF vykazují výbornou odolnost vůči různým formám opotřebení, kterými mohou být např. abraze, popřípadě kavitace. Na základě řady měření v zahraničí nebo u nás bylo zjištěno, že v případě nanesení žárového nástřiku slitiny stelit 6 je hodnota pórovitosti menší než 1% z celkového objemu nástřiku. [2], [3], [16]

2.3.3 Porovnání jednotlivých metod

Metoda nástřiku	Teplota zdroje [°C]	Rychlost dopadajících částic [ms ⁻¹]	Adhezní pevnost [MPa]	Základní vlastnosti povlaku
Plazmatický nástřik	12000 - 20000	100 - 800	± 70	Snížení tvrdosti vlivem rozpadu (shoření) WC Dobrá adheze
Nástřik elektrickým obloukem	4000 - 8000	50 - 300	10 - 40	Vysoká hustota Větší tloušťka
Nástřik studeným plynem	< 900	500 - 1500	-	Nízký obsah oxidů Větší tloušťka
Nástřik HVOF	2800 - 5000	300 - 1000	60 - 85	Vysoká hustota Výborná adhezní pevnost Tlakové pnutí

Tabulka 4 Porovnání jednotlivých metod [2], [3], [4], [7]

Jelikož se žárový nástřik slitiny stelit 6 využívá v oblastech, kde jsou na součásti kladeny vysoké požadavky, které se týkají především vynikající odolnosti vůči jednotlivým mechanismům opotřebení a také vůči různým druhům koroze, je nutné, aby výsledný povlak vykazoval co možná nejnižší pórovitost. Zároveň je také nutné, aby byla zajištěna dobrá adhezní pevnost jednak mezi povlakem a základním substrátem, ale také mezi dílčími (jednotlivými) splaty, tak aby bylo možno obrobit součást na požadovaný rozměr povlaku se zachováním dobrých hodnot parametrů drsnosti výsledného povrchu. [2], [4]

Z tabulky 4 je vidět, že nejvhodnější metodou pro žárový nástřik a jeho následné obrábění řeznými nástroji s definovanou geometrií břitu je metoda HVOF, a to především díky tlakovému pnutí, které při této metodě vzniká, vysoké adhezní pevnosti a nízké pórovitosti.

Výsledná struktura povlaku vytvořeného touto metodou je závislá především na ekvivalentním poměru, který definuje kvantitativní zákonitosti chemických reakcí vznikajícího plamene, tzv. stechiometrii plamene. [2], [4]

2.3.4 Parametry HVOF nástřiku

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3.3 hlavním parametrem HVOF nástřiku, který ovlivňuje výslednou strukturu povlaku je ekvivalentní poměr, který je vyjádřen vzorcem: [2], [4]

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

kde:

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

O – hmotnostní množství kyslíku použitého pro žárový nástřik

F/O – hmotnostní poměr kerosinu a kyslíku použitého pro žárový nástřik

(F/O)_{st} – stechiometrický poměr, který je určen z chemické rovnice při vznikající chemické reakci hoření kerosinu a kyslíku (poměr: 2057 l kyslíku / 1 l kerosinu)

Samotný ekvivalentní poměr určuje výsledné vlastnosti plamene, neboť zvyšováním nebo naopak snižováním hmotnostního poměru F/O vlivem zvýšeného popřípadě sníženého hmotnostního množství kerosinu, respektive kyslíku dochází ke změně tlaku a teploty ve spalovací komoře. Daná teplota a tlak ve spalovací komoře společně s dalšími parametry nástřikového zařízení a s depoziční vzdáleností určují výsledné vlastnosti žárového nástřiku. [2], [4]

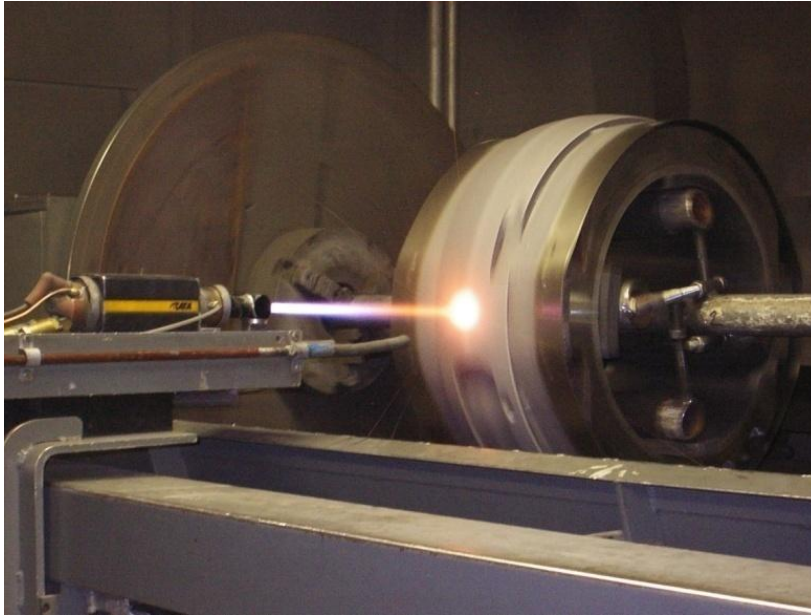
Vlivem zvýšeného hmotnostního množství kyslíku dochází ke zvýšenému tlaku ve spalovací komoře a tím k vyšší rychlosti unášených spalin, do kterých je následně přiveden přídavný materiál ve formě prášku. Rychlost spalin dosahuje na konci konvergentní trysky přibližně dvojnásobku rychlosti zvuku: [2]

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

Naopak snížením hmotnostního množství kyslíku, popřípadě zvýšením hmotnostního množství kerosinu dochází ke zvýšení teploty ve spalovací komoře a tím k lepšímu natavení jednotlivých částic. Vlivy jednotlivých parametrů na vlastnosti plamene a na vlastnosti samotného výsledného povlaku naneseného na základní materiál jsou uvedeny v tabulce 5. [4]

Tabulka 5 Vliv změny parametrů na vlastnosti žárového nástřiku slitiny stelit 6 [4]

Změna parametrů nástřiku	Vliv změny parametrů na:
Snížení hmotnostního množství kerosinu → snížení ekvivalentního poměru	<ul style="list-style-type: none"> • Zvýšení tlaku ve spalovací komoře → zvýšení rychlosti plamene → vyšší hustota povlaku • Snížení teploty plamene → menší protavení částic • Nižší obsah oxidů • Zvýšení pórovitosti
Zvýšení hmotnostní množství kerosinu → zvýšení ekvivalentního poměru	<ul style="list-style-type: none"> • Zvýšení teploty plamene • Zvýšení teploty částic a jejich protavení • Vyšší obsah oxidů
Zvětšení depoziční vzdálenosti	<ul style="list-style-type: none"> • Zvýšený obsah oxidů • Zvýšení pórovitosti • Zvýšení ochlazení částic • Snížení ohřátí substrátu
Prodloužení barelu	<ul style="list-style-type: none"> • Zvýšená rychlosti prášku • Zvýšení hustoty povlaku • Zvýšení prohřátí prášku • Vyšší protavení částic • Zvýšené riziko zacpání barelu

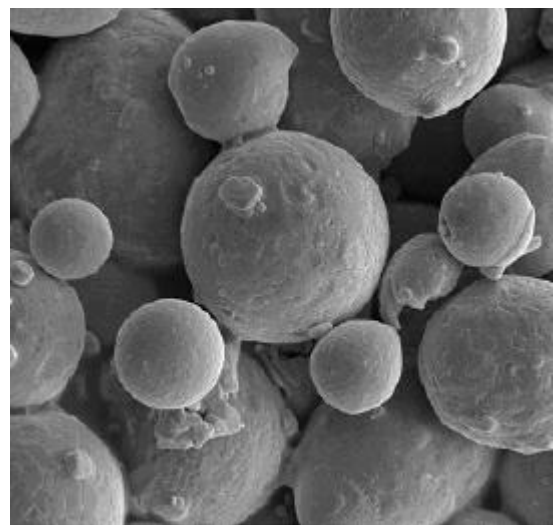
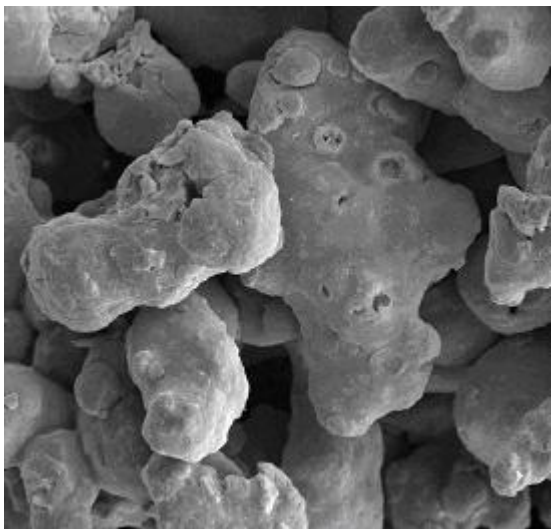


Obrázek 10 Nanášení žárového nástřiku metodou HVOF [16]

2.4 Příprava prášku pro nástřik

Při výrobě žárového nástřiku slitiny stelit 6 se využívá přídavného materiálu ve formě prášku, přičemž pro výsledné vlastnosti žárového nástřiku této slitiny je důležitý tvar a velikost jednotlivých částic, z kterých se prášek skládá. Především velikost částic je velmi důležitá, neboť příliš velká velikost jednotlivých částic může způsobovat nedostatečné protavení těchto částic a tím také narušení výsledné struktury vlivem zvětšeného množství pórů, které mohou při následném soustružení způsobovat praskání a odlupování povlaku a šíření tahových trhlin. Pro výrobu prášku existuje několik metod. Jednou z těchto metod je výroba prášku atomizací neboli rozprašováním tekuté formy prášku do vodního popřípadě plynného prostředí. Princip této metody spočívá v přechodu taveniny z kalibrovacího hrdla do trysky, přičemž následným rozstříkáním do již zmíněných prostředí jednotlivé částice tuhnou pod vysokým tlakem. Prášek, který je atomizován v plynném prostředí vykazuje globulárnější tvar, který je z hlediska celkového protavení a tekutosti mnohem vhodnější, než prášek, jež je rozprašován do prostředí vodního, neboť tento prášek ve výsledku vykazuje, co se týče tvaru, určitou nerovnoměrnost a nepravidelnost, což se může negativně projevit při natavování jednotlivých částic. Porovnání tvaru a velikosti jednotlivých částic u plynem a vodou atomizovaného prášku je možné vidět na obrázku 11. Avšak i jednotlivé částice prášku, který byl vytvořen pomocí atomizace ve vodním prostředí lze určitou metodou převést na vhodnější, tedy globulárnější tvar, a to pomocí přehřátí prášku na teplotu, která výrazně

převyšuje teplotu tavení. Také z hlediska velikosti jednotlivých částic je vhodnější vyrábět prášek atomizací v plynném prostředí, neboť jednotlivé částice takto vyrobeného prášku dosahují přibližně čtyřikrát menší velikosti než v případě prášku, který je vyroben metodou rozprašování v prostředí vodním. Velikost jednotlivých částic u prášku atomizovaného v plynném prostředí dosahuje hodnot v rozmezí 25 – 100 μm . U prášku rozprašovaného v plynném prostředí se také dosahuje vyšší čistoty prášku, tedy nižšího obsahu oxidů, což je důležité z hlediska mechanických vlastností a výsledné struktury žárového nástřiku slitiny stelit 6. [1], [2], [3], [4], [21]



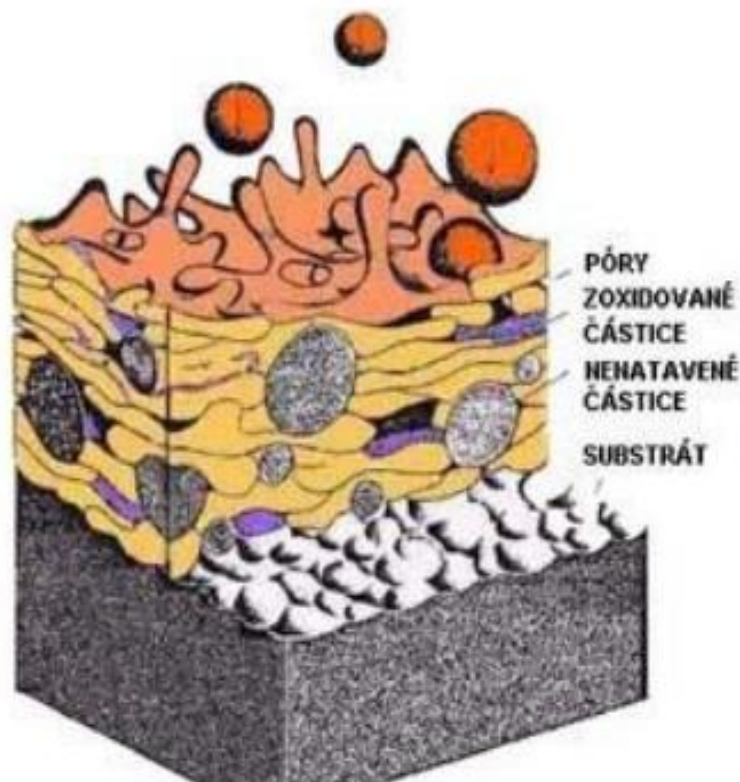
Obrázek 11 Vodou atomizovaný prášek (vlevo), plynem atomizovaný prášek (vpravo) [2]

2.5 Struktura žárového nástřiku

Výsledný povlak, který je proveden metodou HVOF, se vyznačuje strukturou, která je tvořena tzv. jednotlivými splaty, jejichž ideální tvar z hlediska soudržnosti a funkčnosti povlaku je tvar diskovitý. Struktura tedy vykazuje lamelární charakter. Samotný diskovitý tvar splatu je však možno změnit výchozími parametry a to především zvýšením ekvivalentního poměru, čímž dojde k menší rychlosti nastříkujících částic a tím pádem k menšímu rozstříku jednotlivých částic, což vede k globulárnějšímu tvaru splateů, což však může být příčinou vedoucí k horším vlastnostem povrchu po procesu obrábění, neboť u globulárnějších tvarů splateů budou menší dotykové plochy mezi jednotlivými splaty a tím pádem také menší soudržnost, což může způsobovat vytrhávání jednotlivých částic vlivem velkých řezných sil, které při obrábění těžkoobrobitelných nástřiků vznikají. Při

globulárnějším tvaru splatek je také vyšší pravděpodobnost vytvoření oxidů na povrchu součásti a v místech kde jsou póry. [2], [3], [4], [11], [12]

Kromě jednotlivých splatek je struktura žárového nástřiku vytvořeného metodou HVOF dále tvořena nenatavenými, popřípadě pouze částečně natavenými částicemi, póry a také částicemi, které v průběhu letu zoxidovali, tzv. oxidické obálky. Struktura žárového nástřiku je znázorněna na obrázku 12. [2], [4], [11]

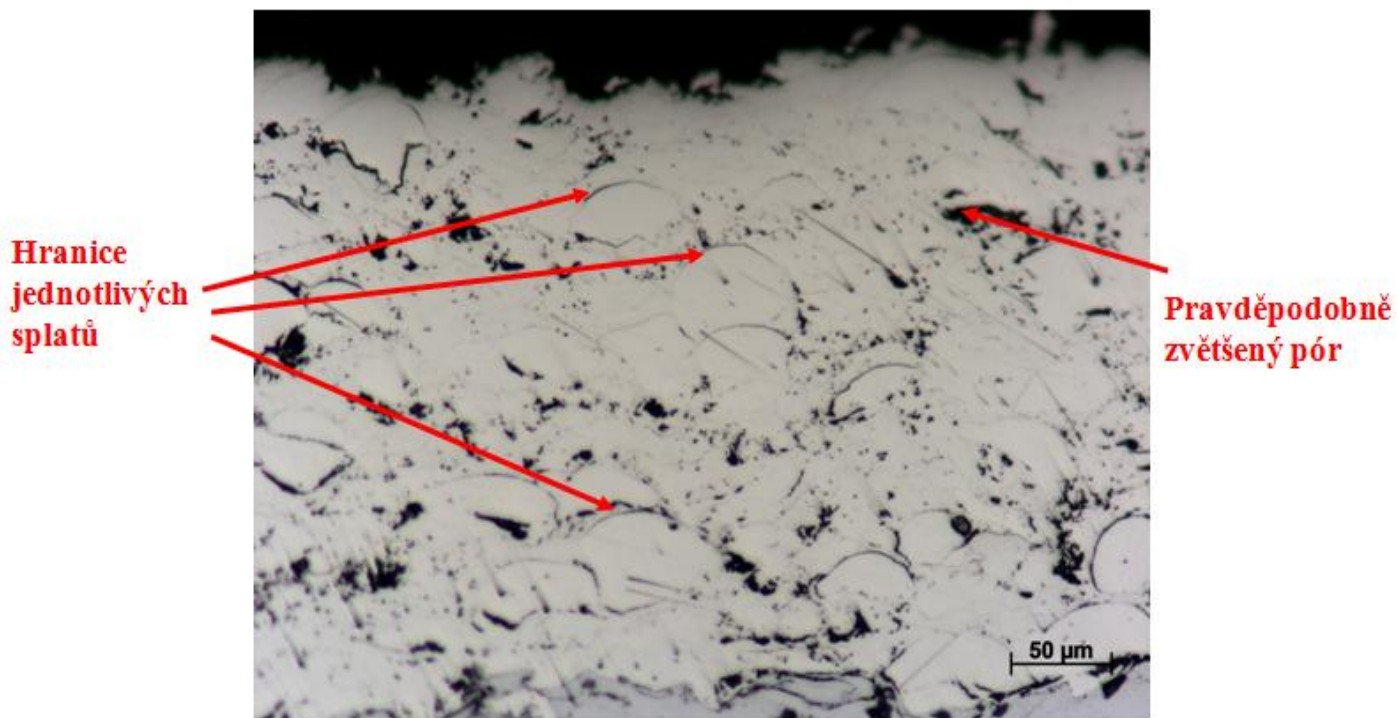


Obrázek 12 Struktura žárového nástřiku [2]

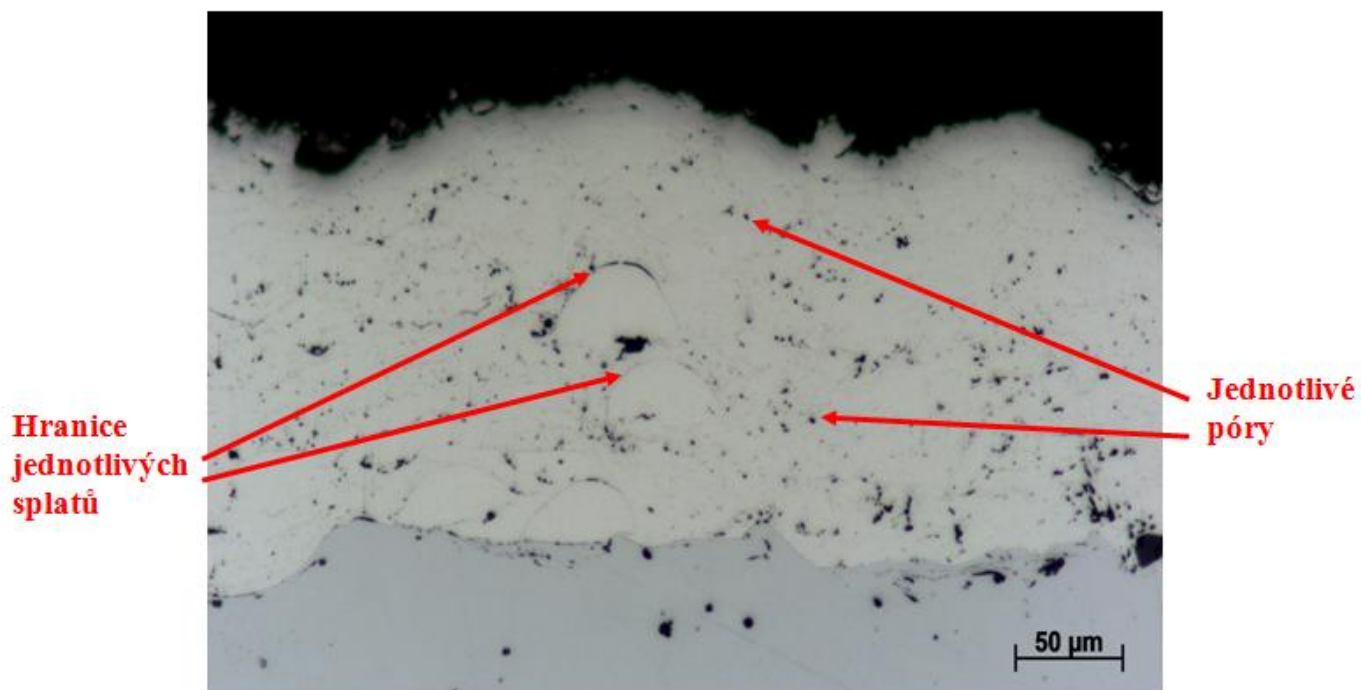
Oxidické obálky (vměstky) mohou ve struktuře způsobovat problém, který vznikne v případě, že tyto vměstky budou tvořit větší obsah v povlaku, popřípadě se budou vyskytovat pouze v určitých místech, což povede ke zvýšené křehkosti a snížení kohezity, respektive kohezni pevnosti mezi jednotlivými částicemi v důsledku právě rovnoměrného rozložení oxidických vměstků. Obsah oxidických vměstků se však ve struktuře může regulovat několika způsoby. Prvním způsobem, kterým lze snížit obsah oxidických vměstků je snížení depoziční vzdálenosti mezi výstupem ze vstřikovacího zařízení a základním substrátem, čímž dojde ke snížení času, během kterého mohou jednotlivé částice zoxidovat. Dalšími způsoby, kterými

Lze snížit obsah oxidických obálek (vměstků) je snížení teploty plamene nebo povrchu základního substrátu, popřípadě zmenšení jednotlivých částic přidavného prášku, což vede v případě zoxidování k menšímu množství oxidů vlivem menší plochy částice. Poslední možností, jak lze snížit obsah oxidických vměstků ve struktuře, je provádění žárového nástřiku v ochranné atmosféře tak, aby se zabránilo přístupu kyslíku k letícím částicím. [2], [3], [4], [11]

Množství pórů ve struktuře je stejně jako množství a rozložení oxidických vměstků důležitý údaj, který jednak slouží k hodnocení kvality žárových nástřiků, ale také má vliv na mechanické vlastnosti samotných nástřiků. Velké množství pórů neboli zvýšená pórovitost naznačuje, že se ve struktuře žárového nástřiku vyskytuje větší množství nenatavených nebo pouze částečně natavených částic a také negativně ovlivňuje kohezní pevnost mezi jednotlivými splaty. Zvýšená pórovitost může být také způsobena globulárnějším tvarem jednotlivých splatů, což lze ovlivnit samotnými parametry nástřiku. Množství pórů způsobené jednak globulárnějším tvarem splatů nebo větším množstvím nenatavených nebo pouze částečně natavených částic způsobuje snížení tvrdosti samotného nástřiku, ale také odlupování a praskání povlaku, což je velmi negativní vlastnost především u součástí, které byly opatřeny žárovým nástřikem z důvodu zvýšené odolnosti proti mechanickému a jinému druhu opotřebení, jako je například opotřebení abrazivní, adhezivní, erozivní, kavitační nebo únavové. Zvýšené množství pórů vytváří ve struktuře žárového nástřiku kanálky a cesty odlišné tloušťky, vytváření tzv. otevřené pórovitosti, což má za důsledek pronikání provozních kapalin skrz tyto kanálky až k základnímu substrátu, a tím ke snížení odolnosti základního substrátu vůči korozi. Ve většině případů žárových nástřiků je zvýšená pórovitost považována za negativní vlastnost samotného žárového nástřiku, avšak v praxi se vyskytují také případy, kde je právě zvýšená pórovitost považována za pozitivní vlastnost. Jedním z těchto případů jsou např. samomazná kluzná ložiska. Hodnocení pórovitosti žárově stříkaného povlaku je velmi obtížné a ne vždy úplně přesné, neboť při přípravě metalografického výbrusu dochází vlivem brousících a leštících kotoučů k vytrhávání tvrdých částic na okrajích jednotlivých pórů a tím k jejich zvětšování, taktéž dochází vlivem vytrhávání jednotlivých částic k vytváření zcela nových pórů, což následně zhoršuje hodnocení množství a tvaru jednotlivých pórů. Příklad špatně a lépe provedeného metalografického výbrusu slitiny stelit 6 je ukázán na obrázku 13, respektive na obrázku 14. [2], [3], [4], [16], [17]

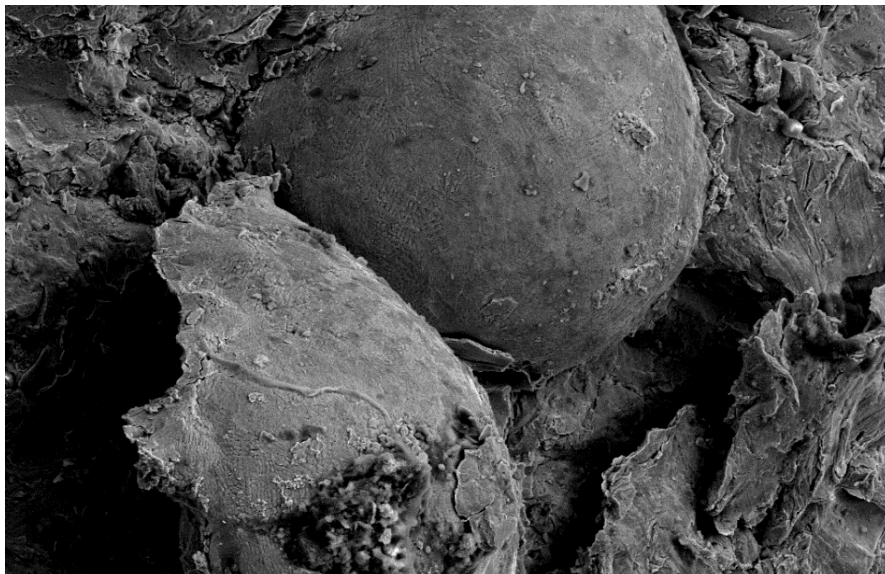


Obrázek 14 Metalografický výbrus slitiny stelit 6, možno vidět poškrábání vlivem vytrhaných částic během přípravy

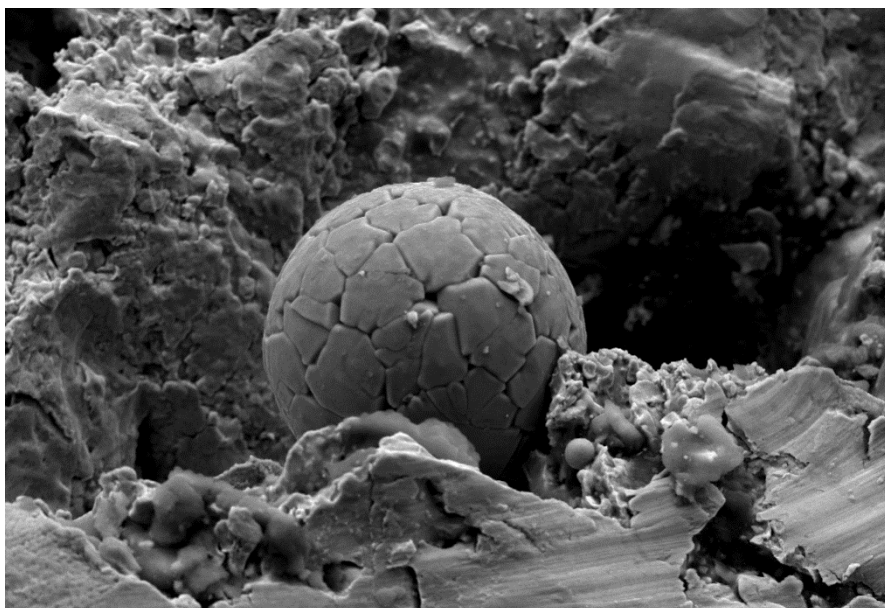


Obrázek 13 Metalografický výbrus slitiny stelit 6, není vidět patrné poškrábání způsobené během přípravy

Nenatavené nebo pouze částečně natavené částice se ve struktuře žárového nástřiku vyskytují z důvodu, že ne každá částice projde v barelu vstřikovacího zařízení přímo jeho středem, tedy středem plamene. V případě, že unášené částice prochází během svého letu ve vstřikovacím zařízení přímo středem plamene, dojde k jejímu úplnému natavení. V případě, že unášená částice letí po trajektorii na okraji plamene nebo přímo mimo něj, vychází částice na výstupu vstřikovacího zařízení buď to pouze částečně natavená, nebo absolutně nenatavená. Na obrázcích 15 a 16 je možné vidět částečně natavenou částici, respektive nenatavenou částici. [2], [4]



Obrázek 15 Částečně natavená částice ve struktuře slitiny stelit 6



Obrázek 16 Nenatavená částice ve struktuře slitiny stelit 6

2.6 Úprava povrchu před nástřikem povlaku

Z hlediska výsledných mechanických vlastností a samotného provozu hraje důležitou roli u součástí s žárovým nástřikem slitiny stelit 6 chování na rozhraní povlak – základní substrát. Samotný povlak slitiny stelit 6 je na základním substrátu ukotven především mechanicky. Kromě mechanického působení působí dále na rozhraní základního substrátu a povlaku slitiny stelit 6 také van der Waalsovy síly a to především disperzní van der Waalsova síla a také difúzní reakce mezi jednotlivými neboli elementárními částicemi jednotlivých splatů. [3]

Adhezní vlastnosti na rozhraní povlaku a základního substrátu jsou ovlivněny především depozičními parametry vstřikovacího zařízení, ale do určité míry také nerovnostmi základního substrátu, na který je následně aplikován žárový nástřik, a jehož povrch tvoří nosné elementy pro následné ukotvení částic povlaku. Je tedy patrné, že je nutné před samotným procesem žárového nástřiku upravit povrch základního substrátu. Samotná úprava povrchu spočívá v otryskávání povrchu tvrdými korundovými částicemi, jejichž zrnitost je většinou 0,8 až 1mm, přičemž hlavním faktorem, který ovlivňuje drsnost základního materiálu je rychlost dopadajících částic korundu. Dílčími faktory, které se podílejí na výsledné drsnosti povrchu základního substrátu, jsou úhel, čas a vzdálenost otryskávání, popřípadě velikost tvrdých korundových částic. [4], [5], [6]

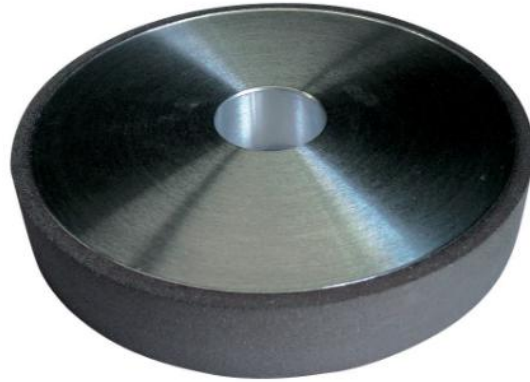
Na základě studií prováděných v zahraničí bylo zjištěno, že při drsnosti povrchu základního substrátu vyjádřené hodnotou $R_a < 1,7 \mu\text{m}$ se velikost adhezivní pevnosti rovná velikosti adhezivní pevnosti na naprosto nezdrsněném povrchu. Naopak daleko větší hodnotě adhezivní pevnosti povlaku žárového nástřiku se dosahuje při drsnosti povrchu základního substrátu vyjádřené hodnotou R_a , a to $R_a > 5,8 \mu\text{m}$. Na základě těchto poznatků je nutné věnovat úpravě povrchu velkou pozornost, a to především při volbě parametrů otryskávání tak, aby byl samotný proces otryskávání co nejvíce ekonomický a hospodárný a současně, aby výsledný povrch základního substrátu splňoval požadavky drsnosti, které jsou nutné k následnému správnému mechanickému ukotvení částic povlaku. Vyšší hodnoty adhezivní pevnosti se také dosahuje v případě, že je základní substrát před samotným procesem předehřát, neboť vlivem předehřátí dochází k lepší interakci mezi částicemi základního materiálu a samotnými natavenými částicemi slitiny povlaku. Velký problém může nastat v případě, pokud by první vrstva povlaku byla tvořena větším množstvím nenatavených nebo pouze částečně natavených částic, které by se obtížně ukotvovaly na mechanicky upravený základní materiál a následně by vlivem těchto částic docházelo v provozu k poškození celé tloušťky povlaku a tím k velkým ekonomickým ztrátám. Důležitým aspektem pro adhezivní vlastnosti je také

tloušťka povlaku, přičemž za kritickou tloušťku je považována tloušťka 450 μm , neboť při této tloušťce dochází k poklesu hodnoty adhezivní pevnosti vlivem přeměny tlakového pnutí na pnutí tahové, které vede ke vzniku vnitřních sil, které odtahují jednotlivé částice povlaku jednak od základního substrátu, ale také dochází k odtahování jednotlivých částic od sebe, což může vést v případě metody soustružení k snadnějšímu vytrhávání jednotlivých částic vlivem silového působení od soustružnického nože. [4], [5], [6]

Velikost adhezivní pevnosti neovlivňuje pouze přilnavost a soudržnost jednotlivých částic na základní materiál, popřípadě přilnavost a koheze jednotlivých částic mezi sebou, ale ovlivňuje také odolnost vůči rázům, respektive únavovou životnost součásti, což je nutné brát na zřetel v případě využití povlaků slitiny stelit 6 jako ochrany a zvýšení životnosti forem a zápusťek.

2.7 Obrábění žárových nástřiků metodou broušení

V současné době se k obrábění žárového nástřiku slitiny stelit 6 a obecně k obrábění žárových nástřiků využívá především metoda broušení. Metody obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií břitu nejsou v praxi prakticky vůbec využívány, neboť je určitá pravděpodobnost, že by při těchto metodách docházelo k delaminaci, neboli oddělení sousedních splatek od sebe vlivem velkých řezných sil. Při broušení žárového nástřiku slitiny stelit 6 se využívá brusných kotoučů z kubického nitridu boru CBN, ale především kotoučů diamantových, kde brusná zrna tvoří přibližně 75% celkového objemu kotouče a zrnitost je u těchto kotoučů ve většině případů D126, respektive B126 v případě kotoučů z CBN. Jako pojiva se v případě diamantových kotoučů a kotoučů z CBN využívá pryskyřice střední tvrdosti, které má dobré samoostřicí vlastnosti a vyznačuje se nízkým vznikem tepla. Při broušení žárového nástřiku slitiny stelit 6 je nutno mít na paměti, že se jedná o materiál s lamelární strukturou, tudíž je nutno pohlížet na broušení tak, aby nedocházelo k tvorbě nových trhlin a pórů vlivem vytržených částic, které by poškozovaly výsledný povrch po broušení. Je tedy nutné volit nízkou hodnotu úběru třísky a to přibližně 0,01 mm tak, aby docházelo k co nejmenšímu teplotnímu ovlivnění obráběného povrchu. Pro dosažení dobré kvality výsledného povrchu je také nutnost zajistit správné orovnění kotouče a jeho dobrou kruhovitost. Důležitým faktorem pro správnou kvalitu povrchu je mimo jiné také potlačení vibrací během samotného procesu broušení. [13], [2]



Obrázek 17 Diamantový brusný kotouč [13]



Obrázek 18 Brusné kotouče z CBN [13]

3. Návrh faktorů a parametrů experimentu

Tato kapitola diplomové práce je zaměřena na experimentální činnost obrábění žárového nástřiku pomocí řezných nástrojů s definovanou geometrií břitu, a to konkrétně na soustružení slitiny stelit 6 tak, aby výsledný obrobený povrch vykazoval podobné hodnoty parametrů drsnosti, jako v případě současně používané metody broušení. Experimentální činnost byla rozdělena do dvou kroků, přičemž v prvním kroku došlo nejdříve k získání informací o vhodných řezných podmínkách a o vhodné makro geometrii břitu řezného nástroje, jímž byly zvoleny cermetové břitové destičky kruhového tvaru. V poslední části experimentální činnosti byl experiment zaměřen na získání vhodného parametru mikro geometrie břitu vyměnitelných břitových destiček, a to konkrétně poloměru zaoblení řezné hrany.

3.1 Použité technické vybavení

Veškerá experimentální činnost soustružení žárového nástřiku slitiny stelit 6 byla prováděna na zařízeních a přístrojích, jimiž jsou vybaveny halové laboratoře Regionálního technologického institutu RTI.

3.2 Použité řezné nástroje

Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 3, k experimentální činnosti soustružení byly vybrány cermetové VBD kruhové tvaru s pozitivní geometrií, a to konkrétně destičky s průměrem 12 mm, úhlem čela v ortogonální rovině $\gamma_o = 25^\circ$ a úhlem hřbetu $\alpha_o = 7^\circ$. Destičky je možné vidět na obrázku 19.



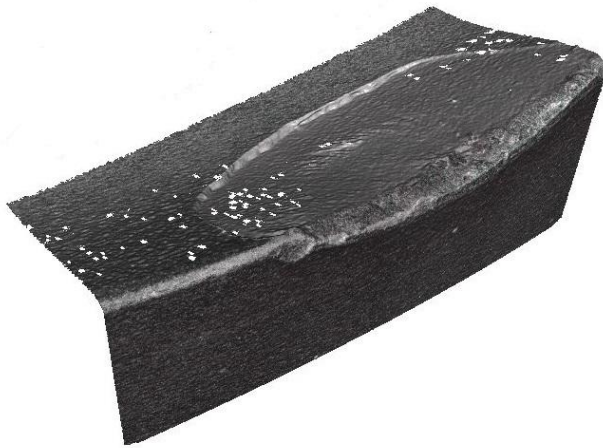
Obrázek 19 Zvolené VBD s pozitivním úhlem čela γ
[27]



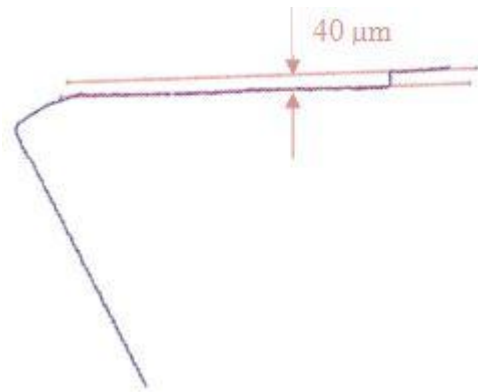
Obrázek 20 Scan řezné hrany VBD s pozitivním úhlem čela γ

Výběr těchto vyměnitelných břitových destiček, tedy destiček s pozitivním úhlem čela, se při první fázi experimentu při vyšších řezných rychlostech a obrábění za sucha ukázal jako

špatný, neboť musel být experiment při takto nastavených řezných podmínkách po pár vteřinách nástroje v řezu přerušen, protože docházelo již v takto krátké době řezu k výraznému opotřebení VBD, a to především ve formě vyštípnutí řezné hrany. Vznikající opotřebení nelze hodnotit jako žlábek (výmol), neboť šířka opotřebení na čele je přibližně 1 mm a to je výrazně větší hodnota než nastavená hloubka řezu. Dalším aspektem, který potvrzuje hodnocení ve formě vyštípnutí řezné hrany je fakt, že během obrábění vznikala drobná tříška, která tedy po čele neodcházela až do vzdálenosti 1 mm. Opotřebení ve formě vyštípnutí řezné hrany u pozitivní geometrie VBD je možné vidět na obrázku 21. Hloubka tohoto vyštípnutí dosahovala na čele po pár vteřinách v řezu hodnoty přibližně 40 μm .

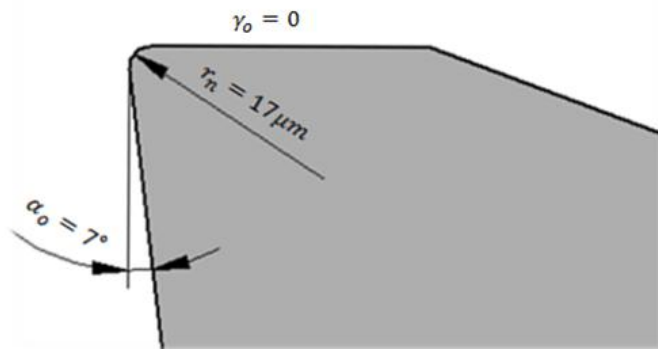


Obrázek 21 Vyštípnutí řezné hrany

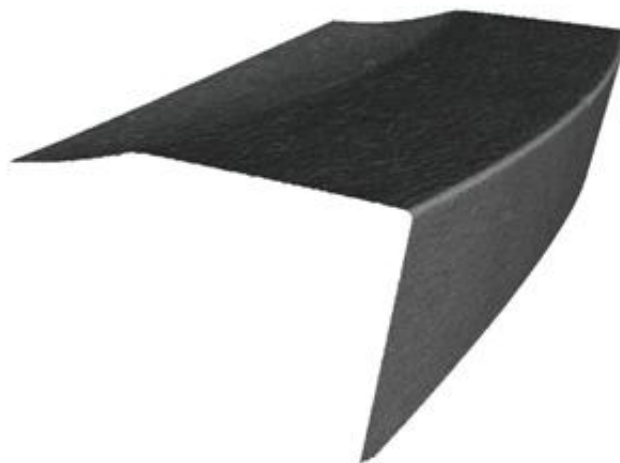


Obrázek 22 Pohled do ortogonální roviny

Proto byla pro následné fáze experimentální činnosti nutná úprava těchto VBD, a to jejich zbrúšením na negativnější úhel čela γ_o , a to konkrétně hodnotu 0° , přičemž během úpravy došlo k vytvoření tzv. lomeného čela destičky, přičemž plocha čela pod úhlem 0° byla takové velikosti, aby její hodnota byla větší než hloubka řezu a_p tak, aby se nejednalo o fazetku, ale skutečně o lomené čelo. Současně byly takto upravené VBD omlety tak, aby poloměr zaoblení řezné hrany dosahoval hodnoty 17 μm . Konkrétní makro geometrie VBD v ortogonální rovině je znázorněna na obrázku 23. Obrázek 24 znázorňuje scan takto upravené VBD pomocí zařízení IFM G4.

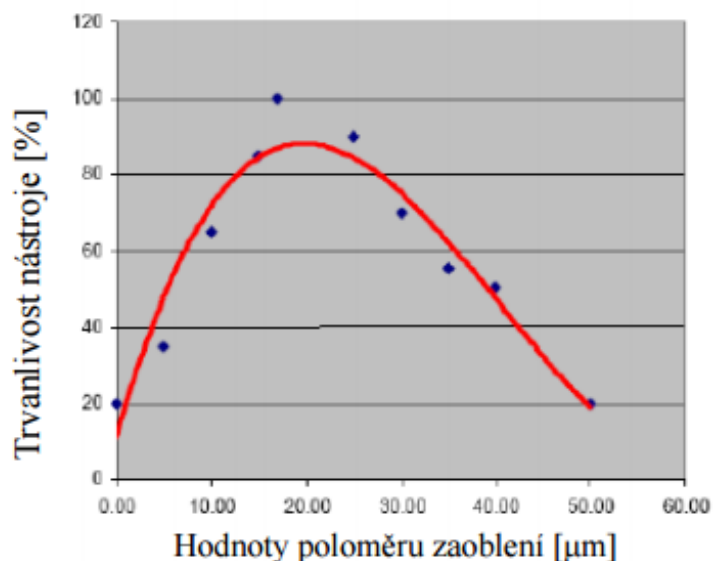


Obrázek 23 Makro geometrie VBD s upravenou plochou čela v rovině ortogonální



Obrázek 24 Scan části VBD s upravenou plochou čela

Jelikož se volba zaoblení řezné hrany na hodnotu $17 \mu\text{m}$ ukázala jako vhodná, byly pro poslední část experimentální činnosti VBD upraveny metodou omílání na rozdílný parametr zaoblení řezné hrany r_n tak, aby bylo možné sledovat vliv poloměru zaoblení řezné hrany VBD na hodnoty parametrů drsnosti výsledného obrobeného povrchu. Konkrétní poloměry zaoblení řezné hrany byly zvoleny na 10 , 14 a $18 \mu\text{m}$ tak, aby se ukázalo, zda je vhodnější poloměr r_n větší než $17 \mu\text{m}$, nebo naopak menší než $17 \mu\text{m}$, přičemž se při volbě hodnot poloměru zaoblení vycházelo z obrázku 25, který znázorňuje graf s optimální hodnotou poloměru zaoblení řezné hrany r_n vzhledem k trvanlivosti řezného nástroje a tím i hodnotám drsnosti obrobeného povrchu. [24], [25]



Obrázek 25 Graf závislosti poloměru zaoblění řezné hrany na trvanlivosti [25]

Konkrétní makro geometrie VBD a používané poloměry zaoblění řezné hrany r_n pro jednotlivé fáze experimentu jsou pro větší přehlednost popsány v tabulkách 6 a 7 a označeny písmeny **A** a **B**.

Typ VBD	Úhel čela γ	Úhel hřbetu α	Poloměr zaoblění r_n
Pozitivní (A)	25°	7°	35 μm

Tabulka 6 Makro geometrie a poloměr zaoblění pro pozitivní VBD

Typ VBD	Úhel čela γ	Úhel hřbetu α	Poloměry zaoblění r_n
VBD s upravenou plochou čela (B)	0°	7°	17, 10, 14, 18 μm

Tabulka 7 Makro geometrie a poloměry zaoblění řezné hrany pro VBD s upravenou plochou čela (VBD s poloměry zaoblění 10, 14 a 18 μm byly používány až v druhé fázi experimentu)

Jednotlivé VBD byly během experimentální činnosti upínány do držáku soustružnického nože, který byl pomocí upínání Capto upnut do modulárního nástrojového systému s HSK kuželem, pomocí něhož došlo k upnutí do vřetena stroje. Kompletní upínací systém včetně držáku soustružnického nože s upnutou vyměnitelnou břitovou destičkou je znázorněn na obrázku 26.



Obrázek 26 Používaný upínací systém při experimentální činnosti

3.1 Použité stroje a přístroje

Veškeré prováděné experimenty probíhaly na multifunkčním soustružnickém centru DMG MORI CTX BETA 1250, které je součástí strojového parku halových laboratoří RTI a které umožňuje přívod chladicí kapaliny pod tlakem až 100 barů.



Obrázek 27 Multifunkční soustružnické centrum DMG MORI CTX BETA 1250

3.4 Další použité přístroje

3.4.1 Měřicí zařízení HOMMEL ETAMIC T8000

Jedná se o měřicí zařízení pro získávání informací, které se týkají povrchu součástí a kontur, a které pracuje na dotykovém principu. V případě experimentální činnosti sloužilo toto měřicí zařízení k měření profilové drsnosti obrobeného povrchu žárového nástřiku slitiny stelit 6. Zařízení je možné vidět na obrázku 28.



Obrázek 28 Měřicí zařízení Hommel Etamic T8000



Obrázek 29 Měření drsnosti pomocí dotykové metody

3.4.2 Měřicí zařízení IFM G4

Toto měřicí zařízení pracuje na opticko – skenovacím principu a během experimentu bylo použito k měření a vyhodnocování výsledného obrobeného povrchu žárového nástřiku z hlediska abbotovy křivky profilu neboli nosné křivky profilu. Zařízení bylo také využito ke

skenování jednotlivých VBD a k provedení diferenčních analýz, pomocí kterých je možno vidět úbytek nebo nárůst materiálu VBD v případě různého druhu opotřebení. Zařízení je znázorněno na obrázku 30.



Obrázek 30 Měřicí zařízení IFM G4

3.4.3 Řádkovací mikroskop SEM – FIB CrossBeamAuriga

Jedná se o zařízení pracující na principu iontového svazku, které bylo využito při zjišťování chemického složení a při pořizování snímků struktury. Zařízení je součástí laboratoří RTI.



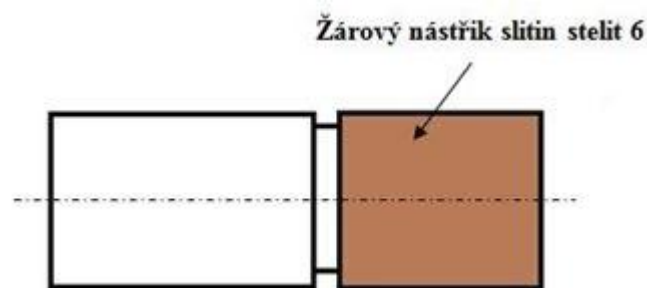
Obrázek 31 Řádkovací mikroskop

3.5 Polotovary zkušebních vzorků

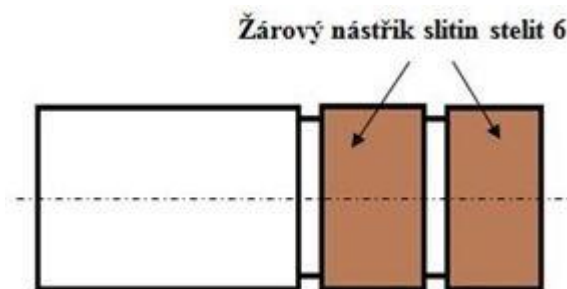
Při první fázi experimentu byly jako polotovary zvoleny válcové vzorky z oceli 12 050.1 o průměru přibližně 60 mm, na které byly od čela vzorku nastříkány pomocí metody HVOF

žárové nástřiky slitiny stelit 6 po délce 40 mm. Na konci žárového nástřiku byl vysoustružen zápich tak, aby bylo možno soustružnickým nožem s VBD během procesu soustružení vyjet z řezu bez současného najetí do zbylé části polotovaru.

Během druhé fáze experimentu byly použity podobné vzorky jako v první fázi experimentu, na kterých však byl vytvořen ještě jeden zápich, který rozdělil funkční plochu žárového nástřiku na dvě poloviny. Tato úprava byla provedena za účelem zvýšení potřebných ploch nutných k experimentu vlivem větší kombinace řezných podmínek a poloměrů zaoblení řezných hran VBD. Obrázkové znázornění zkušebních polotovarů je ukázáno na obrázku 32, respektive na obrázku 33.



Obrázek 32 Polotovar pro první fázi experimentu



Obrázek 33 Polotovar pro druhou fázi experimentu

3.5.1 Nástřikové parametry metody HVOF

Pro žárové nástřiky slitiny stelit 6 sloužící k experimentální činnosti byla zvolena metoda nástřiku HVOF. Princip metody včetně důležitosti nástřikových parametrů na výsledné vlastnosti žárového nástřiku jsou popsány výše v kapitole 2.3.4. Konkrétní nástřikové parametry použité pro žárové nástřiky na zkušebních vzorcích pro experimentální činnost jsou znázorněny v tabulce 8.

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

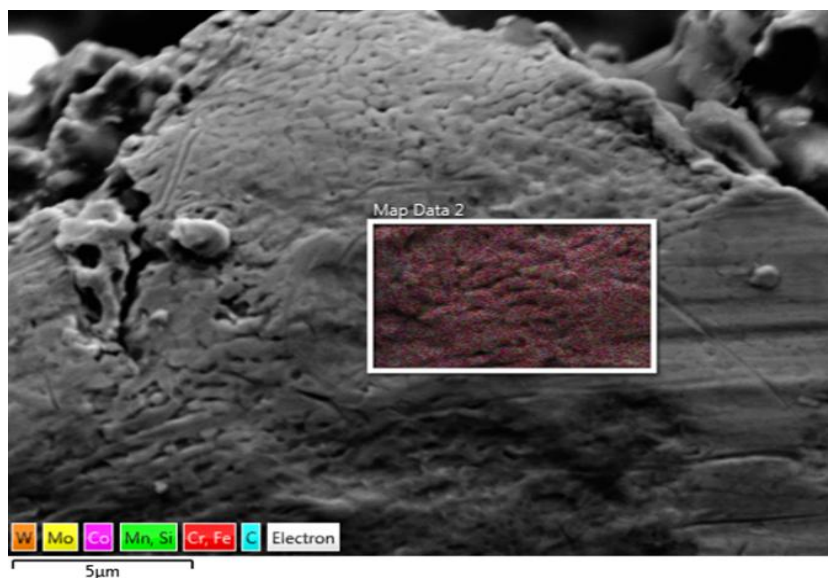
Tabulka 8 Nástřikové parametry HVOF metody [1], [16], [17]



Obrázek 34 Zkušební vzorky s žárovým nástřikem slitiny stelit 6 pro 1. fázi experimentu

3.5.2 Chemické složení nastříkaného žárového nástřiku

Na zkušebních vzorcích žárových nástřiků bylo pomocí řádkovacího mikroskopu provedeno měření chemického složení žárového nástřiku, které bylo následně vyjádřeno pomocí 2D mapy. Konkrétní chemické složení žárového nástřiku slitiny stelit 6 na jednotlivých zkušebních vzorcích odpovídá teoretickému složení této slitiny uvedeného v kapitole 2.1.1. Naměřené chemické složení na zkušebních vzorcích pomocí 2D mapy je možno vidět na obrázku 35. Konkrétní procentuální zastoupení jednotlivých prvků je vyjádřeno v obrázku 36, přičemž vícenásobné zastoupení jednotlivých prvků na ose x je způsobeno pouze odezvou odrážejících se elektronů v několika různých hladinách.



Obrázek 35 Chemické složení žárového nástřiku vyjádřené pomocí 2D mapy



Obrázek 36 Procentuální zastoupení jednotlivých prvků vytvořeného žárového nástřiku

3.6 Stanovení řezných podmínek

Jelikož je v praxi obrábění žárových nástřiků pomocí řezných nástrojů s definovanou geometrií břitu v současné době prakticky nevyužívaná metoda, byla volba řezných podmínek velkou neznámou, a proto byly v první fázi experimentu některé podmínky, a to konkrétně řezná rychlost v_c a hloubka řezu a_p , zvoleny ve velkém rozsahu. Hloubka řezu a_p při obrábění na jednu třísku byla zvolena v pěti variantách a to konkrétně 0,15, 0,175, 0,2, 0,225 a 0,25

mm. Hodnota posuvu f_{ot} byla stanovena na 0,3 mm/ot, ale u dvou vzorků v první části experimentu byl při stejné řezné rychlosti v_c a hloubce řezu a_p proveden experiment s hodnotami posuvu 0,15 a 0,45 mm/ot.

Během experimentu byl také zjišťován rozdíl v hodnotách drsnosti výsledného obrobeného povrchu při obrábění za sucha a obrábění při přívodu řezné kapaliny o tlaku 100 barů. Je ale třeba podotknout, že vlivem nízké řezné rychlosti nelze očekávat velké tepelné zatížení řezného nástroje ve formě VBD, a proto se od přívodu řezné kapaliny u některých vzorků spíše očekávalo snížení tření mezi vznikající drobnou třískou a řezným materiálem a rychlejší odvod třísky z místa řezu tak, aby nedocházelo k poškození povrchu a tím pádem k zhoršení hodnot drsnosti obrobeného povrchu. [8], [9], [10], [14]

Zvolené kombinace řezných podmínek pro jednotlivé vzorky při první části experimentu je možné vidět v tabulce 9. V tabulce 10 je možné vidět stanovené řezné podmínky v kombinaci s navrženými poloměry zaoblení r_n , které byly využity v druhé části experimentální činnosti.

Číslo vzorku	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv f_{ot} [mm/ot]	Hloubka řezu a_p [mm]	Chlazení	Typ geometrie
3	320	0,3	0,15	Za sucha	A
3	160	0,3	0,175	Za sucha	A
3	80	0,3	0,175	Za sucha	A
4	80	0,3	0,25	Tlak 100 barů	B
5	360	0,3	0,225	Tlak 100 barů	A
5	30	0,3	0,25	Tlak 100 barů	B
6	25	0,3	0,2	Tlak 100 barů	B
8	25	0,3	0,225	Tlak 100 barů	B
9	25	0,45	0,2	Tlak 100 barů	B
10	25	0,15	0,2	Tlak 100 barů	B
11	25	0,3	0,2	Za sucha	B
12	25	0,3	0,2	Za sucha	A
13	25	0,3	0,2	Tlak 100 barů	A

Tabulka 9 Kombinace řezných podmínek a makro a mikro geometrie při první fázi experimentu

Číslo vzorku	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv f_{ot} [mm/ot]	Hloubka řezu a_p [mm]	Typ geometrie	Poloměr zaoblení r_n [μ m]
15.2	25	0,15	0,2	B	10
16.1	25	0,15	0,2	B	14
18.1	25	0,15	0,2	B	10
20.1	25	0,15	0,2	B	14
21.1	25	0,15	0,2	B	18
21.2	25	0,15	0,2	B	10
24.2	25	0,15	0,2	B	18
14.1	25	0,3	0,2	B	14
14.2	25	0,3	0,2	B	10
17.1	25	0,3	0,2	B	18
18.2	25	0,3	0,2	B	14
19.1	25	0,3	0,2	B	10
23.1	25	0,3	0,2	B	18
24.1	25	0,3	0,2	B	14
25.1	25	0,3	0,2	B	10
15.1	25	0,45	0,2	B	10
16.2	25	0,45	0,2	B	14
17.2	25	0,45	0,2	B	18
19.2	25	0,45	0,2	B	10
20.2	25	0,45	0,2	B	14
22.1	25	0,45	0,2	B	14
22.2	25	0,45	0,2	B	18
23.2	25	0,45	0,2	B	10

Tabulka 10 Kombinace řezných podmínek a poloměrů zaoblení pro druhou část experimentu

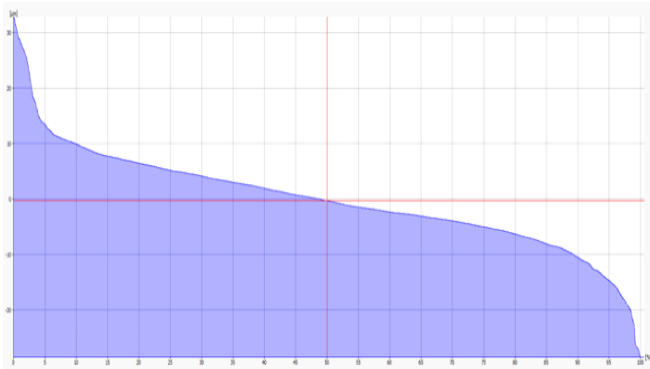
4. Diskuze experimentů

V této části diplomové práce je provedena analýza výsledků, které byly získány během první a druhé fáze experimentu. Výsledkem této části diplomové práce jsou poznatky, které vyjadřují nejvhodnější řezné podmínky a vhodné parametry mikro a makro geometrie řezného nástroje v závislosti na struktuře žárového nástřiku pro dosažení vhodného obrobeného povrchu, který byl hodnocen na základě profilové drsnosti a na základě abbottovy křivky.

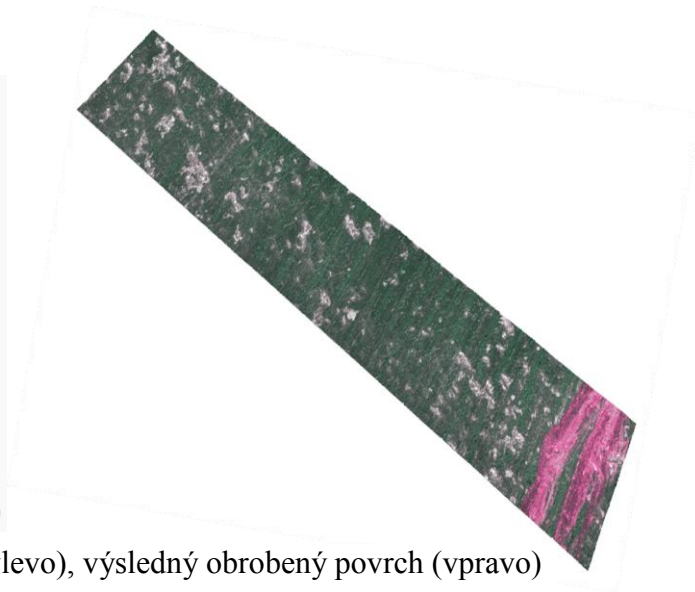
4.1 První fáze experimentu

Během první fáze experimentu probíhalo obrábění žárového nástřiku slitiny stelit 6 pomocí řezných nástrojů a řezných podmínek, které jsou uvedeny v tabulce 9. Během této fáze experimentu bylo zjištěno, že není možné kombinovat vysokou řeznou rychlost společně s pozitivní geometrií VBD, neboť při takovýchto podmínkách docházelo k hrnutí materiálu před samotným řezným nástrojem ve formě VBD a tím k vyštípnutí řezné hrany. Zároveň

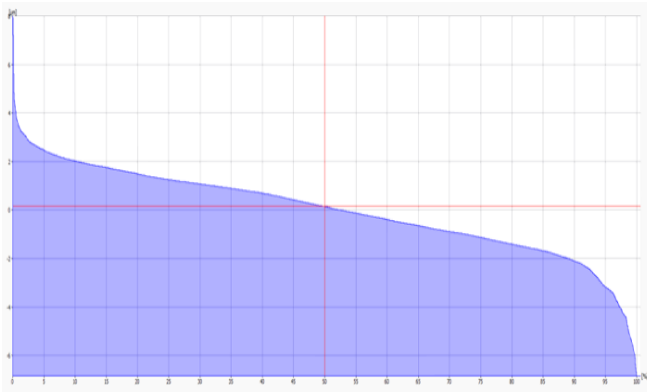
bylo při této fázi zjištěno, že optimální řezná rychlost je 25 m/min. Jednotlivé zkušební vzorky byly vyhodnocovány na základě profilové drsnosti měřené dotykovou metodou a na základě abbotovy křivky profilu a výsledky z těchto měření jsou postupně znázorněny níže na obrázcích 37 až 46.



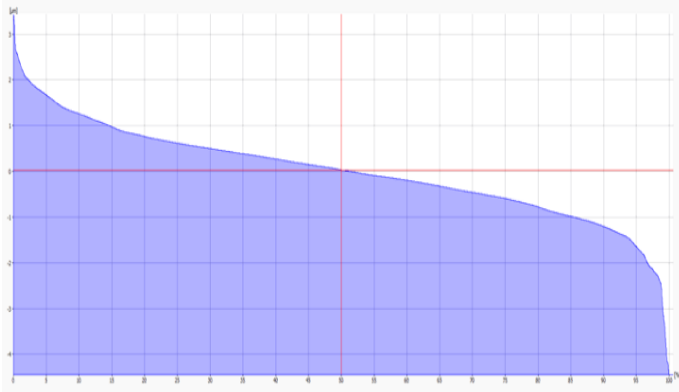
Obrázek 37 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 3 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 80$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,175$ mm, obrábění za sucha



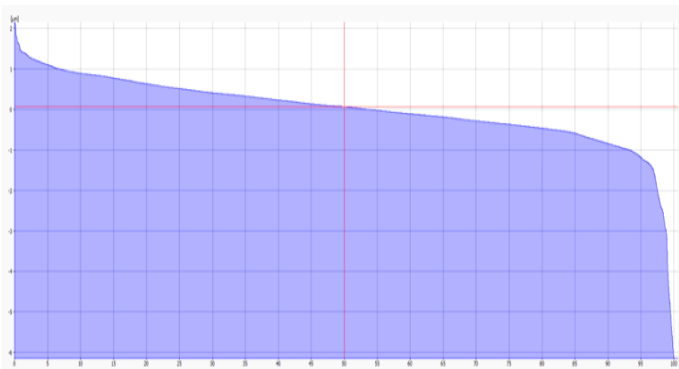
Obrázek 38 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 4 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 80$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,25$ mm, chlazení při tlaku 100 bar



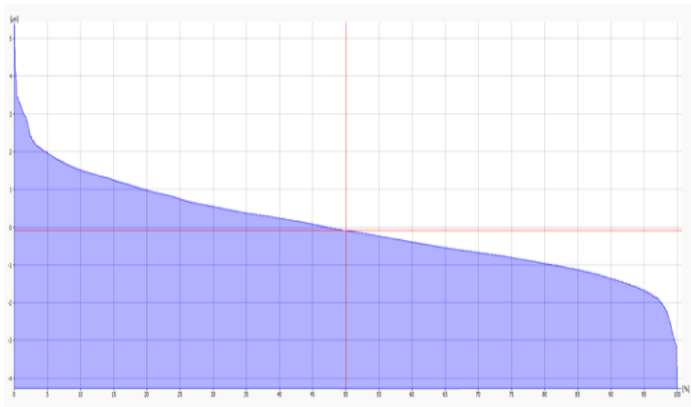
Obrázek 39 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 5 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 30$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,25$ mm, chlazení při tlaku 100 bar



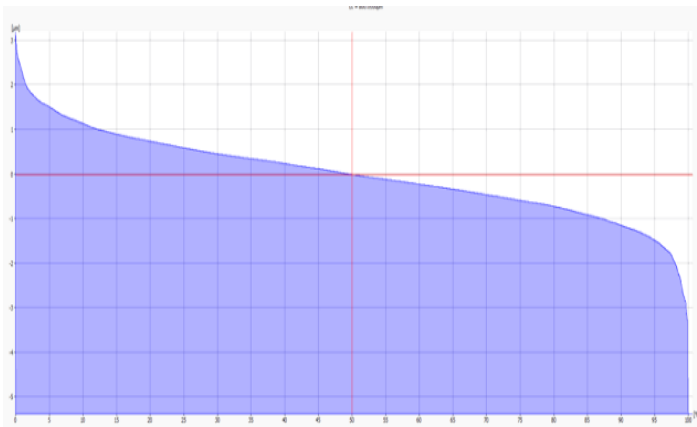
Obrázek 40 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 6 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar



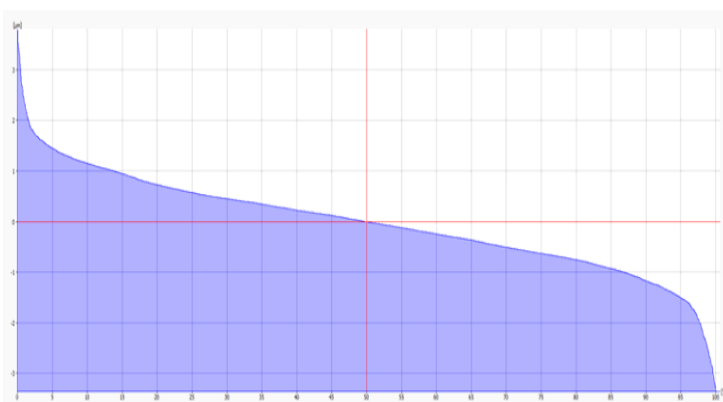
Obrázek 41 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 8 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,225$ mm, chlazení při tlaku 100 bar



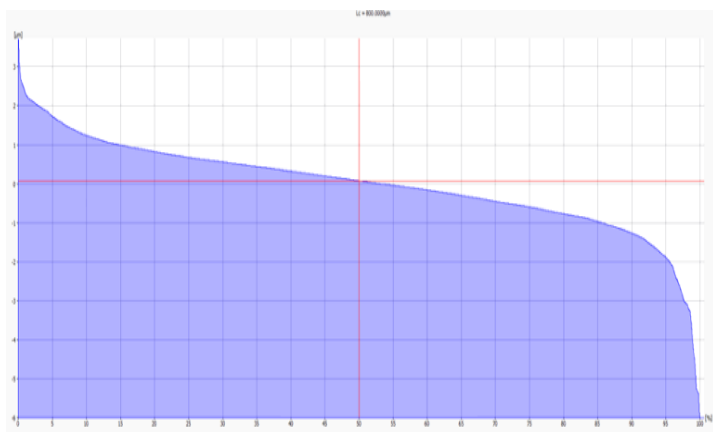
Obrázek 42 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 9 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) -
řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,45$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar



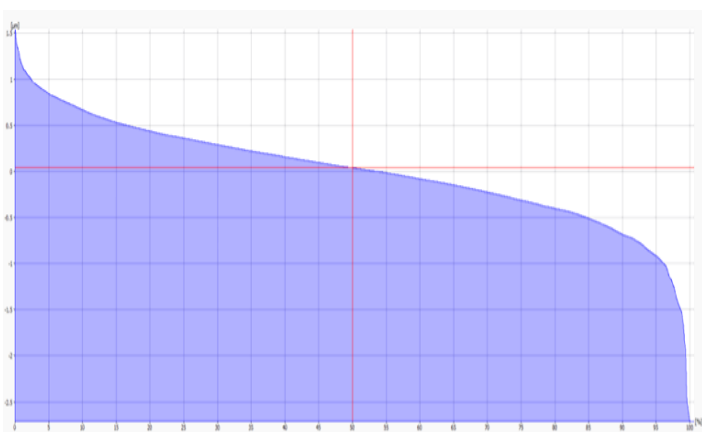
Obrázek 43 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 10 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) -
řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,15$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar



Obrázek 44 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 11 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) -
řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, obrábění za sucha



Obrázek 45 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 12 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, obrábění za sucha



Obrázek 46 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 13 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,15$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar

	Ra1	Ra2	Ra3	Ra	Rt1	Rt2	Rt3	Rt	Rz1	Rz2	Rz3	Rz
3	6,35	7,97	8,01	7,44	45,08	55,89	53,76	51,58	34,62	44,90	46,79	42,10
4	1,28	2,27	1,17	1,57	17,82	29,57	12,69	20,02	11,21	19,19	7,74	12,71
5	1,52	1,49	1,39	1,46	10,61	10,21	8,09	9,63	7,58	7,31	6,07	6,98
6	1,13	1,25	1,09	1,16	10,32	13,83	12,66	12,27	5,84	8,19	6,64	6,89
8	0,59	0,61	0,56	0,59	9,44	11,91	6,18	9,18	5,07	5,29	4,38	4,91
9	1,12	1,04	0,95	1,04	10,03	9,17	8,50	9,23	7,31	6,48	6,22	6,67
10	0,67	0,46	0,50	0,54	12,14	3,94	5,36	7,15	5,13	2,95	3,50	3,86
11	0,71	0,63	0,63	0,66	10,29	6,30	5,65	7,41	5,80	3,81	4,14	4,58
12	1,3	1,40	1,41	1,37	7,43	8,50	11,63	9,18	6,06	6,41	7,34	6,6
13	0,59	0,76	0,5	0,62	6,62	7,39	9,37	7,79	4,96	5,96	4,32	5,08

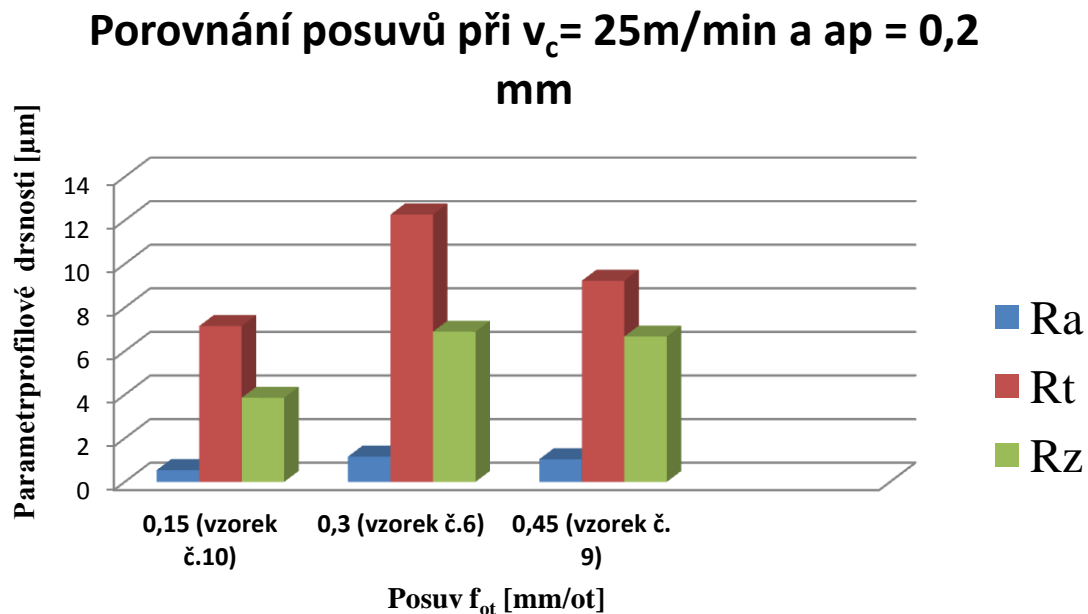
Tabulka 11 Hodnoty drsností obrobených povrchů jednotlivých vzorků

	Rk	Rpk	Rvk	Rmr1	Rmr2
3	19,89	13,70	11,38	9,89	89,18
4	4,01	2,62	2,46	12,42	89,3
5	4,67	1,37	2,73	4,97	90,93
6	2,35	1,004	1,35	10,98	88,88
8	1,73	0,53	1,73	8,91	89,27
9	2,92	1,33	0,95	11,88	93,0
10	2,28	0,95	1,06	9,9	84,84
11	2,33	0,95	1,07	9,88	90,15
12	2,42	1,12	2,05	9,29	88,06
13	1,26	0,45	0,82	9,67	87,53

Tabulka 12 Hodnoty parametrů abbotovy křivky obrobených povrchů pro jednotlivé vzorky

Výsledky ukazují, že nejlepšího povrchu po obrobení se z hlediska parametrů profilové drsnosti dosáhlo při obrábění s vyměnitelnou břitovou destičkou označenou jako B, tedy s upravenou VBD s úhlem čela $\gamma_0 = 0^\circ$, při nízké řezné rychlosti a nejnižším zkoumaném

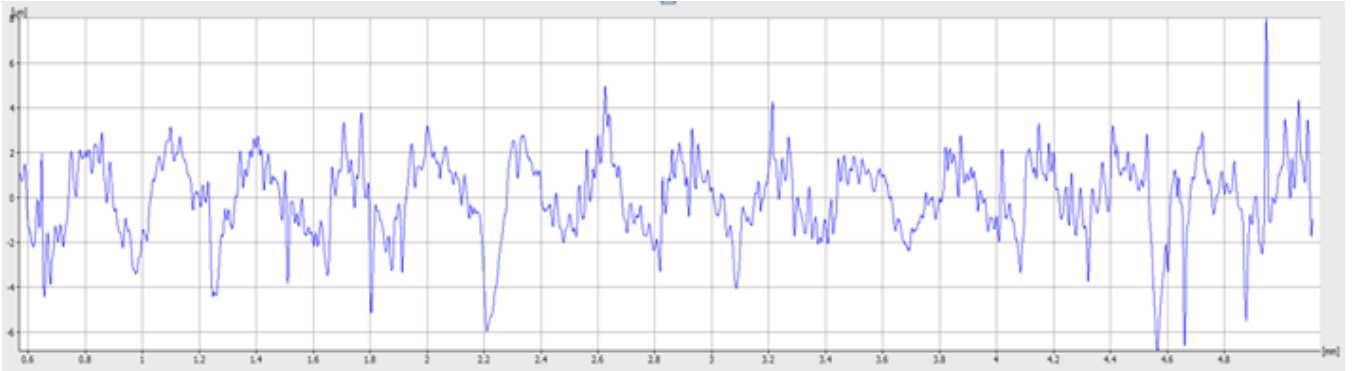
posuvu $f_{ot} = 0,15$ mm/ot. Porovnání výsledků parametrů profilové drsnosti při posuvech 0,15, 0,3 a 0,45 mm/ot je znázorněno v grafu 2.



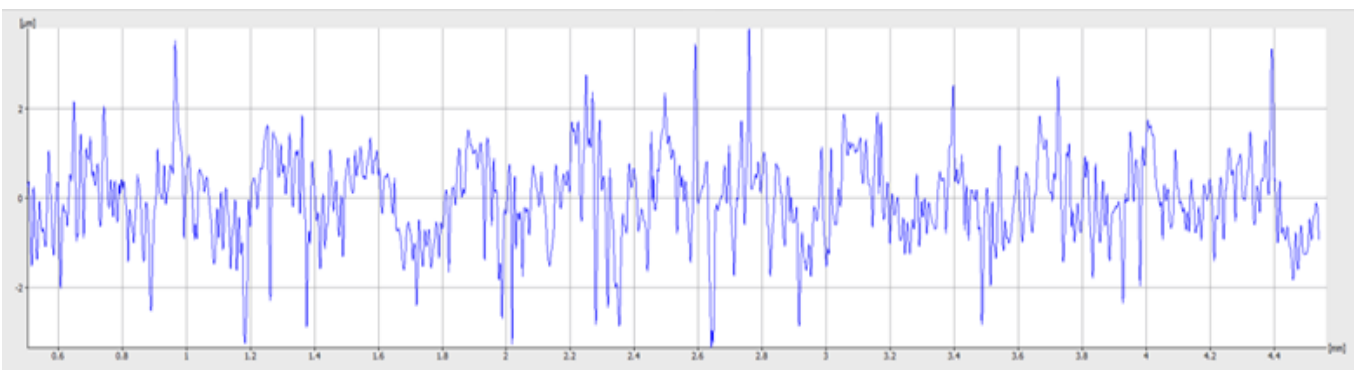
Graf 2 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6, 9, 10 v závislosti na rozdílných posuvech a konstantní řezné rychlosti v_c a hloubce řezu a_p

Z hlediska parametrů abbotovy křivky profilu R_k , R_{pk} a R_{vk} se jako nejlepší jeví vzorky číslo 8, 10, 11 a 13, kde hloubka profilu jádra, vyjádřená parametrem R_k nepřesahuje hodnotu $2,3 \mu\text{m}$ a redukovaná výška pík, neboli špiček není větší než $1 \mu\text{m}$. Nejnižší redukované výšky údolí se dosáhlo u vzorku č. 13 a dále u vzorků č. 10 a 11 kde byla redukovaná výška údolí, vyjádřená parametrem R_{vk} , pouze nepatrně vyšší než $1 \mu\text{m}$. Všechny tyto vzorky byly soustruženy při řezné rychlosti $v_c = 25$ m/min. Z hlediska parametrů R_{mr1} a R_{mr2} , které vyjadřují procentuální zastoupení ploch pík, respektive údolí z celkového povrchu po obrobení, vykazuje nejlepší hodnoty vzorek č. 5, kde parametr R_{mr1} dosahuje hodnoty 4,97%, což značí, že veškerý povrch pík tvoří právě takovéto procentuální zastoupení z celého povrchu, parametr R_{mr2} dosahuje hodnoty 90,93% a vyjadřuje tedy, že celková plocha údolí je 9,07%. Takto vhodné výsledky jsou však dány tím, že obrobený povrch je tvořen poměrně malým množstvím údolí a pík, které však dosahují velké výšky a tím způsobují nízké procentuální zastoupení z celkového povrchu, ale zároveň tento povrch vykazuje vysoké hodnoty profilové drsnosti. Profil povrchu vzorku č. 5 je znázorněn na obrázku 47. U vzorků č. 8, 10, 11 a 13, které vykazují vhodné parametry R_k , R_{pk} a R_{vk} se dosahovalo přibližně 9 – 9,5ti procentuálního zastoupení pík z celkového povrchu a procentuální zastoupení údolí bylo

přibližně mezi 10 – 12%. Nejlepších výsledků z těchto vzorků se dosáhlo u vzorku č. 11, kde parametr R_{mr1} vykazoval hodnotu 9,88% a údolí tvořili 9,85% z celkového povrchu. Ukázka profilu povrchu vzorku č. 11 je znázorněna na obrázku 48.



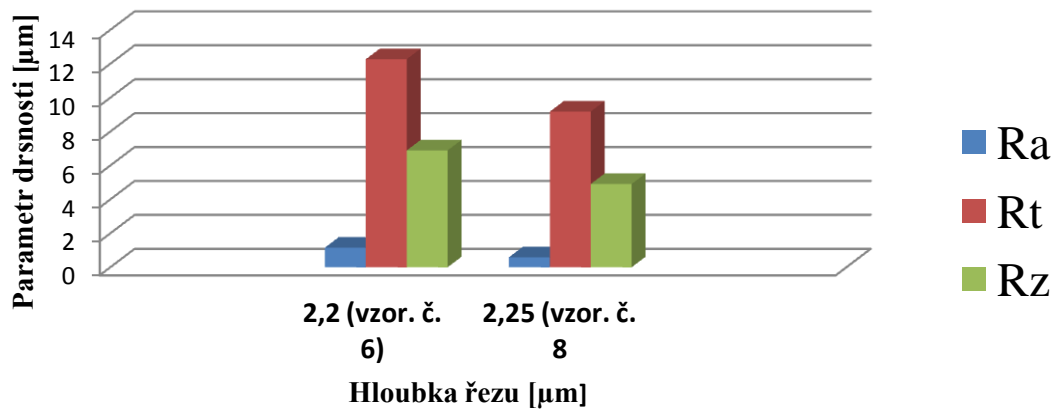
Obrázek 47 Profil povrchu vzorku č. 5



Obrázek 48 Profil povrchu vzorku č. 11

Porovnání výsledků obrobených povrchů z hlediska rozdílné hloubky řezu a_p lze porovnat u vzorku č. 6 a 8, kde byli ostatní řezné podmínky konstantní. Z těchto výsledků vyplývá, že hloubka řezu stanovená na hodnotu 2,25 mm vykazovala lepší výsledky obrobeného povrchu jak v podobě parametrů profilové drsnosti, tak v hodnotách parametrů abbottovy křivky profilu. Graf 3 znázorňuje porovnání těchto vzorků z hlediska hodnot parametrů profilové drsnosti.

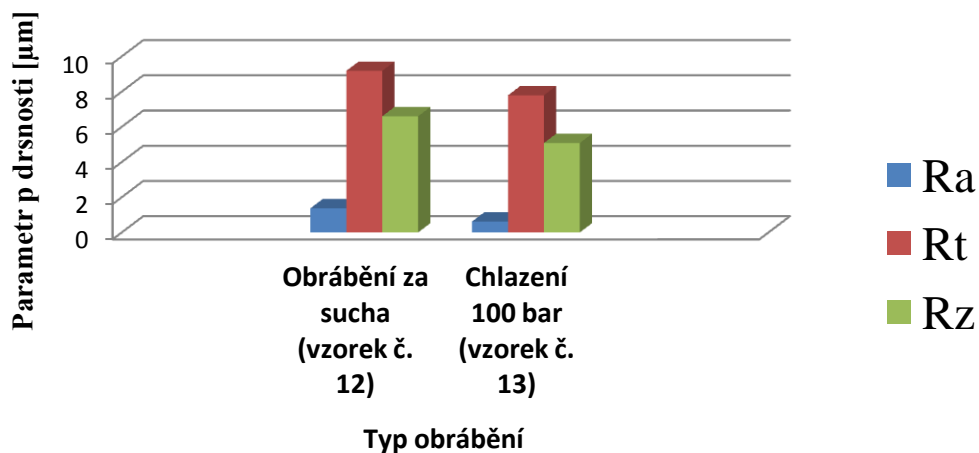
Porovnání vzorků v závislosti na hloubce řezu ap



Graf 3 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6 a 8 v závislosti na rozdílné hloubce řezu

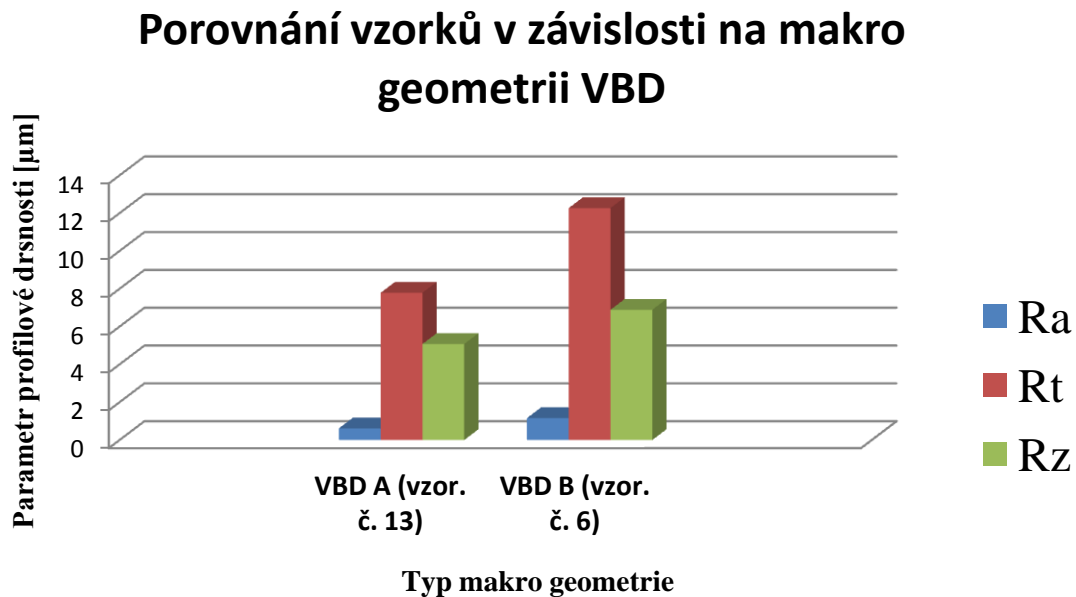
Na základě uvedených obrázků obrobených povrchů a tabulek s parametry abbottovy křivky profilu a profilové drsnosti nelze jednoznačně říci, že by v případě intenzivního chlazení o tlaku 100 barů docházelo k výrazně lepším povrchům, než v případě obrábění za sucha. Vliv chlazení oproti obrábění za sucha se výrazně projevil pouze při obrábění s pozitivní makro geometrií vyměnitelných břitových destiček, což je možné vidět v grafu 4, kde dochází k porovnání vzorků č. 12 a č. 13, tedy vzorků obráběných neupravenou VBD s úhlem čela $\gamma_o=25^\circ$.

Porovnání chlazení a obrábění za sucha s pozitivní makro geometrií VBD



Graf 4 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6 a 8 v závislosti na rozdílné hloubce řezu

Zároveň se však na základě provedených experimentů také zjistilo, že v případě chlazení o tlaku 100 barů se výrazně lepších výsledků dosahovalo s vyměnitelnou břitovou destičkou označenou jako A, tedy s VBD s úhlem čela $\gamma = 25^\circ$. Tento poznatek lze vidět ve sloupcovém grafu 5, kde dochází k porovnání vzorků č. 6 a 13, kdy bylo obráběno za jinak stejných podmínek.



Graf 5 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6 a 13 při rozdílných makro geometriích VBD při obrábění za stejných podmínek

4.2 Druhá fáze experimentu

V této části diplomové práce jsou popsány výsledky druhé fáze experimentální činnosti, během které docházelo k porovnání parametrů profilové drsnosti obrobených povrchů v závislosti na velikosti zaoblení řezné hrany r_n VBD a na velikosti posuvu f_{ot} , neboť se v první fázi experimentu ukázalo, že má posuv při jinak konstantních podmínkách velký vliv na výsledné hodnoty parametrů profilové drsnosti. Výsledky druhé fáze experimentální činnosti, kdy docházelo k soustružení při konstantní řezné rychlosti $v_c = 25$ m/min a hloubce řezu $a_p = 0,2$ mm jsou uvedeny v tabulkách 13, respektive 14. Měření každého parametru probíhalo s 3 opakováními a následně došlo k výpočtu průměrně hodnoty daného parametru.

	Ra1	Ra2	Ra3	Ra4	Ra	Rt1	Rt2	Rt3	Rt4	Rt
15.2	0,43	0,62	0,42	0,42	0,4725	4,71	9,08	4,21	4,16	5,54
16.1	0,47	0,46	0,38	0,43	0,435	5,32	5,02	4,89	6,74	5,4925
18.1	0,43	0,56	0,42	0,48	0,4725	5,94	8,89	5,1	6,2	6,56
20.1	0,47	0,52	0,46	0,42	0,4675	5,96	8,75	6,08	5,91	6,675
21.1	0,42	0,51	0,4	0,51	0,46	13,49	7,75	6,08	9,1	9,105
21.2	0,49	0,51	0,54	0,54	0,52	7,19	10,93	6,58	8,88	8,395
24.2	0,49	0,52	0,57	0,92	0,625	8,31	9,68	9,53	13,61	10,2825
14.1	0,52	0,46	0,73	0,6	0,5775	6,19	5,12	8,83	9,35	7,3725
14.2	1,84	1,76	2,04	2,44	2,02	14,15	9,93	18,96	24,76	16,95
17.1	0,43	0,38	0,38	0,38	0,3925	5,9	6,6	7,47	5,03	6,25
18.2	1,94	1,58	1,76	1,64	1,73	13,99	10,66	12,65	13,49	12,6975
19.1	0,43	0,44	0,44	0,42	0,4325	7,39	5,2	6,46	4,19	5,81
23.1	0,41	0,41	0,49	0,39	0,425	4,76	4,9	8,15	3,69	5,38
24.1	0,59	0,45	0,53	0,47	0,51	10,41	7,02	7,5	8,8	8,4325
25.1	0,82	1,04	1,01	0,77	0,91	14,06	10,9	10,66	8,94	11,14
15.1	1,12	0,9	0,87	0,82	0,9275	28,46	10,58	6,77	5,34	12,7875
16.2	1,11	1,07	1,26	1,16	1,15	8,5	8,09	12,47	9,92	6,89
17.2	2,35	2,36	1,97	2,84	2,38	36,86	32,37	24,6	31,73	20,22
19.2	3,85	3,44	3,19	3,44	3,48	29,78	32,36	32,34	27,28	18,3
20.2	1,8	2,07	2,66	2,19	2,18	13,17	20,53	35,89	24,04	9,81
22.1	0,92	0,9	0,96	0,89	0,9175	9,94	9,11	10,08	4,98	6,29
22.2	1,46	1,2	1,93	1,25	1,46	20,65	10,65	22,56	11,42	9,37
23.2	1,25	1,38	1,59	1,49	1,4275	11,36	14,8	15,74	10,26	6,8

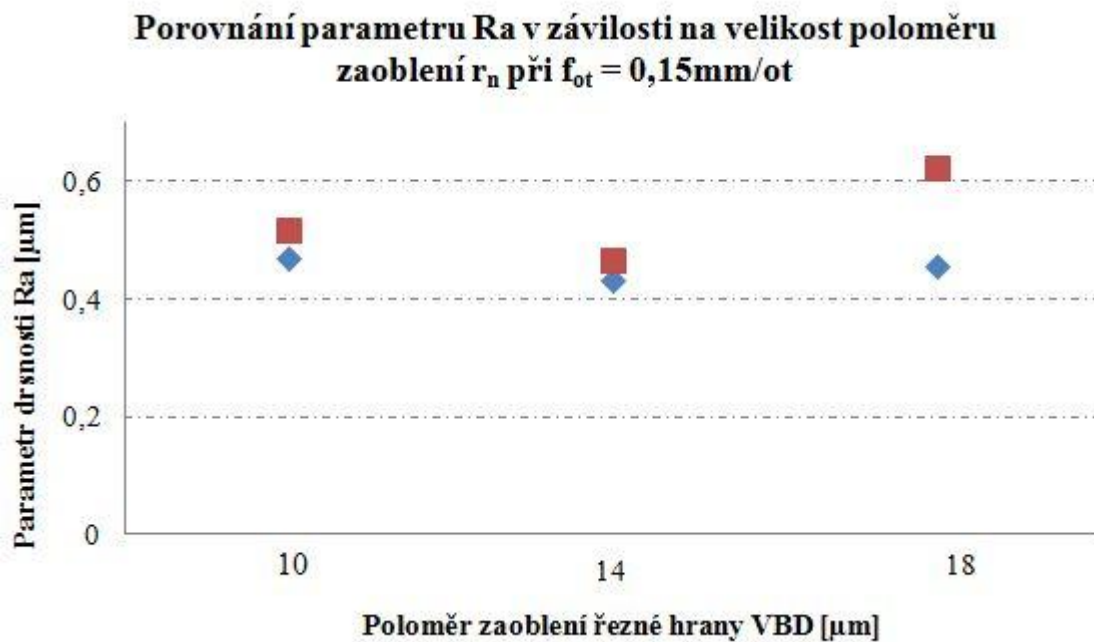
Tabulka 13 Parametry profilové drsnosti Ra a Rt

	Rz1	Rz2	Rz3	Rz4	Rz
15.2	3,25	4,14	2,94	3,04	3,3425
16.1	4,26	3,84	3,15	3,75	3,75
18.1	4,3	4,49	3,61	4,88	4,32
20.1	3,98	5,28	3,78	3,65	4,1725
21.1	5,45	4,98	3,65	5,47	4,8875
21.2	3,93	4,41	4,11	4,55	4,25
24.2	4,6	5,08	5,7	8,97	6,0875
14.1	4,38	3,69	6,83	5,73	5,1575
14.2	9,81	8,68	11,01	13,93	10,8575
17.1	3,28	3,59	3,95	4	3,705
18.2	10,32	7,81	9,59	8,59	9,0775
19.1	3,95	4,01	4,24	3,44	3,91
23.1	3,64	3,7	4,61	3,1	3,7625
24.1	5,35	4,39	5,14	4,86	4,935
25.1	8,25	8,4	8,53	7,01	8,0475
15.1	12,54	6	5,18	4,45	1,0425
16.2	6,89	6,24	8,22	7,47	7,205
17.2	20,22	17,73	14,87	20,9	18,43
19.2	18,3	21,18	18,86	17,8	19,035
20.2	9,81	11,71	15,05	12,75	12,33
22.1	6,29	5,94	6,34	4,51	5,77
22.2	9,37	7,26	12,16	7,73	9,13
23.2	6,8	9,05	9,28	7,43	8,14

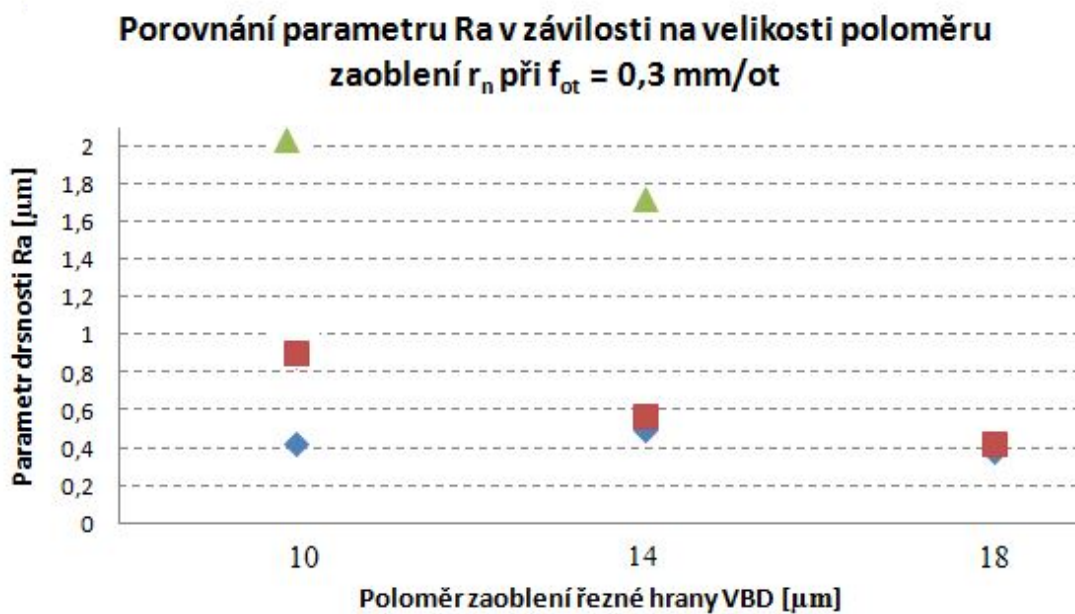
Tabulka 14 Parametr profilové drsnosti Rz

Na základě výsledků uvedených v tabulkách 13 a 14 lze říci, že v některých případech dochází k velmi rozdílným hodnotám parametrů profilové drsnosti, což je dáno jednak odlišnými poloměry zaoblení řezné hrany VBD, ale do určité míry to může být také způsobeno rozdílnou strukturou žárového nástřiku, např. vlivem většího nebo menšího množství pórů nebo vlivem nižší velikosti kohezních sil, což mohlo vést k snazšímu vytržení částic v průběhu obrábění. Na bodových grafech 6, 7 a 8 je možno vidět rozdílné hodnoty

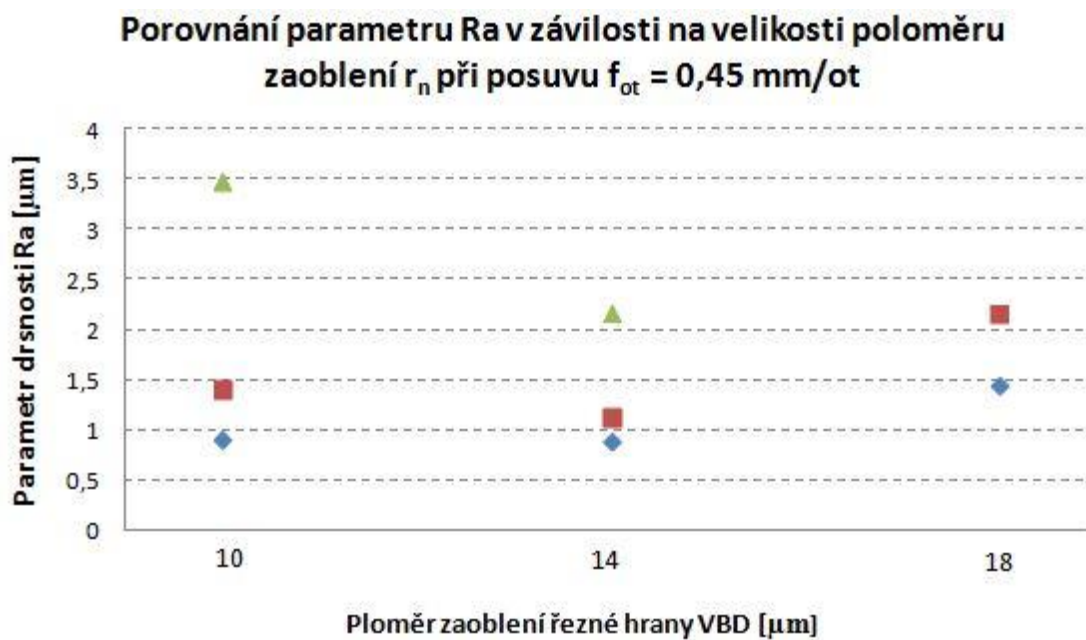
parametru R_a v závislosti na odlišných posuvech f_{ot} a různých hodnotách poloměrů zaoblení r_n .



Graf 6 Porovnání parametrů R_a profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,15\text{ mm/ot}$ a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD



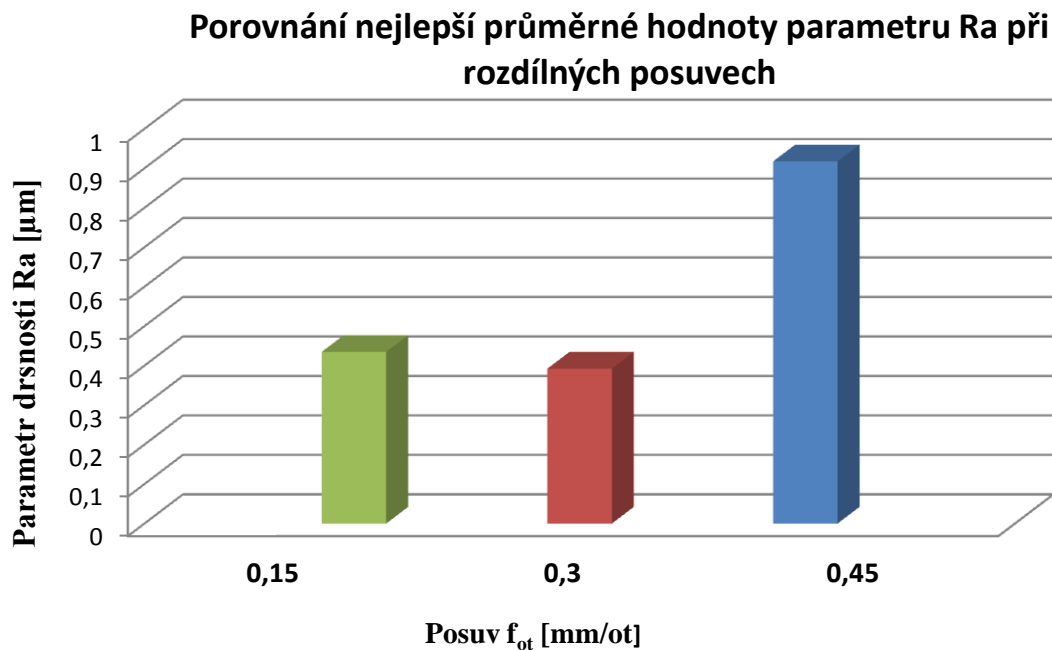
Graf 7 Porovnání parametrů R_a profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,3\text{mm/ot}$ a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD



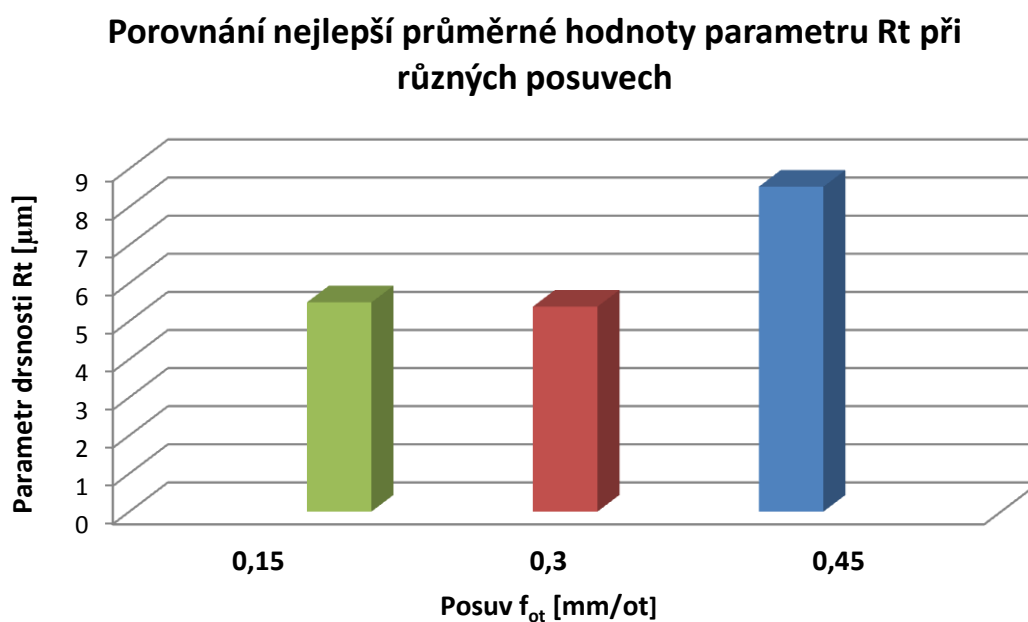
Graf 8 Porovnání parametrů Ra profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,45$ mm/ot a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD

Z předchozích grafů 6, 7 a 8 je patrné, že se zvyšujícím se posuvem f_{ot} docházelo ve většině případů ke zhoršení parametru profilové drsnosti Ra a k většímu rozptylu naměřených hodnot, což mohlo být způsobeno tím, že vlivem zvětšujícího se posuvu f_{ot} docházelo k zvětšení celkové řezné síly při soustružení F a tím pádem docházelo k náhodnému vytrhávání jednotlivých částic zárového nástřiku, které neměly vzhledem k okolním částicím dostatečně velkou kohezni pevnost.

Při vybrání nejlepších průměrných hodnot jednotlivých parametrů profilové drsnosti je možné vidět, že nejlepších hodnot povrchu se dosahovalo při posuvech $f_{ot} = 0,15$ mm/ot a $f_{ot} = 0,3$ mm/ot. Při posuvu 0,45mm/ot byla nejlepší hodnota drsnosti vyjádřená parametrem Ra 0,9175 μm . Porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů drsností v závislosti na jednotlivých posuvech je znázorněno v sloupcových grafech 9, 10 a 11.

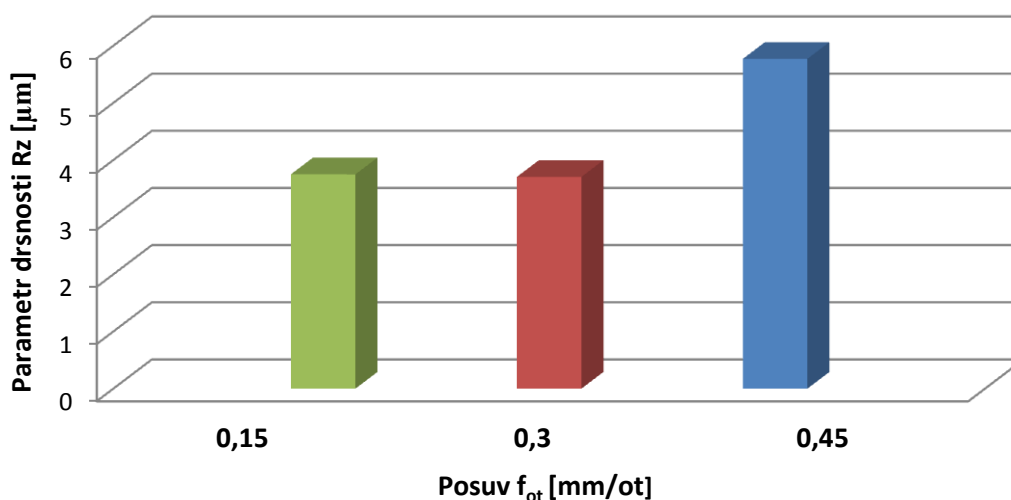


Graf 9 Porovnání parametrů Ra profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,45$ mm/ot a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD



Graf 10 Porovnání nejlepší průměrné hodnoty parametru Rt při různých posuvech

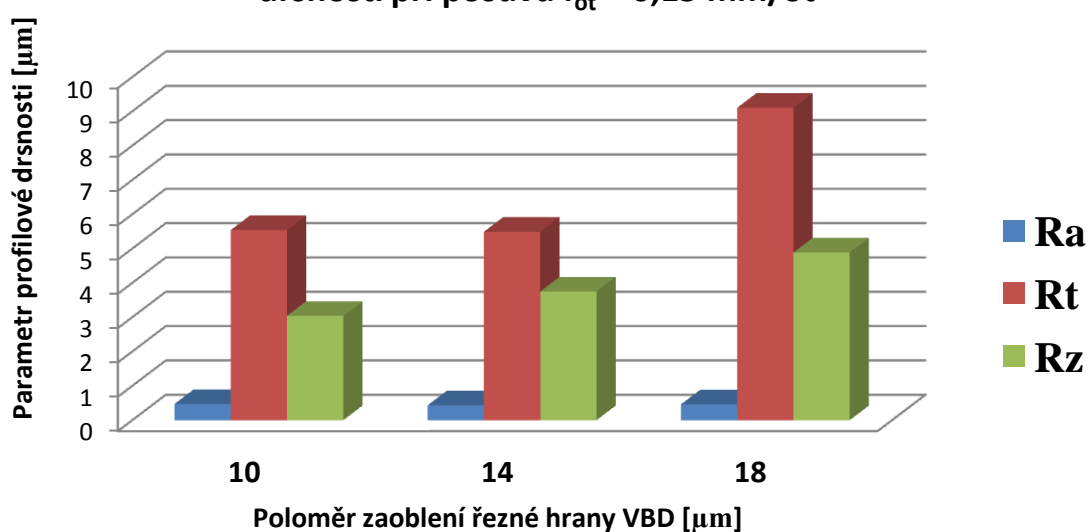
Porovnání nejlepší průměrné hodnoty parametru Rz při různých posuvech



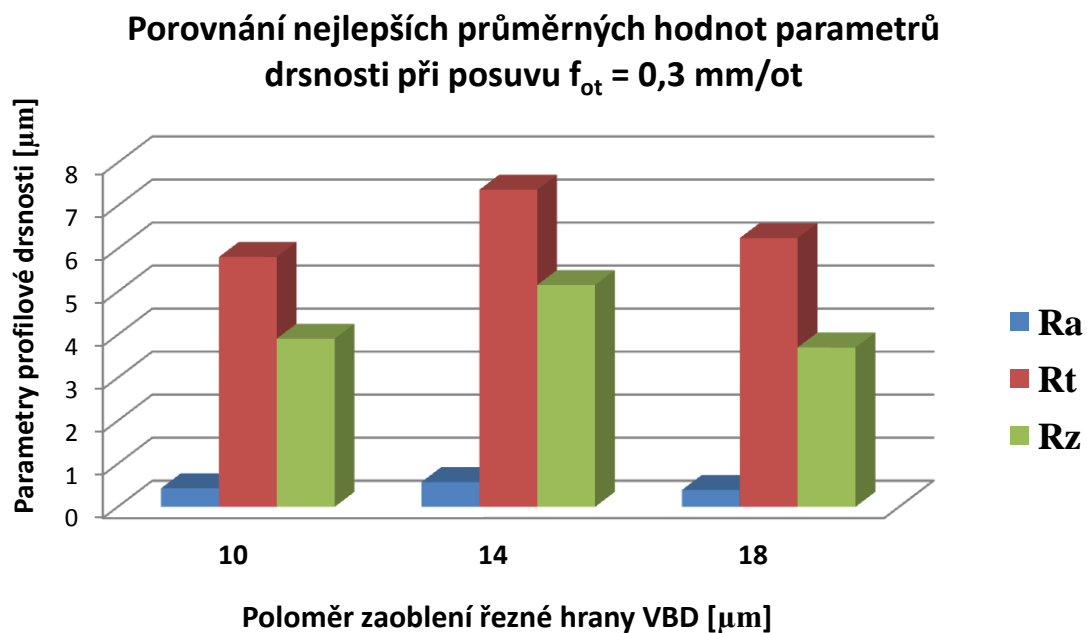
Graf 11 Porovnání nejlepší průměrné hodnoty parametru Rz při různých posuvech

Na základě výsledků druhé části experimentu byly také porovnávány pro nejlepší hodnoty posuvu, tedy pro $f_{ot} = 0,15$ mm/ot a $f_{ot} = 0,3$ mm/ot hodnoty parametrů profilové drsnosti v závislosti na hodnotách poloměrů zaoblení řezných hran VBD. Výsledky porovnání optimálních poloměrů zaoblení jsou znázorněny na sloupcových grafech 12 a 13.

Porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,15$ mm/ot



Graf 12 Porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů drsnosti v závislosti na poloměru zaoblení r_n při posuvu $f_{ot} = 0,15$ mm/ot



Graf 13 Porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů drsnosti v závislosti na poloměru zaoblení r_n při posuvu $f_{ot} = 0,3$ mm/ot

Na základě výše uvedených grafů je možno říci, že z hlediska poloměrů zaoblení se v případě posuvu $f_{ot} = 0,15$ mm/ot dosahovalo podobných výsledků nejlepších průměrných hodnot parametrů profilové drsnosti při poloměrech zaoblení 10 a 14 μm . Při obrábění s VBD o poloměru zaoblení řezné hrany 18 μm se při posuvu $f_{ot} = 0,15$ mm/ot dosahovalo výrazně odlišných parametrů profilové drsnosti. V případě obrábění s posuvem $f_{ot} = 0,3$ mm/ot se při porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů profilové drsnosti nedosáhlo jednoznačných výsledků, na základě kterých by bylo možno říci, který poloměr zaoblení řezné hrany je výhodnější.

Z celkového hlediska lze říci, že nejlepšího povrchu bylo dosaženo na vzorku označeného 16.1, který byl obráběn při posuvu 0,15 mm/ot vyměnitelnou břitovou destičkou s poloměrem zaoblení řezné hrany 14 μm . Scan tohoto povrchu je znázorněn na obrázku 49.

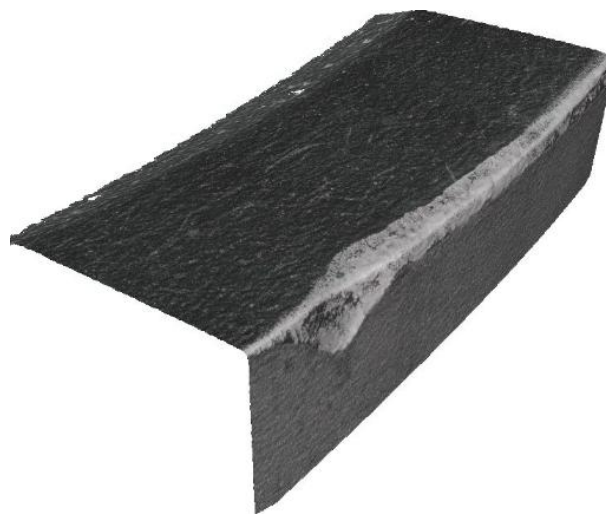


Obrázek 49 Scan povrchu s nejlepšími parametry profilové drsnosti

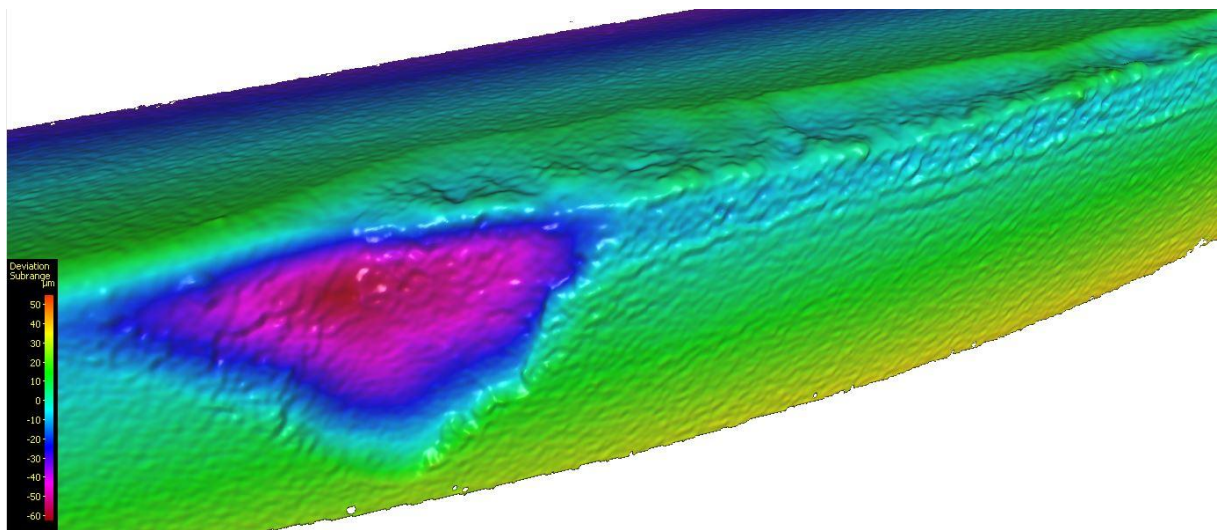
Z obrázku 49 je možno vidět, že na obrobeném povrchu částečně zůstávají menší či větší částice žárového nástřiku, které mohou ve výsledku zhoršovat naměřené parametry profilové drsnosti.

4.3 Opotřebení VBD

Během druhé části experimentu bylo pomocí zařízení IFM G4 také analyzováno opotřebení vyměnitelných břitových destiček, které na nich vznikalo během obrobení jednoho kusu zkušebního vzorku, tedy během časové doby přibližně 1,1 minuty. Opotřebení vykazovalo charakter opotřebení VB_B v kombinaci s opotřebením ve formě vrubu VB_N a docházelo také k mírnému otlačení čela v těsné blízkosti řezné hrany. Opotřebení VBD, včetně diferenční analýzy opotřebení je znázorněno na obrázku 50, respektive na obrázku 51.



Obrázek 50 Opotřebení VBD během druhé fáze experimentu



Obrázek 51 Diferenční analýza opotřebení VBD – úbytek materiálu v místě vrubu přibližně 55 μm

5. Technické hodnocení

Během první a druhé fáze experimentální činnosti byly zjištěny výsledky parametrů profilové drsnosti, na základě kterých lze říci, že v případě vhodných řezných podmínek a makro a mikro geometrii řezného břitu lze dosáhnout podobně kvalitního povrchu jako v případě dosud používané metody broušení. Jako nejvhodnější řezné podmínky byly stanoveny: řezná rychlost $v_c = 25 \text{ m/min}$, hloubka řezu $a_p = 0,2 \text{ mm}$ a posuv $f_{ot} = 0,15 \text{ mm/ot}$, neboť při tomto posuvu docházelo k podobným hodnotám parametrů profilové drsnosti jako v případě posuvu $f_{ot} 0,3 \text{ mm/ot}$ ale daleko menšímu rozptylu jednotlivých naměřených hodnot parametrů.

Je třeba říci, že parametry profilové drsnosti byly měřeny pomocí dotykové metody, tudíž lze u naměřených výsledků očekávat určité nepřesnosti, které jsou způsobeny tím, že měřící hrot není schopen kvůli svému tvaru ideálně kopírovat veškeré píky a údolí profilu obrobeneho povrchu.

Z hlediska poloměru zaoblení r_n se ukázalo, že v případě použití nejvhodnějších řezných podmínek, uvedených výše, se dosahovalo nejlepších výsledků při poloměrech zaoblení 10 a 14 μm . V první fázi experimentu bylo zjištěno, že v případě intenzivního chlazení během řezného procesu se výrazně lepších parametrů drsnosti dosahovalo při použití VBD s pozitivním úhel čela, která se v případě obrábění za sucha jevila jako nevhodná.

V závislosti na parametrech mikro a makro struktury je třeba podotknout, že právě struktura žárového nástřiku hraje společně s podmínkami obrábění velkou roli, neboť změnou

jakéhokoliv nástřikového parametru dochází ke změně struktury žárového nástřiku a po následném obrobení mohou parametry drsnosti obrobeného povrchu žárového nástřiku se změněnou strukturou vykazovat odlišné hodnoty. Problém s odlišnými hodnotami parametrů drsnosti obrobeného povrchu může být vzhledem k mikro a makro struktuře způsoben kromě změny nástřikových parametrů také změnou metody přípravy prášku a tím odlišnému prohřátí a natavení jednotlivých částic, které následně tvoří splaty žárového nástřiku.

6. Ekonomické hodnocení

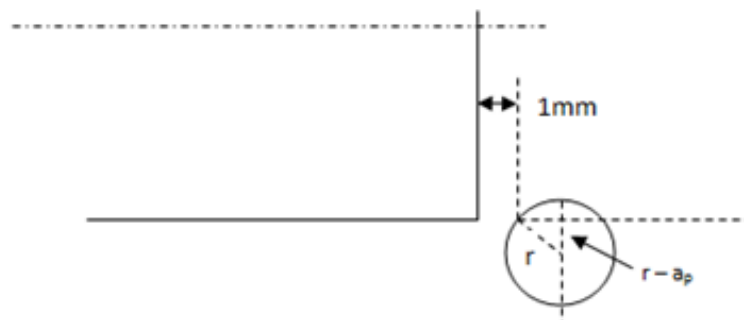
Ekonomické hodnocení diplomové práce spočívá v porovnání současně používané metody broušení a metody soustružení při použití optimálních řezných podmínek. Bylo provedeno porovnání těchto dvou metod na základě výpočtu jednotkového strojního času obrobení jednoho kusu zkušební vzorku a na základě výpočtu pracnosti při obrábění 3000 kusů. Hodnocení na základě celkových nákladů potřebných k obrobení 3000 kusů nebylo provedeno z důvodu neznalosti trvanlivosti brusných kotoučů při obrábění žárového nástřiku slitiny stelit 6, neboť společnosti zabývající se touto problematikou mají tyto informace jako své „know how“.

6.1 Hodnocení na základě jednotkového strojního času t_{AS}

Při výpočtu jednotkových strojních časů metody broušení a soustružení byl jako zkušební vzorek brán vzorek z první části experimentu, kde se nepočítalo se zápichem, aby mohlo dojít k výpočtu nájezdů a přejezdů nástrojů. [26]

6.1.1 Výpočet jednotkového strojního času t_{AS} při metodě soustružení

Při výpočtu jednotkového strojního času t_{AS} pro metodu soustružení se počítalo s přejezdem 2 mm. Výpočet nájezdu soustružnického nože s upnutou VBD kruhového tvaru byl proveden podle obrázku 52 pomocí Pythagorovy věty. Výpočet byl proveden pro řezné podmínky, které byly stanoveny jako nejvhodnější. [26]



Obrázek 52 Znázornění výpočtu nájezdu



Obrázek 53 Měření průměru VBD

Výpočet nájezdu:

$$l_n = \sqrt{r^2 - (r - a_p)^2} = \sqrt{5,93^2 - (5,93 - 0,2)^2} = \sqrt{2,332} = 1,527$$

Výpočet celkové dráhy nástroje:

$$L = l + l_p + l_n = 40 + 2 + 1,527 = 43,527 \text{ mm}$$

Výpočet jednotkového strojního času:

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot d \cdot L}{f_{ot} \cdot v_c \cdot 1000} \cdot i = \frac{\pi \cdot 60 \cdot 43,527}{0,15 \cdot 25 \cdot 1000} \cdot 1 = 2,18 \text{ min}$$

d – průměr obrobku

L – celková dráha nástroje

i – počet přejezdů

6.1.2 Výpočet jednotkového strojního času t_{AS} při metodě broušení

Pro výpočet jednotkového strojního času metody broušení bylo zvolená metoda broušení rozjížděním způsobem, během které se hodnota nájezdu a přejezdu rovná šířce kotouče „ b “, přičemž byl pro výpočet zvolen kotouč o šířce $b = 12$ mm. [26], [13]

Výpočet celkové dráhy nástroje:

$$L = l + l_p + l_n = 40 + 12 + 12 = 64 \text{ mm}$$

Výpočet jednotkového strojního času:

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot d_p \cdot L}{f \cdot v_p \cdot 1000} \cdot i = \frac{\pi \cdot 60 \cdot 64}{1,2 \cdot 35 \cdot 1000} \cdot 20 = 5,74 \text{ min}$$

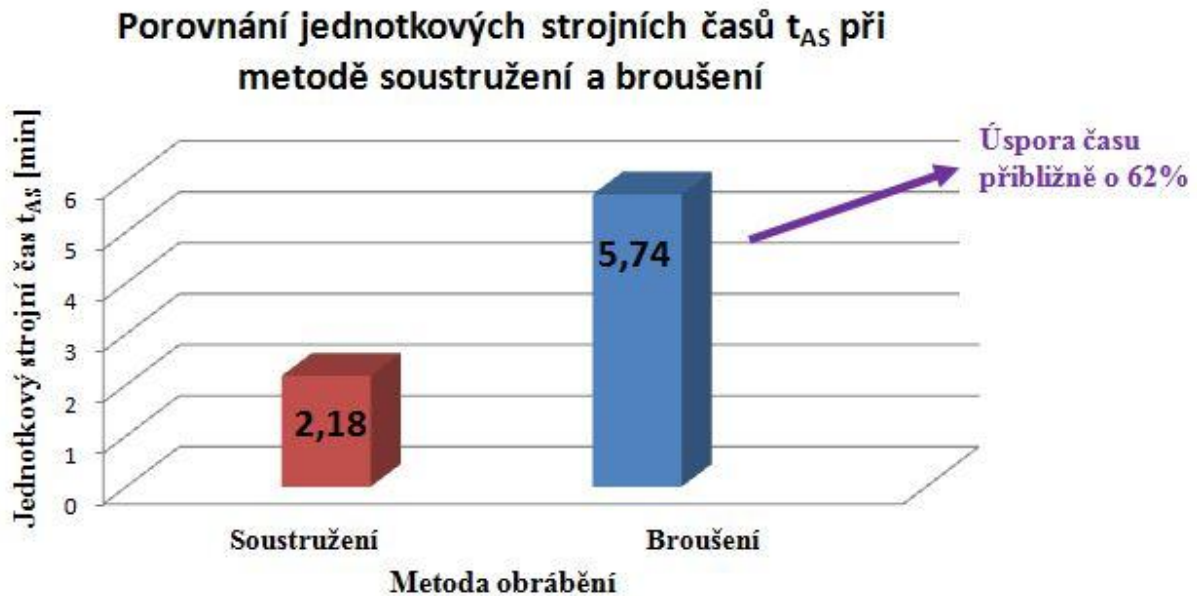
d_p – průměr obrobku

v_p – obvodová rychlost obrobku

i – počet přejezdů

L – celková dráha brusného kotouče

Porovnání obou metod, tedy metody soustružení a metody broušení je znázorněno na sloupcovém grafu 14.



Graf 14 Porovnání jednotkových strojních časů t_{AS} při metodě soustružení a metodě broušení

6.2 Hodnocení na základě pracnosti výroby H_w

Pracnost výroby metody soustružení a metody broušení při výrobě 3000 kusů byla počítána na základě vzorce: [26]

$$H_w = \frac{t_{BC} + k_{opt} \cdot t_{AC}}{60} \cdot D \quad [nH]$$

- t_{BC} - dávkový čas s přírůžkou času směnového
- t_{AC} - jednotkový čas s přírůžkou času směnového
- k_{opt} - koeficient vztažený k optimální velikosti dávky
- D - počet dávek

Koeficient k_{opt} se určí na základě výpočtu technologického počtu kusů n_t , který je dán vzorcem a který vychází z metody profesora Straky:

$$n_t = \frac{\sum t_{BC}}{\sum t_{AC}}$$

Technologické časy t_{BC} a t_{AC} byly určeny pomocí softwarového nástroje TPV2000, který slouží k normování práce.

6.2.1 Výpočet pracnosti výroby H_W při metodě soustružení

Ze softwarového nástroje TPV2000 byly na základě zadaných informací získány technologické časy t_{BC} a t_{AC} . Tabulka zadaných informací a koeficientů potřebná k získání technologických časů je znázorněna na obrázku 54, obrázek 55 vyjadřuje získané technologické časy. [26]

Obrázek 54 Tabulka zadaných informací v TPV2000

Obrázek 55 Technologické časy

Výpočet technologického počtu kusů:

$$n_t = \frac{\sum t_{BC}}{\sum t_{AC}} = \frac{36,40}{3,53} = 10,31 \rightarrow \text{malosériová výroba}$$

Pro malosériovou výrobu platí následující vztahy:

$$k_{\min} = 4,56 \cdot n_t = 4,56 \cdot 10,31 = 47,01$$

$$k_{\text{opt}} = 6 \cdot n_t = 6 \cdot 10,31 = 61,86$$

$$k_{\min} = n_t^2 = 10,31^2 = 106,29$$

Výpočet počtu dávek

$$D = \frac{3000}{k_{opt}} = \frac{3000}{61,86} = 48,49 \cong 50 \text{ dávek}$$

Výpočet pracnosti výroby:

$$H_W = \frac{t_{BC} + k_{opt} \cdot t_{AC}}{60} \cdot D = \frac{36,40 + 61,86 \cdot 3,53}{60} \cdot 50 \cong 212,3 \text{ nH}$$

6.2.2 Výpočet pracnosti výroby H_w při metodě broušení

Na základě zadaných informací pro vybranou operaci „broušení nakulato vnější“ byly ze softwarového nástroje TPV2000 získány hodnoty technologických časů t_{AC} a t_{BC} , které byly následně použity pro výpočet pracnosti výroby H_w . Tabulku zadaných hodnot pro výpočet technologických časů je možno vidět na obrázku 56, vypočtené technologické časy jsou vyjádřeny v obrázku 57. [26]

Broušení nakulato vnější

Počet kusů ve výrobní dávce (ovlivňuje čas TAC a TBC)	DAV:	40
Počet upnutí a přeprnutí	POC:	1
Body: čelo: Přilehlé=1, samost.: Ra3,2-0,8=2 Ra menší=3 průměr: IT16-9=1 IT8-7=2 IT6=3 IT5=4 kužel: Ra3,2-1,6=3 Ra0,8-0,4=4 líc.na barvu=6	BODY:	3
Maximální broušený průměr	DMAX:	60,00
Celková (osová) délka broušení	LB:	40,00
Maximální průměr broušeného čela	DCEL:	0,00
Převažující (minimální) drsnost	RA:	0,40
Přibližná hmotnost obrobku	KG:	0,50
Koeficient obrobitelnosti	KOBR:	1,00
běžné oceli nekalené = 0,7 běžné oceli kalené = 1		
Zadaný čas TAC se násobí zadaným počtem kusů	KS:	1
Opravný koeficient (násobí se čas TAC)	KOPR:	1,00

Nápověda OK Přepočít Storno

Výsledky

TAC:	3,97
TBC:	26,62

OK

Obrázek 57 Tabulka zadaných informací v TPV2000

Obrázek 56 Technologické časy

Výpočet technologického počtu kusů:

$$n_t = \frac{\sum t_{BC}}{\sum t_{AC}} = \frac{26,62}{3,97} = 6,71 \rightarrow \text{malosériová výroba}$$

Pro malosériovou výrobu platí následující vztahy:

$$k_{\min} = 4,56 \cdot n_t = 4,56 \cdot 6,71 = 30,59$$

$$k_{\text{opt}} = 6 \cdot n_t = 6 \cdot 6,71 = 40,26$$

$$k_{\min} = n_t^2 = 6,71^2 = 45,02$$

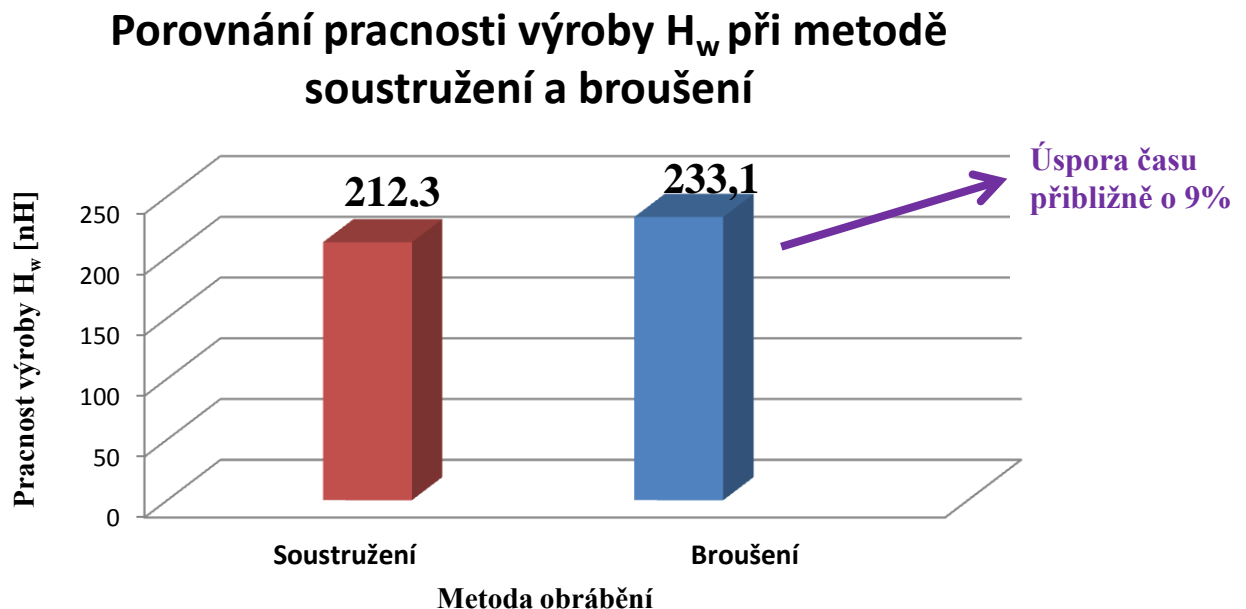
Výpočet počtu dávek

$$D = \frac{3000}{k_{\text{opt}}} = \frac{3000}{40,26} = 74,5 \cong 75 \text{ dávek}$$

Výpočet pracnosti výroby:

$$H_W = \frac{t_{BC} + k_{\text{opt}} \cdot t_{AC}}{60} \cdot D = \frac{26,62 + 40,26 \cdot 3,97}{60} \cdot 75 \cong 233,1 \text{ nH}$$

Porovnání metod soustružení a broušení z hlediska pracnosti výroby při výrobě 3000 kusů je znázorněno pomocí sloupcového grafu 15.



Graf 15 Porovnání pracnosti výroby při metodě soustružení a broušení

7. Závěr

Na základě zadání této diplomové práce byla zpracována rešeršní činnost, ve které lze nalézt informace o základních vlastnostech chrom – kobaltové slitiny stelit 6 a jejího využití ve formě žárového nástřiku v průmyslovém odvětví. Jsou zde uvedeny nejčastěji používané metody k nanesení žárového nástřiku včetně svých kladů a záporů, přičemž jako nejvhodnější metoda byla vybrána metoda HVOF, u níž je následně popsán vliv nástřikových parametrů s ohledem na mikro a makro strukturu samotného žárového nástřiku. Dále je v této teoretické části popsána příprava prášku a její vliv na vlastnosti struktury. Poslední část je věnována úpravě základního substrátu s ohledem na mechanické vlastnosti výsledného žárového nástřiku slitiny stelit 6 a také je v této části stručně popsána současně používaná metoda obrábění těchto nástřiků, a to metoda broušení.

Jelikož si tato diplomová práce kladla za cíl nahrazení současně používané neproduktivní metody broušení produktivnější metodou soustružení, byly během samotné experimentální činnosti sledovány vlivy řezných podmínek a makro a mikro geometrie VBD s ohledem na parametry profilové drsnosti. Z výsledků naměřených během experimentální činnosti vyplynulo, že z hlediska řezných podmínek soustružení se jako nejlepší jeví řezná rychlost $v_c = 25$ m/min, hloubka řezu $a_p = 0,2$ mm a posuv $f_{ot} = 0,15$ mm/ot, přičemž se při tomto posuvu dosahovalo podobných hodnot parametrů profilové drsnosti a mnohem menšího rozptylu naměřených hodnot u jednotlivých podmínek obrábění než v případě posuvu $f_{ot} = 0,3$ mm/ot. Právě velký rozptyl naměřených hodnot by měl být předmětem dalšího zkoumání, neboť rozdílných hodnot parametrů profilové drsnosti bylo dosahováno při zvětšujícím se posuvu, což může být způsobeno zvětšujícími se řeznými silami a tím snazšímu vytrhávání jednotlivých splatů žárového nástřiku, které mohou mít vzhledem k okolním splatům nižší kohezní pevnost např. vlivem menšího natavení, ale také mohou být rozdílné hodnoty parametrů profilové drsnosti způsobené odlišnou strukturou žárového nástřiku, např. vlivem zvýšené pórovitosti v určitých místech. Dále by bylo vhodné provést měření zbytkových napětí v obrobeném povrchu, neboť je velká pravděpodobnost, že vlivem soustružnického nože docházelo k vnesení tahových napětí, která mohou narušovat původně tlaková napětí žárového nástřiku a tím snižovat odolnost žárového nástřiku proti působení provozních podmínek v praxi, což může vést k velkým ekonomickým ztrátám.

Během experimentální činnosti byl zjištěn poměrně zajímavý fakt, který poukazuje na to, že v případě intenzivního chlazení o tlaku 100 bar z čela nástroje se dosahovalo lepších

hodnot parametrů profilové drsnosti s VBD s pozitivním úhlem čela $\gamma = 25^\circ$, která byla za jiných podmínek nevhodná.

V samotné experimentální činnosti bylo také pomocí zařízení IFM G4 sledováno opotřebení VBD, které vznikalo v kombinaci opotřebení VB_B a VB_N .

V poslední části diplomové práce bylo provedeno ekonomické hodnocení současně používané metod broušení a metody soustružení na základě výpočtu jednotkového strojního času t_{AS} a pracnosti výroby H_W . Porovnání metody soustružení a metody broušení z hlediska pracnosti výrob H_W poukazuje na skutečnost, že v případě metody soustružení dojde při zvoleném počtu 3000 kusů a optimálních podmínkách obrábění k snížení času přibližně o 20,8 nH, což v jednosměrném provozu odpovídá dvěma a půl směnám.

Zdroje

- [1] Houdková, Š., Smazalová, E., Pala, Z., „Effect of heat treatment on the Microstructure and Properties of HVOF – sprayed Co-Cr-W coating,“ Journal of the thermal spray technology, 2015 [Citace 8. 3.2016]
- [2] Česánek, Z., „Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí,“ [disertační práce], Plzeň: Západočeská univerzita, 2015, [Citace 6. 11. 2015]
- [3] Prantnerová, M., „Hodnocení vztahu mikrostruktury a vlastností žárových nástřiků,“ [disertační práce], Plzeň: Západočeská univerzita, 2014, [Citace 17. 2. 2015]
- [4] Zahálka, F., „Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků,“ [disertační práce], Plzeň: Západočeská univerzita, 2012 [Citace 13. 12. 2015]
- [5] Wang, Z.Z., Li, C.J., Ohmori, A., „Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings, Thin Solid Films 458 (2005) 141-147 [Citace 13. 2. 2016]
- [6] Staia, M.H., Ramos, E., Carrasquero, A., Roman, A., Lesage, J., Chicot, D., Mesmacue, G., „Effect of substrate roughness induced by grit casting upon adhesion of WC-17%Co thermal sprayed coatings, THIN Solid Films 377-378 (2000) 657-664 [Citace 13. 2. 2016]
- [7] Šildberger, R., „Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem“ [diplomová práce], Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, [Citace 25. 10.2015]
- [8] Král', J., Řehoř, J. a kol., „Technologické a informačné činitele obrábania“, Košice: Sjf TU v Košiciach, 2010, ISBN 978-80-553-0381-9 [Citace 14. 4. 2016]
- [9] Beňo, J., „Teória rezava kovov,“ Viena, Košice, 1999, ISBN 80-7099-429-0 [Citace 14. 4. 2016]
- [10] Beňo, J., „Teoretické základy inovačných technológií,“ Košice: Sjf TU v Košiciach, 2010, ISBN 978-80-553-0449-6 [Citace 14. 4. 2016]
- [11] Metals HandBook – Volume 16 – Machining, ASM International, ISBN 0-87170-007-7 [Citace 27. 10. 2015]
- [12] DeVries, W.R., „Analysis of Material Removal Processes, Springer-Verlag, New York, 1919, ISBN 0-387-9778-7 [Citace 2. 11. 2015]

- [13] Mangl, P., „Optimalizace parametrů broušení slinutých karbidů diamantovými kotouči,“ [diplomová práce], Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009, [Citace 13. 5 2016]
- [14] Řehoř, J., „Teorie Obrábění,“ [prezentace], [Citace 6. 5. 2016]
- [15] Deloro Stellite, „Stellite 6 alloy,“ [technical data], [online], [Citace 23. 10. 2015]
- [16] Houdková, Š., The introduction into technology of HVOF sprayed rating,“ Plzeň: NTC ZČU, VZÚ Plzeň, 2015 [Citace 8. 11. 2015]
- [17] Fulemová, J., Kutlwašer, J., Matějka, J., Vilček, I., Porto, D.C., „Tests on the machinability of the thermal sprayed coatings and propaspal“, [prezentce],Plzeň: Regionální technologický institut, 2015, [Citace 28. 3. 2016]
- [18] 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 [Citace 3.5 2016]
- [19] Cinca, N., Guilemany, J.M., „Structural and properte characterization of stellite coatings obtained by cold gas spraying“, Surface and Coatings Technology, Volume 220, 2013, [Citace 13. 1. 2016]
- [20] Sidhu H.S., Sidhu, B.S., Prakash, S., „Solid partije erosion of HVOF sprayed NiCr and stellite-6 coatings“, Surface and rating Technology, Volume 02, 2007, [Citace 2.11.2015]
- [21] Maldonado, S.G., Michler, S., Antoni, M., Chitty, W., Falcand, C., Hertz, D., „Mechanical and chemical mechanisms in the tribocorrosion od a Stellite type alloy, Wear, Volume 308, Issues1-2, 2013, [citace 25.10.2015]
- [22] Remy, H., Anorganická chemie I.díl, [Citace 19. 12.2015]
- [23] Remy, H., Anorganická chemie II.díl, [Citace 19. 12.2015]

[24] OTEC PRÄZISIONSFINISH GMBH. Význam úpravy břitu – zaoblování ostří a leštění řezných nástrojů. [Prezentace], [Citace 13. 3. 2016]

[25] Morávek, M., „Vliv mikro geometrie cermetových řezných nástrojů na proces obrábění“, [bakalářská práce], Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014, [Citace 13. 3. 2016]

[26] Vyšata, J., Výrobní dávka, [prezentace], Západočeská univerzita v Plzni

[27] Sandvik, [Citace 13. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=RCHT%2020%2006%20M0-PL%20530&m=5739504>

Seznam obrázků

Obrázek 1	Uspořádání hcp a fcc mřížky [22], [23].....	13
Obrázek 2	Důlková (bodová) koroze [15].....	15
Obrázek 3	Průmyslové využití slitiny stelit 6 ve formě žárového nástřiku - kulové ventily a ventilová sedla [15]	16
Obrázek 4	Nástřik slitiny stelit 6 na kulový píst [15].....	16
Obrázek 5	Princip žárového nástřiku [16].....	17
Obrázek 6	Princip vytváření nástřiku elektrickým obloukem [7]	19
Obrázek 7	Princip vytváření žárového nástřiku pomocí plasmu [7]	19
Obrázek 8	Změna teploty plazmového paprsku vlivem zvětšující se vzdálenosti od plazmového hořáku [7].....	20
Obrázek 9	Hořák pro nástřik pomocí metody HVOF [2].....	21
Obrázek 10	Nanášení žárového nástřiku metodou HVOF [16]	25
Obrázek 11	Vodou atomizovaný prášek (vlevo), plynem atomizovaný prášek (vpravo) [2] ..	26
Obrázek 12	Struktura žárového nástřiku [2]	27
Obrázek 13	Metalografický výbrus slitiny stelit 6, není vidět patrné poškrábání způsobené během přípravy.....	29
Obrázek 14	Metalografický výbrus slitiny stelit 6, možno vidět poškrábání vlivem vytrhaných částic během přípravy.....	29
Obrázek 15	Částečně natavená částice ve struktuře slitiny stelit 6	30
Obrázek 16	Nenatavená částice ve struktuře slitiny stelit 6	30
Obrázek 17	Diamantový brusný kotouč [13]	33
Obrázek 18	Brusné kotouče z CBN [13].....	33
Obrázek 19	Zvolené VBD s pozitivním úhlem čela γ [27]	34
Obrázek 20	Scan řezné hrany VBD s pozitivním úhlem čela γ	34
Obrázek 21	Vyštípnutí řezné hrany.....	35
Obrázek 22	Pohled do ortogonální roviny	35
Obrázek 23	Makro geometrie VBD s upravenou plochou čela v rovině ortogonální.....	36
Obrázek 24	Scan části VBD s upravenou plochou čela	36
Obrázek 25	Graf závislosti poloměru zaoblení řezné hrany na trvanlivosti [25].....	37
Obrázek 26	Používaný upínací systém při experimentální činnosti	38
Obrázek 27	Multifunkční soustružnické centrum DMG MORI CTX BETA 1250.....	38

Obrázek 29 Měření drsnosti pomocí dotykové metody	39
Obrázek 28 Měřicí zařízení Hommel Etamic T8000	39
Obrázek 30 Měřicí zařízení IFM G4	40
Obrázek 31 Řádkovací mikroskop	40
Obrázek 32 Polotovar pro první fázi experimentu	41
Obrázek 33 Polotovar pro druhou fázi experimentu	41
Obrázek 34 Zkušební vzorky s žárovým nástřikem slitiny stelit 6 pro 1. fázi experimentu	42
Obrázek 35 Chemické složení žárového nástřiku vyjádřené pomocí 2D mapy.....	43
Obrázek 36 Procentuální zastoupení jednotlivých prvků vytvořeného žárového nástřiku	43
Obrázek 37 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 3 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 80$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,175$ mm, obrábění za sucha.....	46
Obrázek 38 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 4 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 80$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,25$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	46
Obrázek 39 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 5 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 30$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,25$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	47
Obrázek 40 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 6 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	47
Obrázek 41 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 8 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,225$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	47
Obrázek 42 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 9 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,45$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	48
Obrázek 43 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 10 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,15$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	48
Obrázek 44 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 11 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, obrábění za sucha	48

Obrázek 45 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 12 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,3$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, obrábění za sucha	49
Obrázek 46 Abbottova křivka profilu pro vzorek č. 13 (vlevo), výsledný obrobený povrch (vpravo) - řezné podmínky: $v_c = 25$ m/min, $f_{ot} = 0,15$ mm/ot, $a_p = 0,2$ mm, chlazení při tlaku 100 bar.....	49
Obrázek 47 Profil povrchu vzorku č. 5	52
Obrázek 48 Profil povrchu vzorku č. 11	52
Obrázek 49 Scan povrchu s nejlepšími parametr profilové drsnosti.....	62
Obrázek 50 Opatření VBD během druhé fáze experimentu.....	62
Obrázek 51 Diferenční analýza opotřebení VBD – úbytek materiálu v místě vrubu přibližně 55 μ m.....	63
Obrázek 52 Znárodnění výpočtu nájezdu	65
Obrázek 53 Měření průměru VBD.....	65
Obrázek 54 Tabulka zadaných informací v TPV2000	68
Obrázek 55 Technologické časy	68
Obrázek 56 Technologické časy	69
Obrázek 57 Tabulka zadaných informací v TPV2000	69

Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení slitin stelit 6 [15].....	14
Tabulka 2 Základní mechanické vlastnosti slitiny stelit 6 při teplotě 20°C [15].....	14
Tabulka 3 Závislost tvrdosti na teplotě [15].....	15
Tabulka 4 Porovnání jednotlivých metod [2], [3], [4], [7].....	22
Tabulka 5 Vliv změny parametrů na vlastnosti žárového nástřiku slitiny stelit 6 [4].....	24
Tabulka 6 Makro geometrie a poloměr zaoblení pro pozitivní VBD	37
Tabulka 7 Makro geometrie a poloměry zaoblení řezné hrany pro VBD s upravenou plochou čela (VBD s poloměry zaoblení 10, 14 a 18 μm byly používány až v druhé fázi experimentu)	37
Tabulka 8 Nástřikové parametry HVOF metody [1], [16], [17]	42
Tabulka 9 Kombinace řezných podmínek a makro a mikro geometrie při první fázi experimentu.....	44
Tabulka 10 Kombinace řezných podmínek a poloměrů zaoblení pro druhou část experimentu	45
Tabulka 11 Hodnoty drsností obroběných povrchů jednotlivých vzorků	50
Tabulka 12 Hodnoty parametrů abbotovy křivky obroběných povrchů pro jednotlivé vzorky.....	50
Tabulka 13 Parametry profilové drsnosti Ra a Rt	55
Tabulka 14 Parametr profilové drsnosti Rz.....	56

Seznam grafů

Graf 1 Závislost tvrdosti slitiny stelit 6 na teplotě [15].....	15
Graf 2 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6, 9, 10 v závislosti na rozdílných posuvech a konstantní řezné rychlosti v_c a hloubce řezu a_p	51
Graf 3 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6 a 8 v závislosti na rozdílné hloubce řezu	53
Graf 4 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6 a 8 v závislosti na rozdílné hloubce řezu	53
Graf 5 Porovnání parametrů profilové drsnosti vzorků č. 6 a 13 při rozdílných makro geometriích VBD při obrábění za stejných podmínek	54
Graf 7 Porovnání parametrů R_a profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,3\text{mm/ot}$ a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD	57
Graf 6 Porovnání parametrů R_a profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,15\text{ mm/ot}$ a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD	57
Graf 8 Porovnání parametrů R_a profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,45\text{ mm/ot}$ a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD	58
Graf 9 Porovnání parametrů R_a profilové drsnosti při posuvu $f_{ot} = 0,45\text{ mm/ot}$ a rozdílných poloměrech zaoblení řezné hrany VBD	59
Graf 10 Porovnání nejlepší průměrné hodnoty parametru R_t při různých posuvech.....	59
Graf 11 Porovnání nejlepší průměrné hodnoty parametru R_z při různých posuvech	60
Graf 12 Porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů drsnosti v závislosti na poloměru zaoblení r_n při posuvu $f_{ot} = 0,15\text{ mm/ot}$	60
Graf 13 Porovnání nejlepších průměrných hodnot parametrů drsnosti v závislosti na poloměru zaoblení r_n při posuvu $f_{ot} = 0,3\text{ mm/ot}$	61
Graf 14 Porovnání jednotkových strojních časů t_{AS} při metodě soustružení a metodě broušení	67
Graf 15 Porovnání pracnosti výroby při metodě soustružení a broušení	70