

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrobitelnost žárového nástřiku Fe₁₃Cr a jeho vlastnosti

Autor: Bc. Marek CHÝNA

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.

Akademický rok 2020/202

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Marek CHÝNA
Osobní číslo:	S19N0101P
Studijní program:	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Studijní obor:	Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality
Téma práce:	Obrobitelnost žárového nástřiku Fe13Cr a jeho vlastnosti
Zadávací katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky
2. Technologie nástřiku
3. Vlastnosti nástřiku a jeho aplikace
4. Obrobitelnost nástřiku
5. Návrh a realizace experimentu
6. Analýza výsledků
7. Technicko-ekonomické vyhodnocení
8. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- Elektronické informační zdroje dostupné z www.knihovna.zcu.cz
- CIRP ANNALS – Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net>)
- MM Průmyslové Spektrum, dostupné z www.mmspektrum.com
- Strojírenská technologie, dostupné z <http://casopis.strojirenskatechnologie.cz>

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Ing. Michal Povolný**
Regionální technologický institut
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

V Plzni dne 15. října 2020

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

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

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Tomáši Zatloukalovi za velice nápomocné poradenství během tvorby této diplomové práce. Stejně tak velké díky patří i všem pracovníkům ZČU a Plasmametal, kteří mi pomáhali se získáváním informací a dat.

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

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Chýna	Jméno Marek	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Obrobitelnost žárového nástřiku Fe13Cr a jeho vlastnosti		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	73	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Tato diplomová práce se zaměřuje na technologii žárových nástřiků. Dále je analyzován současný stav aplikace žárových nástřiků Fe13Cr a jejich obrobitelnost soustružením. Výzkumná otázka se specializuje na obrobitelnost žárového nástřiku Metcoloy 2 lineární řeznou hranou. Sledovány budou vlastnosti obrobeného povrchu a opotřebení nástroje v závislosti na řezných podmínkách.
KLÍČOVÁ SLOVA	Obrobitelnost, soustružení, broušení, žárové nástřiky, lineární řezná hrana, opotřebení, drsnost, Abbottova křivka, vyštípnutí, abraze, úhel hrany, částice

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Chýna	Name Marek	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technologies and quality assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Machinability of Fe13Cr thermal spraying and its properties		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of machinign	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	73	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis focuses on the technology of thermal spraying. Furthermore, the current state of application of Fe13Cr thermal sprays and their machinability by turning is analyzed. The research question specializes in the machinability of Metcoloy 2 thermal spraying with a linear cutting edge. The properties of the machined surface and tool wear will be monitored depending on the cutting conditions.
KEY WORDS	Machinability, turning, grinding, thermal spraying, linear cutting edge, wear, roughness, Abbott curve, chipping, abrasion, edge angle, particles

Obsah

Poděkování	5
Přehled použitých zkratk	10
Seznam použitých symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam grafů.....	12
Seznam tabulek	12
1 Úvod.....	13
1.1 Cíle diplomové práce.....	13
2 Technologie žárových nástřiků	14
3 Vlastnosti žárových nástřiků a jeho aplikace	15
3.1 Druhy žárových nástřiků	16
4 Obrobitelnost žárových nástřiků	18
4.1 Broušení.....	18
4.2 Soustružení	19
4.2.1 Soustružení lineární řeznou hranou.....	22
4.3 Opotřebení břitu.....	23
4.4 Hodnocení jakosti povrchu.....	25
4.5 Využití Fe13Cr nástřiků v praxi	26
4.5.1 Popis Fe13Cr a Metcoloy 2.....	26
4.5.2 Spolupráce Metco a Folla Tech A.S.....	26
4.5.3 Zkoumání tepelné vodivosti nástřiku Fe13Cr	27
4.5.4 Prodloužení životnosti dílů drážních vozidel.....	28
4.6 Soustružení Fe17Cr	29
4.6.1 Vlastnosti povrchu v závislosti na řezné rychlosti.....	30
4.6.2 Vlastnosti povrchu v závislosti na posuvu.....	32
5 Návrh a realizace experimentu	33
5.1 Získané poznatky	34
5.1.1 Obrobek.....	34
5.1.2 Řezný nástroj.....	35
5.1.3 Obráběcí stroj a přípravek	37
5.1.4 High Feed Turning	38
5.1.5 Měření profilu povrchu	40
5.1.6 Měření opotřebení VBD.....	40

5.1.7	Měření kuželovitosti.....	41
5.2	Plán experimentu	41
5.2.1	Vnesené faktory.....	43
6	Analýza naměřených dat	44
6.1	Naměřené hodnoty drsností R_a	45
6.1.1	Vzorky č. 5 - č. 8	46
6.1.2	Vzorky č. 9 – č. 12	50
6.1.3	Vzorky č. 17 – č. 22 a č. 25 – č. 28	52
6.2	Sledování opotřebení VBD.....	56
6.2.1	Opotřebení VBD u vzorků č. 9 až č. 16	58
6.2.2	Opotřebení VBD u vzorků č. 21 až č. 24 a č. 29 až č. 32 a č. 5	59
6.2.3	Nízká opotřebí břitů VBD	60
6.3	Změny v rozměrech obrobku.....	61
7	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	63
7.1	Broušení do kulata	63
7.2	Soustružení lineární řeznou hranou	63
7.3	Porovnání nákladů	64
8	Závěr.....	64
	Seznam použitých zdrojů	66
	PŘÍLOHA č. 1	i
	PŘÍLOHA č. 2	ii
	PŘÍLOHA č. 3	iii
	PŘÍLOHA č. 4.....	iv

Přehled použitých zkratk

PKBN	Polykrystalický nitrid boru
KBN	Kubický nitrid boru
VBD	Výměnná břitová destička
SNOP	Stroj – nástroj – obrobek – přípravek
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
Fe	Železo
Cr	Chrom
FST	Fakulta strojní
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
VZÚ	Výzkumný a zkušební ústav Plzeň
Fe13Cr	Slitina železa a chromu

Seznam použitých symbolů

V_{vv}	[ml/cm ²]	Valley void volume
v_c	[m/min]	řezná rychlost
a_p	[mm]	hloubka řezu
f	[mm]	posuv
R_a	[μ m]	střední aritmetická hodnota drsnosti
λ_s	[°]	sklon ostří
U	[mm ² /min]	úběr
t_s	[s]	čas strojní
N	[Kč]	cena operace

Seznam obrázků

Obrázek 1: Principiální schéma nánosu žárových nástřiků. [30]	15
Obrázek 2: Profil specificky soustruženého povrchu s lamelární mezivrstvou NiAl5 [12].....	15
Obrázek 3: Schémata strojů pro nástřiky [4].....	16
Obrázek 4: Detail elektrického oblouku po spojení dvou elektrod [8]	18
Obrázek 5: Podélné broušení [14].....	19
Obrázek 6: Oblasti plastických deformací [20].....	20
Obrázek 7: Geometrie soustružnického nože [34]	21
Obrázek 8: MC ISO materiálové kódy [19]	21
Obrázek 9: Znázornění obrábění lin. řeznou hranou.....	23
Obrázek 10: Typy opotřebení břitu [33]	24
Obrázek 11: Abbottova křivka [31]	25
Obrázek 12: Nástřik na trubce HEX 1 [24].....	27
Obrázek 13: Typy zkoušených aplikací drátěných sítí [24].....	28
Obrázek 14: Geometrická úprava polotovaru [26].....	29
Obrázek 15: Opotřebení VBD po obrábění Fe17Cr [26]	33
Obrázek 16: Rozbor úlomku Fe13Cr nástřiku	34
Obrázek 17: Polotovar pro nástřik Fe13Cr [32].....	35
Obrázek 18: Pohled shora na držák VBD [32].....	36
Obrázek 19: Náhled z katalogu BONAR [43]	36
Obrázek 20: Fazetky nabízené firmou Sandvik Coromant [42].....	37
Obrázek 21: Pracovní prostor CTX Beta 1250	38
Obrázek 22: Porovnání běžného a HFC obrábění [40]	39
Obrázek 23: Výška Rz_{kin} při soust. lin. řez. hr. [38]	40
Obrázek 24: ISO značení opotřebení V_B a K_B [20].....	41
Obrázek 25: Způsob značení VBD.....	43
Obrázek 26: Išikawův diagram	44
Obrázek 27: Porovnání profilu č. 5 (nahore) a č. 9 (dole)	48
Obrázek 28: Porovnání vzorků č. 5 (nahore) a č. 9 (dole)	49
Obrázek 29: Filtrované R profily vzorků č. 9 (nahore) a č.11 (dole).....	51
Obrázek 30: Abbottova křivka, vzorek č. 17	53
Obrázek 31: Naměřený profil vzorku č. 17.....	54
Obrázek 32: Detail vzorku povrchu č. 17	54
Obrázek 33: Vytrhané částice z povrchu vzorku č. 28.....	55

Obrázek 34: Změřené R profily, odshora 28_1, 28_2, 28_3.....	56
Obrázek 35: Zvětšený pohled na VBD pro vzorek č. 1	58
Obrázek 36: Vyštípnutí VBD u vzorku č. 16	59
Obrázek 37: Dokončovací soustružení vzorku č. 16.....	59

Seznam grafů

Graf 1: Vliv geometrické úpravy na vlastnosti mezivrstvy [27].....	30
Graf 2: Vliv řezné rychlosti na parametr V_{vv} při obrábění Fe17Cr [27].....	31
Graf 3: Vliv řezné rychlosti na drsnost při soustružení Fe17Cr [27].....	31
Graf 4: Vliv posuvu na parametry drsnosti povrchu [26]	32
Graf 5: Vliv posuvu na parametr V_{vv} [26]	32
Graf 6: Graf velikostí R_a vzorků č. 5 až č. 8.....	47
Graf 7: Velikost K_b , V_b a R_a pro popsané podmínky	50
Graf 8: Hodnoty pro řezy č. 17 až č. 20 a č. 25 až č. 28	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení Metcoloy 2 (nahore) a X20Cr13 (dole).....	26
Tabulka 2: Vlastnosti Fe13Cr nástřiku [32].....	34
Tabulka 3: Parametry stroje CTX Beta 1250 37] [37]	38
Tabulka 4: Plán experimentu.....	42
Tabulka 5: Změřené hodnoty R_a	45
Tabulka 6: Podmínky vzorků č. 5 až č. 8	47
Tabulka 7: Přehled hodnot pro řezy č. 9 až č. 12	50
Tabulka 8: Přehled hodnot pro řezy č. 17 až č. 20 a č. 25 až č. 28	52
Tabulka 9: Naměřená opotřebení V_B a K_B	57
Tabulka 10: Řezné podmínky pro vzorek č. 9 až č. 16	58
Tabulka 11: Řezné podmínky pro vzorek č. 21 až č. 24, č. 29 až č. 32 a č. 5	60
Tabulka 12: Naměřené hodnoty průměrů.....	62
Tabulka 13: Strojní hodinové sazby a ceny nástrojů.....	64

1 Úvod

V současné době trend výroby spočívá v moderních přístupech. Obecně lze říct, že tyto trendy jsou chápány jako zvyšující se nároky na konstrukci, zrychlování výrobních procesů, vyvíjení a aplikování nových technologií, snižování nákladů a ceny samotného výrobku a pochopitelně i konkurenceschopnost na trhu. Pro dosažení požadovaných vlastností vyráběných součástí se stále hojně využívají konvenční technologie upravující jejich povrch pomocí např. chemicko-tepelného zpracování. Avšak od těchto technologií se v některých případech ustupuje a nahrazují se jinými technologiemi. Nevýhodou těchto stávajících procesů je poměrně vysoká technologická, časová a energetická náročnost. Dále pak dodatečné opracování povrchu může být také náročné z obdobných hledisek.

V posledních zhruba dvou desetiletích se začalo hojně využívat žárových nástřiků pro dosažení požadovaných vlastností povrchu výrobků s poměrně menší technologickou náročností oproti stávajícím technologiím. To se projevuje i vzrůstajícím množstvím firem, které nyní provádí aplikace žárových nástřiků. Žárové nástřiky se staly oblíbenými zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, kde se žárové nástřiky začínají používat např. jako náhrada za tvrdochromování. V automobilovém průmyslu se využívají žárové nástřiky na díly spalovacích motorů, které velmi často denním používáním trpí na mechanické a opotřebení. [1]

Pozadu nezůstávají ani obráběcí technologie, díky kterým je možno dříve velmi těžko obrobitelné materiály nyní opracovávat s vynikajícími výsledky. Jedná se především o možnost tyto materiály opracovávat pomocí obrábění s definovanou geometrií břitu, zejména pak soustružením a frézováním [2]. Progresivní technologie, výkonnost obráběcích strojů, nové řezné materiály, jejich povrchové a geometrické úpravy – to vše přispívá k postupnému nahrazování relativně nevykonného broušení obráběním s definovanou geometrií břitu.

Progresivní přístup k obráběcím technologiím ukazuje, že je možné obrábět plochy opatřené těžkoobrobitelnými žárovými nástřiky pomocí nástrojů s definovanou geometrií efektivně a s dosažením velmi dobré integrity povrchu. Obrábění žárových nástřiků, které mají ve své struktuře tvrdé karbidy a oxidy, je umožněno právě výkonným řezným nástroji, které odolávají především abrazi a vysokým teplotám. Často se používají povlakované karbidové, diamantové a KBN nástroje.

V současné době Západočeská univerzita v Plzni experimentuje s technologií soustružení lineární řeznou hranou. Zde byl i vytvořen z kovu na 3D tiskárně speciální držák břitových destiček, který nastavuje jejich řezné hrany do určené polohy. Tento specifický druh obrábění společně s odolnými řeznými materiály má velký potenciál v oblasti efektivního soustružení těžkoobrobitelných materiálů, včetně povrchů opatřených žárovými nástřiky.

1.1 Cíle diplomové práce

Tato diplomová práce se zabývá obrobitelností žárového nástřiku Metcoloy 2 lineární řeznou hranou. Tento žárový nástřik se řadí mezi těžkoobrobitelné, protože jeho struktura je lamelární a obsahuje tvrdé částice v podobě oxidů a karbidů. Pro praktické využití v průmyslových odvětvích se musí většina takto vytvořených ploch nejčastěji obrobřit. Kvůli náročné obrobitelnosti se využívá převážně broušení, které je neefektivní kvůli časové náročnosti.

Hlavním cílem této diplomové práce je metodou soustružení lineární řeznou hranou vytvořit povrch, který se bude podobat jakostí broušenému povrchu. Úkolem bude tedy

sestavit plán řezných podmínek a obrobít povrch. Dále pak analyzovat stav povrchu po obrobení, opotřebení řezné hrany nástroje a geometrické odchylky obrobku.

Tento výzkumný problém tedy spočívá v obrábění žárového nástřiku nekonvenčním způsobem a nekonvenčním nástrojem. Oběma problematikami se v současné době zabývá Západočeská univerzita v Plzni. Již z dřívějších experimentů je částečně patrné, jakým směrem by se měl dalším výzkum ubírat.

V teoretické části diplomové práce jsou popsány žárové nástřiky jako takové a jejich aplikace. Následuje popis strojírenských technologií využívaných pro obrábění rotačních součástí, včetně popisu soustružení lineární řeznou hranou. Posledním tématem je literární rešerše výzkumných prací zabývajících se obrábění žárových nástřiků na bázi FeCr běžným soustružením.

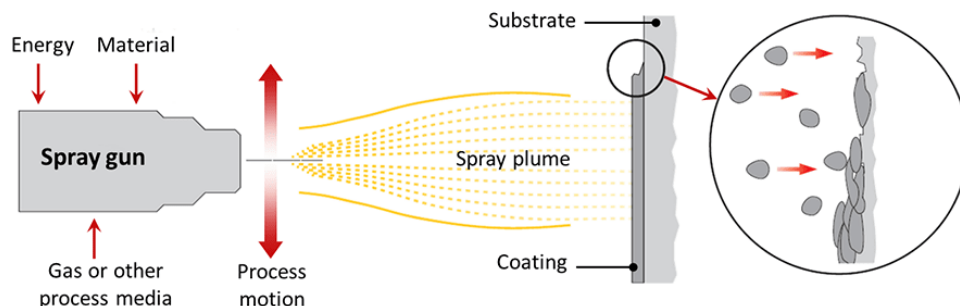
Aplikační část se zaměřuje na experiment obrábění žárového nástřiku Metcoloy 2. Zde je popsáno použité vybavení, způsob obrábění, způsob měření a plán experimentu. Následuje část analyzující vliv řezných podmínek na drsnost a profil nerovností povrchu. Dále je popisován vliv těchto podmínek na opotřebení nástroje a změnu rozměru obrobku. V posledním kroku je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení experimentu a popis dosažených výsledků.

2 Technologie žárových nástřiků

Princip vytváření žárových nástřiků spočívá v nanášení roztavených částic specifického kovového, kovokeramického nebo keramického materiálu na povrch základní součásti, na které vytvoří novou souvislou vrstvu. K usměrnění pohybu roztavených částic je zapotřebí plynného hnacího média. Dále je zapotřebí zdroj tepla, který nanášený materiál ohřeje na jeho teplotu tání, avšak existují i metody, které zdroj tepla nepotřebují.

Obecně je tato metoda založena na přivádění materiálu určeného k nanášení do speciálního zařízení ve formě prášku nebo drátu, který je natavován zdrojem tepla a unášen skrz trysku k součásti určené k povlakování. Následně dochází k relativnímu pohybu mezi tryskou a součástí, aby natavené částice nedopadaly do jednoho místa. Válcovité součásti se upínají např. mezi hroty, ploché součásti se pokrývají např. metodou řádkování. (obr 1.)

Natavené částice představují drobné kapičky kovu, proto k jejich spojení nedochází na atomární úrovni. Velikost těchto částic je řádově od jednotek do desítek mikrometrů v závislosti na použité metodě. Vysoká rychlost chladnutí a kinetická energie při dopadu vytváří lamelární strukturu výsledného povrchu. Může se stát, že některé částice nejsou natavené a poruší tak homogenitu nástřiku. Dále se při nanášení tvoří tvrdé oxidy a karbidy. Je důležité zvolit správnou metodu nanášení a procesní parametry, aby bylo docíleno co možná nejvíce homogenní struktury.

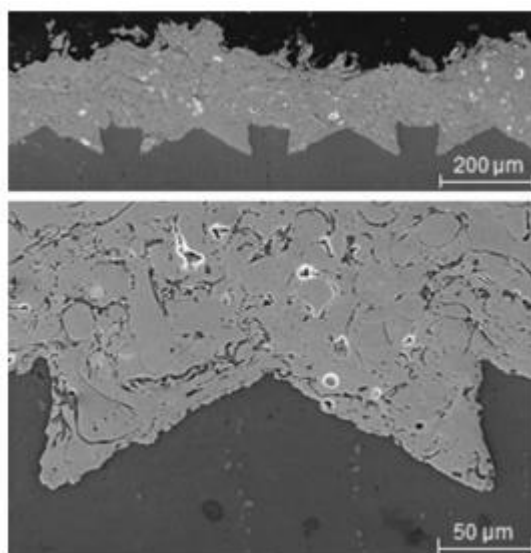


Obrázek 1: Principiální schéma nánosu žárových nástřiků. [30]

3 Vlastnosti žárových nástřiků a jeho aplikace

Žárové nástřiky díky svým vlastnostem tvoří komplexní řešení v mnoha průmyslových odvětvích. V současné době se kromě leteckého a automobilového průmyslu využívají hojně i v chemickém, energetickém, papírenském a také elektrotechnickém průmyslu.

Oproti navařování materiálu konvenčními metodami nemusí být u žárových nástřiků zajištěna zaručená svařitelnost. Povrch musí být vhodně upraven. Často je zdrsňený pískováním nebo dokonce obráběn definovanou geometrií břitů za účelem vytvoření drážek připomínající rybinu pro puškohledy. Po zdrsňení je povrch chemicky zbaven mastnot. Mnohdy se využívají mezivrstvy také nanášené žárovým nástřikem na bázi niklu, chromu nebo hliníku. [12]



Obrázek 2: Profil specificky soustruženého povrchu s lamelární mezivrstvou NiAl5 [12]

„Pro aplikaci žárového stříkání není podstatné chemické složení základního materiálu povlakovaného dílce, ani stav jeho tepelného zpracování. Povlaky nelze nanášet pouze na součásti s již vytvořenými vrstvami – například nitridací nebo chromováním.“ (Plasmametal.cz [11])

Užitné vlastnosti žárových nástřiků:

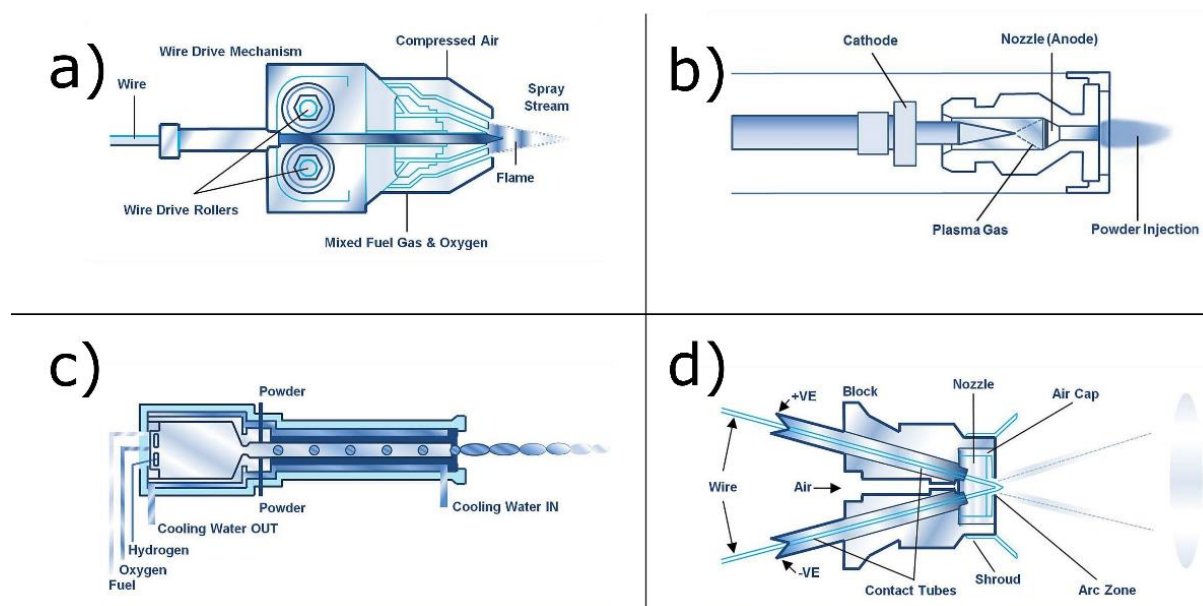
- Odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí
- Odolnosti proti oxidaci a korozi
- Teplotní odolnost
- Zvýšení teplotní a elektrické vodivosti nebo izolace
- Odolnost proti abrazi, kavitaci nebo erozi
- Odolnost mechanickému namáhání

Díky těmto vlastnostem jsou žárové nástřiky dnes v některých odvětvích takřka nenahraditelné. [1][11]

Kromě výroby nových dílů jsou žárové nástřiky vhodné i pro renovaci stávajících strojních součástí. To lze dobře demonstrovat na článku z roku 1997, kdy vodní elektrárny v Baksanu a Kirsau vlivem opotřebení lopatek měly ztrátu zhruba 6 % z generovaného výkonu elektrické energie. Pro renovaci lopatek vodních turbín byly aplikovány žárové nástřiky, které byly následně broušeny. [13]

3.1 Druhy žárových nástřiků

Pro aplikaci žárových nástřiků v praxi se využívá nejčastěji čtyř metod. Metody jsou rozděleny podle druhu vzniku tepla potřebného pro natavení částic. Obrázek níže (obr. 3) ukazuje schéma funkce strojů pro nástřik a) plamenem, b) plazmou.



Obrázek 3: Schémata strojů pro nástřiky [4]

- **Nástřik plamenem**

Jedná se o nejstarší metodu žárového nástřiku. Hořící proud kyslíku nebo vzduchu s acetylenem nebo propanem unášejí roztavený kov přiváděný ve formě prášku nebo drátu. Nevýhodou této metody je nízká rychlost a teplota plamene. Ve struktuře se nachází mnoho nenatavených částic. Výhodou jsou nízké náklady na provoz. [4][5]

- **Nástřik plazmou**

Plazmatický oblouk je zapálen mezi vnitřní netavnou katodou a vnější anodou, jenž tvoří trysku. Jako hnací medium se využívá inertní plyn, který zároveň slouží i jako ochranná atmosféra. Tavný materiál je do trysky přiváděn pomocným plynem pouze ve formě prášku. Vysoká teplota plazmatu umožňuje tavit i keramické částice. Nevýhodou jsou časté fázové změny, vyhořívání a oxidace částic, které mohou způsobit nepředvídatelné chování výsledného povrchu. Proto tato metoda je vhodná jen na určité aplikace, avšak při správných parametrech tato metoda tvoří vysoce kvalitní nástřiky. [4][6]

- **Nástřik HVOF**

Metoda HVOF spočívá v hoření směsi tekutého paliva (kerosin, propan) míseného s kyslíkem, která je urychlena v konvergentně divergentní trysce. Rychlost spalin může dosáhnout až 1500 m/s. Tavný materiál je pomocným plynem přiváděn jen ve formě prášku. Vysoká rychlost skvěle ukotvuje dopadající částice na povrch. Relativně nízká teplota zdroje tepla zabraňuje přílišné oxidaci částic. Na druhou stranu tato metoda nelze použít na keramické částice s vysokou teplotou tání. Výsledné povrchy mají vysokou kvalitu. [4][7]

- **Nástřik elektrickým obloukem**

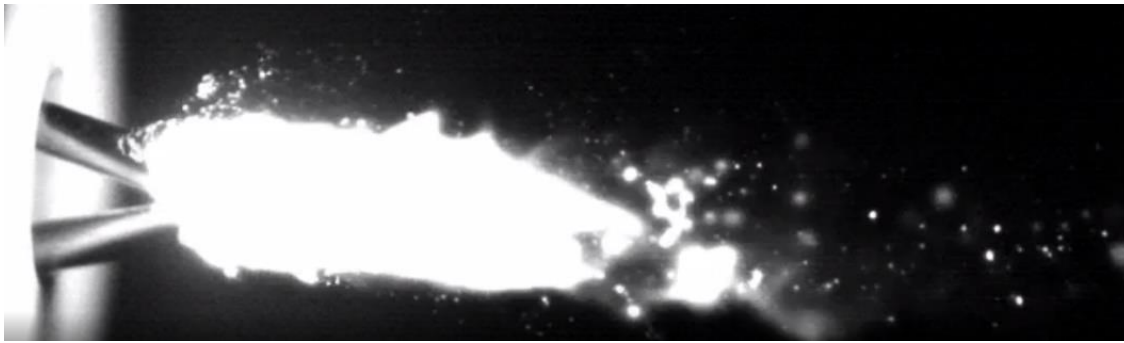
Jak již název napovídá, zdrojem tepla je hoření elektrického oblouku, jenž hoří mezi dvěma elektrodami při jejich přiblížení. Obě elektrody jsou tvořeny kontinuálně přidávanými dráty. Vzniklá tavenina je unášena tryskou směrem k povrchu. Jako nosné medium slouží vzduch. (obr. 4) [4][9]

Tato metoda má hned několik výhod. Jedněmi z nich jsou nízké provozní náklady společně s jednoduchostí konstrukce zařízení. K funkci je zapotřebí pouze elektrický proud a stlačený vzduch, proto jsou tyto stroje vhodné i k aplikacím nástřiků přímo na místě určení součástí. Není tedy nutné, např. s nadrozměrnou strojní součástí, složitě manipulovat. [10]

Ostatní výše popsané metody svým zdrojem tepla ovlivňují dopadající povrch a mohou způsobit následné vyšší vnitřní pnutí. Tato metoda ovlivňuje povrch pouze teplotou částic. Málokdy teplota dosáhne 150°C. Při použití nástřiku metodou elektrickým obloukem bývá zbytkové napětí velice malé v porovnání s ostatními metodami.

Tato metoda je i velmi výkonná, dokáže zpracovat až 80 kg/h přídavných drátů. Navíc je možno použít dva různé dráty pro docílení specifického složení nástřiku.

Nevýhodou je pak relativně vysoká pórovitost a množství nenatavených částic vlivem nízké rychlosti unášených částic nižší teploty. [4][8][9][11]



Obrázek 4: Detail elektrického oblouku po spojení dvou elektrod [8]

4 Obrobitelnost žárových nástřiků

Většina strojních výrobků kolem nás, které mají válcovitý tvar a jsou strojně opracované, jsou s největší pravděpodobností soustružené nebo broušené. Obrábění rotačních ploch je technologický proces, kterým se vytváří požadovaný tvar obrobku v požadovaných rozměrech, stupni přesnosti a kvality povrchu. Přebytečný materiál je odstraněn ve formě třísek. Tříška vzniká relativním pohybem a silovým působením mezi obrobkem a nástrojem

4.1 Broušení

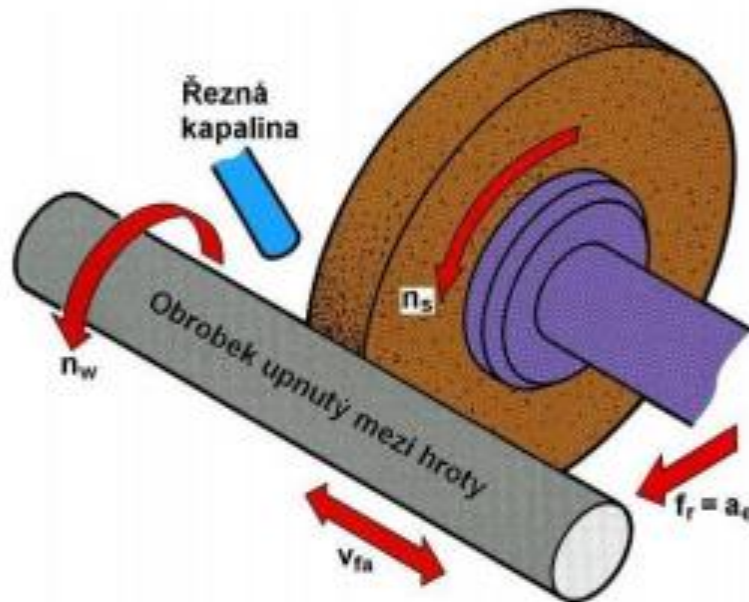
Broušení je jedna z nejstarších metod třískového obrábění. Tato metoda se využívá především pro dokončovací operace a pro získání vysoce jakostních povrchů obráběných těles. Nástrojem broušení jsou nejčastěji kotouče, které tvoří drobná zrna spojena pojivem. Tato zrna mají různorodý tvar, a proto nemají definovanou geometrii. Relativní pohyb mezi obrobkem a brusným tělesem je zajištěn jak pohybem kotouče, tak pohybem obrobku. Brousící stroje mají mnoho variant, především podle tvaru plochy určené k broušení a jejich materiálu. [14]

Broušení lze charakterizovat:

- Nejednotná tříška vlivem různorodosti zrn a nepravidelnému rozmístění v brusném nástroji
- Pojivo není schopné zrna dostatečně udržet pospolu, proto zrna přenáší jen malé řezné síly a postupně se vytrácejí
- Vysoká měrná řezná síla je charakteristická pro broušení.
- Zrno je díky vysoké řezné rychlosti nástroje krátkou dobu v záběru. Dochází k plastickým deformacím a vzniku velkých teplot na povrchu tělesa.
- Oblast primární plastické deformace je ovlivněna zápornými úhly čela zrn
- Vzniklé teplo má negativní dopad na výsledek obrábění. Vlivem tepla dochází k trhlinám na povrchu, změnám struktury a vnesení velkého zbytkového tahového napětí
- Možnost brousit tvrdé těžkoobrobitelné materiály díky tvrdosti zrn

Hlavní výhodou broušení je především možnost dosahovat vysoké přesnosti předepsaných geometrických tvarů. Běžně se přesnost pohybuje 1-3 μm a kruhovitost pod 0,2 μm . Avšak hlavní výhodou je i nízká drsnost povrchu. Lze dosáhnout běžně drsnosti $R_a = 0,2 \mu\text{m}$.

Pro broušení válcových ploch se používá metoda axiálního obvodového broušení. Obrobek je upnut mezi hroty a koná otáčivý pohyb n_w okolo své osy díky unášecímu prvku. Kotouč koná také otáčivý pohyb n_s . Posuv je zajištěn buď pohybem obrobku po dvě vlastní ose, nebo pohybem kotouče kopírující paralelně s osou obrobku v_{fa} . S každým přejezdem se mění zdvih stolu o hodnotu úběru a_e . (obr. 5) [14]



Obrázek 5: Podélné broušení [14]

4.2 Soustružení

Soustružení je nejjednodušší a zároveň nejvyužívanější způsob obrábění za účelem vytvoření rotační plochy. Obrobek je opět upnut tak, aby se mohl otáčet kolem své osy. Pro běžné soustružení se využívají jednobřité rezné nástroje s rezným klínem a definovanou geometrií.

Soustruhy při své činnosti vykonávají dva rezné pohyby

- Hlavní rezný pohyb vykonává obrobek, který se otáčí okolo své osy Z určitou reznou rychlostí v_c .
- Vedlejší rezný pohyb v_f se vykonává přímočaře a je důležitý pro vytvoření třísky. Při podélném soustružení se nůž pohybuje podél osy Z obrobku. Při přímém soustružení se nůž pohybuje kolmo k ose obrobku. [20]

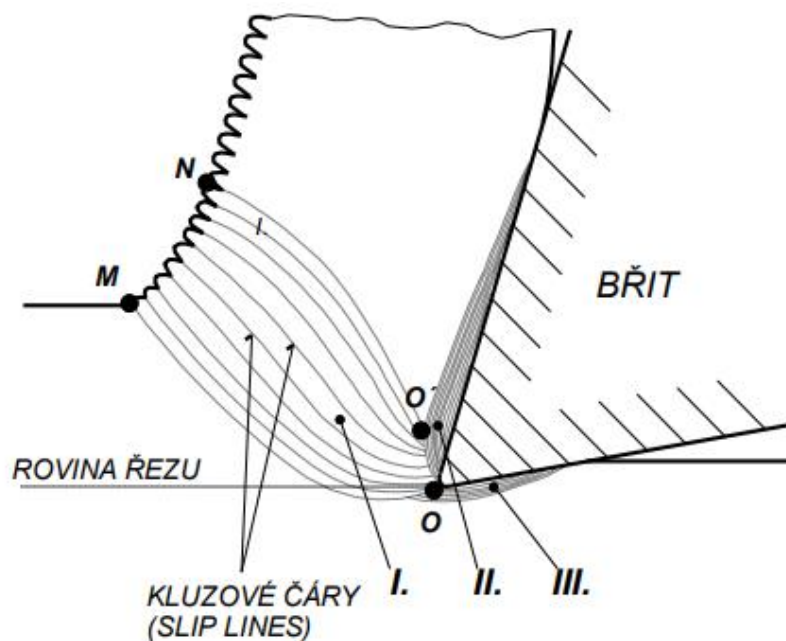
Řezné podmínky jsou soubor nastavení stroje pro docílení vhodného způsobu soustružení a jsou to tři základní hodnoty.

- Řezná rychlost je obvodová rychlost na povrchu obráběné plochy.
- Posuv je dráha, kterou nástroj překoná za jednu otáčku vřetene.
- Hloubka řezu udává, o kolik se zmenší průměr obrobku

Pokud jsou dodrženy předpoklady pro soustružení, v místě vnikání řezného klínu silou F do obrobku vznikají nejdříve pružné, následně plastické a rozrušivé deformace. Pro zjednodušení vysvětlení se používá model ortogonálního řezu. Reálný řez se uvažuje v prostoru s úhlem λ_s . Oblast vzniku třísky je charakterizovaná třemi oblastmi (obr. 6):

- Oblast primární plastické deformace – vliv na tvorbu třísky
- Oblast sekundární plastické deformace – vliv na tvorbu nárůstků
- Oblast terciální plastické deformace – vliv na zbytková napětí povrchu obrobku

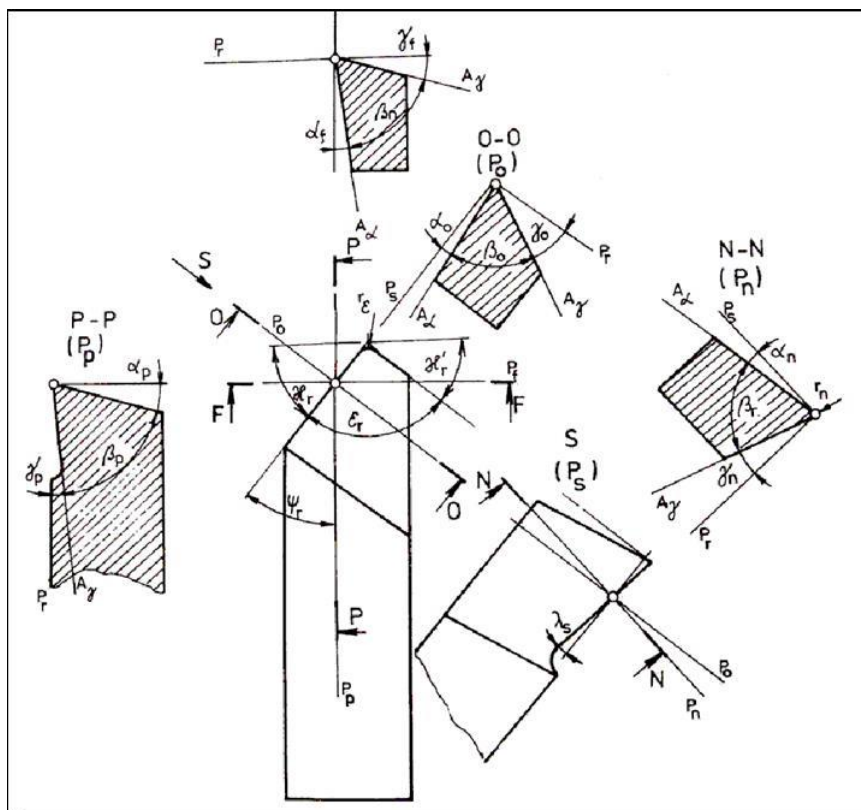
Přičemž chování těchto oblastí mají zásadní vliv na tvorbu třísky a stav povrchu po obrobení. [20]



Obrázek 6: Oblasti plastických deformací [20]







Nůž pro podélné soustružení je definován jeho tvarem a je popsán jeho plochami a úhly. Všechny uhly jsou vyobrazeny níže (obr.7), přičemž nejdůležitějšími pak jsou:

- Úhel hřbetu α ovlivňující velikost tření mezi hlavním hřbetem a obrobkem.
- Úhel břitu β ovlivňuje velikost řezného odporu.
- Úhle čela γ ovlivňuje trvanlivost ostří
- Úhel hlavního ostří κ_r má vliv na tvar třísky
- Úhel hlavního skonu ostří λ_s má vliv na odchod třísky a tuhost obrábění.
- Rádus špičky r_ϵ ovlivňuje kvalitu povrchu. [14]



Obrázek 7: Geometrie soustružnického nože [34]

Vzhledem k tomu, že existuje nepřehledné množství materiálů určených pro obrábění, nejpráhlednější je materiály rozdělit do skupin podle MC ISO kódu a přiřazovat k nim nástroje. Každá skupina z těchto materiálů má unikátní vlastnosti ovlivněné složením, stupněm technologického zpracování a mechanickými vlastnostmi. Pro usnadnění volby nástroje bylo vytvořeno šest hlavních skupin (obr. 8), které se pak dělí do podskupin. Většina výrobců dodává nástroje s již doporučeným zařazením do skupin a předepsanými reznými podmínkami. Např. ISO H jsou často kalené oceli a jsou k nim přiřazovány např. KBN VBD. [19]

<p>P</p>  <p>Steel</p>	<p>M</p>  <p>Stainless steel</p>	<p>K</p>  <p>Cast iron</p>
<p>N</p>  <p>Non-ferrous metal</p>	<p>S</p>  <p>Super-alloys and titanium</p>	<p>H</p>  <p>Hard material</p>

Obrázek 8: MC ISO materiálové kódy [19]

Obrobitelnost lze chápat jako technologickou vlastnost materiálu být snadno nebo obtížně obráběn řezáním. Obrobitelnost závisí na řadě faktorů, především chemickém složení materiálu, druhem předchozího zpracování, fyzikálních vlastnostech atd. Dle normy lze vyjádřit obrobitelnost tzv. indexem obrobitelnosti i . Materiály jsou rozděleny do hlavních čtyř skupin, kdy je zkoušený materiál porovnáván s etanolovým z vybrané skupiny. Převrácením Tylova vztahu se získá v_T pro oba materiály.

$$T = \frac{C_{Tv}}{v^m} \rightarrow v_T = \sqrt[m]{\frac{C_{Tv}}{T}}$$

C_{tv} vyjadřuje teoretickou trvanlivost břitu při $v_c = 1$ m/min a písmeno m vyjadřuje směrnici Taylorovy přímk. Převrácením Tylova vztahu se získá v_T pro oba materiály. Za T se dosazuje určitá doba nástroje v řezu.

$$i = \frac{v_T \text{ Vzorku}}{v_T \text{ Etalonu}}$$

Pokud poměr vyjde $i < 1$, jedná se o horší obrobitelnost. V opačném případě je to lepší obrobitelnost. Bohužel tato metoda je poněkud zastaralá a nelze ji použít na současné těžkoobrobitelné materiály. [20]

Pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů jsou vytvořeny komplexní programy, které berou v potaz i ty nejmenší detaily, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. Tyto programy vychází z experimentálních měření, kdy byl pozorován povrch obrobku a opotřebením břitu v závislosti na změnách řezných podmínek

4.2.1 Soustružení lineární řeznou hranou

Soustružení lineární řeznou hranou je specifický způsob obrábění, který zatím není moc znám a ani popsán. Běžně se soustruží špičkou nástroje, zatímco u této metody se využívá jen jedna řezná hrana. Řezná hrana nemůže být paralelní s osou obrobku, docházelo by pak k využití celé řezné hrany najednou a řezná síla by enormně vzrostla. Proto musí být řezná hrana nastavena na úhel λ_s . Jelikož je řezná síla relativně velká, je pravděpodobné, že se bude v místě řezu generovat vysoká i vyšší teplota.

Výhodou použití lineární řezné hrany je stabilita a tuhost nástroje. Bohužel může se stát, že řezné síly nakonec budou tak velké, že tuhost celé soustavy SNOB bude vykazovat vibrace a povrch nebude vhodně obroben. Tento případ nastal při obrábění žárových nástřiku lineární řeznou hranou v laboratořích Západočeské univerzity. Dlouhý a nedostatečně tuhý obrobek v kombinaci s vyššími řeznými silami způsobily vibrace a ukončení procesu.

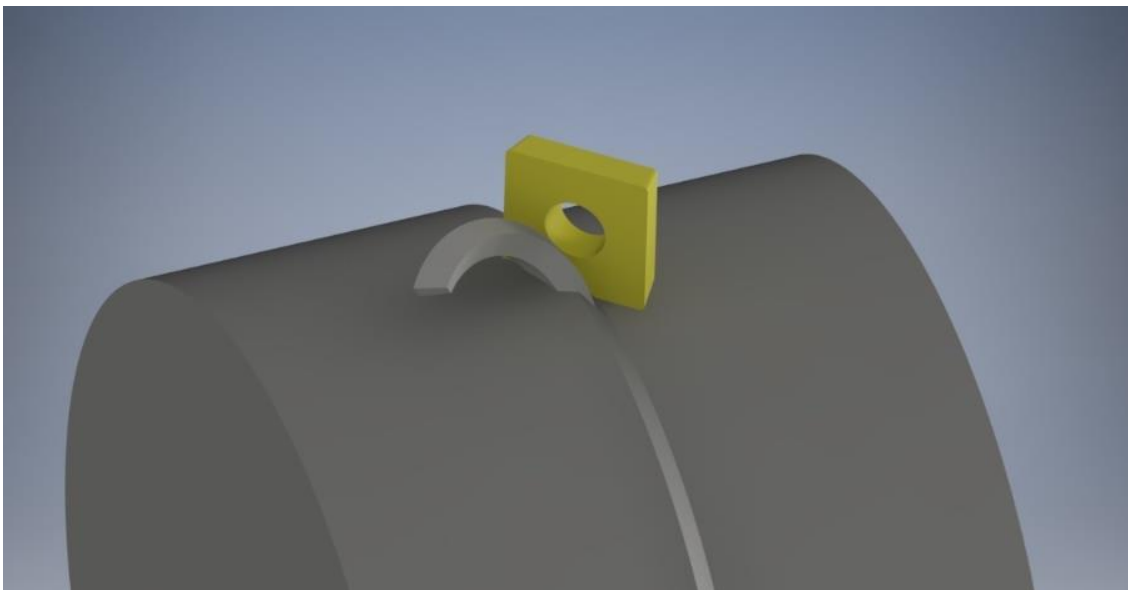
Soustružení lineární řeznou hranou je efektivní, protože využívá vysokých posuvů, které stabilizují řez. Bohužel může dojít k odtlačení nástroje vlivem vyšších řezných sil a ke změně rozměrů nebo kvality povrchu. Řezná hrana je využita lokálně. Po opotřebením jedné části břitu je možné držák posunout a využít tak další část hrany, což je ekonomicky přínosné. [32][38][44]

Výhody této metody jsou:

- Vysoké posuvy a řezné rychlosti snižující čas výroby
- Stabilita nástroje
- Možnost VBD jednoduše renovovat
- Potenciální malý geometrický profil drsnosti

Nevýhody této metody:

- Vysoké nároky na tuhost soustavy
- Nutnost opatření speciálního držáku VBD
- Malý výběr komerčně dostupných VBD
- Tvar součásti nesmí mít osazení



Obrázek 9: Znázornění obrábění lin. řeznou hranou

4.3 Opotřebení břitu

Vlivem tepelného a silového působení dochází k povrchovým a tvarovým změnám břitu. V zásadě otupení břitu vzniká třemi způsoby a to je:

- Otěr řezného nástroje může být způsoben hned několika způsoby. Především tvrdé částice vyskytující se v obráběném materiálu způsobují abrazi nástroje. Při zvýšených teplotách dochází pak k difuznímu a chemickému otěru, kdy řezný materiál na molekulární úrovni reaguje na obráběný materiál.
- Plastická deformace nastává, když je břit v místě řezu vystaven nadlimitním teplotám. Příčinou může být špatná tepelná vodivost řezného materiálu, vysoké parametry řezných podmínek nebo již otupený břit.
- Opotřebení břitu křehkým lomem způsobeným nadměrným dynamickým namáháním. Čím je nástroj méně houževnatý, tím roste riziko vzniku trhlin a zničení nástroje.

Existuje pak několik typů opotřebení bříty, především na hřbetu a na čele, dále je to tvorba nárůstků, vrubů a trhlin na hraně ostří.

Opotřebení hřbetu je projev abrazivních účinků materiálu obrobku. Zejména je pak postižena plocha u hlavního a vedlejšího ostří a rádiusu špičky. Konstantě zvětšující se nebo neměnné opotřebení je důkazem vhodně zvolených podmínek a je obecně méně nebezpečné pro zachování správných rozměrů obrobku.

Výmoly na čele jsou rovněž způsobeny abrazí a difuzí v místě vzniku a odvádění třísky. Afinita je chemická příbuznost dvou materiálů, která jim umožňuje na sebe reagovat. Pro odstranění čelního opotřebení je vhodné zvolit nástroj s vyšší tvrdostí a menší afinitou. Toto opotřebení postihuje především tvorbu třísky a změnu působení řezných sil.

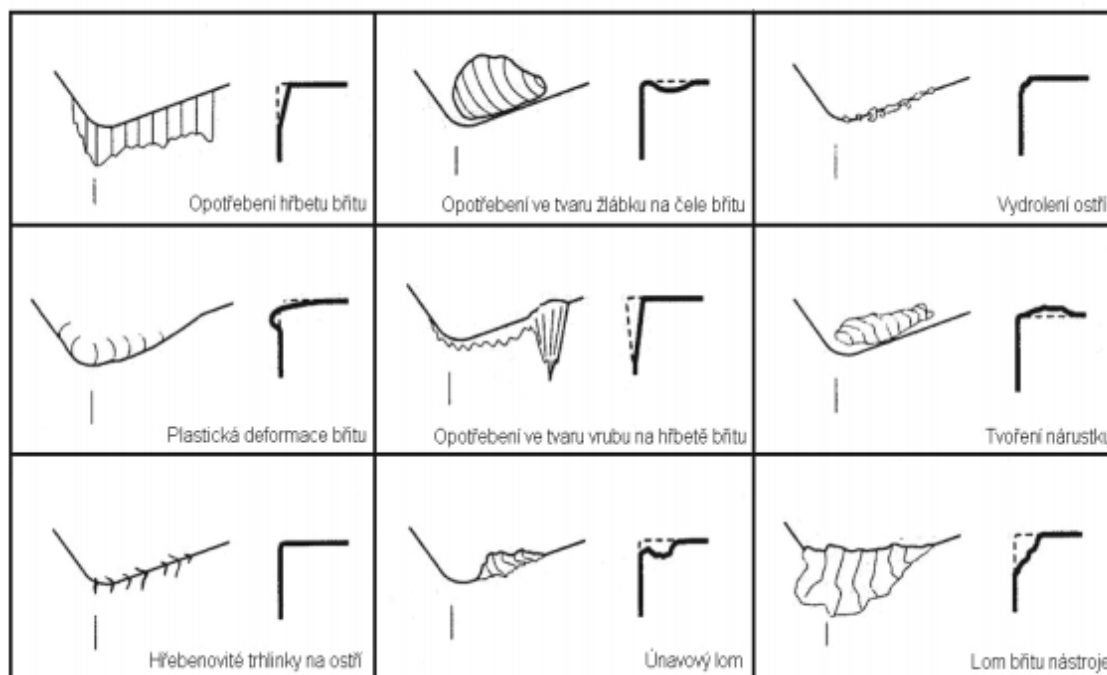
Tvorba nárůstků vzniká při vyšších teplotách, kdy na bříty ulpívají zbytky obráběného materiálu. Mění se tak geometrie bříty a zároveň může dojít k vytržení části bříty. Opět je velmi důležitá dodržet malou afinitu.

Vruby vznikají především v místě průniku vzduchu do místa řezu, přesněji do místa kontaktu boku třísky a břitem. Tento vrub je způsoben adhezí a oxidačním opotřebením. Stejně tak tento vrub může způsobit zpevnění po předchozí operaci na povrchu obrobku.

Plastická deformace bříty vzniká při vysokých teplotách a řezných silách. Tato deformace způsobuje ještě větší nárůst řezných sil s teplotou až do kritického stádia. Charakteristická je změna tváření třísky.

Trhliny jsou důsledkem náhlých tepelných změn (šoků) na ostří. Tyto trhliny přispívají k lomu bříty. Obecně se nedoporučuje chlazení kapalinou, ale spíše se zaměřit na změnu nástroje nebo řezných podmínek.

K vyštipování dochází náhlými změnami řezných sil působících ostří nebo k jeho úplnému zlomení. Zejména pak při přerušovaných řezech.



Obrázek 10: Typy opotřebení bříty [33]

Opotřebení lze sledovat dvěma metodami, a to přímou a nepřímou. Přímé metody spočívají ve sledování a měření rozměrů opotřebení nástroje mikroskopem nebo jiným optickým způsobem. Zatímco metody nepřímé spočívají v přepočtech souvisejících se změnou kvality povrchu, spotřeby energie stroje, změny vzniku třísky, sledování zvukové a tepelné emise z místa řezu, popř. sledování vibrací při obrábění. [16][17][18][20]

4.4 Hodnocení jakosti povrchu

Povrch, jakožto funkční plocha, vzniká při jakémkoliv opracování. Podle účelu použití se při výrobě dosahuje určité jakosti povrchu, kterou lze chápat jako:

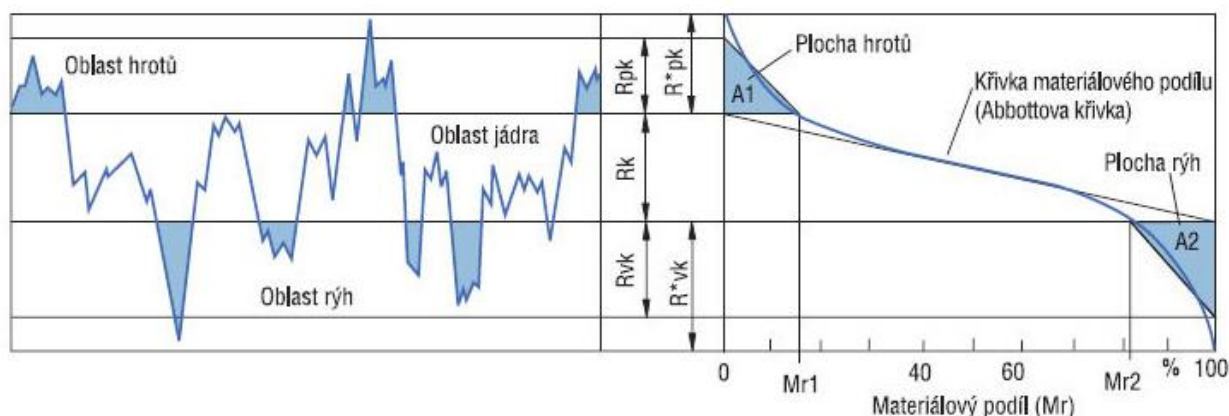
- Rozměrovou a tvarovou přesnost – vychází z přesnosti a tuhosti soustavy SNOP
- Hodnocení drsnosti a mikrostruktury povrchu – ovlivněno především reznými podmínkami a nástrojem
- Vlastnosti povrchové vrstvy – stav obrobku po opracování, sledují se především zbytková napětí, změny struktury a stupeň zpevnění. [35]

Nerovnosti povrchu odpovídají charakteru obrábění a nastaveným podmínkám. Tyto nerovnosti lze teoreticky počítat, ale reálným nerovnostem neodpovídají.

V praxi se pak nejčastěji hodnotí povrch z hlediska jeho tvaru profilu. Tvar tohoto profilu závisí na technologické operaci, ale v zásadě může být periodický (např. soustružení) nebo aperiodický (např. pískování). Pohybem snímače a sledováním jeho výchylek lze získat tento profil, který se nazývá P – profil. Jedná se o průběh, který není filtrovaný o profil vlnitosti W. Filtrací se získá profil R, který je pro strojírenskou praxi nejužitečnější. Profil je měřen v μm . [31]

Základními parametry profilu pak jsou:

- R_a – nejčastěji udávaná hodnota v praxi. Jedná se o aritmetický střed absolutních odchylek profilu od středové čáry profilu, která má určitou délku l_n . Tato hodnota ale nemá velkou vypovídající hodnotu o tvaru profilu.
- R_z – z pěti základních délek získané absolutní hloubky je vytvořen aritmetický průměr
- Abbottova křivka neboli křivka materiálového podílu. Má relativně vyšší vypovídající hodnotu o tvaru povrchu. Tato křivka vystihuje množství ploch hrotů a prohlubní. Čím je strmější, tím více prohlubní (např. trhlin) profil obsahuje. (obr. 11) Pokud bude křivka klesat pomaleji, profil bude mít prohlubní méně. [31][36]



Obrázek 11: Abbottova křivka [31]

4.5 Využití Fe13Cr nástřiků v praxi

Jak již bylo zmíněno, žárové nástřiky se stávají v současné době opravdu velmi populárními. Napovídá tomu i množství článků, které se jimi zabývají. Bohužel, nástřikovým materiálem Fe13Cr se zabývá minimum autorů. Pravděpodobně z toho důvodu, že existují technologicky lepší žárové nástřiky. Například více článků se zabývá nástřiky Stellite, jak jejich aplikací, tak jejich následným zpracováním. Konkrétně k obrábění Fe13Cr nebyly nalezeny žádné publikace.

V současné době probíhá na FST ZČU poměrně rozsáhlý výzkum žárových nástřiků a jejich obrobiteľnosti. Nyní se hlavně zkoumají dva nástřiky, a tím je Fe13Cr a NiCrBiSi. Tato diplomová práce se bude zabývat právě nástřikem na bázi Fe-Cr. Zkušební vzorky dodala pro univerzitu firma Plasma metal.

4.5.1 Popis Fe13Cr a Metcoloy 2

Fe13Cr je označení běžné martenzitické oceli určené k tepelnému zušlechťování, zahrnující žihání, kalení a popouštění. Kalení probíhá při teplotách 980–1065 °C za účelem vzniku austenitu. Následně lze chladit v oleji nebo na studeném vzduchu vzhledem k tloušťce výrobku. Po zakalení a temperování je možné dosáhnout tvrdosti 52 HRC. Je vhodná také k obloukovému svařování nebo kování. [21][22]

Předností této oceli je odolnost atmosférickým vlivům, vodě a některým oxidačním činidlům. Není odolná pak mezikrystalové oxidaci a chloru. Výhoda spočívá i v žáruvzdornosti až do 825 °C, přičemž stabilní mechanické a chemické vlastnosti má do 500 °C za zvýšeného působení páry a síry. [21][22]

Tuto ocel pro žárové nástřiky dodává na především Sulzer Metco s obchodním názvem Metcoloy 2. Chemické složení produktu je téměř identické s ocelí AISI 420 (Tab. 1). Drobné rozdíly ve složení nemají vliv na funkčnost. Jedná se typově o levnější korozivzdorné oceli. (Příloha 1)

Tabulka 1: Složení X20Cr13 (dole) a Metcoloy 2 (nahore)

C	Cr	Ni	Si	Al	S	Mo	Mn	Sn	Cu	P	Fe
0.36	13.87	0.19	0.28	0.005	0.018	0.04	0.52	0.005	0.04	0.019	Rest

Metcoloy2	C	Cr	Ni	Si	Al	S	Mo	Mn	N	Cu	P	Fe
obj. [%]	0,3	13,37	0,3	0,33	0	0	0,09	0,49	0,02	0,06	0,02	85,03

4.5.2 Spolupráce Metco a Folla Tech A.S.

Článek z roku 1998 z časopisu „In the news“ se zmiňuje o úspěšném uskutečnění žárového nástřiku firmou Sulzer Metco pro firmu Folla Tech A.S. v Norsku. Jednalo se o nástřik válce o průměru 1,2 metrů a délce 12 metrů blíž nespecifikovaným materiálem na bázi hliníku a bronzu. Samotné nanášení bylo pro firmu Sulzer Metco výzva, protože k procesu mělo dojít právě ve firmě Folla Tech A.S. metodou nanášením elektrickým obloukem. Následně byla uskutečněna další objednávka žárového nástřiku na 5 metrů dlouhý válec o průměru 1 metr. Zde byla použita již slitina Metcoloy 2 v tloušťce vrstvy 1,7 mm,

kteřá byla následně zbrošena pásovou bruskou s dosažením drsnosti povrchu $Ra\ 0,27\ \mu\text{m}$. Před tím to znamenalo pro firmu Folla tech A.S. posílat válce do Rakouska k přeplátování povrchu, což bylo finančně velmi náročné. Na tomto případě je krásně demontovatelná výhoda možnosti manipulace stroje na žárové nástřiky elektrickým obloukem a také náhrada plátování žárovým nástřikem. [10]

4.5.3 Zkoumání tepelné vodivosti nástřiku Fe13Cr



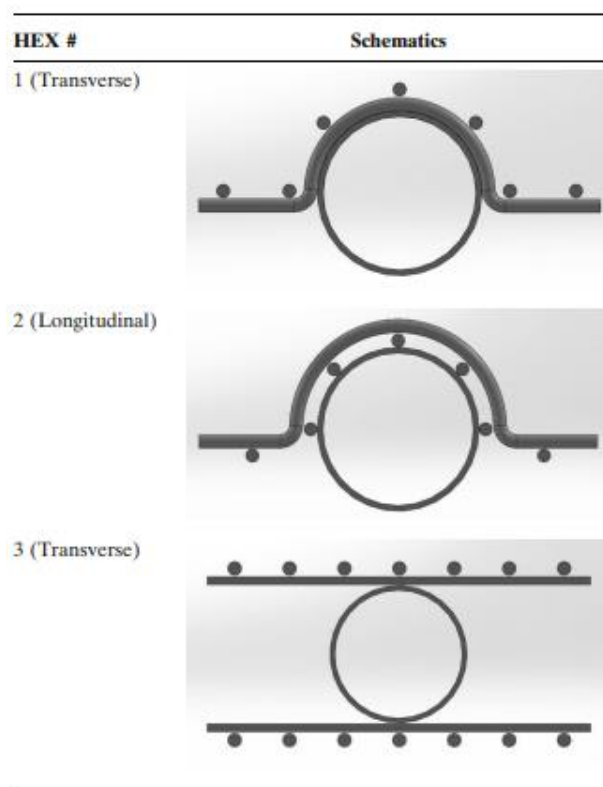
Obrázek 12: Nástřik na trubce HEX 1 [24]

V článku s názvem „Fabrication of Wire Mesh Heat Exchangers for Waste Heat Recovery Using Wire-Arc Spraying“ se autor zabývá vlastnostmi výměníku tepla, kdy povrch výměníku je tvořen trubkami s drátěnou sítí pokrytou nástřikem z Metcoloy 2. Tato konstrukce se zdá být výhodná pro přenos tepla.

Byly zkoumány tři možné vzdálenosti aplikace nástřiku (100, 150, 200 mm), přičemž vzdálenost neovlivňuje teplotu částic roztaveného kovu, ale jejich rychlost dopadu. Bylo prokázáno že se vzrůstající vzdáleností nástřiku roste množství oxidů v povrchu a klesá tak i jeho mechanická odolnost.

Byla vybrána aplikační vzdálenost 150 mm a tři možné typy sestavení trubek s drátěnou sítí. Jednoznačně byla prokázána vyšší účinnost přenosu tepla trubek s drátěnou sítí a nástřikem oproti holým trubkám. Nejlépe ohřívá vnější studené prostředí sestava trubky se sítí HEX 3 (o +68 % oproti holé trubce). Celkově nejefektivněji pak teplo přenášela sestava HEX 1 (o +110 %). (obr.12) [24]

Tento článek sice nesouvisí s obráběním nástřiků, ale dobře demonstruje všestranné využití této technologie. Tento článek sice nesouvisí s obráběním nástřiků, ale dobře demonstruje všestranné využití této technologie.



Obrázek 13: Typy zkoušených aplikací drátěných sítí [24]

4.5.4 Prodloužení životnosti dílů drážních vozidel

V článku „Improving performance and service life of rail vehicles components by twin wire arc spraying“ autoři z VZÚ Plzeň zabývají zlepšením životnosti stupačky pro strojvedoucí na čele lokomotiv pro Škoda Transportation. Díly byly nastříkány různými metodami a různými materiály, a to čistým molybdenem, Fe13Cr a Zn15Al. Obecně je známo že tyto stupačky jsou vystaveny UV záření, oteru chozením, kamínky a vlivy počasí.

Na stupačce s molybdenem byl udělán tříkrát test na součinitel tření podle normy ASTM G 113, kdy 6 mm Fe-Cr kulička vytvářela cyklický pohyb 5 Hz po úsečce délky 10 mm s přítlakem 25 N po dobu 1000 sekund. Výsledek experimentu prokázal dobré kluzné vlastnosti a odolnost proti abrazi, jenž jsou charakteristické pro molybden.

Nástříky stupaček s Fe13Cr a Zn15Al byly podrobeny testu oteruvzdornosti. Podle normy ASTM G65 byl proveden test, kdy byl přiváděn abrazivní písek korundu hrubosti F70 mezi povrch dílce a gumové kolečko přitlačované silou 22 N. Celková dráha kolečka byla 718 m. Test prokázal, že Fe13Cr je lepší, jelikož Zn15Al nástřík byl prodřen až na základní materiál.

Druhý test pro nástříky Fe13Cr a Zn15Al se týkal odolnosti proti erozi povrchu. Erozní medium bylo urychleno na plochu dílce pod různými úhly v cyklech po 2 minutách. Obecně Zn15Al dosáhlo lepších výsledků, protože je houževnatější a tím pádem odolnější proti erozi. Fe13Cr dopadlo hůře, protože je to křehčí nástřík, a tak došlo k většímu úbytku nástříku vlivem působení erozních částic. [25]

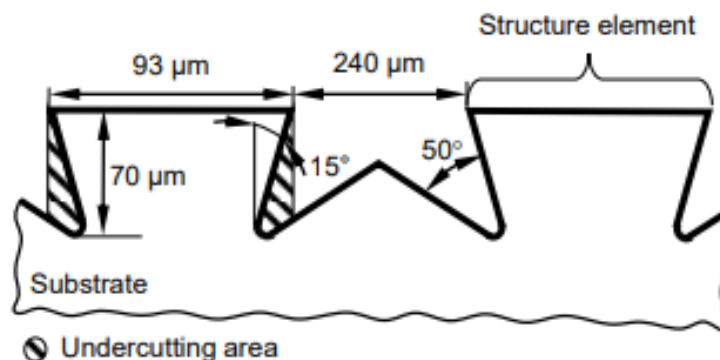
4.6 Soustružení Fe17Cr

Vzhledem k absenci publikací o soustružení Fe13Cr musel být okruh hledání rozšířen na obrábění podobných ocelí, jakou je Fe17Cr. Jedná se o relativně podobnou korozivzdornou ocel s tím rozdílem, že obsahuje 17 % chromu a stává se tak hůře obrobitelnou. Následující dva články „Finish Turning of FeCr17Ni2C0.2 Iron-based Sprayed Coatings: Influences of Substrate Preparation, Cutting Speed and Feed on the Coating and Surface Properties“ a druhý článek „Surface integrity in turning of Fe17Cr2Ni0.2C iron based thermally sprayed coatings with special respect to the influence of the feed“ dobře popisují experimenty při obrábění žárových nástřiků Fe17Cr soustružením.

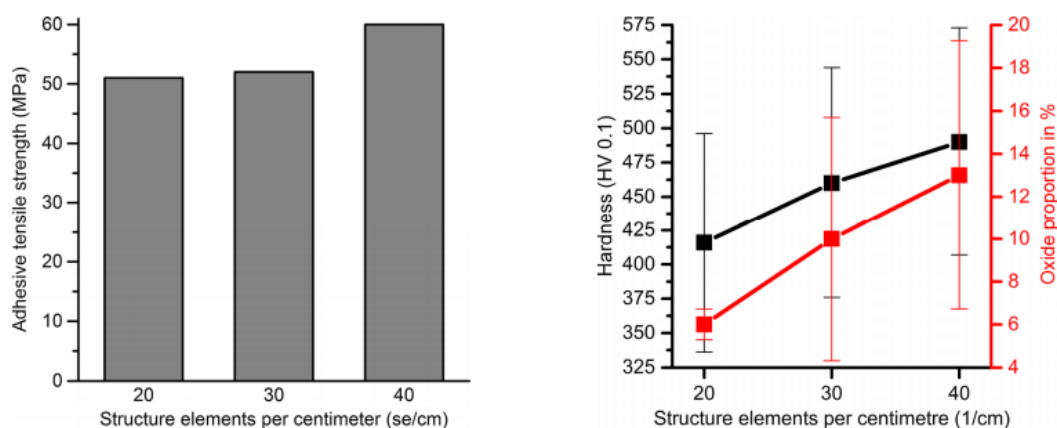
Oba články mají několik společných rysů, jelikož se jednalo o výzkumné publikace stejných autorů na stejné univerzitě. (H. Liborius, A. Nestler, G. Paczkowski, A. Schubert, T. Grund, T. Lampke z Technické univerzity Chemnitz)

- Polotovar – Válec z hliníkové slitiny EN AW-5754 s pr. 50 mm a délkou 50 mm
- Úprava polotovaru – vytvoření mikrostruktury připomínající upínací drážky rybiny.
- Mezivrstva – použití NiAl5 žárového nástřiku elektrickým obloukem pro dosažení lepší soudržnosti.
- Hloubka řezu $a_p = 0,05$ mm
- Nástroj – Soustružnický nůž s VBD PKBN s +90 % boru a kobaltovým pojivem (CCGW 09T304)
- Geometrie nástroje – úhel čela $\gamma = 0^\circ$, úhel hlavního ostří $\kappa_r = 95^\circ$ a rádius špičky $r_e = 0,4$ mm
- Vrchní nástřik – Fe17Cr nanášen plazmatickou metodou.
- Nebyla použita chladicí emulze při obrábění

Polotovar vyrobený z hliníkové slitiny byl opatřen drážkami pro zaručení lepšího ukotvení žárového nástřiku tvořícího mezivrstvu. Klíčový byl výběr nástroje. Dle předchozích zkušeností autorů byl vybrán soustružnický nůž s diamantovou špičkou, úhel špičky nože $\epsilon_r = 50^\circ$, rádius špičky $r_e = 10 \mu\text{m}$ a nastavení ostří $\kappa_r = 95^\circ$ při řezné rychlosti $v_c = 200$ m/min. Hloubka struktury činila $h = 70 \mu\text{m}$ a šířka jednoho elementu $l = 95 \mu\text{m}$. (obr. 14). Dále autoři zjišťovali, jaký vliv má vzájemná vzdálenost elementů na adhezní pevnost, množství oxidů v nástřiku mezivrstvy a tvrdost mezivrstvy. Výsledky jsou patrné z následujících grafů (graf 1). Byla vybrána varianta 30 struktur/cm jako zlatá střední cesta mezi adhezí, množstvím oxidů a mikrotvrdostí. Experimenty obrábění Fe17Cr byly prováděny jen na této geometrické úpravě podkladu. Tvrdost a množství oxidů mezivrstvy také rostou se zvyšujícím se množstvím struktur na centimetr. [26][27]



Obrázek 14: Geometrická úprava polotovaru [26]



Graf 1: Vliv geometrické úpravy na vlastnosti mezivrstvy [27]

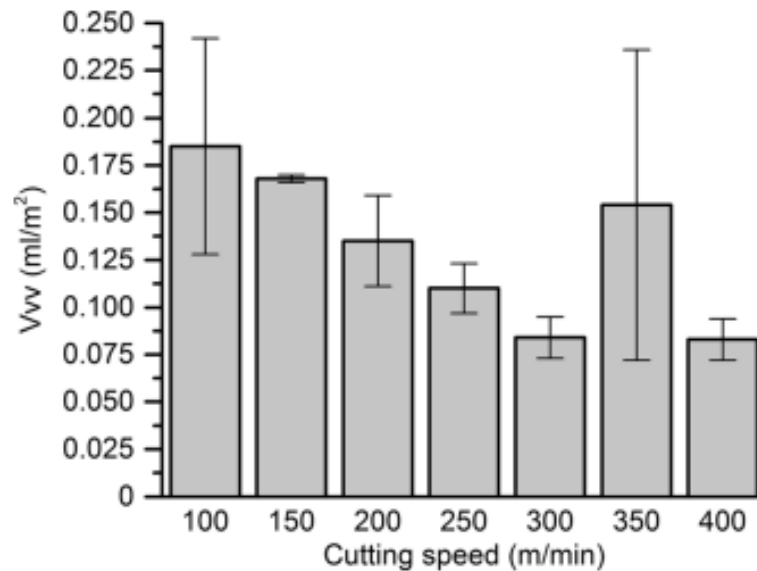
Dále byl vybrán pro experiment dokončovací operace soustružení Fe17Cr výše popsaný nůž s PKBN výměnnou destičkou. Výběr nástroje se zakládá na poznatcích z článku „Study on the Machining of Iron-Based Thermal Spray Coating for Sleeveless Engine Cylinder“ autora K. Ding a spol., jejichž experiment porovnával opotřebení nástrojů z různých materiálů při soustružení nástříků na bázi železa při řezné rychlosti 300 m/min, posuvu 0,25 mm a délce řezu 390 m. PKBN nástroj obstál s opotřebením hřbetu jen 0,1 mm. [28] K zajímavému poznatku došli v článku „Turning of Thick Thermal Spray Coatings“, kde byl soustružen nástřík Metco 450 při jehož obrábění s PKBN destičkou došlo k jejímu chemickému rozpouštění. V podstatě vznikla kyselina boritá, která reagovala za zvýšené teploty (700 °C) se složkami chladicí emulze a vytvořila agresivní soli kovu, které destičku poškodily. Následující dvě kapitoly popisují jednotlivě oba dostupné články H. Liboriuse a spol. [26][27][29]

4.6.1 Vlastnosti povrchu v závislosti na řezné rychlosti

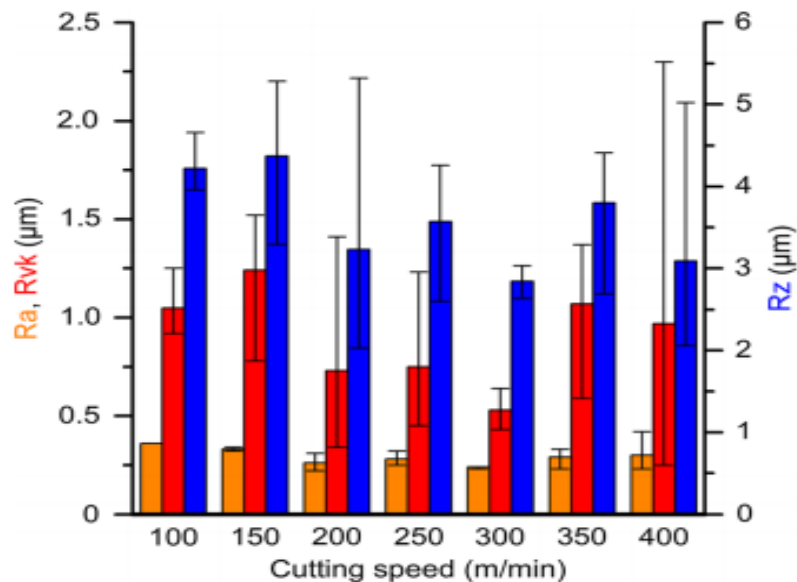
Tato publikace se zabývá vlivem řezné rychlosti na integritu povrchu. Při zkoumání vlivu řezné rychlosti, byla hloubka řezu a posuv konstantní, $f = a_p = 0,05$ mm. Řezná rychlost se pohybovala od 100 m/min to 400 m/min s přírůstkem po 50 m/min. Sledovány byly parametry Ra, Rz, Rvk a Vvv.

Výsledky měření je možné vidět v grafech níže. (graf 2) (graf 3) Trend drsnosti povrchu od 100 do 200 m/min klesá. Od 250 m/min výše se trend nijak výrazně nemění. Přesto při rychlosti 300 m/min bylo dosaženo nejnižších drsností. To by mohlo být vysvětleno částečně protichůdnými možnostmi. Na jednu stranu by to šlo vysvětlit změnou úhlu roviny stříhu v primární oblasti a zároveň zvětšením teploty, což by mohlo mít pozitivní dopad na tvorbu třísky. Na druhou stranu se materiál mohl ještě před primární oblastí vzhledem k jeho mechanickým a strukturálním vlastnostem odtrhávat. Zvyšování řezné rychlosti pak mohlo vést naopak ke snížení teploty a zmenšení úhlu roviny stříhu, což může být také příznivé pro obrábění.

Objem vytrhaných částic má se vzrůstající rychlostí jasně klesající trend do 300 m/min. Při posledních dvou rychlostech vlivem opotřebení nástroje a vysoké teploty v místě řezu množství vytržených částic roste. Při 350 m/min je nejednoznačný výsledek kvůli rozptylu naměřených hodnot. Objem vytržených částic při 400 m/min je jednoznačnější a nízký.



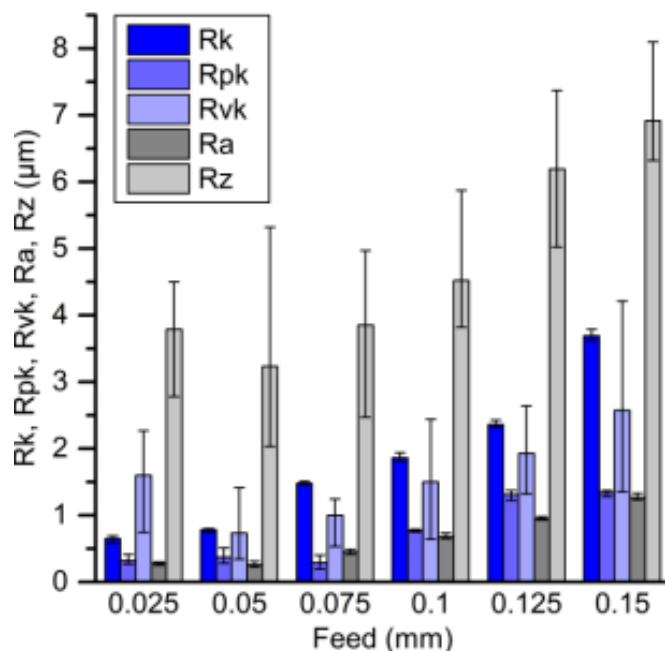
Graf 2: Vliv řezné rychlosti na parametr V_{vv} při obrábění Fe17Cr [27]



Graf 3: Vliv řezné rychlosti na drsnost při soustružení Fe17Cr [27]

Autoři se dle názvu publikace snažili vyhodnotit i vliv posuvu na drsnost povrchu při dokončovací operaci, avšak nepodařilo se vliv zjistit. Závěrem dodali, že řezné rychlosti mezi 200 až 400 m/min by mohly být vhodné pro dokončovací operace a potenciálně nahradit honování. [27]

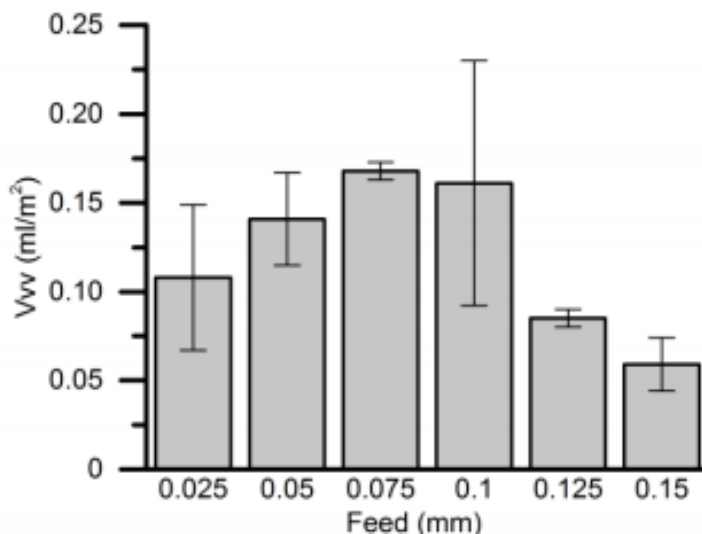
4.6.2 Vlastnosti povrchu v závislosti na posuvu



Graf 4: Vliv posuvu na parametry drsnosti povrchu [26]

Při tomto experimentu byla zachována řezná rychlost 200 m/min a hloubka řezu 0,05 mm. Posuv byl stanoven od 0,025 do 0,15 mm s přírůstkem po 0,05 mm. Opět byly sledovány profily drsnosti R_a , R_z , R_{vk} , R_{pk} , R_k a V_{vv} . Sledováno bylo i opotřebení bříty vzhledem k vzrůstajícímu posuvu.

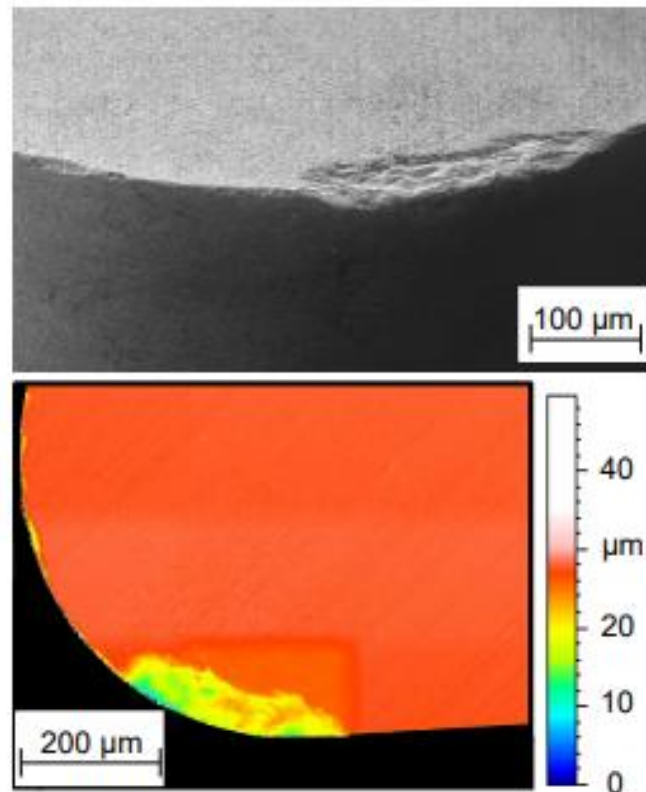
Výsledné drsnostní profily R_a a R_z jsou si trendem podobné, při dvou nejnižších posuvech dosahoval povrch nejnižší drsnosti ($R_a = 0,028 \mu\text{m}$). Pak až do nejvyššího posuvu trend drsností stoupal. Reálný profil R_z je oproti teoreticky vypočítanému o hodně vyšší a mohou za to vytrhané částice povrchu. R_{vk} , jakožto vyjádření oblasti prohlubní Abbotovy křivky, je také ovlivněno vytrhanými částicemi, mezi prvními dvěma posuvy rapidně poklesne, kdy dosáhne u posuvu 0,05 nejmenší hodnoty. Pak už jen stoupá. V_{vv} až do posuvu



Graf 5: Vliv posuvu na parametr V_{vv} [26]

0,1mm stoupá. Poslední dvě hodnoty posuvu vykazují klesající trend. To může být zapříčiněno zvýšenou deformací pod nástrojem v terciální oblasti. (graf 4) (graf 5)

Opotřebení nástroje nebylo znatelné až do posuvu 0,1 mm, kdy u posledních dvou hodnot posuvu činilo opotřebení hřbetu 15 μm . Opotřebení hřbetu bylo foceno pohledem na čelo a měřeno 3D laserovým skenerem (obr. 15). Opět autoři publikace tvrdí na základě získaných dat, že je možné soustružením, jakožto dokončovací operací, nahradit honování.



Obrázek 15: Opotřebení VBD po obrábění Fe17Cr [26]

5 Návrh a realizace experimentu

Primární cílem této diplomové práce je analýza vlastností soustruženého povrchu válce opatřeného vrstvou žárového nástřiku Metcoloy 2. Žárový nástřik bude soustružen v laboratořích ZČU metodou lineární řezné hrany. Zkoumána bude jakost povrchu, opotřebení nástroje a změna rozměrů obrobku v závislosti na řezných podmínkách. Analýzou naměřených dat by mělo být možné vyhodnotit vhodné řezné podmínky a zhodnotit i efektivnost této technologie v porovnání s konvenčně využívanějším broušením povrchu.

S obráběním žárových nástřiků ZČU již delší dobu. Na základě již dříve uskutečněných výzkumů a nashromážděných dat byly odstraněny problémy, které by mohly ohrozit pokračování výzkum. Významným zdrojem informací se pak staly konzultace a dřívější výzkumná správa.

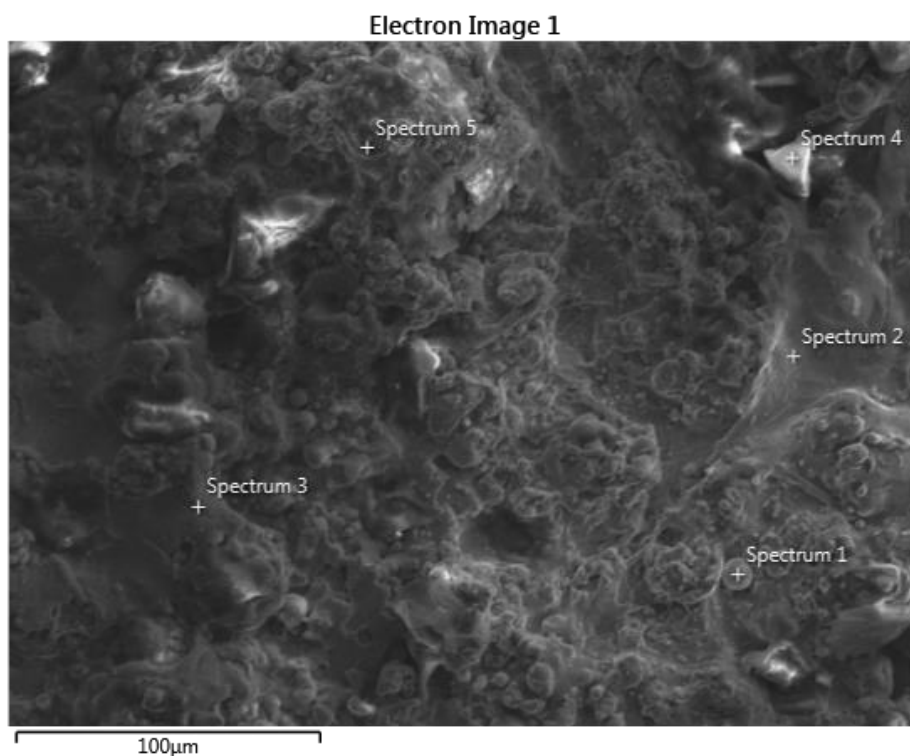
5.1 Získané poznatky

5.1.1 Obrobek

ZČU spolupracuje na tomto projektu s firmou PLASMAMETAL, spol. s r. o. (dále jen Plasmametal) Doporučené technologické parametry nanášení vyústily v nesplnění požadovaných vlastností nástřiku. Firma Plasmametal provedla změny nastavení parametrů při aplikaci nástřiku, které vedly k dosažení mnohem lepších vlastností nástřiku, než je standardem (Tab. 2) Bylo docíleno především vyšší homogenity, velmi nízké hodnoty pórovitosti a malého množství nenatavených částic. Tyto výsledky jsou reprodukovatelné. V současné době Plasma metal dodává polotovary s takto kvalitním žárovým nástřikem Metcoloy 2 pro experimenty ZČU. Zvětšený snímek úlomku nástřiku je tvořen převážně železem a chromem. Nápadný je pak bod Spectrum 4. Jedná se o tvrdý oxid železa, který narušuje homogenitu nástřiku. (Obr. 16)

Tabulka 2: Vlastnosti Fe13Cr nástřiku [32]

	Původní	Po optimalizaci
Strukturní trhliny	0	0
Delaminace struktury	0	0
Deadheze	2,5	0
Kontaminace mezifázového rozhraní	3,5%	1,5%
Pórovitost	3%	Max. 2%
Tvrdość	HV 0,3 385,6	HV 0,3 448
Přilnavost	18,75 Mpa	23,87 Mpa

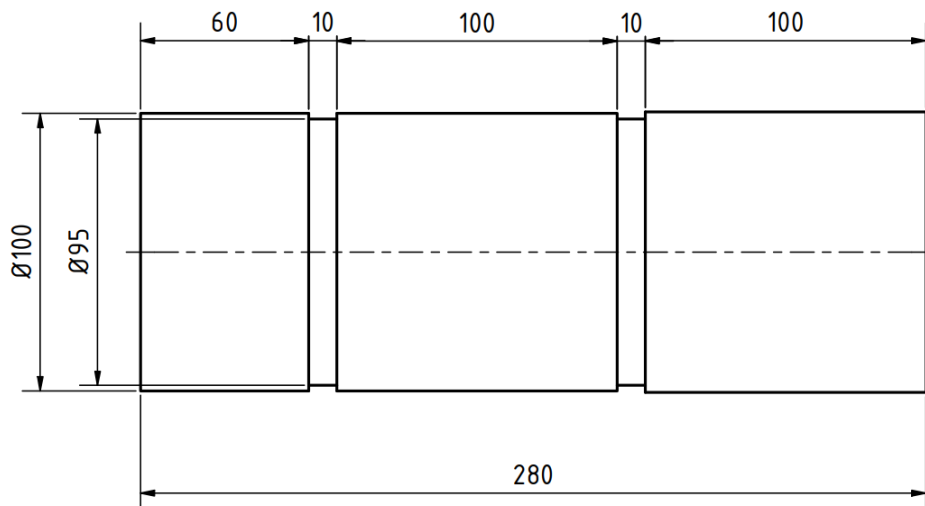


Obrázek 16: Rozbor úlomku Fe13Cr nástřiku

Zajímavé poznatky byly zjištěny při konzultaci s panem Ing. Filipenským. Konzultace se týkala nastavení stroje pro nástřik, přičemž primární vliv na zlepšení struktury má nižší velikost napětí, menší oblouk, vysoký přísun drátu a vyšší proud. Sekundárními parametry jsou tlak vzduchu a vzdálenost. Přesný opak nastavování vede k vyhořívání uhlíku a chromu, kdy se množství chromu může dostat na samotnou hranici zaručené korozivzdornosti nástřiku. Byl použit drát Metcoloy 2 o \varnothing 1,6 mm, který je relativně levný, svůj účel splní velmi dobře, proto nemá cenu kupovat levnější od jiných výrobců.

Žárový nástřik Metcoloy 2 byl nanesen ve čtyřech vrstvách po 0,15mm. Finální tloušťka tedy činila 0,45 mm. Tato tloušťka je určena pro soustružení, pro broušení se používají údajně tenčí vrstvy. Jako pojící mezivrstva byl použit také žárový nástřik NiCr, tvořený 80 % niklem. Jiné druhy mezivrstev nevyhovují požadavkům na adhezi.

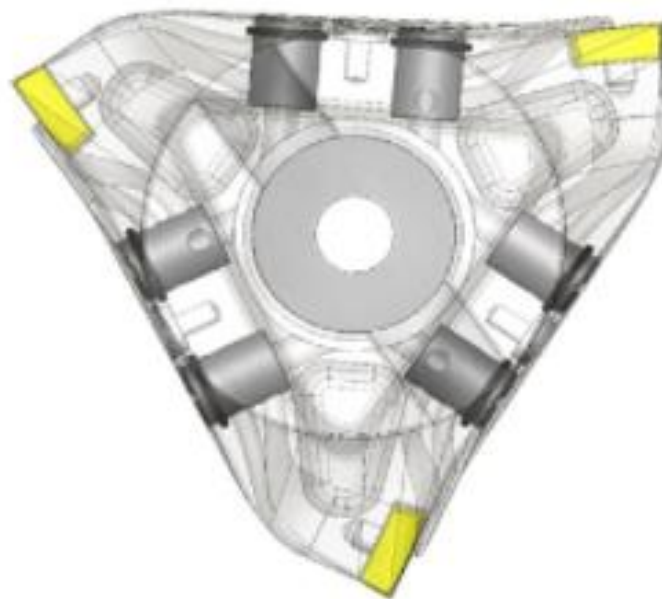
Dřívější experimenty ZCU ukázaly, že původní délka polotovaru 500 mm je nevyhovující, jelikož celá soustava SNOP je pak méně tuhá a při určitých řezných podmínkách se mohou . Pro náš experiment byly vytvořeny polotovary kratší celkové délky $L = 280$ mm a průměru $D = 100$ mm. Polotovary jsou tvořeny dvěma plochami určených k obrábění délky $l = 100$ mm, oddělenými zápichy 10 mm. Polotovar je z pravé strany opatřen důlkem pro podepření hrotem. (Obr. 17)



Obrázek 17: Polotovary pro nástřik Fe13Cr [32]

5.1.2 Řezný nástroj

Pro soustružení lineární řeznou je potřeba mít speciální nástroj, resp. držák břitových destiček. Tento speciální držák byl vytvořen již dříve na ZČU pomocí 3D tisku kovových materiálů. Tento nástroj disponuje hned několika výhodami. Váha držáku VBD je ovlivněna především vnitřní odlehčenou strukturou a kanálky pro přívod chladicí kapaliny do místa řezu. Nízká váha nástroje má pozitivní dopad na stabilitu obrábění a zároveň zachování tuhosti soustavy. Výstupy z chladicích kanálků jsou regulovatelné šrouby přímo na nástroji. Trysky pro chlazení poskytují chlazení ze všech stran VBD. Nástroj lze využít i pro frézování, jelikož má 3 stejné prvky duplikované kolem středové osy upnutí. Výhodou je i rychlá záměna břitu při soustružení bez nutnosti měnit VBD, stačí otočit frézovacím vřetenem. Destička je oproti spojnici se středem držáku vytočena o $+30^\circ$. To znamená, že pro dosažení úhlu $\lambda_s = 50^\circ$ se v NC kódu nastavuje vytočení frézovacího vřetenem jen o úhel $+20^\circ$. Dále aby byla VBD v ose s osou obrobku, musí být frézovací vřeteno posunuto v ose Y (Obr. 18).




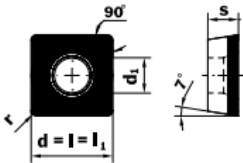
Obrázek 18: Pohled shora na držák VBD [32]

Důležitý je i výběr VBD. Destička musí splňovat parametry pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů výkonnými metodami (HSC, HFC) a navíc musí být určena pro obrábění lineární řeznou hranou. Předchozí experimenty v laboratořích testovaly i vhodnost různých druhů VBD pro tento účel. Komerčně dostupné Iscar VBD se slinutého karbidu určené pro ISO H byly téměř okamžitě zničeny abrazivními účinky nástřiku a na zakázku zhotovené destičky s KBN pájeným segmentem také neobstály z hlediska konstrukce a vyštipování. Destička s full face pájeným PCBN segmentem obstála nejlépe. Pro experiment této diplomové práce byly vybrány dva typy této destičky, s fazetou 5° a 10° o délce 0,1mm. Destičku vyrábí značka BONAR a má označení SCMW-F 09T304 BBW85. Tato destička je tvořena z 85% 1-2 μm zrní boru spojenými AlWCoB pojivem. Dle výrobce se jedná o univerzálnější VBD vhodnou jak pro dokončování, tak pro hrubování v přerušovaném řezu. [43]

SCMW-F
SCGW-F

Full face



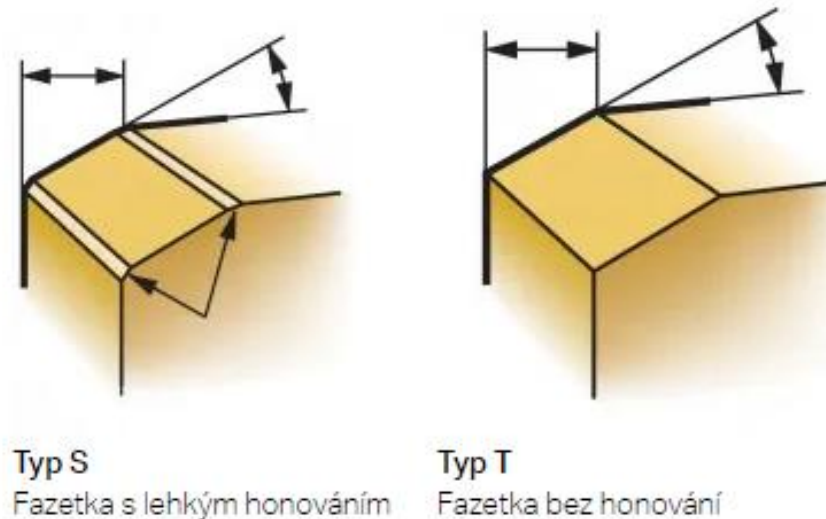


$d = l = l_1$

velikost VBD	řezná hrana	materiál PCBN					velikost [mm]					
		BBN45	B2C50	BBX65	BBW85	BMB90	d	d1	s	l	l1	r
09T304	o				o		9,525	4,4	3,97	9,5		0,4
09T308	o				o	0,8						
120404	o			o			12,7	5,5	4,76	12,7		0,4
120408	o			o		0,8						

Obrázek 19: Náhled z katalogu BONAR [43]

Fazetka je poměrně důležitý geometrický prvek bříty. Opatření bříty fazetkou by mělo vést k snížení řezných sil působících na ostří. Dále fazetka přispívá k houževnatosti bříty. Např. firma Coromant Sandvik nabízí VBD fazetkami 0,2 mm a úhlem až 35°, které jsou vhodné zejména pro přerušované řezy a vyrábí dva typy fazetek. Typ S má fazetku honovanou, která lépe odolává právě přerušovaným řezům a umožňuje větší hloubky řezu. Fazetka typu T je vhodnější pro dokončovací operace s požadavkem vysoké kvality obrobené plochy. Ukázky fazetek níže. [41][42]



Obrázek 20: Fazetky nabízené firmou Sandvik Coromant [42]

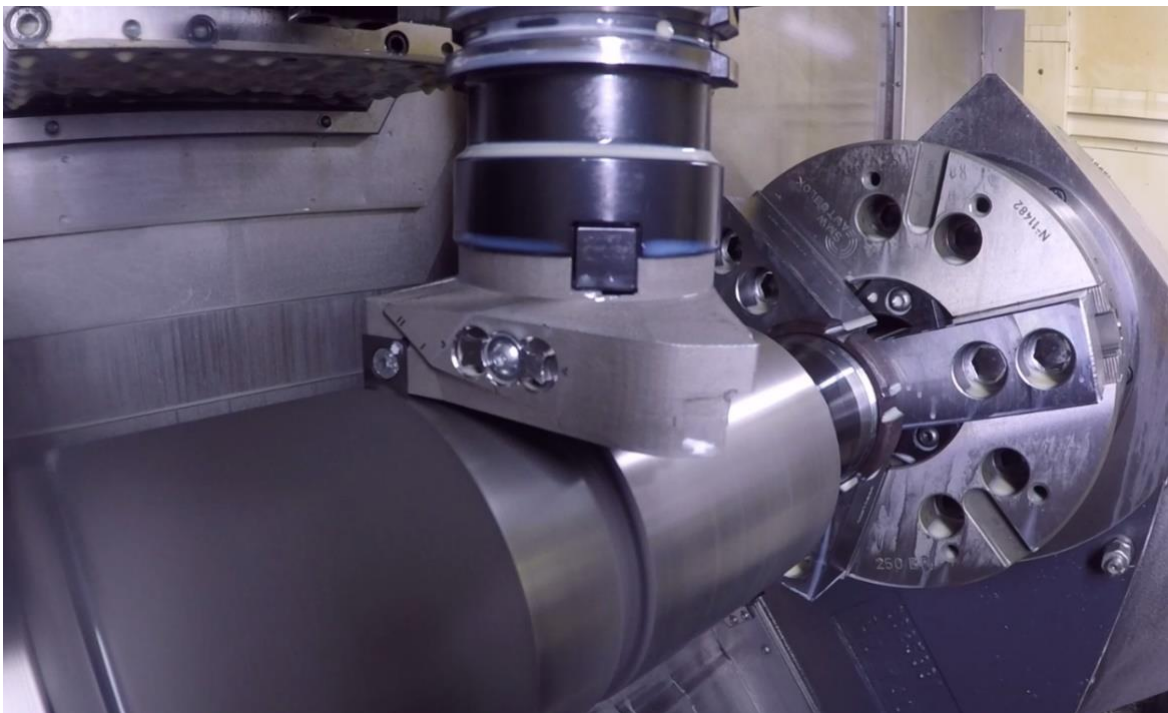
5.1.3 Obráběcí stroj a přípravek

Laboratoře ZČU disponují 5ti - osým CNC soustruhem DMG Mori CTX Beta 1250. Jedná se o moderní výkonný stroj s velmi dobrými možnostmi pro obrábění. Výhodou poháněného vřetena je možnost použít právě výše zmíněný držák VBD buď pro frézování, nebo na soustružení lineární řeznou hranou. Další výhodou je možnost posuvu v ose Y pro posun ostří a využití celé délky řezné hrany. Polohovací přesnost stroje dosahuje méně než 6 μm s opakovatelnou přesností méně než 2 μm . Parametry tohoto stroje jsou popsány v tabulce níže. Pohled do pracovního prostoru je zobrazen na obrázku. [37]

Přípravkem pro podepření obrobku je běžný otočný hrot upnutý do sklíčidla protivřetena. Tento hrot může být méně tuhý a náchylnější ke vzniku vibrací než pevný hrot upnutý do protivřetena. Tím jsme si pravděpodobně vnesli faktor, jak se pak dále dozvíme. Pevný hrot a roztáčení protivřetena by byla lepší volba pro tužší SNOP.

Tabulka 3: Parametry stroje CTX Beta

Pracovní prostor	
Max. délka soustružnické	500 mm
Max. soustružený průměr	1 200 mm
Zdvih v ose Y	± 120 mm
Rozsah naklápění v ose B	± 110°
Pohyb v X/Y/Z	490 (+480, -10) / ± 125 / 1 300 mm
Hlavní vřeteno	
Max. ot. vřetena	5 000 ot/min
Výkon vřetena	33 kW
Krouticí moment	580 Nm
Frézovací vřeteno	
Max. ot. frézovacího vřetena	20 000 ot/min
Krouticí moment	87 Nm
Protivřeteno	
Max. ot. protivřetena	6 000 ot/min
Výkon vřetena	25 kW
Krouticí moment	280 Nm



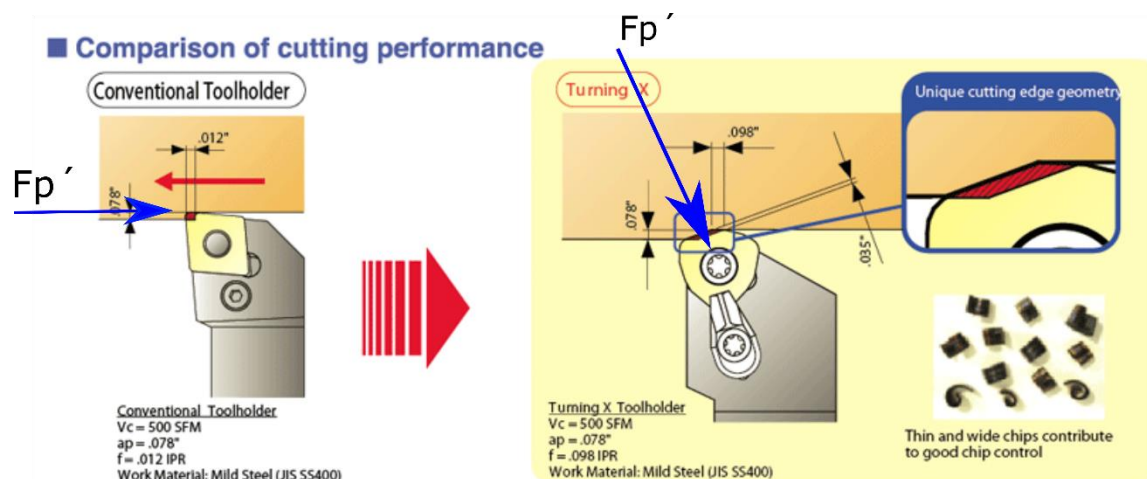
Obrázek 21: Pracovní prostor CTX Beta 1250

5.1.4 High Feed Turning

Efektivnost obrábění spočívá v co možná nejkratším čase dokončit danou obráběnou plochu. Současným trendem jsou technologie HSC (vysokorychlostní obrábění) a HFC (vysokoposuvové obrábění), které umožňují dokončení plochy ve zlomku času, co konvenční technologie. Z různých katalogů CBN destiček určených pro ISO H (kalené oceli) vyplynulo, že málokterá VBD je vhodná pro posuvy vyšší než $f = 0,4$ mm, a pokud ano, tak na úkor

řezných podmínek nebo její životnosti. Proto při tomto experimentu lze hovořit o vysoko posuvovém obrábění

Vysokoposuvové obrábění funguje na principu snížení hloubky řezu a_p a zvýšení posuvu f . Aby bylo toto možné, musí být zvolen i specifický tvar ostří. Především úhel κ_r nabývá malých hodnot. Zároveň se mění i orientace řezného odporu F_p' (označena modře v Obr. 22), který se při této metodě přiklání o ose držáku VBD. Soustava SNOP v tomto směru vykazuje vyšší tuhost, proto je tento způsob obrábění vhodný i pro delší a úzké nástroje.



Obrázek 22: Porovnání běžného a HFC obrábění [40]

Vcelku snadno si můžeme nyní spočítat, jak vysoké by mohly být teoretické nerovnosti po dokončovacím soustružení běžné karbidové destičky a jak velké v porovnání s HFC lineární řeznou hranou. Vzorec pro výšku nerovností běžného soustružení doplníme o hodnoty běžné VBD CCMT 09T308-SM IC807.

$$R_{Z kin} = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} = \frac{0,125^2}{8 \cdot 0,8} = 2,44 \mu m$$

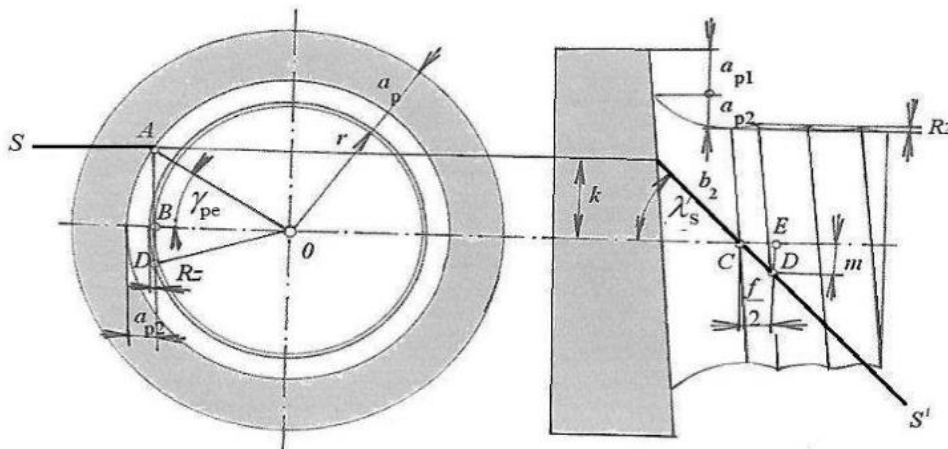
Následně dosadíme hodnoty našeho experimentu do vzorce pro výpočet teoretické výšky nerovností při obrábění lineární řeznou hranou.

$$R_{Z kin} = \frac{f^2 \cdot tg \lambda_s}{4 \cdot D} = \frac{0,8^2 \cdot tg 50^\circ}{4 \cdot 100} = 1,91 \mu m$$

Z výsledků je patrné, že teoretická výška nerovností při soustružení lineární řeznou hranou je nižší než u běžného soustružení. Snížení výšky nerovností u běžného soustružení lze docílit VBD tzv. wiper úpravou vedlejšího ostří, avšak stále nedosáhne tak vysokých posuvů jako u lineární hrany.

Na základě dřívějších testů bylo zjištěno, že soustružení lineární řeznou hranou umožňuje technologii vysokoposuvového obrábění. Lze říct, že se zvyšujícím úhlem sklonu ostří λ_s roste velikost nerovností. Na druhou stranu se zvyšujícím se průměrem obrobku D velikost nerovností klesá. Tuto závislost vyjadřuje popsany vzorec a obrázek (Obr. 23). Autor článku, ze kterého bylo čerpáno, došel k závěru na základě jeho poznatků, že metoda obrábění lineární řeznou hranou umožňuje hrubování i dokončování s uspokojivými výsledky, a to se

stálým posuvem. Dále dodává, že tato technologie by mohla být vhodná pro obrábění nehomogenních materiálů, jako jsou např. kompozity. [38]



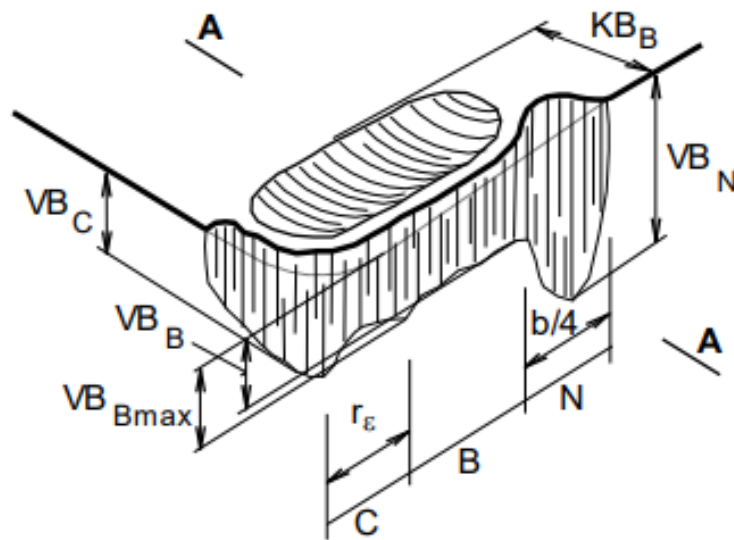
Obrázek 23: Výška $R_{z_{kin}}$ při soust. lin. řez. hr. [38]

5.1.5 Měření profilu povrchu

Měření profilu probíhá v laboratořích ZČU pomocí profiloměru HOMMEL – ETAMIC C8000. Měřicím snímačem je pak čidlo TKU300 se špičkou $2 \mu\text{m}$ a maximálním měřicím rozsahem $800 \mu\text{m}$. Měření spočívá v tažení hrotu po povrchu a zaznamenávání hodnot nerovností. Dráha tažení je pak $L_t = 4,8 \text{ mm}$, rychlost $v_t = 0,5 \text{ mm/s}$ a zaznamenáváno bylo 9600 hodnot v jednom přejezdu. Profil byl následně filtrován s ISO 16610-31 pro získání R profilu z P profilu. Měření probíhalo jen na třech místech vzorku, a to zhruba za začátku dráhy, uprostřed a na konci dráhy nástroje. Výstupem byly R, P hodnoty, průběh jejich profilů a Abbottova křivka.

5.1.6 Měření opotřebení VBD

Opotřebení VBD bylo měřeno digitálním mikroskopem KEYENCE VHX - 6000 s možností odměřování vzdáleností pomocí softwaru. Byly vždy vytvořeny dva snímky, jeden v pohledu čelem VBD ke kameře, druhý hřbetem pod úhlem -14° , což je součet dvou úkosů paty VBD. Na výstupních obrázcích jsou pak kótou značena opotřebení pro jednotlivé řezy. Dále na obrázku níže je možno vidět způsob značení opotřebení dle ISO. (Obr. 24)



Obrázek 24: ISO značení opotřebení V_B a K_B [20]

5.1.7 Měření kuželovitosti

Kuželovitost obrobku byla měřena běžným třmenovým mikrometrem na třech místech. Opět zhruba na začátku, na středu a na konci dráhy nástroje. Naměřené rozměry nám dávají povědomí o tom, jak se mění průměr obrobku vzhledem k např. opotřebení nebo odtlačení nástroje, tuhosti. Toto měření lze považovat pouze za informativní, protože v dané části obrobku bylo vždy jen jedno měření. Výsledný rozměr obrobku by měl činit $D = 101,25$ mm.

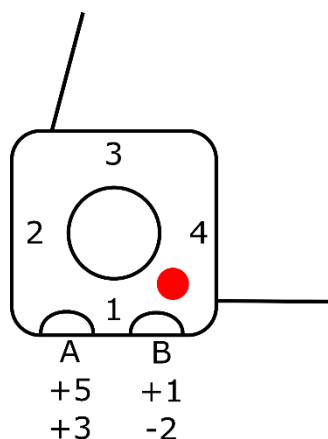
5.2 Plán experimentu

Po předchozích zkušenostech se soustružením Metcoloy 2 nástřiku byly zjištěny podmínky, při kterých je možné bez výrazných problémů provádět tento experiment. Na základě těchto poznatků bylo rozhodnuto vytvořit řezné podmínky, které by variovaly 5 faktorů o dvou úrovních, aby bylo možné přiblížit se efektivnějšímu procesu obrábění. Variovala se řezná rychlost v_c 150 m/min a 250 m/min, posuv na otáčku $f = 0,4$ mm a 0,8 mm, fazetka -5° a -10° , celkový úhel ostří λ_s 50° a 70° , zapnuté nebo vypnuté chlazení řezu emulzí. Tabulka níže zobrazuje celý plán. (Tab. 4)

Tabulka 4: Plán experimentu

Plán Experimentu								
č. kusu	posuv f	rychlost vc	Sklon λ_s	VBD	Chlazení	Y osa	č. VBD	Místo řezu
1	0,4	150	50°	(-5°)	ano	(+5)	2,1	Hrot
2	0,4	150	50°	(-5°)	ne	(+1)	2,1	Vřeteno
3	0,4	150	50°	(-10°)	ano	(+5)	2,1	Hrot
4	0,4	150	50°	(-10°)	ne	(+1)	2,1	Vřeteno
5	0,4	150	70°	(-5°)	ano	(+3)	2,2	Hrot
6	0,4	150	70°	(-5°)	ne	(-2)	2,2	Vřeteno
7	0,4	150	70°	(-10°)	ano	(+3)	2,2	Hrot
8	0,4	150	70°	(-10°)	ne	(-2)	2,2	Vřeteno
9	0,4	250	50°	(-5°)	ano	(+5)	2,3	Hrot
10	0,4	250	50°	(-5°)	ne	(+1)	2,3	Vřeteno
11	0,4	250	50°	(-10°)	ano	(+5)	2,3	Hrot
12	0,4	250	50°	(-10°)	ne	(+1)	2,3	Vřeteno
13	0,4	250	70°	(-5°)	ano	(+3)	2,4	Hrot
14	0,4	250	70°	(-5°)	ne	(-2)	2,4	Vřeteno
15	0,4	250	70°	(-10°)	ano	(+3)	2,4	Hrot
16	0,4	250	70°	(-10°)	ne	(-2)	2,4	Vřeteno
17	0,8	150	50°	(-5°)	ano	(+5)	3,1	Hrot
18	0,8	150	50°	(-5°)	ne	(+1)	3,1	Vřeteno
19	0,8	150	50°	(-10°)	ano	(+5)	3,1	Hrot
20	0,8	150	50°	(-10°)	ne	(+1)	3,1	Vřeteno
21	0,8	150	70°	(-5°)	ano	(+3)	3,2	Hrot
22	0,8	150	70°	(-5°)	ne	(-2)	3,2	Vřeteno
23	0,8	150	70°	(-10°)	ano	(+3)	3,2	Hrot
24	0,8	150	70°	(-10°)	ne	(-2)	3,2	Vřeteno
25	0,8	250	50°	(-5°)	ano	(+5)	3,3	Hrot
26	0,8	250	50°	(-5°)	ne	(+1)	3,3	Vřeteno
27	0,8	250	50°	(-10°)	ano	(+5)	3,3	Hrot
28	0,8	250	50°	(-10°)	ne	(+1)	3,3	Vřeteno
29	0,8	250	70°	(-5°)	ano	(+3)	3,4	Hrot
30	0,8	250	70°	(-5°)	ne	(-2)	3,4	Vřeteno
31	0,8	250	70°	(-10°)	ano	(+3)	3,4	Hrot
32	0,8	250	70°	(-10°)	ne	(-2)	3,4	Vřeteno

Důležité je poznamenat, že ke každému pokusu na vzorku je přiřazena jedna část řezné hrany. Každá hrana destičky obsahuje dvě místa určená pro řez. To znamená, že jedna destička může vykonat osm jednorázových řezů. Při pohledu na čelo destičky je možné vidět označení lihovým fixem. Ve směru hodinových ručiček se označuje, o kolikátou se jedná hranu.



Obrázek 25: Způsob značení VBD

Značení destiček se může zdát poněkud komplikovanější. Níže je popsáno, jak se v tomto systému značení vyznat:

- Číslo na první pozici ve sloupci VBD označuje číslo destičky daného typu. Takže byly použity dva kusy destičky s fazetkou - 5° označené č.2.x a č.3.x, a dva kusy destičky s fazetkou - 10° označené č.2.x a č.3.x.
- Druhá pozice ve sloupci VBD označuje čtyři použité hrany v řezu.
- Pozice A odpovídá posunutí v Y +5 a +3 (vřeteno více k obsluze), pozice B odpovídá posunutí +1 a -2 milimetrů (vřeteno více do stroje).

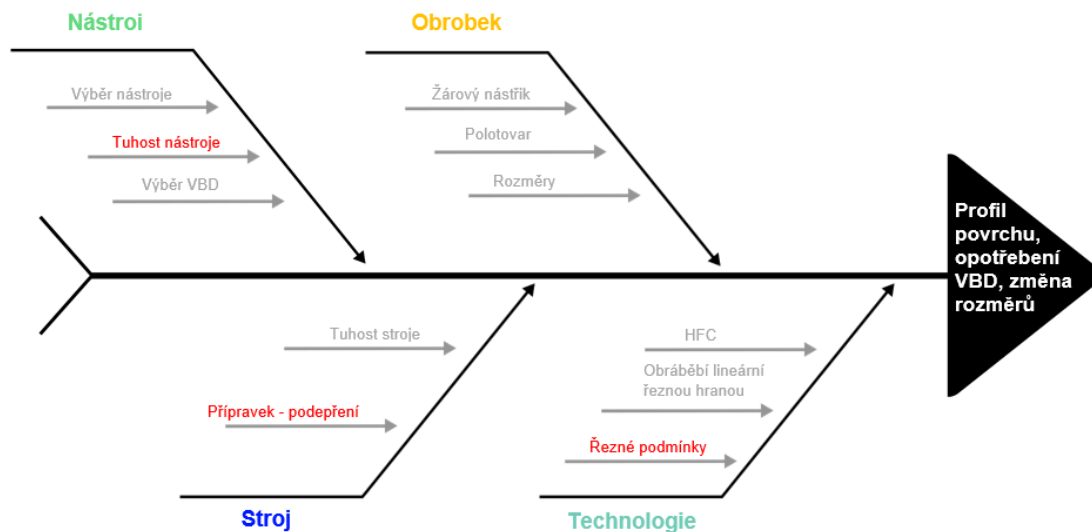
Na jedné ploše byly provedeny vždy dva řezy, kdy první hrubovací řez o hloubce $a_p = 0,2$ mm srovnal obrobek a odstranil vnější vrstvu nástřiku. Druhý řez o hloubce $a_p = 0,05$ mm byl dokončovací. Výsledný průměr obrobeného válce by měl být 101,25 mm. Po otočení je VBD dotahována do lůžka držáku. Zaměření špičky nástroje po každém obrobení neprobíhalo. Údajně je možné, aby se destička vracela na své původní místo s přesností maximálně do jedné setiny milimetru.

5.2.1 Vnesené faktory

Na základě plánu experimentu je patrné, že byly vneseny další faktory, které mohou ovlivnit výsledek obrábění. Pro přehlednější pohled na tyto faktory byl vytvořen diagram rybí kosti neboli Išikawův diagram (Obr. 26). Červeně jsou v diagramu značeny tyto vnesené faktory. Podle plánu experimentu je patrné, že se tyto vnesené faktory opakují společně, což je relativně výhodné, protože se projevují společně a je možné očekávat jejich projev. Horší by bylo, kdyby se tyto vnesené faktory byly nahodilé. Nevýhodou je ale jejich přítomnost celkově.

Pro přechod mezi polohou A a B je nutné posunout vřeteno v ose Y o několik milimetrů v závislosti na úhlu ostří λ_s . U úhlu 70° jsou to -2 a +3 mm, u úhlu 50° jsou to +1 a +5 mm v ose Y. Tím si vlastně nepřimo vnašíme další faktor, který by teoreticky mohl ovlivnit proces obrábění. Zvětšení vzdálenosti mezi středem upnutí nástroje do frézovacího vřetene a místa řezu může vést např. ke snížení tuhosti SNOP a vzniku vibrací nebo odtlačování nástroje.

Dále všechna obrábění s chladicí kapalinou jsou na ploše blíže k hrotu upnutému do protivřetena. Na straně podepření může obrobek vykazovat menší tuhost vůči obráběnému rotačnímu tělesu. Problémem může být i samotný typ hrotu. Otočné hroty s ložisky mohou být opět méně tuhé oproti pevným hrotům. Mohou za to kuličky v ložiskách, které musí mít určitou vůli, aby se mohla ložiska točit. Dále může dojít k rozkmitání soustavy, když se vhodně setkají malé amplitudy i jiných dalších zdrojů kmitání.



Obrázek 26: Išikawův diagram

6 Analýza naměřených dat

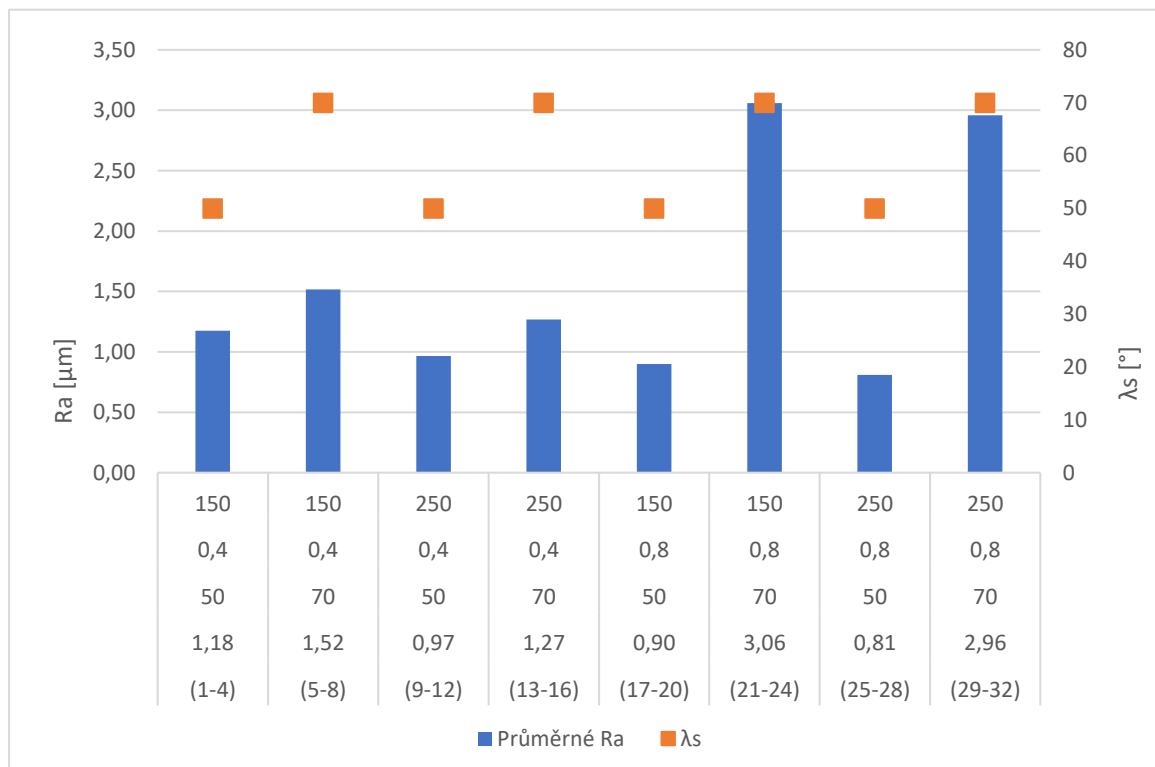
Nejprve by bylo dobré zmínit, jakým způsobem se budou data hodnotit. V úvahu připadá použití matematických analýz, které by daly váhu jednotlivým vlivům. V našem případě se ale jedná o experiment, který by měl spíše vytřídit vhodné rezné podmínky a ty méně vhodné a zjistit, jaký faktor, co způsobuje. Hodnocení bude probíhat slovně a objektivně, na základě získaného povědomí o problematice tohoto tématu a logickým zdůvodněním, proč daný jev nastal. Hodnocení bude rozděleno do tří podkapitol, kde každá zvlášť se bude popisovat naměřené výsledky drsnosti, opotřebení bříty a kuželovitosti vzhledem k vstupním faktorům a jejich úrovním.

6.1 Naměřené hodnoty drsností R_a

Tabulka 5: Změřené hodnoty R_a

Naměřené drsnosti R_a [μm]				
č. kusu	1	2	3	Drsnost R_a
1	1,3	2,2	0,9	1,47
2	1,3	1,1	1,0	1,13
3	1,2	1,0	1,1	1,10
4	1,1	1,1	0,8	1,00
5	3,1	3,2	3,3	3,20
6	0,7	0,8	0,9	0,80
7	1,1	1,3	1,6	1,33
8	0,6	0,8	0,8	0,73
9	1,2	0,8	0,9	0,97
10	0,8	1,4	1,5	1,23
11	0,8	0,7	0,8	0,77
12	0,9	0,9	0,9	0,90
13	0,9	0,7	0,9	0,83
14	1,8	1,2	1,3	1,43
15	1,2	1,0	1,1	1,10
16	2,1	1,4	1,6	1,70
17	0,9	1,4	1,0	1,10
18	0,9	0,8	0,7	0,80
19	0,8	1,2	0,8	0,93
20	0,8	0,9	0,6	0,77
21	5,6	5,2	4,6	5,13
22	2,0	2,0	1,9	1,97
23	2,2	2,4	2,5	2,37
24	2,3	3,0	3,0	2,77
25	0,9	1,1	0,7	0,90
26	0,9	0,5	0,8	0,73
27	0,9	1,0	0,7	0,87
28	0,9	0,7	0,6	0,73
29	3,7	3,7	3,6	3,67
30	4,3	2,4	5,8	4,17
31	1,8	1,8	2,0	1,87
32	3,0	2,0	1,4	2,13

Tabulka výše obsahuje nejdříve tři naměřené hodnoty pro každý kus, které jsou aritmeticky zprůměrované ve výslednou drsnost R_a . Pro lepší přehlednost bylo provedeno barevné škálování výsledných hodnot. Při prvotním ohledání je možné spatřit, že některé hodnoty drsností R_a jsou poměrně nízké.



Na první pohled se zdá být nejvíce patrný vliv úhlu ostří λ_s a posuvu f . Tabulka níže udává průměrné hodnoty vždy čtyř posuvů, se stejným úhlem ostří, ale ostatní řezné podmínky jsou jiné. Vzhledem k tomu, jak je sestavený plán experimentu, vychází průměrování vždy po čtyřech řezech, tzn. průměrné hodnoty z č. kusů 1 až 4, 5 až 8 atd.

6.1.1 Vzorky č. 5 - č. 8

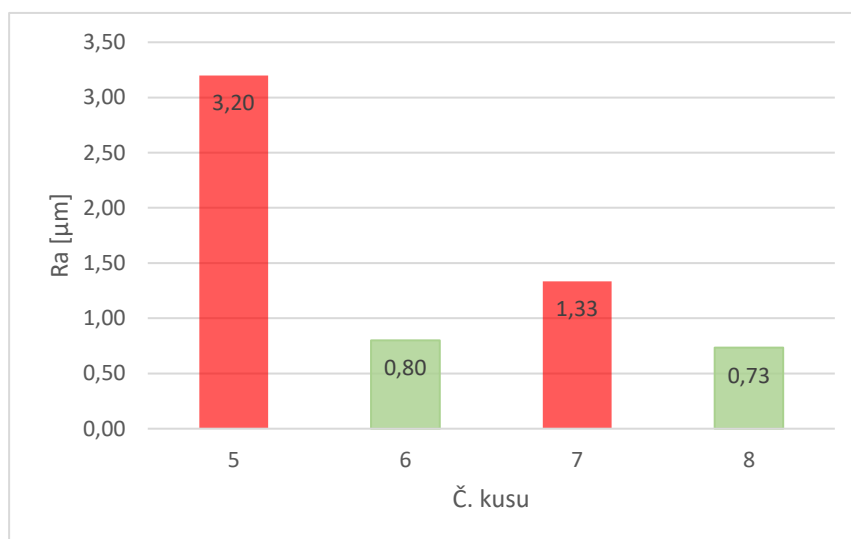
Obecně by se tedy dalo tvrdit, že lepší kvality povrchu lze dosáhnout při $\lambda_s = 50^\circ$ než při $\lambda_s = 70^\circ$ (Tab. 6). To však ale neplatí pro některé jednotlivé hodnoty R_a . Průměrování hodnot R_a skrylo některé poměrně zajímavé výkyvy. Nyní si ukážeme, kde tyto nečekané výkyvy vznikly vzhledem předchozímu způsobu hodnocení vlivu úhlu λ_s .

Graf ukazuje nezprůměrované drsnosti R_a vzorků 5 až 8, které odpovídají v předchozím grafu druhému modrému sloupci. Červeně značené sloupce odpovídají zapnutému chlazení a posuvu v Y o +3 mm. Zelené sloupce pak odpovídají posuvu v Y o -2 mm a vypnutému chlazení. U měření 5 a 6 je fazetka -5° a u zbylých dvou -10° . Konstantní je pak řezná rychlost $v_c = 150$ m/min a posuv $f = 0,4$ mm. Doprovodná tabulka popisuje data v grafu.

Nyní nastává otázka, co mohlo takové výkyvy způsobit? V zásadě by tyto výkyvy mohly odpovídat právě zapnutému nebo vypnutému chlazení, nebo posunu v ose Y.

- Když je nástroj posunut o + 3 mm, zvětšuje se vzdálenost mezi místem řezu a středem frézovacího vřetena a VBD řeže více ke vnější špičce. Může se tak snížit tuhost SNOP
- Dále chlazení může nepříznivě ovlivnit tvorbu třísky, pokud je teplem vznikajícím v řezu zvyšována plasticita obráběného materiálu.
- Další faktor, který byl zpozorován a jedná se vnesený faktor, je fakt, že se v obou případech (5 a 7) jednalo o plochu blíže ke podepření hrotem. Během obrábění byla generována strojem poměrně neobvyklá zvuková emise. To mohlo být způsobené méně tuhous soustavou SNOP.

Všechny tři výše zmíněné faktory mohly ovlivnit kvalitu obrobeného povrchu. Bylo by vhodné tuto oblast experimentu prozkoumat znovu, popř. variovat navíc vzdálenost plochy od vřetene a typ podepření.

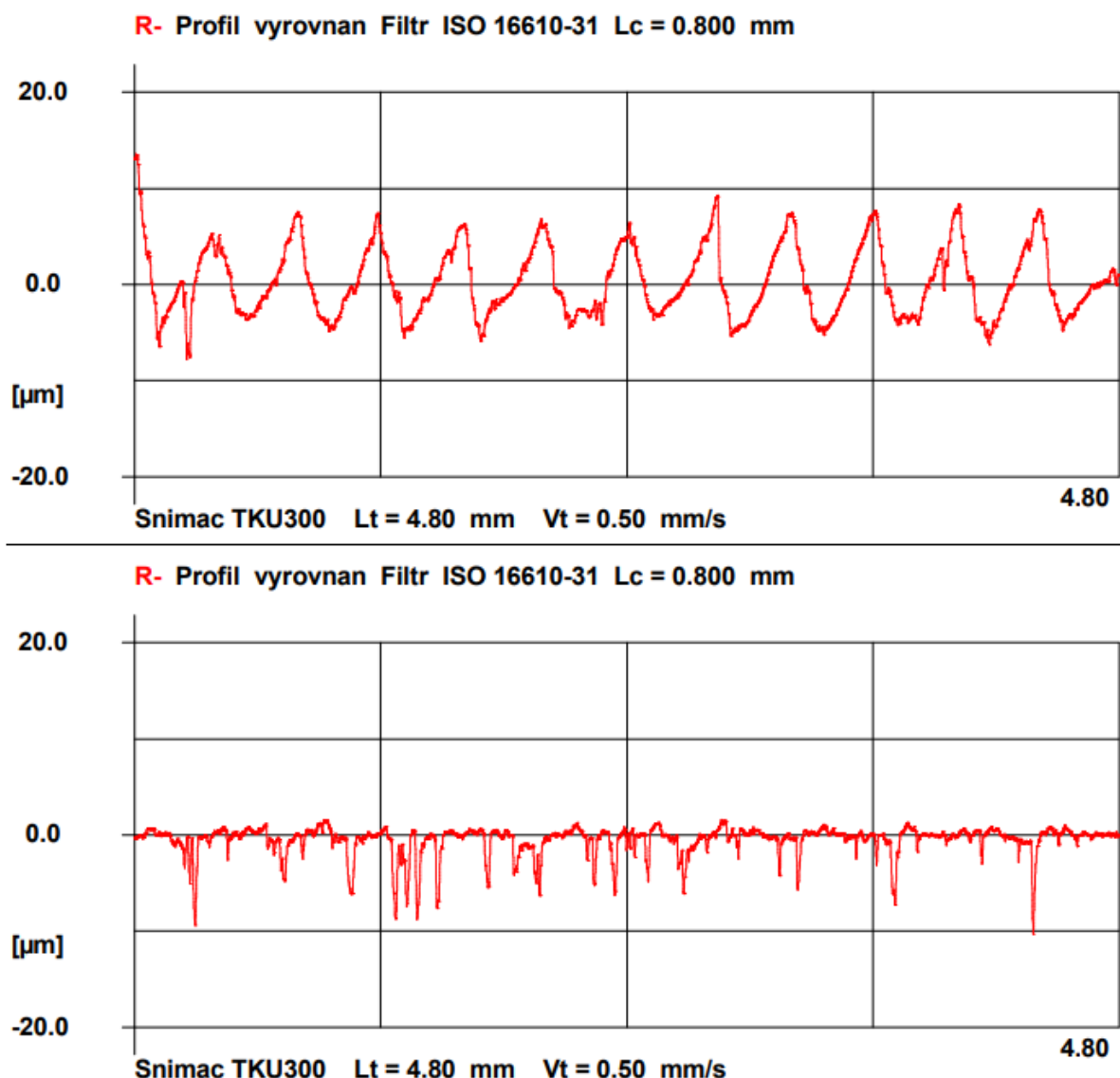


Graf 6: Graf velikostí Ra vzorků č. 5 až č. 8

Tabulka 6: Podmínky vzorků č. 5 až č. 8

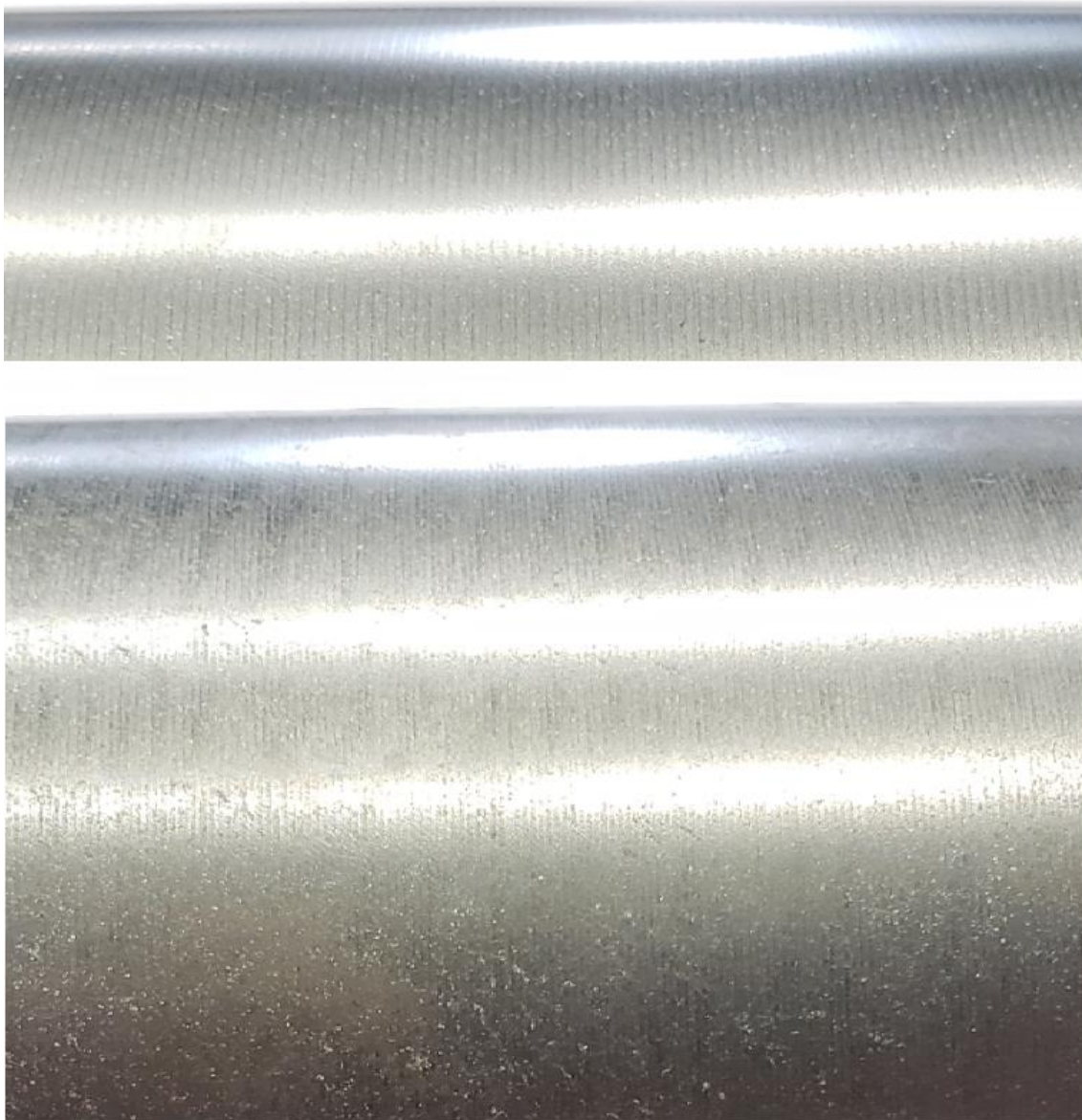
f = 0,4 mm, vc =150 m/min						
Č. kusu	Drsnost Ra	λs	VBD	Chlazení	Y osa	Pozice
5	3,20	70°	(-5°)	ano	3	Koník
6	0,80	70°	(-5°)	ne	-2	Vřeteno
7	1,33	70°	(-10°)	ano	3	Koník
8	0,73	70°	(-10°)	ne	-2	Vřeteno

Měření drsnosti R_a nemá vyloženě vypovídající hodnotu. Důležité je sledovat i geometrické abnormality tvaru povrchu zaznamenané profiloměrem. Na obrázku níže můžeme vidět již filtrovaný R profil vzorku č. 5 (Obr. 27). Výška nerovností skutečně odpovídá vyšší drsnosti $R_a = 3,2 \mu\text{m}$. Avšak tento profil neobsahuje podezřelé špičky. Celý změřený profil se zdá být vcelku harmonický. Pokud by ale obsahoval nějaké hluboké úzké propady, mohlo by se jednat o vytrhané částice zárového nástřiku. Při pohledu na obrobený vzorek jsou vidět zejména stopy po nástroji, ale povrch se netřpytí, jen leskne. Dalo by se tvrdit, že je to relativně dobré znamení, protože třpyt by znamenal právě vytrhané částice. Níže je porovnání vzhledu po obrobení vzorku č. 5 a č. 9., kdy na vzorku č. 9 (nízké $R_a = 0,97 \mu\text{m}$) jsou vidět pouhým okem vytrhané částice. Tuto myšlenku potvrzuje i záznam odfiltrovaného profilu č. 9, který se vyznačuje hlubokými úzkými propady, které odpovídají chybějícím částicím (Obr. 28). Celé snímky obrobků jsou v přílohách (Příloha č.3 a č.4)



Obrázek 27: Porovnání profilu č. 5 (nahore) a č. 9 (dole)

V tomto výběru hodnot má nejmenší drsnost povrch č. 8. Jeho drsnost je $R_a = 0,73 \mu\text{m}$. Při zkoumání profilu povrchu a Abbottovy křivky bylo zjištěno, že tento profil má málo propadů a Abbottova křivka klesá pozvolně. Záznam z profiloměru je k náhledu v příloze. (Příloha č. 5) Jedná se všeobecně o jeden z nejlepších povrchů tohoto experimentu.



Obrázek 28: Porovnání vzorků č. 5 (nahore) a č. 9 (dole)

6.1.2 Vzorok č. 9 – č. 12

Tabulka 7: Přehled hodnot pro řezy č. 9 až č. 12

f = 0,4 mm, vc = 250 m/min							
Č. kusu	Drsnost Ra	λ_s	VBD	Chlazení	Y osa	Čelo Kb	Hřbet Vb
9	0,97	50°	(-5°)	ano	(+5)	0,572	0,507
10	1,23	50°	(-5°)	ne	(+1)	0,526	0,442
11	0,77	50°	(-10°)	ano	(+5)	0,098	0,049
12	0,90	50°	(-10°)	ne	(+1)	0,125	0,053



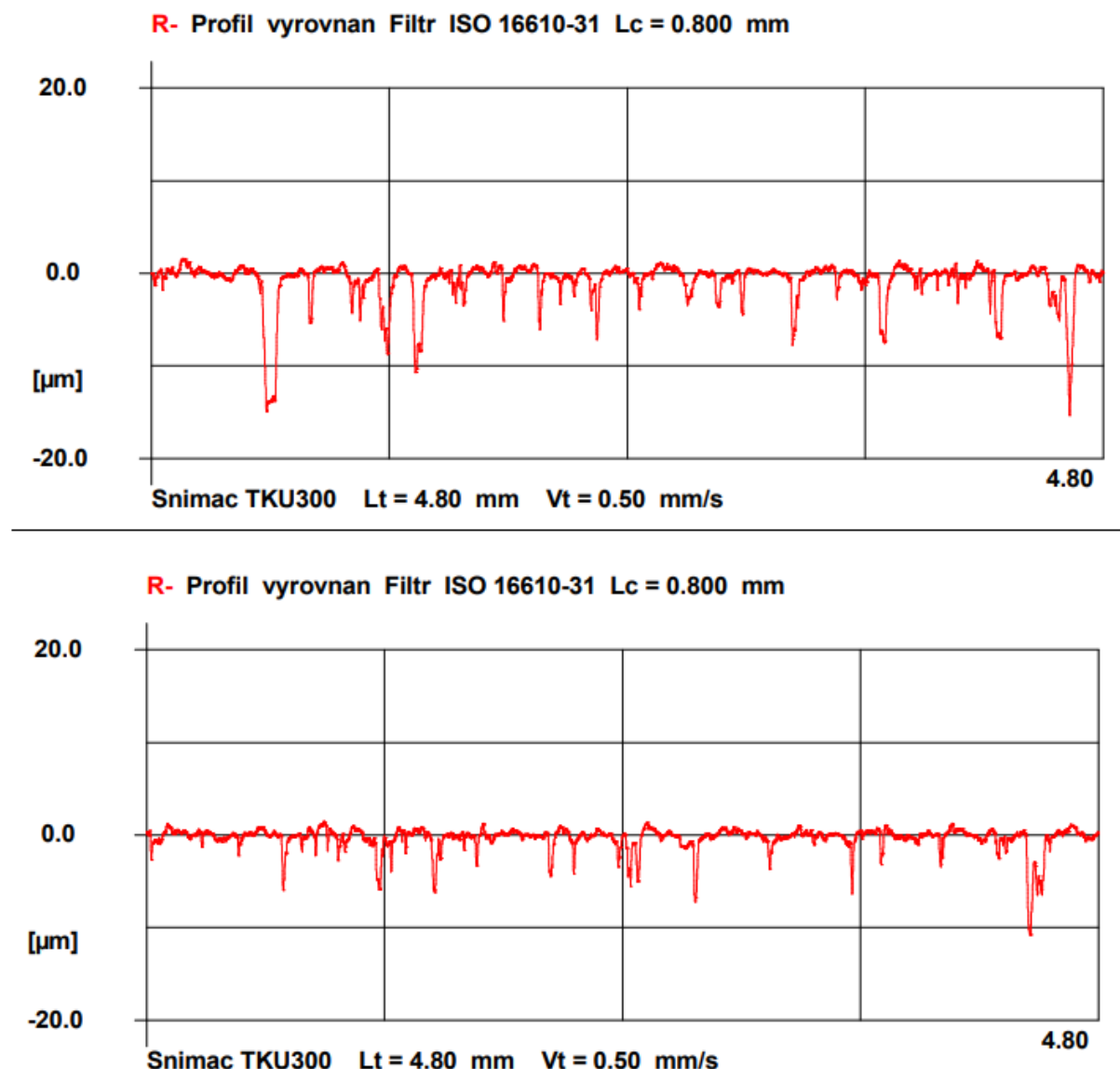
Graf 7: Velikost Kb, Vb a Ra pro popsané podmínky

Znovu se zaměříme na vzorek č. 9. Další poměrně zajímavá anomálie je vidět u měření drsnosti R_a u vzorků 9 až 12 (Tab. 7). Drsnosti R_a nejsou ničím zvláštní, jsou relativně malé a výsledek obrábění se zdá být uspokojivý. Problém nastává u opotřebení VBD. U kusu 9 a 10 (oranžově) došlo k vyštípnutí hrany destičky. Jediný parametr, který se v tomto případě mění, je úhel fazetky. Oba případy vyštípnutí se staly u fazetky -5° . Je pravděpodobné, že se zmenšeným úhlem fazetky došlo ke zvýšení působící řezné síly a vzniku vyššího tření na čele destičky v doprovodu zvýšeného tepla v místě řezu. Tuto myšlenku lze podpořit tím, že při nájezdu VBD za sucha (č. 10) se jiskry neobjevovaly, zatímco na konci dráhy nástroje se objevilo větší množství jisker a žhnoucí oblast na VBD. Při obrábění č. 9 bylo zapnuté chlazení a tím by se mohla vysvětlovat nižší drsnost R_a oproti č. 10, protože mohlo dojít k částečnému uchlazení oblasti hřbetu a čela.

Oba řezy (č.9 a č.10) byly provedeny na jednom obrobku. Také je možné, že obrobek byl v nepořádku. Hloubka řezu a_p mohla být větší v důsledku větší vrstvy nástřiku na

polotovaru. Nebo mohl být obrobek špatně uchycen do čelistí a podepření, což je ale nepravděpodobné, protože zvuková emise nebyla neobvyklá. Tabulka a graf ukazují velikost opotřebení a velikost R_a (Tab. 7, Graf. 7). Posun v Y nemá nejspíš žádný vliv, neboť +5 mm v Y by znamenalo méně tuhou soustavu, zde je to přesně naopak, než by dávalo smysl.

Opět při pohledu na změřený profil povrchu drsnoměrem (č. 9 a č. 11) můžeme zpozorovat poměrně hluboké a úzké propady (Obr. 29) Tyto úzké propady odpovídají vytrhaným částicím žárového nástřiku u obou vzorků. Abbottova křivka je u vzorku č. 9 téměř nezatelně strmější a oblast rýh je nepatrně větší oproti č. 11. Typově tyto povrchy nejsou zrovna dobré jakosti, sice dosahují nízké drsnosti, ale defekty v jejich povrchu můžou způsobit mikrotrhliny. Výstupy profiloměru je možné vidět na obrázku níže, kde na první pohled více hlubších a širších propadů má profil č.9, který má zároveň i vyšší drsnost R_a oproti vzorku č. 11.



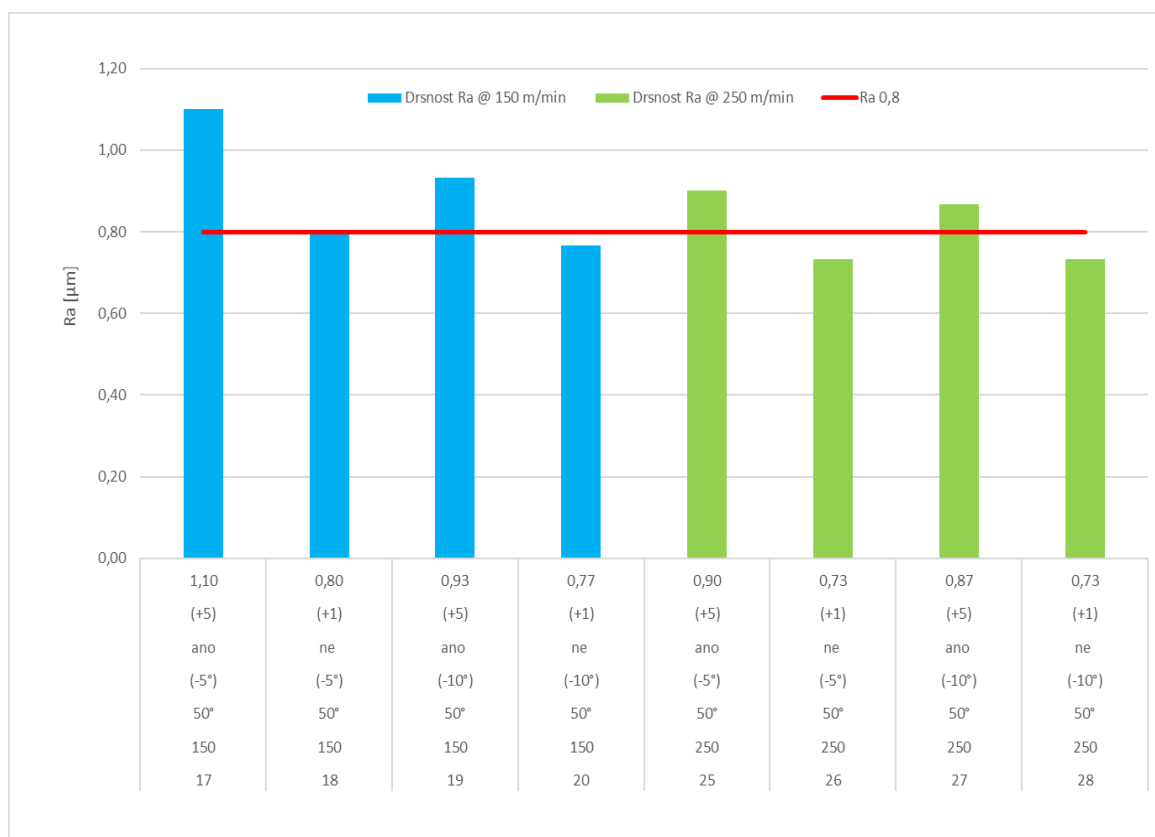
Obrázek 29: Filtrované R profily vzorků č. 9 (nahore) a č.11 (dole)

6.1.3 Vzorokky č. 17 – č. 22 a č. 25 – č. 28

Pokud se zaměříme na naměřené drsnosti R_a u pokusu č. 17 až 20 a u č. 25 až 28 je možné si všimnout, že jsou všechny relativně nízké v porovnání s ostatními hodnotami R_a . Navíc jsou v tabulce plánu experimentu (Tab. 4) ve skupině po čtyřech. To znamená, že jsou díky sestavení plánu ovlivněny zejména úhlem ostří $\lambda_s = 50^\circ$. V následující tabulce a grafu budou porovnány drsnosti těchto osmi vybraných ploch. (Tab. 8, Graf 8)

Tabulka 8: Přehled hodnot pro řezy č. 17 až č. 20 a č. 25 až č. 28

f = 0,8 mm							
Č. kusu	vc	λ_s	VBD	Chlazení	Y osa	Drsnost R_a	Pozice
17	150	50°	(-5°)	ano	(+5)	1,10	Koník
18	150	50°	(-5°)	ne	(+1)	0,80	Vřeteno
19	150	50°	(-10°)	ano	(+5)	0,93	Koník
20	150	50°	(-10°)	ne	(+1)	0,77	Vřeteno
25	250	50°	(-5°)	ano	(+5)	0,90	Koník
26	250	50°	(-5°)	ne	(+1)	0,73	Vřeteno
27	250	50°	(-10°)	ano	(+5)	0,87	Koník
28	250	50°	(-10°)	ne	(+1)	0,73	Vřeteno

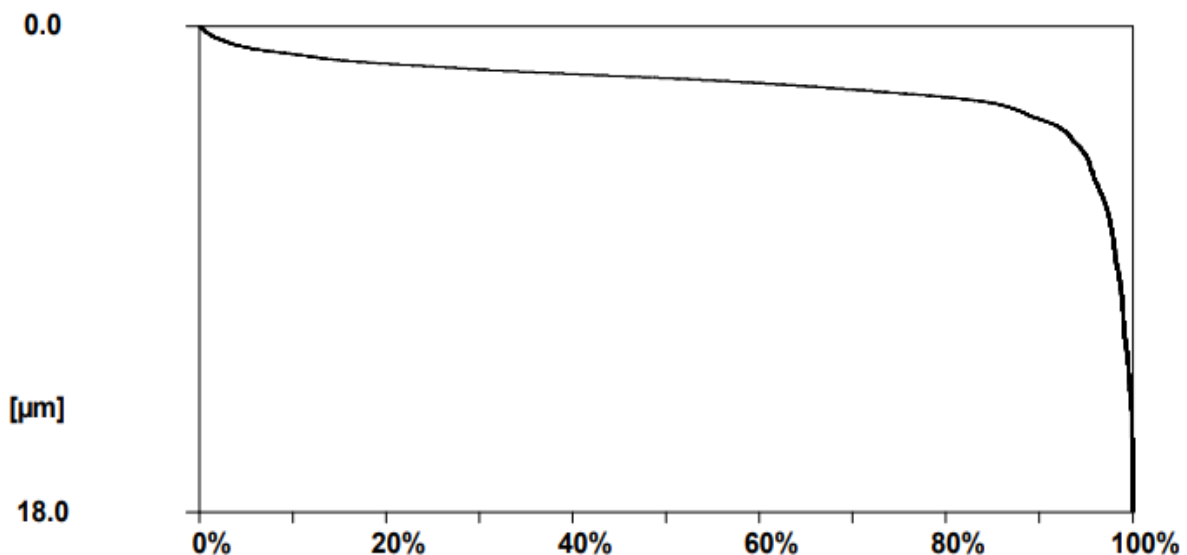


Graf 8: Hodnoty pro řezy č. 17 až č. 20 a č. 25 až č. 28

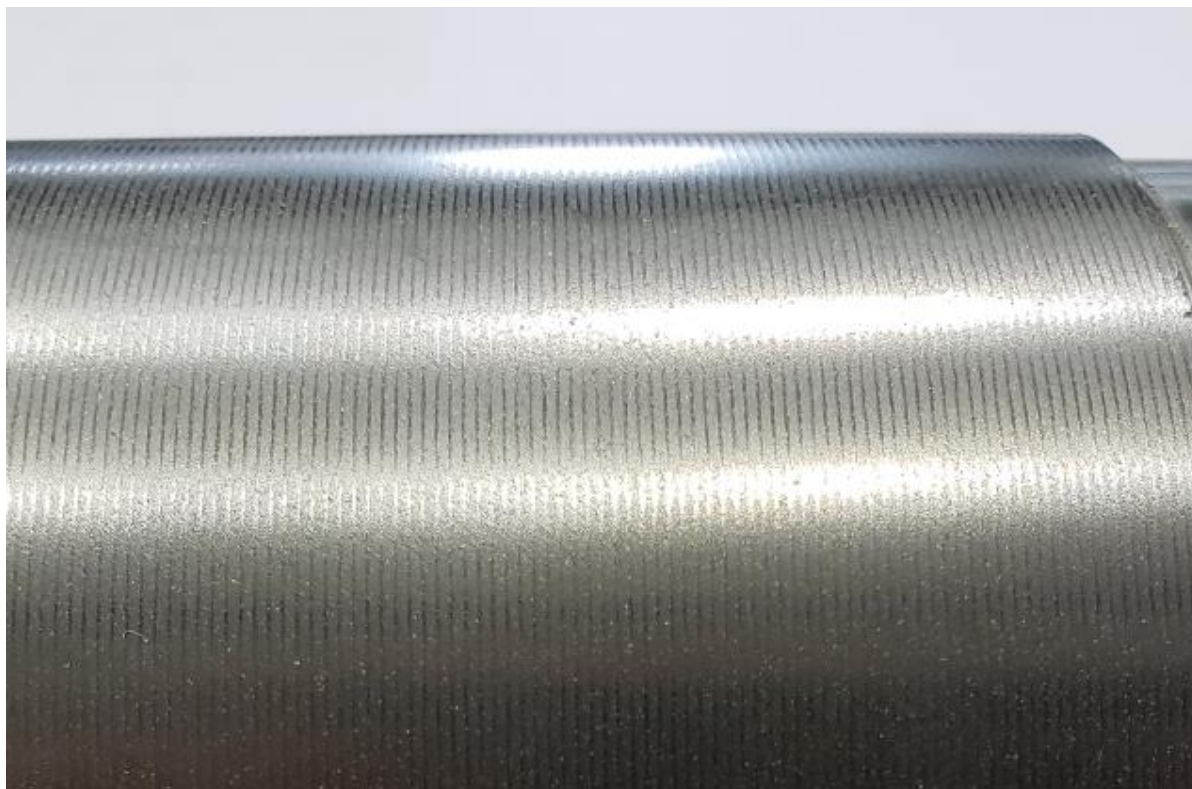
Modré sloupce představují drsnost R_a při rychlosti $v_c = 150$ m/min, zelené při $v_c = 250$ m/min, červená linie představuje $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Tato hodnota R_a byla vybrána jakožto hodnota drsnosti používaná v praxi. Drsnosti R_a při 150 m/min dosahují obecně vyšších hodnot než při 250 m/min.

- Je pravděpodobné, že vyšší řezná rychlost prospívá k lámání třísky. To by mohlo být vysvětleno tím, že se zvyšující rychlosti roste úhel kluzu Φ v primární oblasti třísky. Zároveň mechanické vlastnosti (tvrdost) v kombinaci se zvyšující se řeznou rychlostí posouvají hranici OM ve směru třísky relativně rychleji, než se posouvá hranice NO'. Primární oblast třísky se tak zmenší.
- Dále je patrný vliv úhlu fazetky. Tam kde je fazetka -10° , jsou oproti drsnostem s fazetkou -5° vždy nepatrně lepší drsnosti při dané řezné rychlosti.
- Dalšími dvěma faktory, které by mohly ovlivňovat drsnost je, posuv v ose Y a chlazení. Bohužel tyto dva faktory se mění společně, a proto nelze jednoznačně říct, který z nich způsobuje nepatrně horší drsnost při stejných zbylých podmínkách.
- Poslední opomíjený faktor je ten, že hodnoty s vyšší drsností byly získány ze vzorků obráběných blíž k podepření hrotem. I to by mohl být poměrně významný faktor, který může ovlivnit tuhost SNOP.

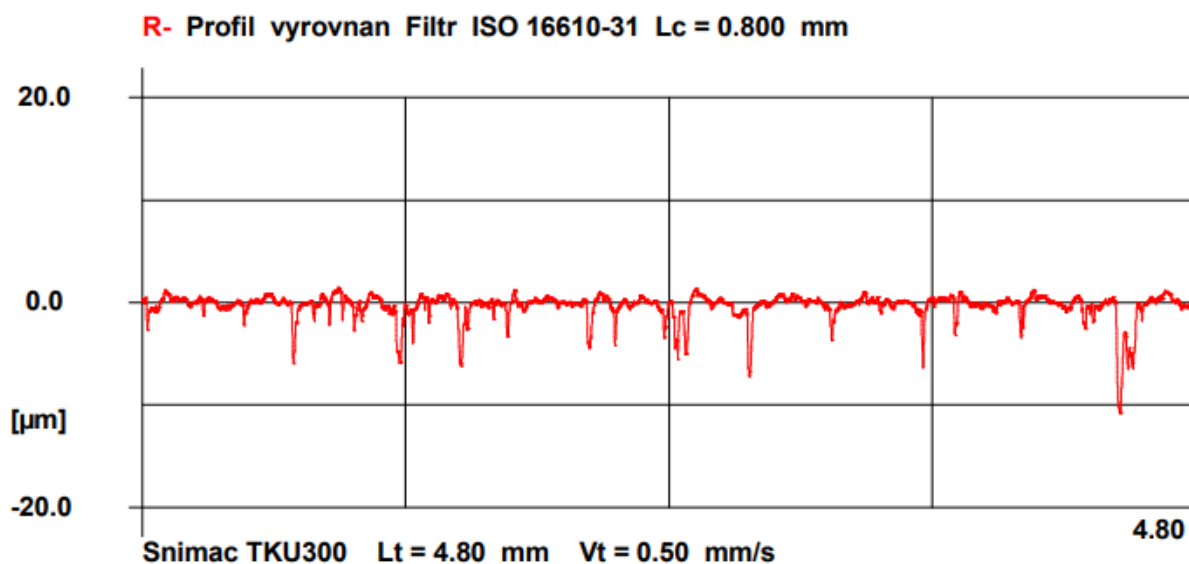
Z protokolu měření drsnosti č.17, jakožto vzorku s největší drsností v tomto výběru, je patrné, že Abbottova křivka po filtraci klesá pozvolna. Tento povrch má menší podíl v oblasti rýh. Čím je oblast rýh menší, tím má povrch vyšší jakost a je tak méně náchylný k vnějším vlivům, vniku trhlin atd. I profil změřený drsnoměrem vykazuje menší množství propadů naměřených hodnot. Také pohledově vypadá obrobená plocha vzorku č. 17 velmi jakostně. (Obr. 30, 31, 32)



Obrázek 30: Abbottova křivka, vzorek č. 17



Obrázek 32: Detail vzorku povrchu č. 17

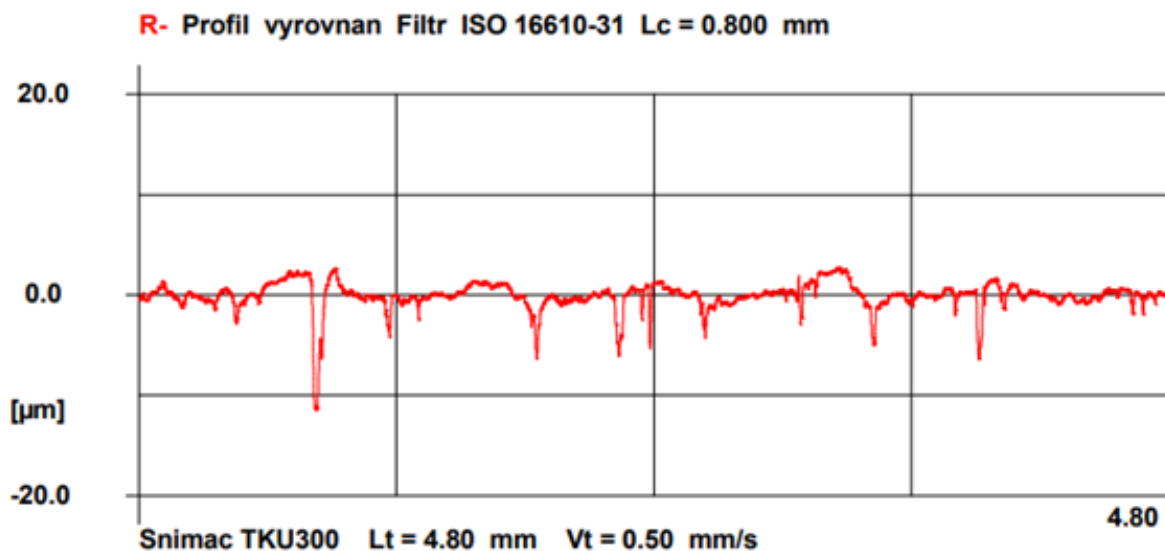


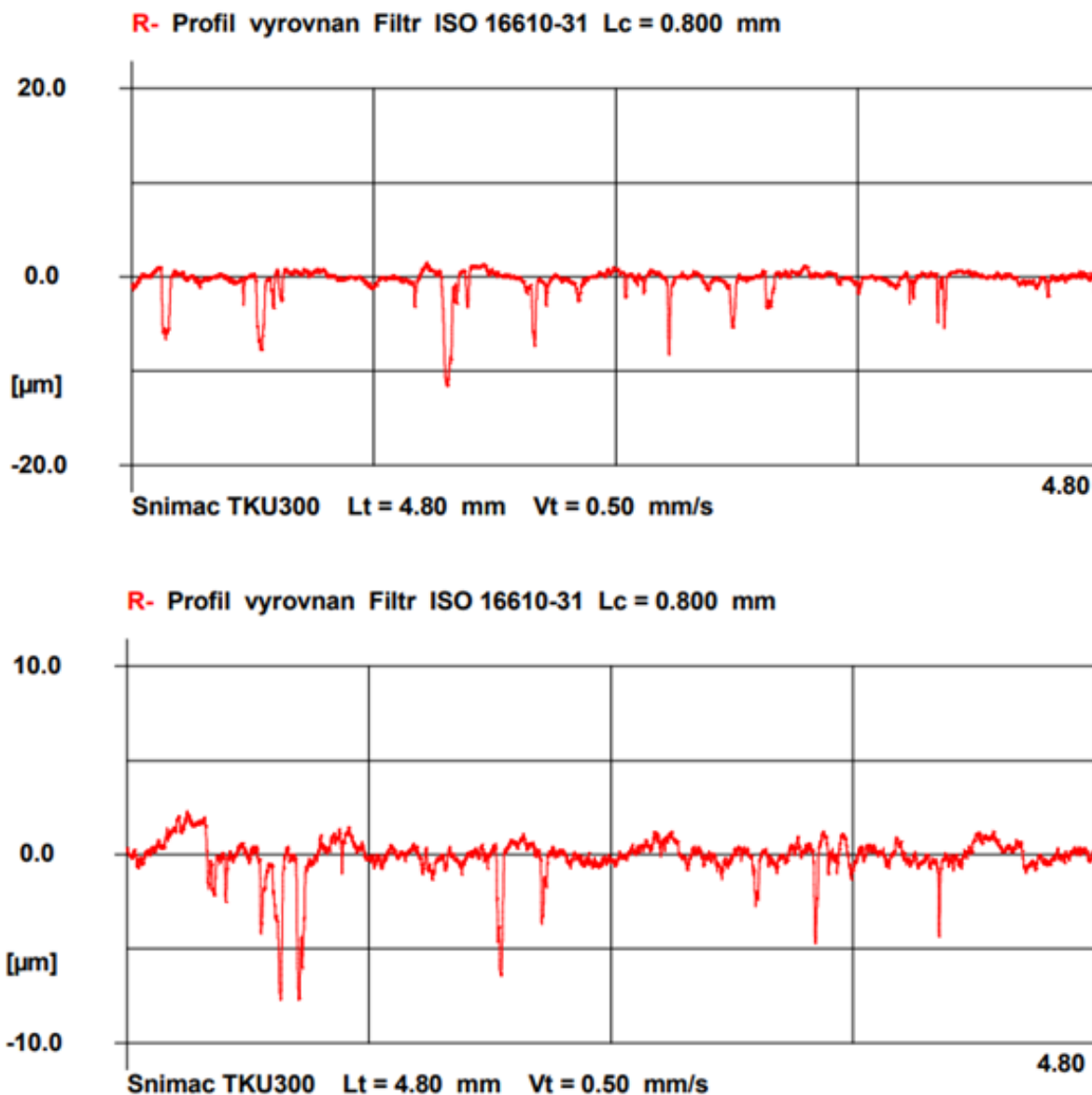
Obrázek 31: Naměřený profil vzorku č. 17



Obrázek 33: Vytrhané částice z povrchu vzorku č. 28

Při bližším zkoumání dat vzorku č. 28 bylo zjištěno, že ze tří naměřených profilů jen jeden (č.28_2) (Obr. 34) má pozvolnější klesání Abbottovy křivky a menší množství propadů hodnot v naměřeném filtrovaném profilu. Zbylé dva (28_1 a 28_3) mají zjištěné parametry horší. Při pohledu na detail obrobeného povrchu lze zpozorovat pouhým okem vytrhané částice z povrchu (Obr. 33) a přesto dosahuje velmi nízké drsnosti $R_a = 0,73 \mu\text{m}$. Takový povrch není vhodný, vytrhané částice můžou dále šířit trhliny v povrchu a povrch je více náchylný na mechanické opotřebení. Navíc povrch je i méně odolný vůči korozi.





Obrázek 34: Změřené R profily, odshora 28_1, 28_2, 28_3

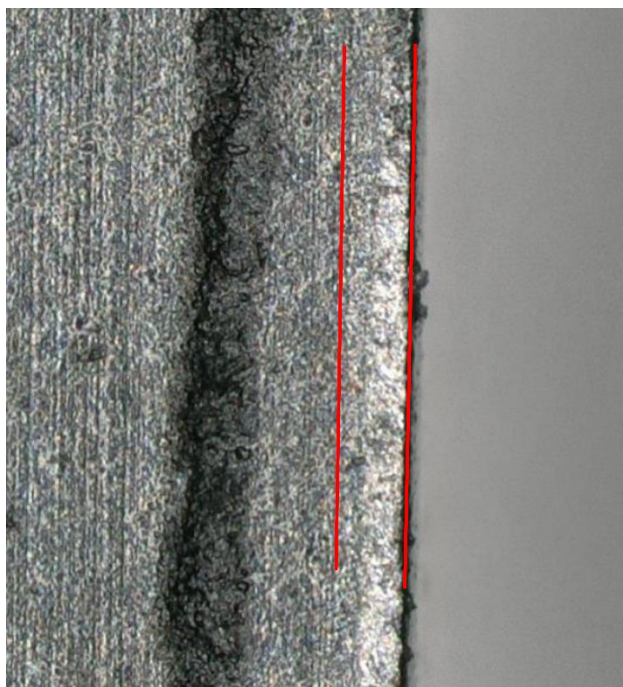
6.2 Sledování opotřebení VBD

V tabulce níže jsou zaznamenána opotřebení VBD na jejím hřbetě a čele. V posledním sloupci tabulky jsou informace o tom, jakým způsobem došlo ke zničení břitu. Opět bylo provedeno pro lepší představivost barevné škálování (Tab. 9). Jako první by bylo dobré zaměřit se na opotřebení, která nesplňují maximální dovolené opotřebení. Jako kritériální opotřebení bylo zvoleno pro čelo $K_{Bkrit} = 0,3$ mm a pro hřbet $V_{Bkit} = 0,3$ mm. Dráha, kterou nástroj urazí, je poměrně krátká, aby bylo možné zjistit jeho jasnou trvanlivost. Přesto je možné stanovit, při kterých řezných podmínkách byl břit prakticky zničen nebo opotřeben za kritériální mez. O těchto řezných podmínkách by se pak bylo možno tvrdit, že nejsou vhodné pro obráběcí z hlediska životnosti nástroje. Podmínky, při kterých opotřebení nedosáhne kritériální hodnoty by bylo možné následně podrobit zkouškám řezivosti.

Tabulka 9: Naměřená opotřebení V_B a K_B

Opotřebení VBD					
č. kusu	č. VBD	Typ VBD	čelo K_B	Hřbet V_B	Způsob opotřebení
1	2,1	(-5°)	0,096	0,092	Oprava
2	2,1	(-5°)	0,110	0,092	Oprava
3	2,1	(-10°)	0,101	0,088	
4	2,1	(-10°)	0,088	0,047	
5	2,2	(-5°)	0,232	0,429	Abraze hřbetu
6	2,2	(-5°)	0,166	0,083	
7	2,2	(-10°)	0,148	0,148	
8	2,2	(-10°)	0,149	0,080	
9	2,3	(-5°)	0,572	0,507	Vyštípnutí čela
10	2,3	(-5°)	0,526	0,442	Vyštípnutí čela
11	2,3	(-10°)	0,098	0,049	
12	2,3	(-10°)	0,125	0,053	Nabourání - nemá vliv
13	2,4	(-5°)	0,114	0,484	Abraze hřbetu
14	2,4	(-5°)	0,272	0,049	Vyštípnutí čela
15	2,4	(-10°)	0,138	0,138	
16	2,4	(-10°)	0,310	0,244	Vyštípnutí čela
17	3,1	(-5°)	0,193	0,081	Vyštípnutí - nemá vliv
18	3,1	(-5°)	0,129	0,181	
19	3,1	(-10°)	0,093	0,053	
20	3,1	(-10°)	0,103	0,049	
21	3,2	(-5°)	0,244	0,230	Vylomení hřbetu
22	3,2	(-5°)	0,206	0,067	
23	3,2	(-10°)	0,567	0,124	Abraze
24	3,2	(-10°)	0,366	0,143	Abraze
25	3,3	(-5°)	0,211	0,083	
26	3,3	(-5°)	0,165	0,105	
27	3,3	(-10°)	0,097	0,066	
28	3,3	(-10°)	0,097	0,134	
29	3,4	(-5°)	0,376	0,181	Abraze
30	3,4	(-5°)	0,468	0,230	Abraze
31	3,4	(-10°)	0,205	0,114	
32	3,4	(-10°)	0,398	0,211	Vyštípnutí čela

Měření opotřebení břitu pomocí mikroskopu může být ovlivněno zejména subjektivní chybou, kdy nemusí být dobře čitelné, kde opotřebení končí. To se stalo právě u měření opotřebení VBD 2.1 s fazetkou – 5°. Na obrázku je vidět černé zbarvení na hřbetě VBD, pravděpodobně způsobené teplem. Avšak při přiblížení obrázku bylo opotřebení vidět jasněji a byla provedena korekce z původních 0,235 mm na 0,092 mm pomocí grafického softwaru s možností odměřování. Na zvětšeném pohledu na hřbet jsou vidět stopy po opracovávání VBD z výroby (nepatrné podlouhlé vrypy, po broušení paty). (Obr. 35)



Obrázek 35: Zvětšený pohled na VBD pro vzorek č. 1

6.2.1 Opotřebení VBD u vzorků č. 9 až č. 16

Na první pohled nápadná jsou vyštípnutí čela a silná abraze hřbetu při obrábění ploch č. 9, č. 10, č. 13, č.14. a č.16. Pokud přiřadíme plán experimentu k těmto defektům VBD (Tab. 10), můžeme si všimnout, že mají společným parametrem $v_c = 250$ m/min, $f = 0,4$ mm a fazetku -5° . Právě vyšší řezná rychlost, která vnáší vyšší množství energie do řezu společně s málo nakloněnou fazetkou dovolující menší zatížení, vedlo k vytváření tepla v místě řezu, zejména pak u $\lambda_s = 50^\circ$, kde je v záběru větší plocha bříty. U č. 14 nedošlo k vyštípnutí, ale jen k abrazi, protože VBD byla méně v záběru kvůli $\lambda_s = 70^\circ$ a také byla VBD chlazená. U č. 16 došlo také k vyštípnutí VBD (Obr. 36). Video z pracovního prostoru stroje ukázalo, že na konci hrubovacího přejezdu z místa řezu odcházelo větší množství jisker (Obr. 37). U dokončovacího přejezdu břit generoval jiskry po celou dobu řezu. S největší pravděpodobností je na vině absence chlazení. Předchozí opotřebení VBD bylo běžné při úplně stejných parametrech.

Tabulka 10: Řezné podmínky pro vzorek č. 9 až č. 16

Č. kusu	posuv f	rychlost Vc	Sklon λ_s	VBD	Chlazení	Y osa
9	0,4	250	50°	(-5°)	ano	(+5)
10	0,4	250	50°	(-5°)	ne	(+1)
11	0,4	250	50°	(-10°)	ano	(+5)
12	0,4	250	50°	(-10°)	ne	(+1)
13	0,4	250	70°	(-5°)	ano	(+3)
14	0,4	250	70°	(-5°)	ne	(-2)
15	0,4	250	70°	(-10°)	ano	(+3)
16	0,4	250	70°	(-10°)	ne	(-2)



Obrázek 37: Dokončovací soustružení vzorku č. 16



Obrázek 36: Vyštípnutí VBD u vzorku č. 16

6.2.2 Opotřebení VBD u vzorků č. 21 až č. 24 a č. 29 až č. 32 a č. 5

U VBD pro plochy č 21, č.32, č. 24, č. 29, č. 30, č. 32 došlo k nadlimitnímu opotřebení hrany. (Tab. 11) Společným vodítkem je posuv $f = 0,8 \text{ mm}$ a $\lambda_s = 70^\circ$. Toto opotřebení, ať už formou vyštípnutí nebo abraze, je vcelku snadno vysvětlitelné. Jelikož je VBD více nakloněná čelem směrem k ose posuvu a zároveň je vyšší posuv, působí také na VBD v této ose větší řezné odpory. V kombinaci vyšší řeznou rychlostí se v místě řezu generuje teplo, což opět potvrzují videa u vzorku č. 30 a č. 32. U VBD s $\lambda_s = 50^\circ$ došlo k rovnoměrnějšímu rozložení složek řezných sil, a proto destičky vydržely s relativně velmi nízkým opotřebením i při vyšší rychlosti a vyšším posuvu. Výše zmíněnou teorii podporuje i fakt, že při $\lambda_s = 70^\circ$ bylo dosaženo podstatně horších povrchů obrobků, než při $\lambda_s = 50^\circ$.

Tabulka 11: Řezné podmínky pro vzorek č. 21 až č. 24, č. 29 až č. 32 a č. 5

Č. kusu	posuv f	rychlost V_c	Sklon λ_s	VBD	Chlazení	Y osa
21	0,8	150	70°	(-5°)	ano	(+3)
22	0,8	150	70°	(-5°)	ne	(-2)
23	0,8	150	70°	(-10°)	ano	(+3)
24	0,8	150	70°	(-10°)	ne	(-2)
29	0,8	250	70°	(-5°)	ano	(+3)
30	0,8	250	70°	(-5°)	ne	(-2)
31	0,8	250	70°	(-10°)	ano	(+3)
32	0,8	250	70°	(-10°)	ne	(-2)
5	0,4	150	70°	(-5°)	ano	(+3)

U VBD pro vzorek č. 31 došlo k uchlazení místa řezu. Společně s větším úhlem fazetky -10° nedošlo k tak masivní abrazi řezné hrany a opotřebení čela K_{Bkrit} nedosahuje, avšak obrobek nedosahuje dobré kvality.

U VBD pro vzorek č. 22 došlo poměrně velké abnormalitě. Podle dosavadního modelu (vysoký posuv, malý sklon fazetky, velký sklon ostří) mělo dojít právě k poškození této VBD. Přesto, že povrch obrobku vykazuje vyšší drsnost a má vytrhané částice, tak nedošlo k masivnímu poškození VBD. Tato abnormalita by mohla být vysvětlena tužší soustavou SNOP (obrábělo se blíže ke sklíčidlu) a vypnutým chlazením, díky kterému tříska měla v místě řezu dostatečně vysokou teplotu, aby pouze zvýšila její plasticitu, avšak nezničila břit. Dále nevíme, jestli by se dalšími řezy takto rychle opotřebení zvětšovalo, nebo jestli se jedná o tzv. „zařiznutí“. Ve videu nedochází ke vzniku jisker.

Opačným způsobem by mohlo být vysvětleno opotřebení VBD u obrobku č. 5. Zde je díky posuvu osy Y +3 mm větší vzdálenost mezi středem frézovacího vřetena a obráběnou plochou a obrábí na straně podepření. Je pravděpodobné, že díky méně tuhému podepření, většímu ramenu mezi VBD a vřetenem a snížení plasticity třísky došlo k možnému odtlačení VBD a nepatrnému zvětšení plochy kontaktu hřbetu VBD a obrobku. Zároveň tímto došlo ke zvětšení řezné síly v ose posuvu odtlačení bříty.

6.2.3 Nízká opotřebení břitů VBD

Velmi nízká opotřebení byla zaznamenána u VBD pro vzorky č. 1 až č. 4 jsou vcelku snadno vysvětlitelná. Nízká řezná rychlost, malý posuv působí na břit nižšími řeznými odpory. Dále nižší úhel sklonu ostří lépe rozkládá tyto řezné odpory, proto i jinak náchylnější VBD s fazetkou -5° velmi dobře obstály.

U č. 6 jde nejspíš o tužší SNOP díky obrábění u vřetena a posuvu ose Y -2 mm. Nedochází tak k odtlačení VBD a zvýšení řezných odporů v ose posuvu. Proto při těchto řezných podmínkách obstojí i VBD s fazetkou -5°.

U č. 7 a č. 8 nejspíš může za nízká opotřebení menší posuv, menší řezná rychlost a větší úhel fazetky -10° bez ohledu na ostatní podmínky.

Naopak u č. 11 a č. 12 za nízká opotřebení může pravděpodobně lepší rozložení řezných odporů díky sklonu ostří 50° a fazetka -10°, bez ohledu na řeznou rychlost a posuv. To

dokazují i nízká opotřebení u VBD vzorku č. 25 až č. 28. I při vyšším posuvu a řezné rychlosti dobře obstály VBD díky sklonu ostří 50° , které lépe rozložilo řezné síly. Podobně aplikovatelná myšlenka platí i na VBD pro vzorky č. 17 až č. 20, kdy byl opět úhel skonu ostří 50° . Celkově pak lze říct, že ve většině případů VBD s fazetkou -10° a sklonem 50° lépe odolávaly řezu.

U č. 17 došlo k vyštípnutí čela a částečně hřebu na úplném konci VBD těsně před její špičkou. Stalo se tak po najetí d řezu, kdy řezná hrana pravděpodobně nevydržela rázovou změnu. Samotné místo řezu po najetí celou destičkou bylo zhruba 2 mm více ke středu. Toto vyštípnutí tedy nemělo vliv na funkci.

6.3 Změny v rozměrech obrobku

Již na první pohled je patrné, že většina průměrů obrobků se ve směru posuvu zvětšují, přičemž sloupec 1 odpovídá počátku dráhy nástroje a sloupec 3 odpovídá konci dráhy nástroje. (Tab. 12) Největší dosažená kuželovitost je 0,03 mm. Kuželovitost obrobku může vznikat odtlačováním obrobku kvůli netuhému podepření. Dále může vznikat odkláněním nástroje z místa řezu kvůli nižší tuhosti nástroje. resp. jeho držáku. Opotřebení nástroje také hraje svou roli, kdy zvětšující se opotřebení zmenšuje řezivost nástroje a vznikají tak vyšší řezné odpory, které posilují právě výše dva zmíněné faktory.

V tabulce se vyskytují dvě výjimky, při kterých se obrobek zužuje ve směru posuvu. Jedná se o obrobek č. 14 a č. 32. Tento jev by mohl být vysvětlen na základě stejné řezné rychlosti $v_c = 250$ m/min, stejného úhlu ostří $\lambda_s = 70^\circ$, vypnutého chlazení a vyššího opotřebení čel nástroje u těchto dvou obrobků. V obou případech také došlo ke vniku velkého množství jisker na konci dráhy nástroje. Tento jev by tedy mohl být vysvětlen tím, že se vzrůstající teplotou dochází ke zvýšení plasticity obráběného materiálu a na nástroj je kladen menší řezný odpor než při jiných podmínkách, při kterých je nástroj naopak odtlačován větší silou.

U měření č. 5 a č. 29 naopak dochází k nulové změně průměrů. Řezné podmínky obou vzorků byly $\lambda_s = 70^\circ$, fazetkou -5° a zapnutým chlazením. Nulová kuželovitost by mohla být vysvětlena konstantním řezným odporem již od začátku řezu. Opotřebení řezné hrany vykazuje nadkritériální hodnoty, a i drsnosti R_a jsou oproti ostatním hodnotám jedny z nejvyšších.

Také nulových rozdílů průměrů dosahují vzorky č. 19 a č. 28. V obou případech je společným znakem stejný úhel ostří $\lambda_s = 50^\circ$, fazetka -10° a vypnuté chlazení. Obě VBD dosahují jedněch nejnižších opotřebení a zároveň vzorky nejnižších drsností.

U vzorku č. 11 nastal největší nárůst průměru (+0,03 mm). Podmínky byly velmi příznivé, zejména pak sklon ostří $\lambda_s = 50^\circ$ a fazetka -10° a velmi malé opotřebení hřebu a nízká drsnost. Zde se nejspíše potkaly dva faktory a těmi jsou nižší tuhost podepření hrotem a obrábění vnější částí bříty, protože posun v ose Y byl +5 mm. S delší dráhou byl pak nástroj více odtlačován z místa řezu.

Přesto je nutné dodat, že výsledky jsou velmi orientační, průměry na začátku, středu a konci délky obrobku byly měřeny jen dvakrát, skutečné hodnoty mohou být jiné. Navíc tvar obrobku může vykazovat jiné odchylky, například válcovitost, kruhovitost nebo celkové házení, takže nelze mluvit v našem případě ani tak o kuželovitosti. Pokud bychom uvažili v potaz, jakou metodou a co vlastně obrábíme, je rozměrová odchylka do 0,02 mm relativně

uspokojivý výsledek. Navíc tento nedostatek lze dokorigovat v NC programu při praktickém využití.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty průměrů

Naměřené průměry				
č. kusu	1	2	3	rozdíl
1	101,24	101,25	101,25	0,01
2	101,19	101,19	101,20	0,01
3	101,26	101,26	101,27	0,01
4	101,20	101,21	101,22	0,02
5	101,25	101,25	101,25	0,00
6	101,18	101,19	101,20	0,02
7	101,27	101,27	101,28	0,01
8	101,19	101,20	101,21	0,02
9	101,26	101,26	101,27	0,01
10	101,22	101,23	101,23	0,01
11	101,25	101,27	101,28	0,03
12	101,20	101,22	101,22	0,02
13	101,24	101,25	101,25	0,01
14	101,20	101,19	101,19	0,01
15	101,23	101,24	101,25	0,02
16	101,20	101,21	101,21	0,01
17	101,22	101,23	101,24	0,02
18	101,16	101,17	101,18	0,02
19	101,23	101,23	101,23	0,00
20	101,16	101,16	101,18	0,02
21	101,26	101,28	101,27	0,02
22	101,14	101,15	101,16	0,02
23	101,24	101,25	101,26	0,02
24	101,18	101,19	101,20	0,02
25	101,23	101,24	101,25	0,02
26	101,18	101,19	101,19	0,01
27	101,23	101,23	101,24	0,01
28	101,18	101,18	101,18	0,00
29	101,32	101,32	101,32	0,00
30	101,26	101,26	101,25	0,01
31	101,24	101,25	101,25	0,01
32	101,23	101,22	101,21	0,02

7 Technicko-ekonomické zhodnocení

Jedním z cílů této diplomové práce spočívá v ekonomickém zhodnocení současně využívanější technologie a technologie inovativní. V našem případě budeme porovnávat broušení do kulata a soustružení lineární řeznou hranou. Od firmy Plasmametal víme, že je možné obrousit s úběrem $U_{BRUS} = 10000 \text{ mm}^2/\text{min}$ s nespécifikovanou hloubkou broušení při dokončování.

Naším předpokladem tedy je, vyrobit 10 ploch hřídelí s drsností $R_a = 0,8 \text{ } \mu\text{m}$ a průměrem $D = 100^{+0,101}_{+0,079} \text{ mm}$ v s6 toleranci a délkou $l = 150 \text{ mm}$. Polotvarem bude hřídel s již vyhrubovaným nástřikem Metcoloy 2 o průměru $100,2 \text{ mm}$ a bude nás zajímat tedy jen dokončovací řez, jehož hloubka bude $a_p = 0,05 \text{ mm}$ pro dosažení horní hodnoty tolerance.

7.1 Broušení do kulata

Pro broušení do kulata máme již stanovenou velikost úběru, kterou použijeme pro výpočet strojního času obrábění námi zvolené hřídele.

Délka hřídele	$L = 150 \text{ mm}$
Délka nájezdu	$L_N = 0,5 \text{ mm}$
Délka přejezdu	$L_P = 0,5 \text{ mm}$
Průměr obrobku	$D = 100,2 \text{ mm}$
Šířka kotouče	$B = 10 \text{ mm}$
Úběr	$U_{BRUS} = 10000 \text{ mm}^2/\text{min}$

$$t_{sBRUS} = \frac{\pi \cdot D \cdot L_{CELK}}{U_{BRUS}} \cdot i = \frac{\pi \cdot D \cdot (L + L_N + L_P + B)}{U_{BRUS}} \cdot i =$$
$$= \frac{\pi \cdot 100,2 \cdot (150 + 0,5 + 0,5 + 10)}{10000} \cdot 10 = 50,68 \text{ min} = 3040,8 \text{ s}$$

7.2 Soustružení lineární řeznou hranou

Pro výpočet strojního času využijeme řezné podmínky z experimentu č. 20, kde jsme dosáhli drsnosti $R_a = 0,77 \text{ } \mu\text{m}$ a povrchu se malým množstvím vytrhaných částic.

Posuv	$f = 0,8 \text{ mm}$
Řezná rychlost	$v_c = 150 \text{ m/min}$
Délka hřídele	$L = 150 \text{ mm}$
Délka nájezdu	$L_N = 6 \text{ mm}$
Délka přejezdu	$L_P = 9 \text{ mm}$
Průměr obrobku	$D = 100,2 \text{ mm}$

$$t_{sBRUS} = \frac{\pi \cdot D \cdot L_{CELK}}{1000 \cdot v_c \cdot f} \cdot i = \frac{\pi \cdot D \cdot (L + L_N + L_P)}{1000 \cdot v_c \cdot f} \cdot i =$$

$$= \frac{\pi \cdot 100,2 \cdot (150 + 6 + 9)}{1000 \cdot 150 \cdot 0,8} \cdot 10 = 4,33 \text{ min} = 259,7 \text{ s}$$

$$U_{SOUS} = v_c \cdot f \cdot 1000 = 150 \cdot 0,8 \cdot 1000 = 120000 \text{ mm}^2/\text{min}$$

7.3 Porovnání nákladů

Jak je patrné z vypočítaných hodnot, rozdíl při dokončování ve strojních časech a v úběru materiálu je obrovský. Úspora času pak činí 92 % podle vzorce:

$$\frac{3040,8 - 259,7}{3040,8} \cdot 100 = 91,5\%$$

Tabulka 13: Strojní hodinové sazby a ceny nástrojů

Strojní hodnová sazba bruska	1 200 Kč
Cena brus. Kotouče	4 700 Kč
Strojní hodinová sazba soustruh	1 400 Kč
Cena VBD	2 900 Kč

Broušení:

$$N_B = 4700 + 1200 \cdot \frac{3040,8}{3600} \cdot 10 = 14836 \text{ Kč}$$

Soustružení:

$$N_B = 2900 + 1400 \cdot \frac{259,7}{3600} \cdot 10 = 3908 \text{ Kč}$$

Výsledná úspora při soustružení s těmito parametry je 73 % oproti broušení. Tyto výpočty nelze brát doslovně, pouze směrodatně, protože nejsou zahrnuty všechny náklady výroby. Avšak je patrné, že ve všech ohledech je úspornější soustružení oproti broušení. Nevýhodou soustružení lineární řeznou hranou je, že se v našem případě nepodařilo dosáhnout tak kvalitního povrchu, jako při broušení. Soustružený povrch obsahuje oproti broušení vždy větší množství vytrhaných částic povrchu, a navíc není možné soustružit nástřik Metcoloy 2 pod drsnost $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ touto metodou.

8 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo metodou soustružení lineární řeznou hranou vytvořit povrch, který by dosahoval jakostí broušenému povrchu. Úkolem bylo tedy sestavit plán řezných podmínek a obrobit povrch. Dále pak analyzovat stav povrchu po obrobení, opotřebením řezné hrany nástroje a geometrické odchylky obrobku.

Úvodem do teoretické části diplomové práce je seznámení s technologií žárových nástřiků, vysvětluje jejich nanášení a popisuje vlastnosti. Následuje teorie v oblasti obrábění. Literární rešerše se zabývá současnými výzkumy žárového nástřiku Fe13Cr a jeho soustružení. Kvůli nedostatku článků se okruh hledaných publikací rozšířil na obráběných nástřiků Fe17Cr. Bylo zjištěno, že je možné tento nástřik soustružit s velmi uspokojivými výsledky.

Začátek aplikační části popisuje strojové a nástrojové vybavení, polotovar a vlastnosti žárového nástřiku, technologii HFC a způsob měření dat. Výstupem je získání profilu drsnosti, opotřebení nástroje a změna průměru s dráhou nástroje. Následuje analýza naměřených dat popisující děje při vybraných případech. Bylo zjištěno, že zásadní vliv na kvalitu obrobeného povrchu má sklon ostří λ_s , kdy lepších povrchů dosahovalo ve většině případů $\lambda_s = 50^\circ$ a fazetkou -10° . To bylo patrné zejména pak u řezné rychlosti $v_c = 250$ m/min a posuvu $f = 0,8$ mm, kdy rozdíly v kvalitě povrchu byly nejvíce znát. Nejnižší dosažená drsnost je $R_a = 0,73 \mu\text{m}$, přičemž povrch obsahoval ke konci dráhy nástroje vyšší množství vytrhaných částic, které se mohou potenciálně rozšířit v trhliny povrchu. Takový povrch je v praxi nevyhovující. Naopak některé povrchy s nepatrně horší drsností mají povrch s velmi malým množstvím vytrhaných částic. Opotřebení nástroje na krátké dráze nástroje ukázalo, které řezné podmínky jsou vhodné, a které nevyhovují vůbec. Obecně podmínky $\lambda_s = 70^\circ$ a vyšší posuv vytváří vyšší opotřebení nástroje. Dále s délkou dráhy roste i průměr obrobku maximálně do 0,03 mm. Nejčastěji ale do 0,02 mm u posuvu $f = 0,8$ mm, což lze odstranit korekcí nástroje.

Technicko-ekonomické zhodnocení ukázalo až 92% úsporu času při nahrazení broušení soustružením a 73% finanční úsporu při práci stroje. Avšak tato data jsou pouze orientační. Broušení je sice pomalé a tedy drahé, ale na rozdíl od soustružení lineární řeznou hranou je možno dosáhnout mnohem lepších kvalit povrchů a tolerovaných rozměrů. V tomto ohledu broušení nahraditelné není.

Tento experiment byl přínosem a poukazuje na určité výhody a nevýhody tohoto inovativního řešení. Pro další experimenty by bylo vhodné zaměřit se na nepřímé faktory, např. podepření obrobku. Dále by bylo vhodné do budoucna získané znalosti otestovat i v praxi na reálných dílech a vyzkoušet vlastnosti těchto dílů v provozu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] TRIBO Engineering, s.r.o. | Žárové nástriky. [online]. Copyright © 2013 [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/zarove-nastriky.html>
- [2] Efektivnější soustružení tvrzených součástí | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 10.05.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivnejsi-soustruzeni-tvrzenych-soucasti>
- [3] What is Metal Spraying / Thermal Spraying?. World Class Metal Spraying : IRS Surfacing Technologies Ltd [online]. Copyright © 2021 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.irsltd.co.uk/what-is-metal-spraying/>
- [4] The Process - Metallisation Ltd. Home - Metallisation Ltd [online]. Copyright © 2021 Metallisation Limited [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.metallisation.com/the-process/>
- [5] TRIBO Engineering, s.r.o. | Nástřík plamenem . [online]. Copyright © 2013 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/nastrik-plamenem.html>
- [6] TRIBO Engineering, s.r.o. | Plazmatický nástřík . [online]. Copyright © 2013 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/plazmaticky-nastrik.html>
- [7] TRIBO Engineering, s.r.o. | Supersonický nástřík HP/HVOF. [online]. Copyright © 2013 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/supersonicky-nastrik-hp-hvof.html>
- [8] SMS-Group, GmbH | Thermal coating solutions: Wire arc spraying [online]. Copyright © 2021 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z:
- [9] TRIBO Engineering, s.r.o. | Nástřík elektrickým obloukem. [online]. Copyright © 2013 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/nastrik-elektrickym-obloukem.html>
- [10] In the news. J Therm Spray Tech 7, 451–476 (1998). <https://doi.org/10.1007/s11666-998-0044-x>
- [11] Použité technologie | PLASMAMETAL, spol. s.r.o. Titulní stránka | PLASMAMETAL, spol. s r.o. [online]. Copyright © 2021 [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [12] GRUND, T., G. PACZKOWSKI, T. LAMPKE, H. LIBORIUS, A. NESTLER a A. SCHUBERT. Finish Turning of FeCr17Ni2C0.2 Iron-based Sprayed Coatings: Influences of Substrate Preparation, Cutting Speed and Feed on the Coating and Surface Properties. Journal of Thermal Spray Technology [online]. 2020, 29(1-2), 308-318 [cit. 2021-01-09]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: [doi:10.1007/s11666-019-00930-9](https://doi.org/10.1007/s11666-019-00930-9)
- [13] Brilov, E.P., Shpolyanskaya, É.N. Protection of elements of the water passage of turbines from hydroabrasive wear. Hydrotechnical Construction 31, 699–702 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF02767224>
- [14] BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., PETŘOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. Nové směry v progresivním obrábění. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007. [cit. 2021-01-09]. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [15] Surface Roughness Characteristics of Polyamide APA after the Turning by Unconventional Cutting Tool | Scientific.Net. We publish scientific and engineering peer-reviewed academic journals and book series | Scientific.Net [online]. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.702.263>
- [16] Příručka pro technologie - Opatřebení se nevyhne! | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah |

- MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 12.05.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme>
- [17] Sandvik Coromant. Sandvik Coromant – Řešení problémů při soustružení [online] [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/troubleshooting.aspx>
- [18] Sandvik Coromant. Sandvik Coromant – Opatření břitů [online] [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [19] Sandvik Coromant. Sandvik Coromant – Obráběné materiály [online] [cit. 11.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [20] ŘEHOŘ, Jan. "Teorie obrábění". Prezentace. Plzeň. [cit. 13.05.2021]
- [21] SS420 Grade AISI 420 Stainless Steel Properties, Heat Treatment, Hardness, Magnetic. World Material - Free Online Material Information Resource [online]. Copyright © 2021 [cit. 13.05.2021]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/ss420-astm-aisi-420-stainless-steel-grade/>
- [22] X20Cr13, 1.4021, AISI 420 - stainless steel. VIRGAMET- Engineering & Stainless steel supplier [online]. Copyright © by Virgamet 2021. All rights reserved. [cit. 13.05.2021]. Dostupné z: <https://virgamet.com/x20cr13-1-4021-z20c13-aisi-420-uns-s42000-420s29-stainless-steel>
- [23] Oerlikon Metco - Metcoloy 2 2.0 mm (0.079 in) 15kg. [online]. Copyright © 2021 [cit. 13.05.2021] Dostupné z: <https://mymetco.oerlikon.com/en-us/article/1002472>
- [24] Rezaey, R., Salavati, S., Pershin, L. et al. Fabrication of Wire Mesh Heat Exchangers for Waste Heat Recovery Using Wire-Arc Spraying. J Therm Spray Tech 23, 609–615 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0058-5>
- [25] ŠULCOVÁ, Petra, Marek VOSTŘÁK, Jakub ANTOŠ a Kateřina LENCOVÁ. IMPROVING PERFORMANCE AND SERVICE LIFE OF RAIL VEHICLES COMPONENTS BY TWIN WIRE ARC SPRAYING. 29th International Conference on Metallurgy and Materials [online]. 2020, 2020, 666-671 [cit. 2021-5-13]. ISSN 2694-9296. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.37904/metal.2020.3570](https://doi.org/10.37904/metal.2020.3570)
- [26] LIBORIUS, H., A. NESTLER, G. PACZKOWSKI, A. SCHUBERT, T. GRUND a T. LAMPKE. SURFACE INTEGRITY IN TURNING OF FE17CR2NI0.2C IRON BASED THERMALLY SPRAYED COATINGS WITH SPECIAL RESPECT TO THE INFLUENCE OF THE FEED. MM Science Journal [online]. 2019, 2019(04), 3220-3227 [cit. 2021-01-09]. ISSN 18031269. Dostupné z: [doi:10.17973/MMSJ.2019_11_2019074](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2019_11_2019074)
- [27] GRUND, T., G. PACZKOWSKI, T. LAMPKE, H. LIBORIUS, A. NESTLER a A. SCHUBERT. Finish Turning of FeCr17Ni2C0.2 Iron-based Sprayed Coatings: Influences of Substrate Preparation, Cutting Speed and Feed on the Coating and Surface Properties. Journal of Thermal Spray Technology [online]. 2020, 29(1-2), 308-318 [cit. 2021-01-09]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: [doi:10.1007/s11666-019-00930-9](https://doi.org/10.1007/s11666-019-00930-9)
- [28] Ding, Kan, and Hiroyuki Sasahara. "Study on the Machining of Iron-Based Thermal Spray Coating for Sleeveless Engine Cylinder." Advanced Materials Research, vol. 472–475, Trans Tech Publications, Ltd., Feb. 2012, pp. 991–996. Crossref, [doi:10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.991](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.991).
- [29] López de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Fernandes, M.H. et al. Turning of thick thermal spray coatings. J Therm Spray Tech 10, 249–254 (2001). <https://doi.org/10.1361/105996301770349349>

- [30] Techniques - Griekspoor Thermal Coatings. Hydraulic industry's specialist - Griekspoor Thermal Coatings [online]. Dostupné z: <https://www.griekspoorthermalcoatings.com/techniques>
- [31] Parametry drsnosti | HOMMEL CS s.r.o.. [online]. Copyright © 2021 [cit. 11.05.2021] Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [32] ŘEHOŘ, Jan. Závěrečná zpráva dílčího projektu NCK strojírenství TN01000015/08: Technologie žárových nástřiků a vývoj nástrojů pro jejich obrábění. Plzeň, 2021. [cit. 2021-05-22].
- [33] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN isbn91-972299-4-6.
- [34] Geometrie. Školní intranet - Střední škola technická [online]. Dostupné z: https://sst.opava.cz/pernikar/nove_www/teorie_obrabeni_soubory/geometrie.htm
- [35] BUMBÁLEK, Bohumil. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. [online]. [cit. 2021-05-22]. VUT v Brně. Fakulta strojírenského inženýrství. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [36] Zvyšování spolehlivosti součástí superfinišováním | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 16.05.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-spolehlivosti-soucasti-superfinisovanim>
- [37] CTX beta 1250 TC - Soustružnicko frézovací centra od DMG MORI. DMG MORI Czech - CNC obráběcí stroje, kovoobráběcí stroje DMG MORI [online]. Copyright © 2021 DMG MORI. Všechna práva vyhrazena. [cit. 16.05.2021]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/soustruzeni/soustruzeni-frezovani/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc>
- [38] VASILKO, Karol. Integrated Tool for High-Feed Turning. Manufacturing Technology [online]. 2019, 19(5), 880-885 [cit. 2021-5-18]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/388.2019/a/1213-2489/MT/19/5/880
- [39] Sumitomo Catalogue - Sumitomo. Sumitomo Cutting Tools - Sumitomo [online]. Copyright © 2018 SUMITOMO ELECTRIC Hartmetall GmbH [cit. 18.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sumitomotool.com/downloads/catalogue/>
- [40] High-feed Turning. Canadian Metalworking - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More [online]. Copyright © 2021 FMA Communications, Inc. All rights reserved. [cit. 19.05.2021]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/product/management/high-feed-turning>
- [41] Jednodušší soustružení tvrzených součástí | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 21.05.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/jednodussi-soustruzeni-tvrzenych-soucasti>
- [42] Sandvik Coromant - Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obroběných součástí [online]. Copyright © [cit. 16.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning.aspx>
- [43] Bonar a.s. - obrábění výrobků pomocí materiálu PCBN a PCD.. Bonar a.s. - obrábění výrobků pomocí materiálu PCBN a PCD. [online]. Copyright © 2019 Bonar a.s., webovou stránku vytvořilo a spravuje [cit. 23.05.2021]. Dostupné z: <https://www.bonar-as.cz/>

- [44] Monka, P., Monkova, K., Balara, M. et al. Design and experimental study of turning tools with linear cutting edges and comparison to commercial tools. *Int J Adv Manuf Technol* 85, 2325–2343 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8065-3>
- [45] ZATLOUKAL, Tomáš. Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje. [cit. 2021-04-02], 2018. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni

PŘÍLOHA č. 1

Dodací list s chemickým složením Metcoloy 2

oerlikon
metco

Inspection Certificate
EN 10204 - 3.1



Oerlikon Metco Europe GmbH
Sprestrasse 2
D-65451 KELSTERBACH
Phone: +49 6142 6033 0
Fax: +49 6142 6033 400

Shipping Doc/Date
800512078 / 29.03.2018

Page
1

Lot No: 742002

Characteristic	Inspection Method	Value	Unit
Chemical Analysis			
C		0,30	WT%
Cr		13,37	WT%
Cu		0,06	WT%
Fe		85,03	WT%
Mn		0,49	WT%
Mo		0,09	WT%
Ni		0,30	WT%
P		0,02	WT%
S		0,00	WT%
Si		0,33	WT%
N		0,02	WT%
Other Tests			
Diameter		1,60	mm

Approved Specifications:
MSRR9507/103 Issue 2
RRMS 40034 Issue A
OMat 3/277A

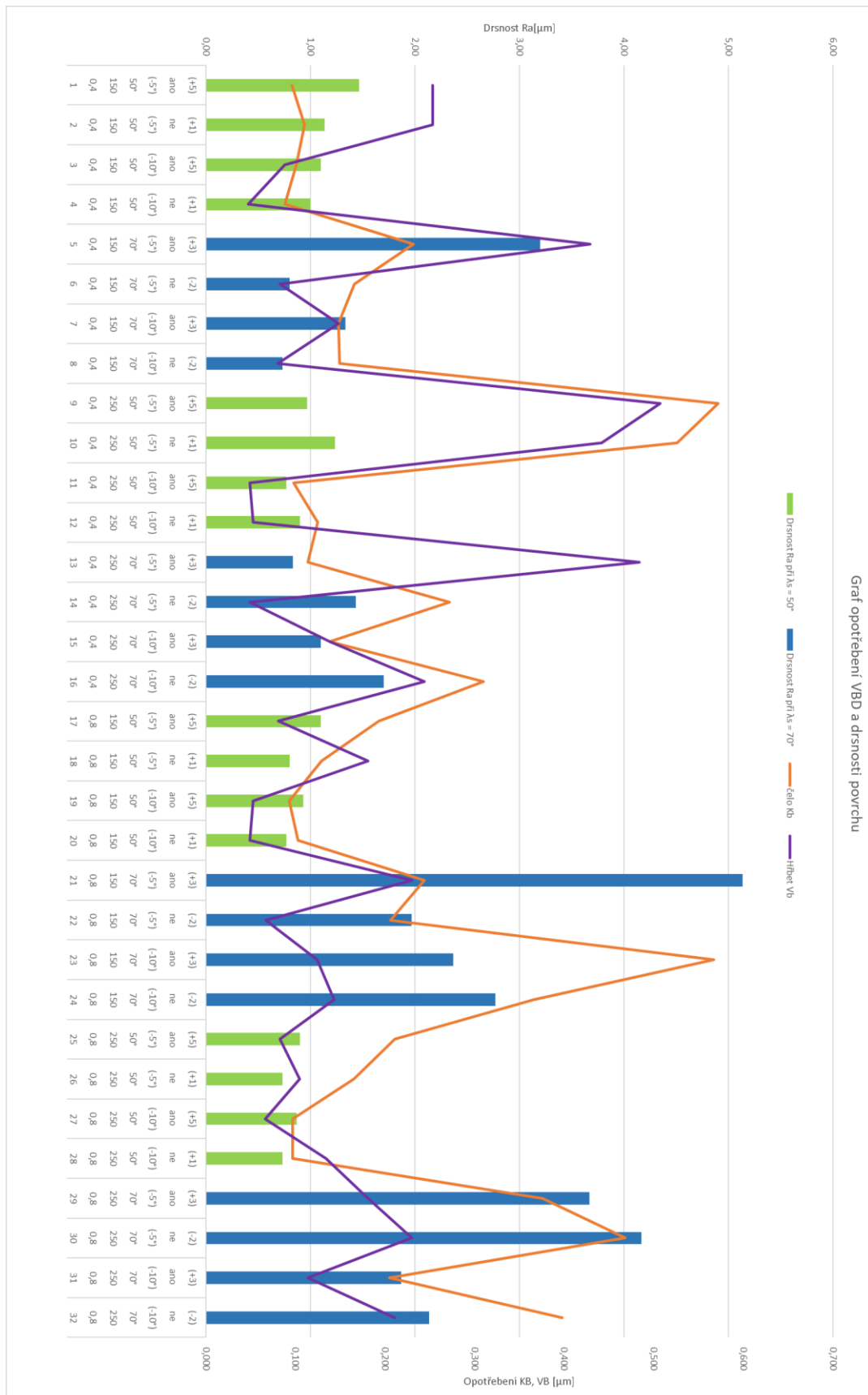
Material inspected and released by Oerlikon Metco Europe GmbH, Kelsterbach unless otherwise stated.

It is hereby certified that the material described above has been inspected, and conforms to all applicable requirements of the contract order and specifications referenced on this certificate. This certificate shall not be reproduced except in full without the written approval of Oerlikon Metco. The recording of false, fictitious, or fraudulent, statement or entries on this certificate may be punished as felony under the federal law. This material is being supplied in accordance with the Quality System at Oerlikon Metco Europe GmbH which is an ISO 9001:2008 Certified Vendor. This material is supplied according to the quality requirements of the customers purchase orders. This inspection certificate meets the requirements of EN10204:2005 3.1 (Inspection Certificate), 2.2 (Test Report) or 2.1 (Certificate of Compliance with the Order).

By 
Quality Assurance Representative on behalf of
Joern Lindner

PŘÍLOHA č. 2

Komplexní graf drsnosti R_a a opotřebenosti V_B a K_B



PŘÍLOHA č. 3

Obrobený vzorek č. 5



PŘÍLOHA č. 4

Obrobený vzorek č. 9



PŘÍLOHA č. 5

Protokol profilu povrchu č. 8

