

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA
TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

DISERTAČNÍ PRÁCE

Výzkum a vývoj obrobiteľnosti žárového nástřiku NiCrBSi

Autor:

Ing. Tomáš Zatloukal

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.

Plzeň 2023

Prohlášení o autorství:

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Tato práce je koncipována dle požadavku Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni, tj. obsahuje zejména shrnutí a zhodnocení poznatků ve studované oblasti a seznam souvisejících publikací. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce

V Plzni dne:

.....

Podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTACE

Téma disertační práce je zaměřeno do oblasti moderních metod obrábění žárového nástřiku NiCrBSi, který je v praxi využíván za účelem zvýšení funkčních vlastností povrchu. Žárové nástřiky s vysokým obsahem niklu a chromu obecně spadají do kategorie těžkoobrobitelných materiálů. Disertační práce je řešena v souvislosti s projektem NCKS, ve kterém spolupracuje Západočeská univerzita v Plzni s firmou Plasmametal s.r.o., která se již několik let zabývá technologií žárového stříkání s následným obráběním funkčních ploch.

V teoretické části je zkoumána obrobitelnost žárového nástřiku NiCrBSi vyrobeného metodou vysokorychlostního nástřiku (HVOF). V úvodu je rozebrán způsob vytváření žárového nástřiku spolu se strukturou a vlastnostmi nástřiku po aplikaci. Následuje charakteristika těžkoobrobitelných materiálů zahrnující řezné materiály spolu s popisem moderních metod pro jejich využití. V rešeršní sekci je podrobně rozebrána slitina NiCrBSi a způsob obrábění této slitiny technologií broušení. V následujících kapitolách je podrobněji rozebrána problematika obrábění a současný stav vybraných vědeckých poznatků v oblasti obrábění žárových nástřiků a těžkoobrobitelných materiálů s vysokým podílem niklu a chromu. Na závěr teoretické části je proveden souhrn získaných informací, na základě kterého je vypracován návrh cílů řešení disertační práce.

V první sekci experimentální části je proveden návrh speciálního nástroje QCA4, v kterém je navržen tvar nástroje včetně upnutí, typu břitové destičky, způsobu přívodu řezné kapaliny do místa řezu a možnosti regulace pomocí vložených členů. Dále je zde popis obráběných polotovarů a výčet použitých břitových destiček pro obrábění. Hlavní část této disertační práce se již věnuje samotným experimentům, v kterých jsou postupně získávány důležité znalosti v oblasti obrábění žárového nástřiku za použití technologie obrábění s lineární řeznou hranou. Testovány jsou zde i produktivní způsoby obrábění jako metoda vysokorychlostního obrábění (HSC) nebo vysokoposuvového obrábění (HFC). V předposlední části experimentálního řešení jsou na základě předchozích experimentů vybrány nejlepší řezné podmínky za účelem statistického vyhodnocení dlouhodobých testů řezivosti. Na závěr je popsána provedená implementace výsledků ve firmě Plasmametal s.r.o. spolu s požadavky pro uzavření projektu NCKS a výpočtem produktivity obrábění proti původnímu stavu.

S ohledem na dosažené výsledky z provedených experimentů lze konstatovat, že byly naplněny všechny stanovené cíle disertační práce, neboť byla potvrzena hypotéza optimalizace způsobu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi a tím zvýšení účinnosti procesu v řádu stovek procent.

Klíčová slova

NiCrBSi, Žárový nástřik, HVOF, Obrábění, HFC, Lineární řezná hrana, Statistické vyhodnocení, ANOVA, Drsnost povrchu

ANNOTATION

The topic of the dissertation is focused on the field of modern methods of machining NiCrBSi thermal spray, which is used in practice to increase the functional properties of the surface. Thermal sprays with a high content of nickel and chromium generally fall into the category of difficult-to-machine materials. The dissertation is solved in connection with the NCKS project, in which we cooperate with the company Plasmametal s.r.o., which has been dealing with thermal spraying technology and subsequent machining of functional surfaces.

In the theoretical part, the machinability of NiCrBSi thermal spray produced by the high-velocity oxygen fuel method (HVOF) is investigated. In the introduction, the method of creating thermal spraying is discussed, together with the structure and achieved properties of the spray after application. This is followed by an analysis of hard-to-machine materials, including cutting materials and productive ways of machining them. In the research area, the NiCrBSi alloy and the method of machining this alloy with grinding technology are analyzed in detail. In the following chapters, the issue of machining and the current state of selected scientific findings in the field of machining thermal sprays and difficult-to-machine materials with a high proportion of nickel and chromium are discussed in more detail.

In the first part of the experimental solution, the design of the special tool QCA4 is carried out, in which the shape of the tool is designed, including the clamping, the type of cutting edge, the method of supplying the cutting fluid to the cutting point and the possibility of regulation using inserted members. Furthermore, there is a design of machined workpieces and a list of used cutting inserts for machining. The main part of this dissertation is already devoted to the conducted experiments, in which important knowledge in the field of thermal sprays machining using the technology of machining with a linear cutting edge is gradually being acquired. Productive machining methods such as high-speed cutting HSC machining or high-feed cutting HFC machining are also tested. In the penultimate part of the experimental solution, the best cutting conditions are selected based on previous experiments for statistical evaluation of long-term cutting tests. Finally, the implementation of the results in the company Plasmametal s.r.o. is described, together with the requirements for closing the NCKS project and calculating the machining productivity against the original state.

With regard to the results achieved from the conducted experiments, it can be stated that all the set goals of the dissertation were fulfilled, as the hypothesis of optimizing the method of machining NiCrBSi hot injection and thereby increasing the efficiency of the process in the order of hundreds of percent was confirmed.

Keywords

NiCrBSi, Thermal spray, HVOF, Machining, HFC, Linear cutting edge, Statistical evaluation, ANOVA, Surface roughness

Obsah

1	Úvod do problematiky.....	12
1.1	Úvod.....	12
1.2	Význam výzkumu	13
1.3	Stanovené cíle disertační práce	14
2	Technologie žárového stříkání	15
2.1	Vývoj žárových nástřiků	15
2.2	Princip vytváření žárových nástřiků.....	16
2.3	Technologická příprava před stříkáním.....	17
2.4	Struktura žárového nástřiku	18
2.5	Technologie vysokorychlostního stříkání (HVOF).....	19
2.6	Slitina NiCrBSi	20
3	Problematika obrábění těžkoobrobitelných materiálů.....	21
3.1	Charakteristika obráběných materiálů.....	21
3.2	Nástrojové materiály	22
3.2.1	Slinuté karbidy	22
3.2.2	Řezná keramika	23
3.2.3	Cermet	23
3.2.4	Kubický nitrid bóru	24
3.2.5	Polykrystalický diamant.....	24
3.3	Produktivní metody obrábění	25
3.3.1	Vysokorychlostní obrábění HSC.....	25
3.3.2	Vysokoposuvové obrábění HFC	26
4	Rešeršní část.....	27
4.1	Broušení žárových nástřiků.....	27
4.2	Obrábění žárových nástřiků definovanou geometrií břitu.....	29
4.3	Problematika obrábění s lineární řeznou hranou.....	31
4.4	Rešeršní část.....	36
4.5	Souhrn získaných poznatků.....	45
5	Praktická část.....	48

5.1	Návrh prototypu obráběcího nástroje	48
5.2	Optimalizace nástroje	55
5.3	Příprava, výroba a modifikace zkušebních vzorků	58
5.4	Metalografické hodnocení HVOF nástřiku slitiny NiCrBSi	61
5.5	Modifikace žárového nástřiku NiCrBSi	63
5.6	Výroba a úprava makrogeometrie řezného nástroje	65
5.7	Testování a optimalizace řezivosti řezného nástroje	67
5.7.1	Zkušební test obrábění	67
5.7.2	Experimentální obrábění se slinutým karbidem IC20 – SCMW 120408	69
5.7.3	Experimentální obrábění s polykrystalickým diamantem CVD-D	73
5.7.4	Experimentální obrábění s kubickým nitridem bóru	76
5.7.4.1	PCBN firma Rotana	76
5.7.4.2	PCBN firma Bonar	80
5.7.4.3	Vysokorychlostní obrábění nástřiku s destičkou CBN-B	82
5.7.4.4	Vysokoposuvové obrábění nástřiku s destičkou CBN-B	85
5.8	Statistické vyhodnocení dlouhodobých testů řezivosti s CBN-B	89
5.8.1	Drsnost obrobeného povrchu Ra	90
5.8.2	Drsnost obrobeného povrchu Rz	92
5.8.3	Opotřebení čela břitové destičky KBb	93
5.8.4	Analýza opotřebení čela KBb s uvážením vlivu vzdálenosti obrábění	95
5.8.5	Analýza opotřebení hřbetu VBmax s uvážením vlivu vzdálenosti obrábění	97
5.8.6	Funkční vzorky a výpočet produktivity obrábění	101
6	Implementace technologie obrábění s lineární řeznou hranou	102
7	Shrnutí dosažených výsledků	109
8	Diskuze výsledků	113
9	Závěr	114
10	Literatura	116
11	Přílohy	121
12	Přehled publikačních činností	127

Seznam obrázků

Obrázek 1: První experiment technologie žárového stříkání [6].....	15
Obrázek 2: Technologický proces žárového stříkání [7]	16
Obrázek 3: Metalografie žárového nástřiku Fe ₁₃ Cr s mezivrstvou [8]	17
Obrázek 4: Grafické zobrazení struktury žárového nástřiku [9]	18
Obrázek 5: Grafické zobrazení struktury žárového nástřiku [12]	19
Obrázek 6: Rozdělení obráběných materiálu dle DIN ISO 513 [16]	21
Obrázek 7: Rozdělení řezných materiálů v závislosti na tvrdosti [20]	22
Obrázek 8: Princip metody vysokoposuvového obrábění HFC [27]	26
Obrázek 9: Povrch po broušení bez / s příčným zvlněním [31]	27
Obrázek 10: Deformace při obrábění homogenního materiálu a žárového nástřiku [35].....	29
Obrázek 11: Porušení nástřiku vlivem nevhodně nastavených podmínek při obrábění [8].....	30
Obrázek 12: Defekty v přechodové oblasti nástřiku Stellite 6 [37]	30
Obrázek 13: Obrábění lineární řeznou hranou (vlevo) a konvenční soustružení (vpravo) [18]	32
Obrázek 14: Zaoblení břítu u destičky CBN-B s fazetkou 0,2 x 20°	33
Obrázek 15: Schéma břitové destičky Wiper [42]	33
Obrázek 16: Obrábění s lineární hranou $\lambda_s = 45^\circ$, $a_p = 1$ mm, $D = 20$ mm [45].....	35
Obrázek 17: Porovnání nástroje s lineární a zakřivenou řeznou hranou [46]	35
Obrázek 18: Varianty obráběcích nožů s rozdílným úhlem čela [37]	36
Obrázek 19: Rozdíl v utváření třísky při variantě úhlu čela $\gamma = -7^\circ, +7^\circ$ [37].....	37
Obrázek 20: Opotřebení sekundárního boku z důvodu malé hloubky řezu [36]	38
Obrázek 21: Snímek velikosti a druhu opotřebení v závislosti na hloubce řezu [53].....	43
Obrázek 22: Porovnání konvenční způsobu obrábění a obrábění s lineární řeznou hranou	48
Obrázek 23: Pozice břitové destičky v těle speciálního nástroje QCA.....	48
Obrázek 24: Nástrojový držák typu HSK 63 A.....	49
Obrázek 25: Rozměry břitové destiček s označením SCMW 120408	50
Obrázek 26: Návrh lůžka pro VBD tvaru S	50
Obrázek 27: Rozvod chladicí kapaliny směrem k břitové destičce	51
Obrázek 28: První návrh chladicích kanálků pro jednu VBD.....	51
Obrázek 29: Návrh a reálná podoba regulačních členů nástroje	52
Obrázek 30: Síť vnitřních kanálků a dutin za účelem odlehčení nástroje.....	52
Obrázek 31: Vyznačené funkční plochy s přídavkem 1 mm	53
Obrázek 32: Obrobení funkční ploch speciálního nástroje	54
Obrázek 33: Přípravek pro experiment na vodní paprsek	54
Obrázek 34: Experiment s cílem snížení drsnosti povrchu kanálku	55
Obrázek 35: Speciální nástroj s vnitřním chlazením při soustružení	55
Obrázek 36: Návrh a realizace nového typu regulátoru	56
Obrázek 37: Přípravek pro vyzkoušení funkčnosti nového typu regulace.....	56
Obrázek 38: Rozptýlení kapaliny po výstupu z kanálku.....	57

Obrázek 39: Simulace proudění původního tvaru kanálku	57
Obrázek 40: Optimalizace chladicích kanálků.....	58
Obrázek 41: Stroj DMG MORI CTX Beta 1250 TC [56].....	59
Obrázek 42: Návrh polotovaru pro nástřik NiCrBSi.....	59
Obrázek 43: Připravený polotovar ve stroji CTX Beta 1250	60
Obrázek 44: Rozměry nově navržených polotovarů	60
Obrázek 45: a) mikrostruktura HVOF nástřiku materiálu NiCrBSi ze skenovacího elektronového mikroskopu, b) měření pórovitosti povlaku, c) výsledky měření po naprahování obrazu, d) histogram zobrazující velikostní zastoupení pórů od 0 do 1 [μm^2].....	61
Obrázek 46: SEM snímek povrchu HVOF nástřiku materiálu NiCrBSi a jeho EDS analýza prokazující homogenní chemické rozložení legujících prvků bez výrazné segregace.....	62
Obrázek 47: Mikrostruktura HVOF nástřiku NiCrBSi pozorovaná skenovacím elektronovým mikroskopem a EDS analýza rozložení chemických prvků ve struktuře.....	63
Obrázek 48: Struktura a vlastnosti nevyhovujícího nástřiku NiCrBSi	64
Obrázek 49: Struktura a vlastnosti optimalizovaného nástřiku NiCrBSi.....	64
Obrázek 50: Rozměry břitové destiček SCMW 120408.....	65
Obrázek 51: Rozměry břitové destiček Bonar PCBN – 120404	66
Obrázek 52: Rozměry břitové destiček SCMW 120405	66
Obrázek 53: Průběh zkušební obrábění s nástrojem QCA4.....	67
Obrázek 54: Nastavení pozice s nástrojovou korekcí v Y ose	68
Obrázek 55: Obrobený povrch při zkušebním testování řezných podmínek	68
Obrázek 56: Schéma rozdělení jednotlivých ploch polotovaru	69
Obrázek 57: Mikroskop Keyence VHX 6000	70
Obrázek 58: Porovnání povrchů při obrábění s /bez pohybu Y osy.....	70
Obrázek 59: Obrobený povrch u vzorku č. 7.1 (vpravo) a 4.1 (vlevo)	71
Obrázek 60: Porovnání opotřebení s/bez použití pohybu v Y ose	71
Obrázek 61: Výsledek obrábění se slinutým karbidem od firmy Pramet (řez 1 a 2)	72
Obrázek 62: Výsledný povrch z testu č. 10.1 (vlevo) a 11.1 (vpravo).....	74
Obrázek 63: Zaznamenané opotřebení testu č. 11.1 s vyštípnutím hrany	74
Obrázek 64: Destrukce řezné hrany u testu č. 13.1	74
Obrázek 65: Výsledek obrábění při řezu č. 15.1 s CVD-D.....	75
Obrázek 66: HCS obrábění vzorku č. 8.1 a 10.1 s PCBN.....	77
Obrázek 67: Poškození řezné hrany PCBN testu č. 10.1	77
Obrázek 68: HFC obrábění s PCBN destičkou Rotana.....	78
Obrázek 69: Snímek řezné hrany PCBN z testu 11.1 a 12.1.....	78
Obrázek 70: Porovnání testu č. 13.1 (vlevo) a 14.1 (vpravo)	78
Obrázek 71: Snímek řezné hrany PCBN z testu č. 15.1	79
Obrázek 72: Testování tuhosti soustavy SNO (plocha 4, plocha 3, plocha 1).....	81
Obrázek 73: Výsledek testu č. 4–3 řez s nedostatečnou tloušťkou nástřiku	81
Obrázek 74: Testování vlivu v_c na plochy s nízkou tuhostí ($v_c= 320,980,1180$ m/min).....	83

Obrázek 75: Snímek břitové destičky PCBN Bonar po obrobení ve čtyřech Y pozicích.....	84
Obrázek 76: Vliv posuvu f ($f = 0,05, 0,1, 0,15$ mm/ot) při konst. řezné rychlosti $v_c = 980$ m/min	84
Obrázek 77: Vliv posuvu f ($f = 0,25, 0,35, 0,5$ mm/ot) při konstantní $v_c = 980$ m/min.....	85
Obrázek 78: Zapojení lunety při obrábění žárového nástřiku.....	85
Obrázek 79: Obrobená krajní plocha při testování pevného hrotu.....	86
Obrázek 80: Obecné tvary opotřebení řezné hrany.....	86
Obrázek 81: Šířka řezu a vzhled opotřebení VBD u vzorků č. 1, 2, 3, 4.....	88
Obrázek 82: Model upnutí speciálního nástroje pro firmu Plasmametal.....	102
Obrázek 83: Model speciálního nástroje pro obrábění žárového nástřiku NiCrBSi.....	103
Obrázek 84: Zkušební testování speciálního nástroje na stroji CTX Beta.....	103
Obrázek 85: Vzhled obrob. povrchu nástřiku po hrubování (vlevo) a dokončování (vpravo)	104
Obrázek 86: Testování speciálního nástroje ve firmě Plasmametal.....	105
Obrázek 87: Vzhled obrobeného povrchu po hrubování ve firmě Plasmametal.....	106
Obrázek 88: Vzhled obrobeného povrchu po dokončování ve firmě Plasmametal.....	106
Obrázek 89: Měření kruhovitosti vzorku z firmy Plasmametal.....	107
Obrázek 90: Měření válcovitosti vzorku z firmy Plasmametal.....	107
Obrázek 91: Sada použitá pro provedení kapilární zkoušky dle ČSN EN ISO 3452.....	108
Obrázek 92: Postup provedení kapilární zkoušky s negativní detekcí miko- i makrotrhlin spojených s povrchem obrobku.....	108

Seznam grafů

Graf 1: Experimentálně zjištěné tepelné bilance v závislosti na řezné rychlosti [25].....	25
Graf 2: Vliv řezných podmínek broušení na velikost zbytkových napětí [34].....	28
Graf 3: Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na drsnosti povrchu R_a [37].....	37
Graf 4: Výsledky při obrábění SK a CBN při rozdílných řezných rychlostech [36].....	39
Graf 5: Výsledky experimentu 2 při obrábění s CBN [36].....	39
Graf 6: Hodnocení závislosti řezné rychlosti a posuvu na drsnost R_z [50].....	40
Graf 7: Závislost řezné rychlosti na zbytková napětí v povrchu [50].....	41
Graf 8: Závislost řezné síly a teploty během řezání v závislosti na hloubce řezu [53].....	43
Graf 9: Velikost drsnosti R_a a opotřebení v závislosti na řezné rychlosti [55].....	44
Graf 10: Testování tuhosti soustavy SNO za stanovených podmínek.....	80
Graf 11: Testování vlivu řezné rychlosti na plochy s nízkou tuhostí.....	82
Graf 12: Testování vlivu posuvu na hodnotu drsnosti R_a	83
Graf 13: Výsledky z vysokoposuvového obrábění s CBN-B.....	88
Graf 14: Závislost úhlu sklonu ostří řezné hrany a posuvu na změnu hodnoty drsnosti R_a	92
Graf 15: Závislost úhlu sklonu ostří řezné hrany a posuvu na změnu hodnoty drsnosti R_z	93
Graf 16: Závislost úhlu sklonu ostří a posuvu na hodnotě opotřebení čela KBb.....	94
Graf 17: Vliv interakce řezné rychlosti a vzdálenosti na změnu hodnoty KBb.....	96

Graf 18: Vliv interakce úhlu sklonu ostří a vzdálenosti na změnu hodnoty KBb.....	96
Graf 19: Vliv interakce posuvu a vzdálenosti na změnu hodnoty KBb	97
Graf 20: Vliv interakce řezné rychlosti a vzdálenosti na změnu hodnoty VBmax	98
Graf 21: Vliv interakce úhlu sklonu ostří a vzdálenosti na změnu hodnoty VBmax	99
Graf 22: Vliv interakce posuvu a vzdálenosti na změnu hodnoty VBmax	99
Graf 23: Vliv úhlu sklonu ostří, řezné rychlosti a vzdálenosti na VBmax při $f = 0,2$ mm/ot	100
Graf 24: Vliv úhlu sklonu ostří, řezné rychlosti a vzdálenosti na VBmax při $f = 0,4$ mm/ot	100
Graf 25: Porovnání teoretických vzorců a vytvořeného vzorce ze statistického vyhodnocení.....	112

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení NiCrBSi [33]	20
Tabulka 2: Chemické složení slitiny Stellite 6 [48]	36
Tabulka 3: Chemické složení povlaku AlCoCrFeNiTi [50]	40
Tabulka 4: Chemické složení nástřiku Stellite 6 [52]	41
Tabulka 5: Plán experimentu a naměřené hodnoty drsnosti Ra [51]	42
Tabulka 6: Chemické složení Inconelu 718 [54]	42
Tabulka 7: Vliv použité technologie na vlastností nástřiku NiCrBSi [3]	62
Tabulka 8: Souhrn a naměřené výsledky při obrábění s destičkou IC20	69
Tabulka 9: Doporučené řezné podmínky pro destičku SK Pramet	72
Tabulka 10: Souhrn a naměřené výsledky při obrábění s destičkou CVD-D	73
Tabulka 11: Souhrn experimentu s PCBN destičkami Rotana	76
Tabulka 12: Souhrn experimentu pro dlouhodobé testy řezivosti.....	87
Tabulka 13: Stanovený plán experimentu s dosaženými výsledky.....	89
Tabulka 14: Plán experimentu v kódované podobě	89
Tabulka 15: Tabulka ANOVA pro model Ra	90
Tabulka 16: Odhady regresních koeficientů modelu $Ra = f(v_c, f, \lambda_s)$	90
Tabulka 17: Tabulka ANOVA pro model opotřebení čela KBb.....	93
Tabulka 18: Odhady regresních koeficientů modelu $KBb = f(v_c, f, \lambda_s)$	94
Tabulka 19: Test řezných podmínek pro hrubování nástřiku NiCrBSi.....	104
Tabulka 20: Test řezných podmínek pro dokončování nástřiku NiCrBSi	104

Seznam zkratk a symbolů

VBD	Výměnná břitová destička
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
RTI	Regionální technologický institut
SNO	Soustava stroj – nástroj-obrobek
ČSN	Česká státní norma
DIN	Německá norma
AISI	Americká norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
IC20	Druh Slinutého karbidu
SK	Slinutý karbid
PCBN	Polykrystalický kubický nitrid bóru
CBN	Kubický nitrid bóru
PKD	Polykrystalický diamant
CVD	Chemical vapour deposition
PVD	Physical vapour deposition
HSC	Vysokorychlostní obrábění
HFC	Vysokoposuvové obrábění
HV	Tvrdost dle Vickerse
HV _{0,1}	Mikrotvrdost dle Vickerse
HRC	Tvrdost podle Rockwella
TiN	Nitrid Titanu
TiC	Karbid titanu
TiCN	Titan Carbonitrid
QCA	Quatro Cooling Assistance
EDS	Energiově disperzní spektrometrie
HSK	Hohl schaft kegel
FV	Funkční vzorek
OT	Ověřená technologie
DoE	Design of experiment
RMSE	Root mean square deviation
ANOVA	Analysis of variance

Značka	Popis	Jednotky
v_c	Řezná rychlost	[m/min]
a_p	Hloubka řezu	[mm]
f_{ot}	Posuv na otáčku	[mm/ot]
f_z	Posuv na zub	[mm/z]
U	Úběr materiálu	[mm ²]
n	Otáčky vřetene	[ot/min]
r_n	Poloměr zaoblení řezné hrany	[μ m]
r_ε	Poloměr zaoblení špičky	[μ m]
D	Průměr polotovaru	[mm]
l	Délka polotovaru	[mm]
Ra	Průměrné aritmetická hodnota	[μ m]
Rz	Nejvyšší výška profilu	[μ m]
Rq	Střední úchylka drsnosti	[μ m]
Rt	Celková výška profilu	[μ m]
VB _{max}	Opotřebení hřbetu VBD	[mm]
KB _b	Opotřebení čela VBD	[mm]
α	Úhel hřbetu nože	[°]
β	Úhel břitu nože	[°]
γ	Úhel čela nože	[°]
λ_s	Úhel sklonu ostří	[°]
κ_r	Úhel nastavení hlavního ostří	[°]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _e	Mez pevnosti v kluzu	[MPa]
δ	Zbytková napětí	[MPa]
x, y, z	Osy stroje	[-]
R _{pk}	Redukované výšky výstupků	[μ m]
R _{vk}	Redukované hloubky prohlubní	[μ m]
R _{sm}	Průměrná šířka prvků profilu	[mm]
R _k	Hloubka jádra profilu drsnosti	[μ m]
R _{mr1} , R _{mr2}	Materiálový podíl	[%]

1 Úvod do problematiky

1.1 Úvod

Povlaky spadající do kategorie žárových nástřiků jsou v současné době významně využívány v mnoha průmyslových odvětvích. Vzhledem k tomu, že se neustále zvyšují nároky na strojní součásti, je snahou nacházet stále nové kombinace materiálů za účelem vyšší spolehlivosti a lepších funkčních vlastností. Tento trend také souvisí s neustálou potřebou inovovat a zlepšovat kvalitu výrobků z důvodu konkurenčního boje, zmenšení nákladů na výrobu nebo za účelem dodržování evropských norem, např. ISO 9001. Zavedením žárových nástřiků do výroby se také snižuje energetická náročnost výroby a s tím související výrobní náklady. Hlavní využití těchto povlaků je ve zvýšení odolnosti proti mechanickému opotřebení, dobře také odolávají působení agresivního chemického prostředí, korozi, oxidaci, a to i v případě zvýšených teplot. Samotná technologie žárového stříkání prochází neustále inovativním vývojem, kde se hledají nové způsoby efektivního zhotovení těchto specifických povlaků [1] [2] [3].

Žárové nástřiky nacházejí své uplatnění například v automobilovém a leteckém průmyslu, kde se aplikují na díly spalovacích motorů jako ochrana proti opotřebení za zvýšených teplot. Můžeme zde uvést například čepy, písty, válce, ventily, klikové hřídele apod. Významné zastoupení nacházejí také v energetickém průmyslu, kde se aplikují na lopatky turbín jako tepelná bariéra, ochrana proti korozi a kavitaci. Ve strojírenském průmyslu se různé typy žárových nástřiků aplikují na součásti čerpací a hydraulické techniky. V neposlední řadě se určité druhy žárových nástřiků využívají i v tiskařském průmyslu, kde jsou nanášeny na silně namáhané povrchy tiskařských válců [1] [2] [4].

Technologie žárového stříkání se však nevyužívá jen z důvodu zvýšení funkčních vlastností u výroby nových dílů. Svě prakticky nezastupitelné využití mají žárové nástřiky v oblasti renovací strojních součástí. Jedná se o renovace opotřebovaných nebo poškozených součástí, u kterých je výroba nového kusu finančně nákladná nebo obtížná. Renovují se například rozměrná kluzná ložiska, pístnice a ostatní díly spalovacích motorů. V některých případech může být i ekonomicky výhodné použít tuto technologii za účelem opravy chybného obrobení [1] [2] [5].

Hlavní princip technologie žárového stříkání, konkrétně HVOF, spočívá ve vytváření povlaku na povrch základního materiálu. Nástřik je vytvořen ze speciální směsi prášku, nebo z drátu o daném chemickém složení, který je přiveden do strojního zařízení. Zde dochází k natavení jednotlivých částic, které jsou následně urychleny ve speciální trysce. Na povrch základního materiálu tak dopadají tyto natavené částice s vysokou kinetickou energií. Částice se po dopadu vlivem vysoké energie deformují a vytváří tak souvislý povlak s charakteristickou lamelární strukturou a s požadovaným chemickým složením. Na vytváření povlaků se nejčastěji používají různé kombinace slitin ocelí, keramiky, cermetů nebo čistých kovů [2] [4].

Technologie žárového stříkání patří dnes k praktickým a spolehlivým řešením problémů v oblasti ochrany povrchu v mnoha průmyslových odvětvích. Žárové nástřiky lze obecně rozdělit dle jejich chemického složení a způsobu použití v daném průmyslu. Tato disertační práce se zabývá obrobiteľností slitiny NiCrBSi, která je v praxi využívána z důvodu svých výborných vlastností, které zvyšují ochranu proti opotřebením, korozi a oxidaci, a to i v případě zvýšených teplot. Tato speciální slitina zároveň patří k těžkoobrobiteľným materiálům, právě z důvodu své tvrdosti, vysokého podílu niklu a abrazivních prvků v podobě tvrdých karbidů chromu. Z uvedených důvodů se pro obrábění těchto niklových slitin používá výhradně technologie broušení.

Drsnost žárového nástřiku se po aplikaci pohybuje okolo $Ra = 7 \mu\text{m}$. Takto velká drsnost povrchu není vhodná pro funkční účely stříkané plochy. Následné obrobení povlaku je proto nevyhnutelné pro získání nižší drsnosti povrchu a k dodržení geometrických a rozměrových tolerancí. Broušení žárových nástřiků je vzhledem k velmi malým tloušťkám řezů poměrně časově náročné s nízkou produktivitou. S procesem broušení je také spojena řada komplikací, která je blíže popsána v teoretické části práce.

1.2 Význam výzkumu

Hlavní cíl práce je nalezení nového způsobu obrábění slitiny NiCrBSi za účelem zvýšení produktivity procesu. Zvýšení má být docíleno výměnou technologie broušení za technologii obrábění s definovanou geometrií břitu. Za účelem této změny je aplikován speciální způsob obrábění s lineární řeznou hranou, jelikož zde konvenční způsoby obrábění selhávají. Zároveň je ale stanovena podmínka dosažení požadované kvality povrchu, kterou stanovila firma Plasmametal s.r.o., se kterou dlouhodobě ZČU v Plzni spolupracuje v oblasti výzkumu a vývoje.

Organizací, které se zabývají problematikou spojenou s technologií žárového stříkání, je mnoho. Mimo ZČU se této problematice v rámci ČR věnuje např. Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Vysoké učení technické v Brně, Vojenský technický ústav ochrany Brno nebo Ústav fyziky plazmatu AVČR. Uvedené organizace jsou vybaveny nejen kvalitním technologickým vybavením, ale i odborným personálem s letitými zkušenostmi získanými při řešení mnoha úspěšně realizovaných projektů a grantů.

Naprostá většina publikací, které se týkají konkrétně slitiny NiCrBSi, však pojednává o metalografii a testování mechanických vlastností této slitiny. Pracoviště zaměřující se na aplikaci žárového nástřiku se věnují souvislostem mezi změnou vstupních parametrů a dosahovaných vlastností vytvořeného povlaku. Naopak publikací, které se zabývají obecně obrobiteľností různých druhů žárových nástřiků, není mnoho a konkrétně u slitiny NiCrBSi publikace prakticky neexistují. Právě z tohoto důvodu jsou získané informace určitým ukazatelem směru výzkumu a vývoje pro Katedru technologie obrábění na ZČU.

Na základě výše uvedených faktů a skutečností jsou na následující stránce stanoveny jednotlivé dílčí cíle pro teoretickou i experimentální část této disertační práce.

1.3 Stanovené cíle disertační práce

Uvedené cíle disertační práce vycházejí ze získaných informací a zkušeností během studia na KTO-ZČU a z výzkumné činnosti v Regionálním Technologickém Institutu.

1. Teoretická část

Vypracovat ucelený odborný přehled vybraných ovlivňujících faktorů, které souvisí s problematikou obrábění žárového nástřiku NiCrBSi, vyrobeného metodou vysokorychlostního nástřiku pomocí plamene (HVOF) v následující struktuře:

1. Princip vytváření žárového nástřiku a jeho struktura
2. Technologie vysokorychlostního stříkání (HVOF)
3. Charakteristika těžkoobrobitelných materiálů
4. Slitina NiCrBSi (Colmonoy)
5. Způsoby obrábění žárových nástřiků
6. Problematika obrábění s lineární řeznou hranou
7. Hodnocení a souhrn řešeršní činnosti

2. Experimentální část

Hlavní cíle experimentální části:

- Návrh, výroba a optimalizace speciálního nástroje pro obrábění.
- Testování technologie obrábění s lineární řeznou hranou
- Vyhodnocení a volba adekvátní změny za technologii broušení

Hypotéza 1: Aplikací nástroje s lineární řeznou hranou se zvýší účinnost procesu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi v porovnání s technologií broušení minimálně o 30%

Seznam dílčích kroků:

Způsob podélného soustružení je volen z důvodu získání základních poznatků o chování žárového nástřiku NiCrBSi při obrábění s lineární řeznou hranou.

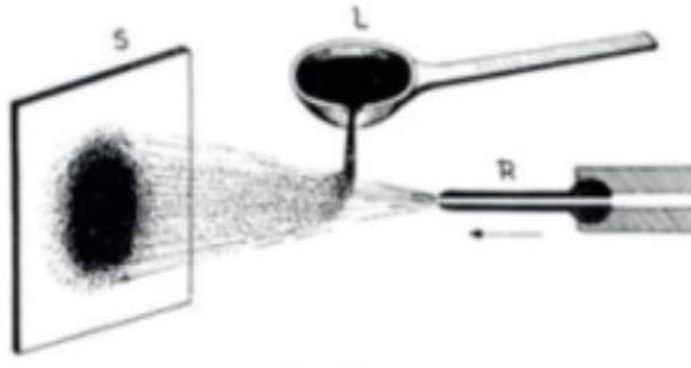
- ✓ Charakterizovat vliv procesních parametrů jako je řezná rychlost v_c , posuv f , hloubka řezu a_p a úhel sklonu ostří λ_s na proces obrábění
- ✓ Určit závislost kvality obrobeného nástřiku na procesních parametrech
- ✓ Otestovat vybrané řezné materiály s ohledem na kvalitu povrchu
- ✓ Provést dlouhodobé testy řezivosti vybraných řezných materiálů
- ✓ Naleznout optimální poměr mezi tloušťkou stříkané vrstvy a odebranou tloušťkou s ohledem na adhezi nástřiku
- ✓ Shrnutí získaných výsledků a závěrečná implementace možných řešení.

2 Technologie žárového stříkání

2.1 Vývoj žárových nástřiků

Technologie žárového stříkání je z dnešního pohledu velmi významnou technologií zasahující do několika průmyslových odvětví. Žárové nástřiky se nejčastěji rozdělují podle použitého zdroje tepelné energie. Z tohoto pohledu dnes existuje mnoho variant, které vytvářejí specifické povlaky s ohledem na potřebnou funkčnost a náročnost výroby [2] [4].

Z historického hlediska nelze technologii žárového stříkání považovat za novinku tohoto století. Jako první totiž s touto technologií přišel Dr. Ing. Max Ulrich Schoop již v roce 1909. Samotná myšlenka vznikla zcela náhodně téhož roku při pohledu na olověný brok, který byl vystřelen proti zdi. Olověný brok se nejen pomocí vysoké kinetické energie při nárazu na stěnu zploštil, ale vlivem plastické deformace také ulpěl na zmíněné stěně. Téhož roku byl vyzkoušen první experiment této technologie, a to pouhým přiléváním taveniny z lící pánve před trysku generující stlačený vzduch, viz Obrázek 1. Po podání patentu na nově objevenou technologii se Dr. Schoopovi nedostalo přílišné uznání, jelikož byl celý proces přirovnáván k nanášení roztavené čokolády [6] [7].



Obrázek 1: První experiment technologie žárového stříkání [6]

Druhý zásadní milník v historii žárového stříkání přišel v roce 1918, kde byl podán patent na technologii stříkání za pomoci elektrické energie. Tento princip se po mnoha modifikacích využívá dodnes, kde se za pomoci elektrického oblouku taví konce přídavného materiálu. Následným několikaletým vývojem a objevem schopnosti ionizovat plyn byl po druhé světové válce proveden experiment využívající pro proces stříkání zdroj plazmy. Časem bylo vynalezeno a modifikováno mnoho způsobů vytváření povlaku, které lze obecně rozdělit podle použitého zdroje tepelné energie a principu tavení přídavného materiálu. Metody nanášení žárových nástřiků lze dále rozdělit podle formy přídavného materiálu. Forma přídavného materiálu je zásadním způsobem ovlivněné použitou technologií a obecně se jedná o varianty s použitím materiálu ve formě prášku, drátu nebo ve formě tyčinek [6] [7].

Rozdělení podle použitého zdroje tepelné energie: [4]

- **Tepelný zdroj vytvořený vlivem elektrické energie**
 - Nástřik elektrickým obloukem
 - Plazmový nástřik
- **Tepelný zdroj vytvořený vlivem hoření směsi**
 - Nástřik plamenem
 - Detonační nástřik
 - Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)
- **Bez tepelného zdroje**
 - Nástřik za studena

2.2 Princip vytváření žárových nástřiků

Samotný princip vytváření žárového nástřiku je zjednodušeně popsán v předchozím textu. Lze ho chápat jako nanášení souvislé vrstvy přídavného materiálu na předem připravený povrch stříkané součásti. Celý proces lze vyjádřit schematicky (Obrázek 2). V prvním bodě je potřeba mít vhodný přídavný materiál o určitém chemickém složení. Tento materiál je přiváděn do speciálního zařízení, kde dochází k tavení jednotlivých částic přídavného materiálu. Natavené částice jsou následně pomocí proudu vzduchu urychleny do výstupní trysky, kde jsou usměrněny směrem k povrchu. Po dopadu na základní materiál se vlivem vysoké kinetické energie částice deformují a vytvářejí souvislý povrch o typické lamelární struktuře [2] [3] [4].

Proces žárového stříkání



Obrázek 2: Technologický proces žárového stříkání [7]

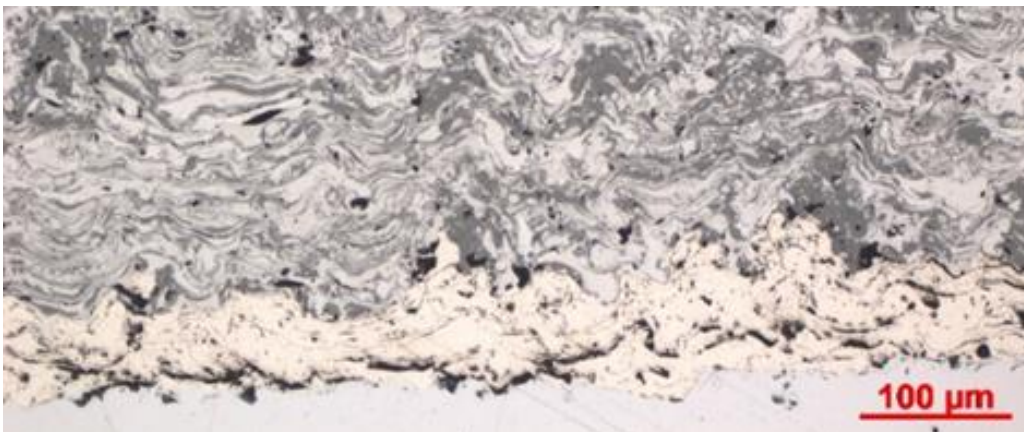
Proces nanášení žárového nástřiku je ve své podstatě velmi specifický, jelikož na povrch základního materiálu nedopadají atomy či ionty přídavného materiálu, ale přímo natavené částice. Proto lze pomocí vzhledu struktury jednoduše rozeznat tento proces nanášení při porovnání s ostatními způsoby jako je např. povlakování břitových destiček označované jako CVD a PVD.

2.3 Technologická příprava před stříkáním

Pro správné přilnutí stříkaného povlaku je před aplikací potřeba provést několik technologických kroků. Pro správné přilnutí povlaku na povrch součásti je nutné tento povrch nejprve zdrsnit. Zdrsnění povrchu se provádí obvykle otryskáváním s použitím písku z oxidu hlinitého (Al_2O_3). Zdrsnění povrchu lze provádět ručně, ale pro zaručení homogenních vstupních podmínek zdrsněného povrchu je vhodné strojní řešení např. pomocí robota. Po otryskávání následuje čištění povrchu od zbytků nečistot v acetonové lázni za pomoci ultrazvuku. Odstranění nečistot funguje na principu akustické kavitace, kde se ze zdroje ultrazvukových vln šíří velké množství mikroskopických bublin s velkým povrchovým napětím. Chemické vlastnosti acetonu spolu s ultrazvukem odstraňují téměř veškeré nečistoty a mastnotou.

Posledním krokem technologické přípravy stříkaných vzorků bývá předehřev. Předehřátí vzorků je obvykle do $250\text{ }^\circ\text{C}$ a je prováděno za několika účely. Jednak vlivem vysoké teploty dochází ke spálení posledních nečistot. Zároveň se tímto snižuje teplotní gradient mezi stříkaným materiálem a obrobkem, který po aplikaci chladne mnohem pomaleji a tím se znatelně snižuje zbytkové tahové napětí v povlaku. Předehřev součásti je proto velmi důležitý i pro celkovou funkčnost a vlastnosti povlaku.

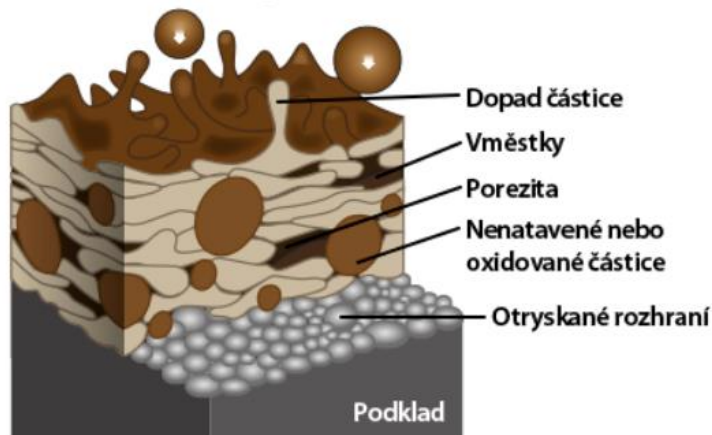
Existují případy, kde se využívá další přídavný materiál, který napomáhá k lepší přilnavosti povrchu s povlakem a lze jej tedy zařadit také do přípravných fází. Tato tenká vrstva slouží jako tzv. vazebný povlak, který zlepšuje uchycení finálního povlaku, ale zároveň nemusí mít vliv na mechanické vlastnosti vrchního povlaku. Jako příklad lze uvést žárový nástřik Fe13Cr , na který se specializuje firma Plasmametal. Přídavný materiál z chrom-uhlíkové martenzitické oceli (ekvivalent 17 026) ve formě plného drátu patří k levnější skupině přídavných materiálů. Tento povlak se vytváří metodou žárového stříkání pomocí elektrického oblouku a vykazuje vyšší heterogenitu v porovnání s povlaky vytvořenými metodou žárového stříkání pomocí plazmy nebo vysokorychlostním stříkáním plamenem (HVOF). Pro dosažení maximální přilnavosti k substrátu se používají mezivrstvy na bázi niklových slitin (NiCr , NiAl , NiTi) (Obrázek 3) [8].



Obrázek 3: Metalografie žárového nástřiku Fe13Cr s mezivrstvou [8]

2.4 Struktura žárového nástřiku

Struktura vytvořeného žárového nástřiku je z hlediska stavby a vzhledu specifická. Ze samotného principu technologie vyplývá, že natavené částice nového materiálu se po dopadu na základní materiál výrazně deformují do jednotlivých lamel diskovitého tvaru. Takto deformované částice se v oblasti žárového stříkání nazývají „splaty“. Vzhledem k široké škále procesních parametrů a mnoha metodám žárového stříkání je logické, že výsledná struktura nebude z hlediska vzhledu a kvality vždy stejná. Grafický vzhled struktury žárového nástřiku zobrazuje Obrázek 4 [4].



Obrázek 4: Grafické zobrazení struktury žárového nástřiku [9]

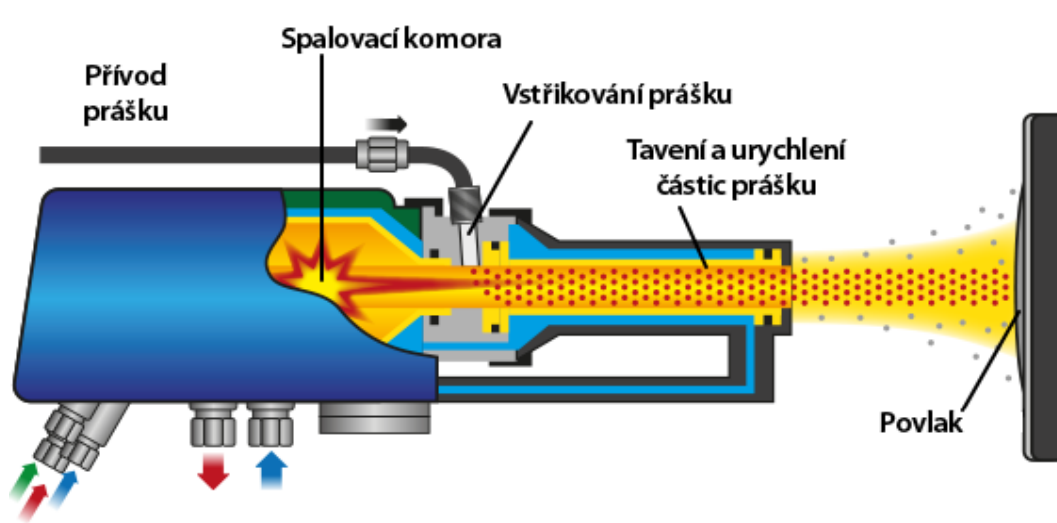
Mimo natavených částic diskovitého tvaru se ve struktuře vyskytují i částice, která nebyla zcela natavená. Tyto částice se po dopadu na povrch deformují jen částečně, a proto jsou spíše globulárního charakteru. S ohledem na čistotu přídavného materiálu a procesu nanášení se ve struktuře nacházejí také různé vměstky a nečistoty. Povlak vzhledem k použité technologii vždy obsahuje určité procento pórovitosti. Všechny tyto nedokonalosti pak mají významný vliv na kvalitu a životnost povlaku [1] [3] [5].

S větším procentem výskytu vměstků, pórů a oxidických částic se zhoršuje celková přilnavost povlaku k základnímu materiálu. Zhoršuje se také přilnavost mezi jednotlivými částicemi povlaku vlivem vyšší pórovitosti a tím pádem menších stykových ploch. S vyšším výskytem pórů ve struktuře se zhoršuje i korozní odolnost. Korozní medium pak pomocí pórů prostupuje skrz povlak až k základnímu materiálu, kde dochází k oxidaci. Všechny uvedené aspekty pak mohou způsobit vznik trhlin a tím i destrukci části povlaku [1] [3] [5].

Pro zlepšení struktury povlaku lze použít tepelné zpracování ve formě opětovného zahřátí nebo přetavení. Po takové úpravě dochází k homogenizaci a k lepší přilnavosti povlaku k základnímu materiálu. Splaty a póry ve struktuře, přestávají být po přetavení výrazně rozpoznatelné, snižuje se také zbytkové napětí v povlaku. Při dostatečně vysoké teplotě je možné docílit i přivaření povlaku k základnímu materiálu. Pro tepelné zpracování se využívají různé druhy laserů, plamene nebo se vzorky mohou vložit přímo do pece [10] [11].

2.5 Technologie vysokorychlostního stříkání (HVOF)

Technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem je v anglické literatuře označována jako HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Tuto metodu lze označit jako nejmodernější způsob vytváření žárového nástřiku. HVOF technologie navazuje na detonační způsob nanášení nástřiku, s tím rozdílem, že proces HVOF probíhá kontinuálně. Ve spalovací komoře nastává hoření směsi paliva s kyslíkem, které je přiváděno nepřetržitě. Tento poměr má zásadní vliv na tavnou teplotu, která se pohybuje v rozmezí od 2800 do 5000 °C. Nejčastěji použité palivo pro hoření bývá kerosin, ale používá se v menší míře i propylen, acetylen nebo vodík. Ve spalovací komoře nastává po smíchání paliva s kyslíkem zažehnutí pomocí svíčky. Při hoření probíhá tavení přídavného materiálu ve formě prášku, který je přiveden ke spalovací komoře nosným plynem, obvykle dusíkem. Natavené částice jsou následně urychleny ve speciální trysce, která je ve tvaru konvergentně divergentním. Natavené částice jsou urychleny až na supersonické hodnoty dosahující 1000 m/s. Pro zajištění stabilního procesu nanášení je sledována teplota a tlak ve spalovací komoře, celá konstrukce je také vybavena vnitřním chlazením pro lepší regulaci procesu, (Obrázek 5) [3] [5].



Obrázek 5: Grafické zobrazení struktury žárového nástřiku [12]

Při porovnání s jinými technologiemi žárového stříkání se u HVOF dosahuje nejvyšší rychlosti natavených částic. Především z tohoto důvodu se vytváří velmi kvalitní povlak s adhezí dosahující až 90 MPa. Také z hlediska struktury je vytvořený povlaku velmi kvalitní s nízkým obsahem oxidů a malou pórovitostí do 0,5 %. Při porovnání s nástřikem pomocí plazmy má však metoda HVOF nižší tavnou teplotu, proto je určena spíše pro materiály se střední a nízkou teplotou tavení jako je např. nikl, chrom, kobalt, karbid wolframu apod. Výhodou nízké tavné teploty je naopak zachování původních vlastností přídavného materiálu, jelikož zde nedochází k výrazným fázovým změnám [2] [3].

2.6 Slitina NiCrBSi

Slitina NiCrBSi je specifická tím, že vykazuje velmi dobrou odolnost proti opotřebení. Také dobře odolává korozi a kavitační erozi. Co se týká použitých materiálů, lze tuto slitinu zařadit do kategorie, která má nízký dopad na životní prostředí. Jelikož je v této slitině dominantním prvkem nikl, lze tento nástřik zařadit do kategorie niklových slitin, viz Tabulka 1. Nikl zajišťuje slitině její specifické vlastnosti v podobě odolnosti proti otěru, oxidaci a korozi, a to i v případě zvýšených teplot. Chrom je druhým prvkem, který je ve slitině silně zastoupen. Ten spolu s niklem zvyšuje již zmíněnou odolnost proti korozi a oxidaci. Chrom navíc tvorbou chromových precipitátů (karbidů a boridů) zvyšuje významně tvrdost této slitiny. Důležitým prvkem ve slitině NiCrBSi je uhlík, který vytváří spolu s chromem velmi tvrdé karbidy, které zvyšují tvrdost celé slitiny a na druhé straně bor, který společně s chromem vytváří velmi tvrdé boridy. Doprovodným prvkem lze označit křemík, který slouží především k lepšímu způsobu nanášení v podobě povlaku pro metodu vysokorychlostního nástřiku (HVOF). Bor napomáhá rovněž ke snížení teploty tavení pro dokonalé roztavení prášku ve spalovací komoře. Křemík na druhou stranu zlepšuje samovolný tok natavených částic ve výstupní trysce snížením viskozity připravené směsi [1] [3] [13].

Tabulka 1: Chemické složení NiCrBSi [33]

Prvek	Ni	C	Cr	Si	B	Fe	O
NiCrBSi	Základ	0,76 %	15,16 %	4,65 %	3,19 %	3,87 %	0,043 %

Slitinu NiCrBSi lze jako žárový nástřik nanášet třemi různými způsoby. Jedná se o vysokorychlostní nástřik (HVOF), plazmový nástřik nebo starší způsob nástřiku pomocí plamene. Každý ze způsobů stříkání má odlišný princip fungování, proto jsou z nich logicky získávány rozdílné výsledné vlastnosti hotového nástřiku [1] [3] [13].

Nástřik pomocí plamene se v dnešní době řadí spíše ke starším metodám. Proti jiným metodám má nástřik znatelně horší vlastnosti v podobě vyšší pórovitosti a menší přilnavosti k základnímu materiálu. Vlivem hoření kyslíku s acetylenem je v nástřiku také vyšší výskyt oxidů. Vyšší pórovitost souvisí s nižší pracovní teplotou (max. 3 200 °C) a nižší rychlostí stříkání. Pórovitost nástřiku může v některých případech dosáhnout až 20 %, což má výrazný vliv na tvrdost a životnost žárového nástřiku. Vzhledem k nižší pořizovací ceně a menším provozním nákladům má tato metoda stále své využití pro součásti s menšími nároky na kvalitu [1] [3] [13].

Nástřik pomocí plazmy patří k modernějším metodám, kde se využívá tepelná energie z elektrického oblouku. Tavicí teplota je výrazně vyšší než v případě nástřiku plamenem i metodou HVOF – cca 1 200 až 20 000 °C. Právě díky tomu dochází často k úplnému natavení částic, proto má výsledný povlak jen velmi malé procento pórovitosti. Přilnavost povlaku k základnímu materiálu je také výrazně větší než u nástřiku plamenem a při použití uzavřené komory lze dosáhnout i minimálního množství oxidů ve struktuře. Své nevýhody má plazma především ve složitosti a vyšší pořizovací ceně. Vysoká teplota, která sice přispívá k menší pórovitosti a vyšší přilnavosti může na druhou stranu způsobit nechtěné fázové změny [1] [3] [13].

3 Problematika obrábění těžkoobrobitelných materiálů

3.1 Charakteristika obráběných materiálů

Norma DIN ISO 513 rozděluje materiály v obrábění do šesti základních skupin (Obrázek 6). Každou skupinu lze chápat jako kategorii materiálů, která při obrábění způsobuje specifické namáhání rezného břitu. Vzhledem k vlastnostem jako je vysoká tvrdost, pevnost, nízká tepelná vodivost a výskyt tvrdých abrazivních částic lze převážnou většinu žárových nástřiků zařadit do kategorie materiálů s písmenem ISO-H a ISO-S [14] [15] [16].

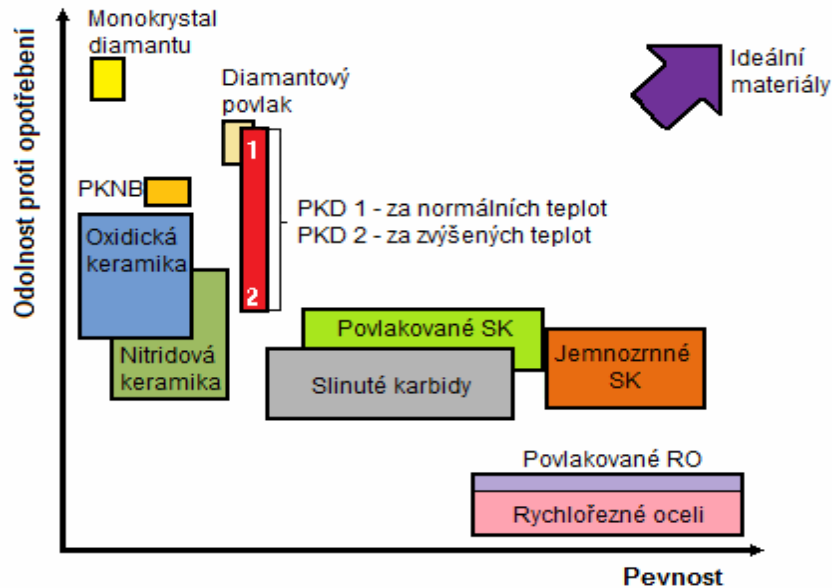
Identifikační písmeno a barva	Hlavní materiály
P	Uhlíkové, legované, feritické a nástrojové oceli, uhlíková ocelolitina skupiny 26, nízko a středně legované ocelolitiny skupiny 27, feritické a martenzitické korozivzdorné oceli
M	Nerezové oceli (austenitické a feriticko-austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné)
K	Šedá litina nelegovaná i legovaná, tvárná litina, temperovaná litina
N	Neželezné kovy, nekovy (hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny, slitiny mědi, bronz, mosaz, keramika a jiné vysoce abrazivní nekovy)
S	Super slitiny a titanové slitiny (žárupevné speciální slitiny na bázi niklu nebo kobaltu, titanové slitiny)
H	Tvrdé materiály (uhlíkové nebo kalené oceli o tvrdosti 48 – 65 HRC, zušlechtěné oceli s pevností nad 1500 MPa, nástrojové oceli, rychlořezné oceli, pružinové oceli, tepelně zpracované oceli, tvrzená litina, slitiny s tvrdou povrchovou vrstvou, slinuté karbidy, tvrdé niklové slitiny, atd.)

Obrázek 6: Rozdělení obráběných materiálů dle DIN ISO 513 [16]

Slitiny v kategorii ISO-S představují širokou škálu různě legovaných ocelí a materiálů na bázi niklu, titanu a kobaltu. Typickým příkladem je například Inconel s obsahem až 50 % niklu. Typická vlastnost těchto materiálů je postupné zpevňování během obráběcího procesu a vznik velmi vysokých teplot z důvodu nízké teplotní vodivosti. Slitiny na bázi niklu zvyšují houževnatost materiálu a tím ulpívají na břit rezného nástroje, kde mají tendenci vytvářet nárůstek [14] [17].

V kategorii ISO-H se vyskytují materiály s velmi vysokou tvrdostí v rozmezí 45–65 HRC. Takové tvrdosti se běžně dosahuje např. kalením a následným popuštěním oceli. Při obrábění tvrdých materiálů vzniká stejně jako u ISO-S velké množství tepla a břit je namáhán především abrazivním opotřebením [16] [18] [19].

3.2 Nástrojové materiály



Obrázek 7: Rozdělení řezných materiálů v závislosti na tvrdosti [20]

V současné době se často pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů třídy ISO-S a ISO-H využívají vyměnitelné břitové destičky (VBD). Použití monolitních nástrojů z nástrojové oceli nebo slinutých karbidů není v této oblasti příliš ekonomické. V závislosti na obráběném materiálu se pro VBD využívají v největší míře slinuté karbidy. Mezi speciální materiály pak lze zařadit řeznou keramiku, cermet, kubický nitrid bóru nebo polykrystalický diamant. Typické rozdělení řezných materiálů v závislosti na tvrdosti a houževnatosti představuje Obrázek 7 [16] [18] [19].

3.2.1 Slinuté karbidy

Slinutý karbid je tvořen kombinací materiálů z karbidového základu a pojivem. Jako karbidový základ se využívá karbid wolframu a pojivem je kobalt. Další složky obsažené ve struktuře jsou např. karbid wolframu, titanu, tantalu nebo niobu. Slinuté karbidy lze rozdělit do šesti základních skupin dle ISO normy stejně jako v případě rozdělení materiálu. Pro obrábění žárových nástřiků by bylo vhodné vybírat z kategorie S a H [16] [18].

Při volbě slinutého karbidu se sleduje obsah pojiva a velikost zrna. Obecně platí, že s rostoucím obsahem pojiva roste houževnatost slinutého karbidu a naopak. Výběr správné velikosti zrna je další možností, jak ovlivnit celkovou tvrdost VBD. Velikost zrn se v současné době pohybuje od 0,2 – 5 μm . V případě obrábění tvrdých materiálů je vhodné volit karbidy s menší velikostí zrna do 1 μm [16] [19].

3.2.2 Řezná keramika

Řezná keramika nachází své uplatnění při obrábění těžkoobrobitelných materiálů s tvrdostí do 60 HRC. Skládá se převážně z krystalických látek složených z anorganických sloučenin nekovového charakteru. S neustálým zvyšováním produktivity a nároků na obrábění probíhá vývoj i v oblasti deponování keramiky ve formě tenkých vrstev zvyšující ořezuvzdornost. Keramika dobře snáší tepelné a dynamické namáhání, proto se využívá například v oblasti vysokorychlostního nebo vysokoposuvového obrábění [16] [18].

Řezná keramika se obecně rozděluje na keramiku na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) a nitridu křemíku (Si_3N_4). Čistá keramika není příliš vhodná pro obrábění tvrdých materiálů z důvodu menší pevnosti a tepelné vodivosti. Keramika na bázi Al_2O_3 více odolává tepelným šokům, ale tvrdostí je přibližně srovnatelná se slinutým karbidem. Neoxidická keramika na bázi Si_3N_4 se při porovnání s keramikou na bázi Al_2O_3 vyznačuje lepší odolností proti tepelným šokům a vyšší houževnatostí. Při porovnání se slinutým karbidem si neoxidická keramika udržuje svou tvrdost i při vysokých teplotách [16] [18].

Keramika na bázi Al_2O_3 se za účelem zvýšení svých vlastností vyztužuje vlákny z karbidu křemíku tzv. whiskery. Whiskerová keramika dosahuje nejvyšší houževnatosti, tvrdosti a odolnosti proti tepelnému namáhání ze všech uvedených typů. Na základě toho je tento typ keramiky nejvhodnější pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů s vysokou tvrdostí [16] [18].

3.2.3 Cermet

Cermety jsou stejně jako slinuté karbidy vyráběny práškovou metalurgií. Název je odvozen ze dvou základních složek, kterými jsou keramické částice (TiC , TiN , TiCN) a kovové pojivo (Ni , Mo , Co). Cermety se ve srovnání se slinutým karbidem vyznačují lepší odolností proti opotřebení, vysokou pevností za tepla i chemickou stabilitou. Zároveň však vykazují menší houževnatost a odolnost proti teplotním rázům [16] [18] [21].

Cermety neustále procházejí inovativním vývojem pro získání lepších užitných vlastností pro proces obrábění. Novinkou je například speciální slinovací proces, který dokáže vytvořit houževnatější jádro spolu s tvrdou povrchovou vrstvou. Tento typ cermetu je vhodný především pro dokončovací operace za vysokých řezných rychlostí. Cermety se vyrábějí také s různými typy povlaků. Převážně se využívá PVD technologie povlakování pro zachování ostrého a zároveň houževnatého břítu. Povlakované vrstvy zaručují vyšší odolnost proti opotřebení a tvorbě nárůstku, což zvyšuje trvanlivost břítu [16] [18] [21].

3.2.4 Kubický nitrid bóru

Kubický nitrid bóru (CBN) se vyznačuje po diamantu nejvyšší tvrdostí v oblasti řezných materiálů. Zároveň má také výbornou odolnost proti opotřebení a rázům. Vyznačuje se také chemickou stabilitou během obrábění, a to i při vysokých teplotách. Jako řezný materiál existuje ve třech formách, kterými jsou destička z CBN, povlak CBN nebo pájený řezný břit CBN na podkladu. [16] [18].

Konečné vlastnosti jsou závislé na velikosti a obsahu zrn CBN a na obsahu a typu použitého pojiva. Vysoký obsah CBN zvyšuje trvanlivost nástroje, proto je takové složení vhodné pro náročné hrubovací operace, kdy dochází k velkému mechanickému a teplotnímu namáhání. Na druhou stranu použití keramického pojiva a menšího obsahu CBN je vhodné na dokončovací operace z důvodu větší chemické stability a lepší odolnosti proti opotřebení. Kubický nitrid bóru má své zastoupení především při obrábění kalených ocelí, kde z důvodu affinity uhlíku k železu nelze použít polykrystalický diamant. Pomocí CBN se obrábí také tvrzené litiny nebo žáruvzdorné slitiny [16] [18] [19] [22].

3.2.5 Polykrystalický diamant

Stejně jako u Kubického nitridu bóru se polykrystalický diamant (PKD) vyrábí způsobem práškové metalurgie, kdy se zrna o určité velikosti smíchávají s pojivem a jsou slinovány na podložku většinou ze slinutého karbidu. Velikost zrna PKD se udává v rozmezí od 0,5 do 3 μm . Jako pojivo se používá kobalt, keramika nebo nitrid titanu. Z obecných grafů vyplývá, že nejmenší míra opotřebení je u PKD v kombinaci jemnějšího zrna s keramickým pojivem. S rostoucí velikostí zrn roste náchylnost ke vzniku opotřebení. Stejně tak větší opotřebení nástroje vzniká při použití kobaltového pojiva než pojiva TiN [16] [18] [22].

Hlavní nevýhoda PKD je především v neschopnosti využití tohoto materiálu při obrábění různých ocelí z důvodu afinity k uhlíku. Diamant se také při dosažení teploty 650 $^{\circ}\text{C}$ začne měnit na grafit, z důvodu nízké teplotní stálosti. Ze získaných poznatků vyplývá, že se diamant nejvíce využívá při obrábění různých neželezných kovů a slitin především mědi, mosazi, bronzu, titanu apod. Často se používá při obrábění hliníku s vysokým obsahem křemíku z důvodu výborné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Své zastoupení má také při obrábění různých kompozitních materiálů s obsahem skelných nebo uhlíkových vláken. Obecně se udává, že nástroje z diamantu mají až 10x větší trvanlivost než nástroje ze slinutého karbidu [16] [18] [22].

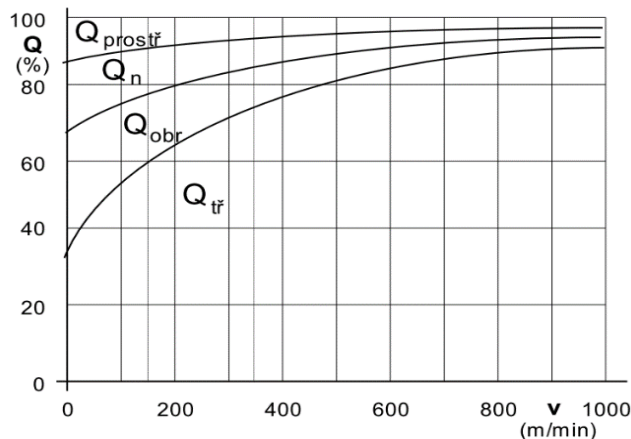
3.3 Produktivní metody obrábění

3.3.1 Vysokorychlostní obrábění HSC

Vysokorychlostní režim obrábění označovaný jako HSC vychází z počátečních písmen anglického názvu High Speed Cutting. Řezná rychlost se obecně u HSC obrábění bere jako mnohonásobně vyšší než je standardní, které se pohybuje dle doporučení výrobců břitových destiček do řezných rychlostí maximálně $v_c = 350$ m/min. Veškeré rychlosti nad touto hranicí lze považovat za vysokorychlostní obrábění, které může v krajních mezích pro specifické typy obrábění dosáhnout dokonce až 18 000 m/min. Stroje, na kterých je možné použít HSC režim obrábění jsou zpravidla velmi přesné CNC obráběcí centra jako je např. stroj DMG CTX Beta vyskytující se v halových laboratořích RTI s otáčkami vřetena do max. 12 000 ot/min. Při námi obráběném průměru 100 mm to v extrémním případě odpovídá řezné rychlosti $v_c = 3700$ m/min [23] [24].

Výhodou použití režimu vysokorychlostní obrábění spočívá především ve zvýšení produktivity obrábění vlivem zkrácení výrobních časů s tím, že kvalita obrobeného povrchu by měla být stejná nebo v některých případech i lepší než při standardním obrábění. Při překročení kritické řezné rychlosti začne v obráběném materiálu docházet k fyzikálním a chemickým změnám vlivem vysoké teploty v místě řezu. Zvýšená teplota v místě řezu má několik pozitivních účinků na proces obrábění, které se týkají hlavně oblasti vzniku třísky. Změny vyvolané vysokou teplotou přispívají k oddělování třísky přímo v rovině stříhu, čemuž napomáhá i menší řezný odpor, který s rostoucí teplotou klesá. Řezné síly tak klesají vlivem sníženého řezného odporu, ale i z důvodu menšího pěchování třísky a zmenšení jejího průřezu [23] [24].

Graf 1 ukazuje, že se zvyšující se řeznou rychlostí odchází přibližně 90 % vzniklého tepla do třísky, která se tak dostává až do teploty tavení. To vede ke snížení součinitele tření mezi třískou a čelem řezného materiálu a tím ke zmenšení abrazivního opotřebení na řezném ostří. Se zvyšující se řeznou rychlostí také klesá teplo prostupující do nástroje nebo obráběného materiálu, čímž nedochází ke zbytkovému pnutí, či hrubnutí zrna [23] [25].



Graf 1: Experimentálně zjištěné tepelné bilance v závislosti na řezné rychlosti [25]

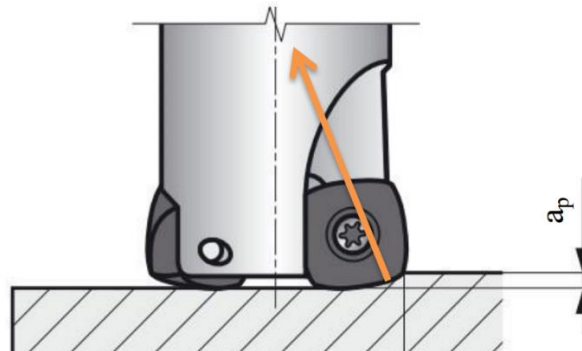
Z výše uvedených informací lze režim vysokorychlostního obrábění využít i pro těžkoobrobitelné materiály, které se doposud obráběly pouze technologií broušení. Mezi takové materiály se řadí i žárový nástřík NiCrBSi, jehož problematika obrábění je řešena v této disertační práci. Pro HSC obrábění je však potřeba nasadit velmi tvrdé řezné materiály či povlaky jako např. kubický nitrid bóru, který je schopen obrábět materiály s tvrdostí přesahující 60 HRC. Na rozdíl od diamantu (PKD) si CBN stabilně zachovává své vlastnosti až do 2000 °C a zároveň s ním lze obrábět i tvrdé železné slitiny, které s diamantem (kvůli své afinitě uhlíku k železu) použít nelze. Při správně zvolených řezných podmínkách je možné s HSC obráběním vytvořit povrchy, které mohou svou kvalitou konkurovat i broušeným plochám s drsností v rozsahu $R_a = 0,2 - 0,8 \mu\text{m}$. Vzhledem k tomu, že je vysoká teplota při HSC obrábění žádoucí, není tento proces chlazen řeznou kapalinou. Při obrábění je možné použít např. stlačený vzduch, který napomáhá odvodu roztavené třísky z nástroje a polotovaru [23] [26].

3.3.2 Vysokoposuvové obrábění HFC

Další produktivní způsob obrábění je metoda vysokoposuvového obrábění, který má z anglického názvu zkratku HFC (High Feed Cutting). Značně se tento způsob obrábění využívá u frézování, kde ho je možné naleznout pod pojmem HFM (High Feed Milling). Princip této metody spočívá ve změně orientace výslednice řezných sil směrem do osy nástroje, jelikož je předpokladem vysoké tuhosti i v případě tenkých nástrojů. Vysoká produktivita obrábění je zaručena zvýšeným posuvem při obrábění ($f_z = 1 - 3,5 \text{ mm}$), který je kompenzován menší šířkou záběru (do $a_p = 1 \text{ mm}$) [27] [28].

Vyšší hodnoty posuvu mají však negativní vliv na drsnost povrchu, snížení tuhosti a na velikost řezných sil. Z tohoto důvodu je třeba zvolit speciální nástroje určené pro tento způsob obrábění. Za tímto účelem se využívají monolitní karbidové nástroje nebo nástroje s robustními břitovými destičkami s malým úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 10-15^\circ$. Vlivem malého úhlu směřuje výslednice řezných do osy nástroje, viz Obrázek 8 [27] [28].

V praxi se často tento způsob využívá při obrábění např. úzkých hlubokých kapes, kde lze použít pouze tenký a dlouhý nástroj. Štíhlý nástroj pak při nevhodně nastavených řezných podmínkách ztrácí tuhost, což má vliv na stabilitu řezného procesu a na vzhled obrobenej plochy.



Obrázek 8: Princip metody vysokoposuvového obrábění HFC [27]

4 Rešeršní část

4.1 Broušení žárových nástřiků

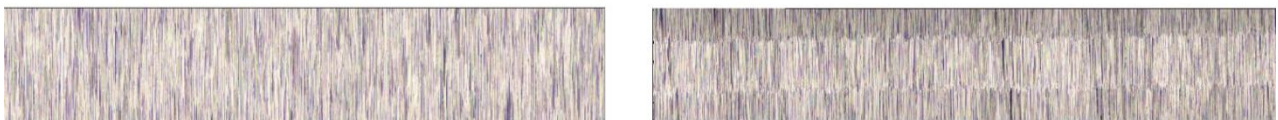
Převážná většina žárových nástřiků spadá do kategorie těžkoobrobitelných materiálů z důvodu svého specifického složení. Obsahují řadu těžkoobrobitelných prvků, kterými jsou například nikl, chrom, wolfram nebo vanad, které zvyšují tvrdost těchto speciálních slitin. Tyto prvky také spolu s uhlíkem vytvářejí velmi tvrdé karbidy ve struktuře, které způsobují intenzivní otupování rezné hrany při procesu obrábění. Právě z těchto důvodů se v dnešní době využívá převážně technologie broušení pro snížení drsnosti na povrchu nástřiku [29] [30] [31].

Broušení žárových nástřiků je vzhledem k velmi malým tloušťkám řezů poměrně časově náročné. S procesem broušení je také spojena řada komplikací, které je potřeba brát v úvahu. Jedním z problémů bývá například nesprávně ořvnaný brusný kotouč a nedosažení dostatečné kruhovitosti obrobku. Při špatné funkci filtru se mohou dostat drobné částice odebraného materiálu opět do rezného procesu pomocí rezné kapaliny. Možné problémy mohou také vzniknout nesprávným výběrem kotouče, u kterého se zohledňuje velikost zrna, výběr materiálu a pojiva. Vzhledem k velmi vysokým otáčkám nástroje je potřeba řešit i případný vznik vibrací při broušení [30] [32] [33].

Při broušení žárových nástřiků je důležité si uvědomit, že se nejedná o objemově homogenní materiál, ale že strukturu tvoří jednotlivé splaty natavených částic, obecně lze takovou strukturu pojmenovat jako lamelární. Při nevhodně nastavených podmínkách dochází k delaminaci žárového nástřiku, vzniku trhlin a tvorbě pórů [3].

Například v publikaci [31] zabývající se broušením Inconelu 718 jsou uvedeny problémy při hledání optimálních rezných podmínek. Inconel 718 a nástřik NiCrBSi sdílí společné vlastnosti, které jsou klíčové pro jejich použití v extrémních podmínkách. Oba materiály obsahují nikl a chrom jako základní složky, což jim poskytuje odolnost vůči korozi a teplotní stabilitu. Tato vlastnost je klíčová pro zachování dlouhodobé životnosti a spolehlivosti v náročných prostředích.

V publikaci je detailně popsán experiment, při kterém ze 14 kombinací různých rezných podmínek nebyla ani jednou dosažena požadovaná drsnost povrchu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Na povrchu obrobku bylo po broušení zaznamenáno příčné zvlnění, viz Obrázek 9. Po určitém čase broušení také nastávalo postupné zanášení brusného kotouče patrně z důvodu velkého množství niklu ve slitině [31].

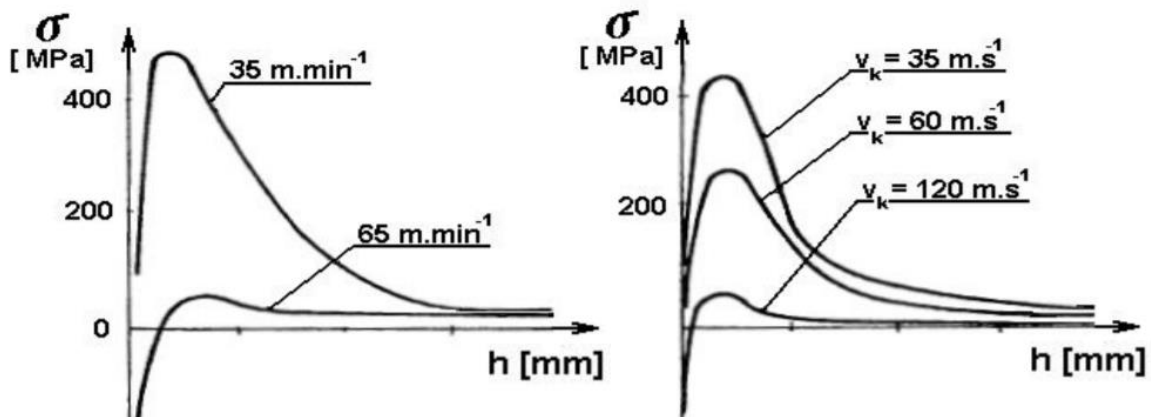


Obrázek 9: Povrch po broušení bez / s příčným zvlněním [31]

Další problém může nastat při nevhodně nastavených řezných podmínkách a vytvářením tak vysoké teploty v místě řezu. Vlivem vysoké teploty dochází ke strukturálním a fázovým změnám a při chladnutí obrobku může docházet ke vzniku tahových zbytkových napětí. Všechny uvedené body pak přispívají ke vzniku trhlin a tím ke snížení životnosti součásti [3] [30].

Velikost zbytkových napětí ve struktuře a jejich směr má podstatný vliv na životnost a funkčnost obrobku plochy nástřiku. Zbytková napětí v povrchové vrstvě vznikají působením doprovodných jevů při obrábění. Zbytková napětí vznikají v povrchu při nerovnoměrných plastických deformacích povrchové vrstvy např. důsledkem působení řezných sil, vysokého ohřevu nebo fázových změn materiálu. Zbytková napětí lze rozdělit na napětí tahová a tlaková. Obecně lze také říci, že každá operace způsobuje jiný typ zbytkových napětí, ale největší vliv na konečný stav má poslední provedená operace. Právě z tohoto důvodu je důležité věnovat zbytkovým napětím značnou pozornost, jelikož se pohybujeme v oblasti dokončovacích operací. Zbytková tlaková napětí v nástřiku zvyšují celkovou soudržnost struktury a tím i jeho životnost. Naopak přítomnost tahových zbytkových napětí může vést ke vzniku a šíření trhlin a tím k praskání a předčasnému selhání v provozu [34].

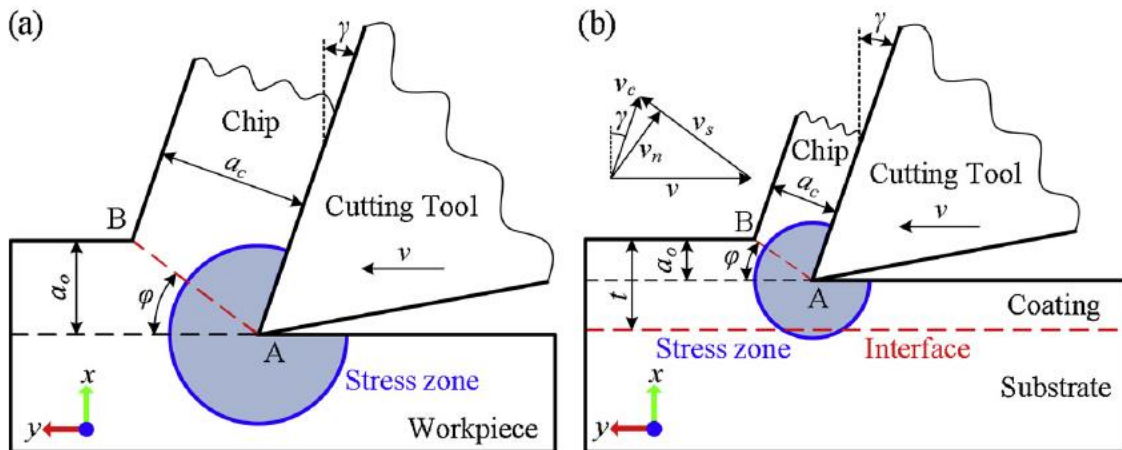
Obecně se uvádí, že zbytková napětí vznikají především při nevhodně nastavených podmínkách při broušení, jelikož zde vzniká velmi vysoké tepelné zatížení. Graf 2 zobrazuje závislost řezné rychlosti a zbytkových pnutí v materiálu, kdy při menších řezných rychlostech mohou vzniknout zbytková tahová napětí dosahující velikosti $\delta = 400$ MPa. Zároveň je z grafu patrné, že z uvedených řezných rychlostí pro broušení nebylo dosaženo zbytkových tlakových napětí [34].



Graf 2: Vliv řezných podmínek broušení na velikost zbytkových napětí [34]

4.2 Obrábění žárových nástřiků definovanou geometrií břitu

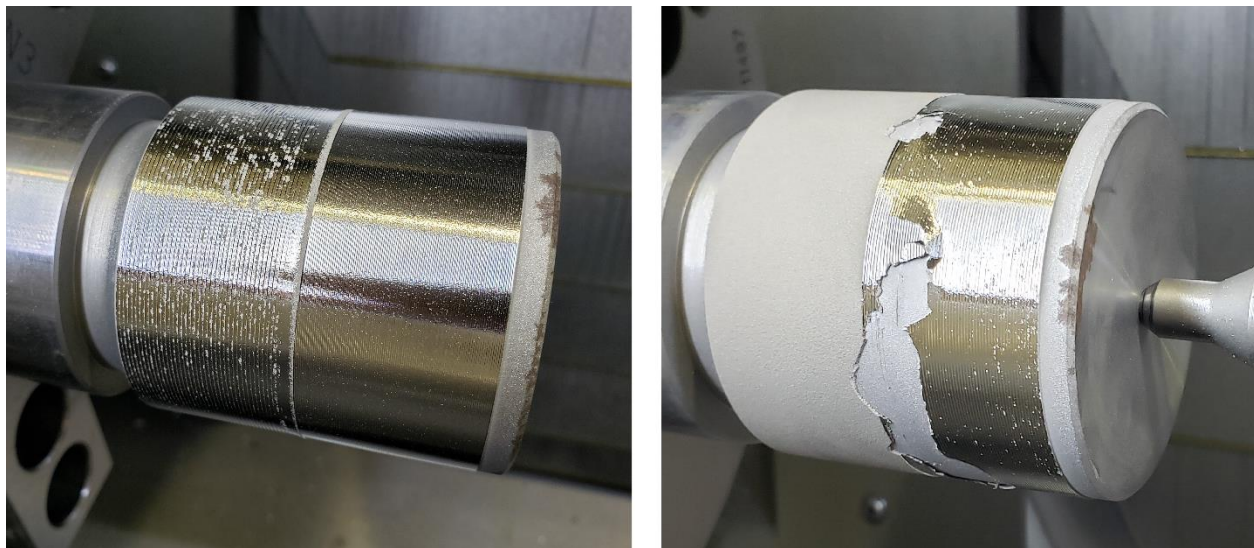
Drsnost žárového nástřiku se po aplikaci pohybuje okolo $Ra = 7 \mu\text{m}$. Takto velká drsnost povrchu není vhodná pro funkční účely stříkané plochy. Následné obrobení povlaku je proto nevyhnutelné pro získání nižší drsnosti povrchu a k dosažení geometrických a rozměrových tolerancí. Následné obrábění doprovází také změna integrity povrchu, do které spadá např. adheze vytvořeného povlaku, tvrdost a deformační zpevnění nebo zbytková napětí. Vzhledem k velmi malým tloušťkám žárových nástřiků (z ekonomického hlediska) zde nastává problém s velikostí a hloubkou ovlivněné vrstvy Obrázek 10 [35].



Obrázek 10: Deformace při obrábění homogenního materiálu a žárového nástřiku [35]

Kritické řezné podmínky nastávají při obrábění, kdy plastická deformace zasahuje do oblasti základního materiálu. Vyvoláním plastické deformace do takové hloubky může mít za následek prasknutí nebo částečné vytrhání žárového nástřiku, jak je zobrazeno na Obrázku 11. Z tohoto důvodu je pro nástřiky charakteristické obrábění s velmi malou hloubkou řezu v rozsahu 0,1 – 0,5 mm. Na druhou stranu je potřeba dodržet podmínku pro stabilní obrábění tak, že nastavená hloubka odřezávané vrstvy musí být větší než poloměr zaoblení řezného břitu a špičky [35].

Problémy při obrábění žárových nástřiků vznikají zejména ze dvou důvodů. Prvním důvodem je přilnavost žárového nástřiku k podkladovému substrátu. Druhým důvodem je vysoká tvrdost a vysoký obsah těžkoobrobitelných prvků, které zhoršují obrobitelnost a způsobují intenzivní opotřebení na řezném nástroji. Zhoršená přilnavost povlaku je zaznamenána především na okrajích stříkaného polotovaru, kde povlak ztrácí svou soudržnost a dochází k odtržení ze základního materiálu vlivem vysokých řezných sil. Při nevhodně nastavených řezných podmínkách dochází k vytrhávání nástřiku mimo okraje nebo k úplnému odloupení nástřiku z obrobku. Obrázek 11 zobrazuje výsledek špatně nastavených podmínek při obrábění nástřiku Stellite 6 provedené ve výzkumných laboratořích Regionálního Technologického Institutu [8] [36].



Obrázek 11: Porušení nástřiku vlivem nevhodně nastavených podmínek při obrábění [8]

Přilnavost neboli adheze povlaku k základnímu materiálu je velmi důležitá vlastnost při tepelném nebo mechanickém zatěžování. Po aplikaci žárového nástřiku nastává rychlé tuhnutí přídavného materiálu, které vedou ke vzniku tahových zbytkových napětí ve struktuře. Velikost napětí se mění v závislosti na procesních parametrech procesu jako např. velikost tavné teploty, rychlost a typ nosného plynu, aplikační vzdálenost, typ prostředí apod. Ke snížení tahových napětí se také využívá přehřátí povrchu základního materiálu pro zmenšení teplotního šoku. Celková kvalita povrchu a tím i přilnavost je značně ovlivněna i mírou mikrodefektů vytvořených v přechodové oblasti. Ve struktuře se běžně objevuje několik typů mikrodefektů jako je pórovitost, obsah nečistot nebo oxidů, viz Obrázek 12 [3] [35].



Obrázek 12: Defekty v přechodové oblasti nástřiku Stellite 6 [37]

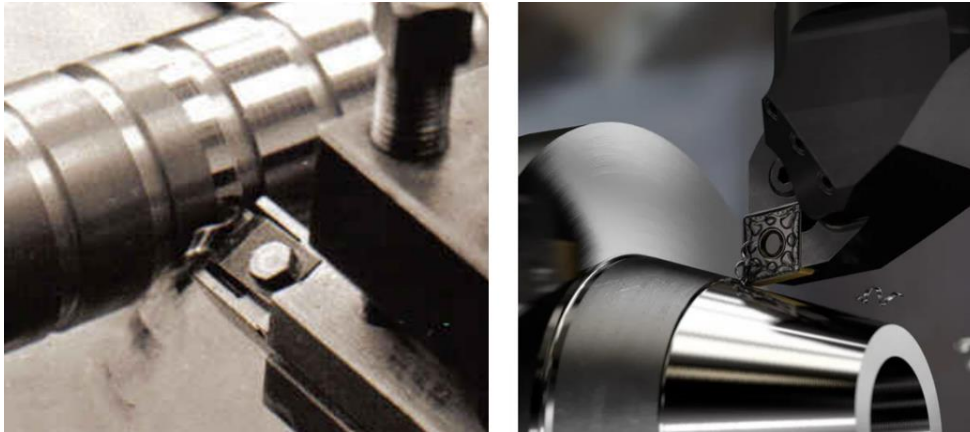
Shluk většího množství těchto vad zejména v přechodové oblasti se základním materiálem opět vede k poškození povlaku během obrábění. Pro potřebné zakotvení nástřiku je potřeba nejprve povrch základního materiálu řádně odmastit a odstranit veškeré nečistoty. Toto čištění se provádí formou otryskávání, které slouží i ke zdrsnění povrchu pro lepší ukotvení natavených částic. Po provedení těchto operací se doporučuje nanášet nástřik nejdéle do čtyř hodin, z důvodu oxidace vzdušnou vlhkostí, která by snížila přilnavost k povrchu. V oblasti žárových nástřiků obecně platí, že s rostoucí tloušťkou nástřiku klesá adheze povlaku [2] [3] [36].

Specifická kombinace těžkoobrobitelných prvků vytváří velmi intenzivní zátěž na řezný nástroj. Ve struktuře se nacházejí jednak tvrdé částice jako karbidy a oxidy, které způsobují silnou abrazi na řezné hraně. Žárové nástřiky se díky vynikající odolnosti proti opotřebení vyznačují také vysokou hodnotou tvrdosti, která se v případě slitiny NiCrBSi pohybuje okolo 60 HRC. Bez ohledu na způsob stříkání se struktura skládá z natavených částic diskovitěho tvaru, takže strukturu lze považovat za heterogenní. Je třeba také zmínit nízkou tepelnou vodivost a již zmiňovanou pórovitost, které nepříznivě působí na proces obrábění. Proto je při návrhu řezných podmínek důležité věnovat všem výše uvedeným aspektům velkou pozornost [35] [36].

4.3 Problematika obrábění s lineární řeznou hranou

Obrábění lineární řeznou hranou patří stále i v dnešní době k velmi specifickému způsobu obrábění. I přesto, že se pojem lineární řezná hrana objevila několik let dříve v různých internetových zdrojích, neexistuje stále mnoho materiálů a publikací zabývajících se problematikou a reálným využitím tohoto typu obrábění.

U běžného způsobu obrábění dochází k odřezávání materiálu tím, že špička nástroje vniká do materiálu jako první, zároveň špička nástroje směřuje do osy obrobku (Obrázek 13). U obrábění lineární řeznou hranou nemusí dojít ke kontaktu špičky bříty s obráběným materiálem, kontakt tak nastává pouze se zbylou částí řezné hrany. Zároveň je pozice nástroje orientována tangenciálně směrem k obrobku a pozice bříty destičky je v mimoběžné poloze, který může být natočen o úhel sklonu ostří λ_s . Takto polohovaný nástroj přispívá k vyšší tuhosti během obrábění, z důvodu lepšího rozložení řezných sil vzhledem k širší délce řezu. S tím je bohužel doprovázeno i zvýšení řezných sil, které lze částečně kompenzovat nižší nastavenou hloubkou řezu. Řezné síly jsou výrazně závislé na úhlu sklonu ostří λ_s a tím i šířce řezu, kde se předpokládá, že s nižší hodnotou úhlu se budou tyto síly zvětšovat ($\lambda_s = 0^\circ$, břit nástroje je rovnoběžný s osou polotovaru). S ohledem na delší šířku řezu je tento způsob obrábění vhodný např. pro progresivní metodu vysokoposuvového obrábění HFC [38] [39].

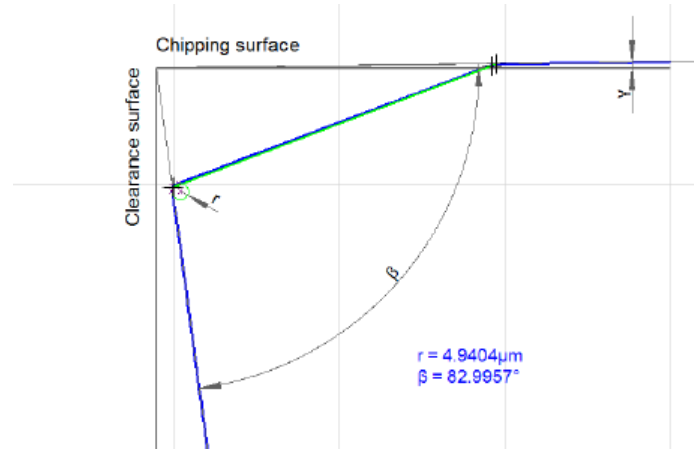


Obrázek 13: Obrábění lineární řeznou hranou (vlevo) a konvenční soustružení (vpravo) [18]

Při nalezení správného poměru mezi úhlem sklonu ostří a drsnosti obrobeného povrchu se v ideálním případě předpokládá využití jedné řezné hrany až ve čtyřech pozicích, pro čtvercovou destičku to znamená celkem šestnáct řezných hran pro jednu pozitivní břitovou destičku. V případě negativního typu destičky (oboustranné) by tento počet byl dokonce dvojnásobný. Tím je možné využít celou délku řezné hrany, buď při postupném posouvání pozice Y během obrábění, nebo fixací různých pozic břitu během obrábění s rozdílnou hodnotou Y osy. Využití celé délky řezné hrany u konvenčního obrábění je prakticky nemožné z důvodu extrémního nárůstu řezných sil, které by vedlo pravděpodobně k přetížení a zastavení stroje. Například u destičky typu CCMT 09T308 s délkou řezné hrany 9,7 mm je doporučeno obrábět v rozsahu hloubky řezu $a_p = 0,8 - 3$ mm [40].

Problém u konvenčního způsobu obrábění nastává při nastavení hloubky řezu menší, než je rádius zaoblení špičky břitové destičky r_ϵ . V takovém případě není zaručena stabilita obrábění vlivem vzniku vibrací a ztráty kontroly utváření třísky. Speciální břitové destičky určené na obrábění měkkých materiálů např. hliníku se nabízejí s variantou zaoblení špičky $r_\epsilon = 0,1$ mm. S malým poloměrem špičky však významně klesá pevnost břitu, která je při obrábění tvrdých žárových nástřiků potřebná. Při aplikaci žárového stříkání je snahou vytvořit povlak o minimální tloušťce 0,2 – 0,3 mm po obrobení (broušení). Z ekonomického hlediska se proto běžně tloušťka nástřiku po aplikaci pohybuje okolo 0,5 mm. Pro konvenční způsob obrábění je takto malá hloubka řezu nevyhovující i v případě jednoho obráběcího přejezdu, natož při kombinaci hrubovacího a dokončovacího řezu, který je potřebný pro zvýšení přesnosti výroby [40] [41].

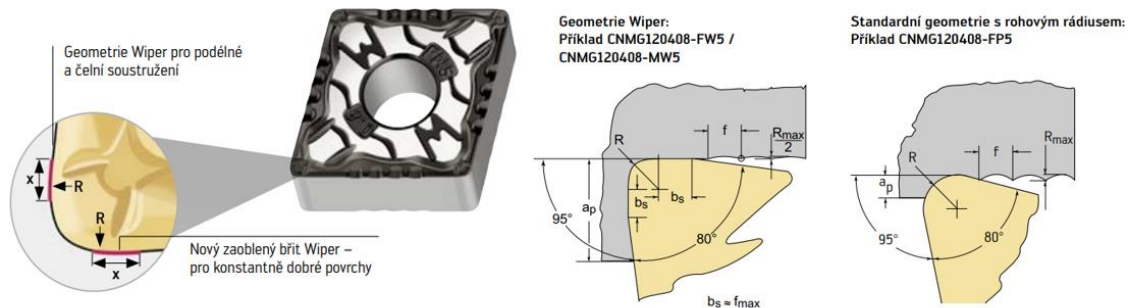
Při obrábění s lineární řeznou hranou se pro oddělení třísky využívá břit s poloměrem zaoblení r_n , který je podstatně menší než poloměr špičky r_ϵ (běžně 5–30 μm), proto umožňuje obrábění i ve velmi malých hloubkách řezu v rozsahu $a_p = 0,05 - 0,1$ mm. Pro zvýšení pevnosti u takto ostré geometrie břitu se zpravidla provádí úprava v podobě různých druhů fazet jako je např. 0,2 mm x 20°, viz Obrázek 14.



Obrázek 14: Zaoblení břitu u destičky CBN-B s fazetkou 0,2 x 20°

Mezi hlavní nevýhody tohoto typu obrábění je v komplexnosti obrábění, kde lze využít lineární řeznou hranu pouze na válcových nebo mírně kuželových plochách. Složitější kontury jsou vzhledem ke tvaru a pozici uložení břitové destičky velmi problematické, stejně jako obrábění rohů nebo přilehlých čel polotovaru. Uvedené nedostatky však pro problematiku řešenou v této disertační práci nejsou podstatné, jelikož je záměrem obrábět žárový nástřík NiCrBSi pouze na vnějších válcových plochách.

V závislosti na zlepšení drsnosti obrobeného povrchu se u klasického způsobu obrábění využívá speciálního typu břitových destiček nesoucí název Wiper. Obecně se udává u destiček typu Wiper dvojnásobné zvýšení kvality povrchu při zachování stejného posuvu při srovnání s běžnou břitovou destičkou. Trik dosahující lepší kvality povrchu spočívá v prodloužení kontaktu řezné hrany břitové destičky s obráběným materiálem (Obrázek 15) [42].



Obrázek 15: Schéma břitové destička Wiper [42]

Z Obrázku 15 vyplývá vliv poloměru zaoblení špičky na velikost vzniklých výstupků na obrobené ploše. Postupným zvětšováním poloměru dojde k delší stykové ploše břitu s obráběným materiálem a tím ke zlepšení drsnosti povrchu. Stejný princip je využit i při obrábění s lineární řeznou hranou, kde je celková drsnost závislá na posuvu f , úhlu sklonu ostří λ_s a na poloměru obrobku r . Standardní výpočet teoretické drsnosti R_z je při běžném způsobu obrábění závislý pouze na posuvu a poloměru špičky břitové destičky r_e , viz vzorec (1) [42].

Jedna z prvních myšlenek obrábění s lineární řeznou hranou je popsána v knize „*Teória a prax trieskového obrábania*“ [39], ve které se prof. Vasilko z Technické univerzity v Košicích zabývá lineární řeznou hranou v závislosti na dosažení lepší kvality povrchu Rz. V knize se věnuje popisu a odvození vztahů pro výpočet drsnosti povrchu Rz u obrábění s lineární řeznou hranou (2), které porovnává s výsledky a výpočty standardního soustružení (1).

Výpočet drsnosti Rz u běžného způsobu soustružení:
$$Rz = \frac{f^2}{8 r_\epsilon} [\mu\text{m}] \quad (1)$$

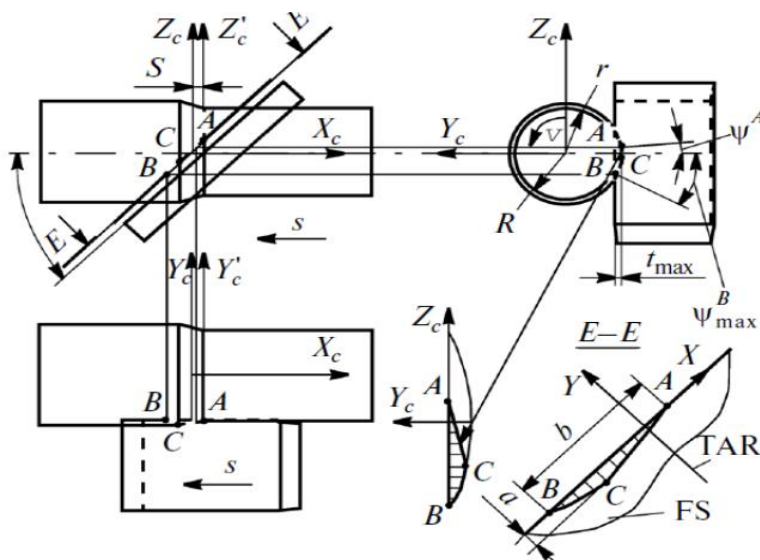
Výpočet drsnosti Rz při soustružení s lineární hranou:
$$Rz = \sqrt{\frac{f^2}{4} tg^2 \lambda_s + r^2} - r [\mu\text{m}] \quad (2)$$

Při zohlednění řezných parametrů v podobě vyšších řezných posuvů a menších hloubek řezu lze vzorec s lineární řeznou hranou upravit do zpřesňující formulace výpočtu (3) drsnosti Rz. [43]

$$Rz = \sqrt{\frac{f^2 tg^2 \lambda_s}{4 \left[1 - tg \lambda_s \frac{f}{2\pi r}\right]^2} + r^2} - r [\mu\text{m}] \quad (3)$$

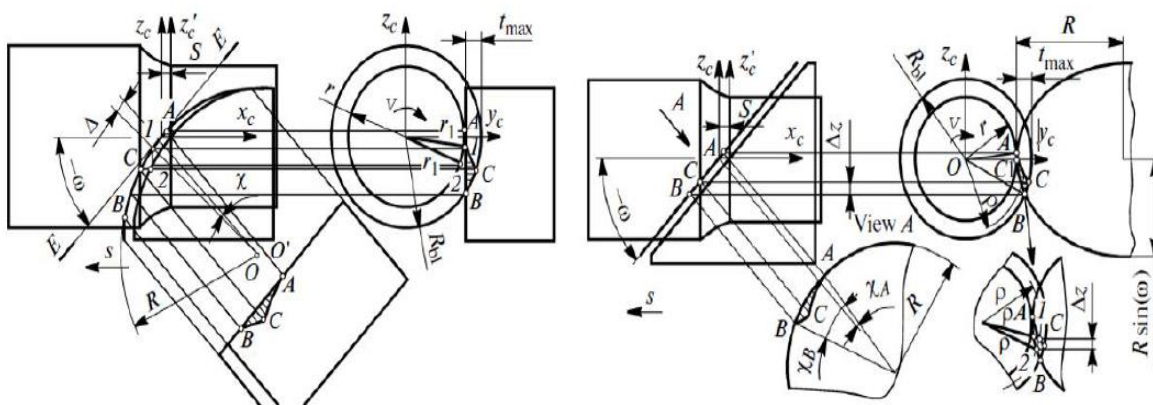
Problematické obrábění s lineární řeznou hranou se prof. Vasilko dále věnuje ve svých dalších publikacích například „*Highly productive tools for turning and milling*“ [43] nebo „*Machining with linear cutting edge*“ [44]. Ve svých publikacích provedl několik experimentů, kde obráběl ocel s označením C45 s hloubkou řezu $a_p = 1$ mm. Plány a hodnocení experimentů jsou zaměřeny na měření a rozbor řezných sil a měření drsnosti povrchu.

Další publikace věnující se této problematice je možné dohledat u autora A. V. Filippova, který se zabývá průřezem odebíraného materiálu v závislosti na poloměrech obráběných ploch, úhlu sklonu ostří a hloubky řezu. V jedné z prvních publikací s názvem „*Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning*“ [45] popisuje tento vztah při obrábění s lineární hranou pod úhlem $\lambda_s = 45^\circ$ s hloubkou řezu $a_p = 1$ mm a průměrem polotovaru $D = 20$ mm (Obrázek 16). Na základě tohoto článku se dále věnuje odvození vztahů pro výpočet průřezu odřezávané vrstvy v závislosti na zmiňovaných parametrech řezu [46].



Obrázek 16: Obrábění s lineární hranou $\lambda_s = 45^\circ$, $a_p = 1$ mm, $D = 20$ mm [45]

Po vytvoření těchto zmiňovaných závislostí se A. V. Filippov zabývá tvorbě obdobných závislostí, ale u nástrojů, které mají lineární ostří s mírně zaoblenými konci. Toto zaoblení tak ovlivňuje geometrii čela a hřbetu řezné části a tím i změnu průřezu odřezávané vrstvy. Uvedenou myšlenku popisuje v několika svých dalších publikacích např. „*Cutting-Force Components in Turning by Tools with No Cutting Tip*“ [47], kde jsou zkoumány nástroje s menším či větším zakřivením břitu, viz Obrázek 17. Zkoumán je vliv hloubky řezu, polohy s úhlem sklonu ostří, složky řezných sil a řezná síla v přímém a nepřímém směru obrábění. Obecně se uvádí, že nástroje tohoto typu vytvářejí při porovnání s běžnými nástroji lepší vzhled i drsnost povrchu. Naopak omezení vzniká v komplexnosti použití těchto nástrojů a zvýšený výskyt vibrací během obrábění z důvodu vyšších řezných sil. Filippov se také detailně věnoval řezným silám a jejich závislostí na parametry obrábění, které však nejsou pro problematiku řešenou v této disertační práci relativní [46] [47].



Obrázek 17: Porovnání nástroje s lineární a zakřivenou řeznou hranou [46]

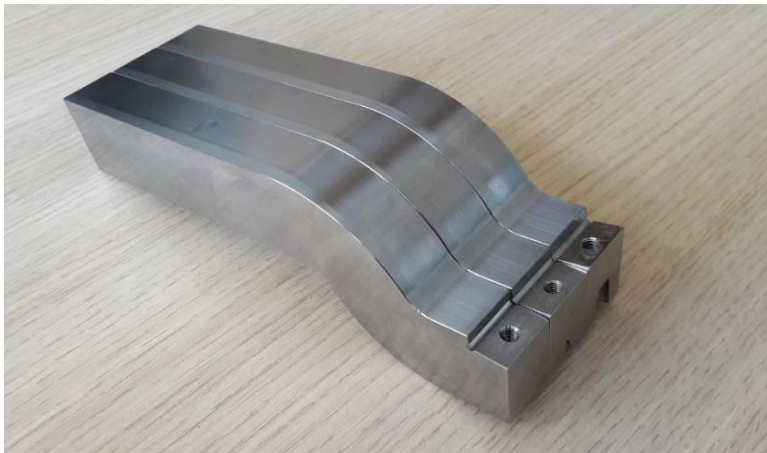
4.4 Rešeršní část

V úvodu rešeršní části zde provedu shrnutí mé diplomové práce s názvem „Analýza procesu obrázení tvrdých povlaků hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje“ [37]. V práci byl zkoumán základní proces obrábění žárového nástřiku pomocí ortogonálního volného řezání. Obráběný materiál byl žárový nástřik Stellite 6 (Tabulka 2) vytvořený metodou vysokorychlostního nástřiku HVOF. Cílem práce bylo vyhodnotit vliv jednotlivých rezných parametrů v závislosti na drsnost povrchu Ra, Rz, Rt a Rq. Hlavním smyslem tohoto výzkumu je, stejně jako v disertační práci, zvýšení produktivity obrábění žárového nástřiku. Zvýšení produktivity mělo být docíleno změnou technologie výroby z broušení na proces obrázení [37].

Tabulka 2: Chemické složení slitiny Stellite 6 [48]

Co	Cr	W	C	Ni	Fe	Si	Mo	Mn	ostatní
45 - 60 %	27 - 32 %	4 - 6 %	0,9 - 1,4 %	max. 3 %	max. 3 %	max. 1,5 %	max. 1 %	max. 1 %	max. 1 %

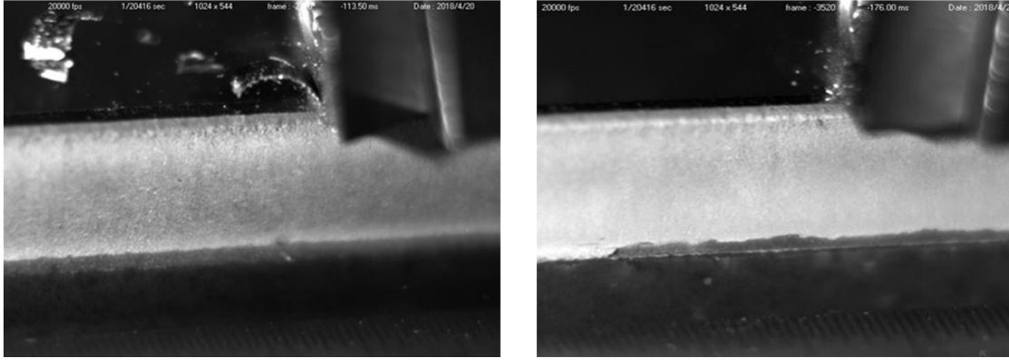
V praktické části je popsán proces obrázení žárového nástřiku včetně soustavy SNO. Pro experiment byly vyrobeny tři typy nástrojů z oceli 42CrMo4 (Obrázek 18), které se liší v nastavení úhlu čela ve variantách $\gamma = -7^\circ, 0, 7^\circ$. Další variovaným parametrem je hloubka řezu ve dvou variantách $a_p = 0,1$ a $0,3$ mm. Posledním zkoumaným parametrem byla rezná rychlost ve čtyřech hodnotách v rozmezí $v_c = 20-55$ m/min. V práci je také proveden chemický rozbor nástřiku Stellite 6, včetně měření mikrotvrdomosti a tloušťky žárového nástřiku. Při porovnání naměřených hodnot s tabelovanými hodnotami došlo ke shodě ve všech zkoumaných oblastech [37].



Obrázek 18: Varianty obráběcích nožů s rozdílným úhlem čela [37]

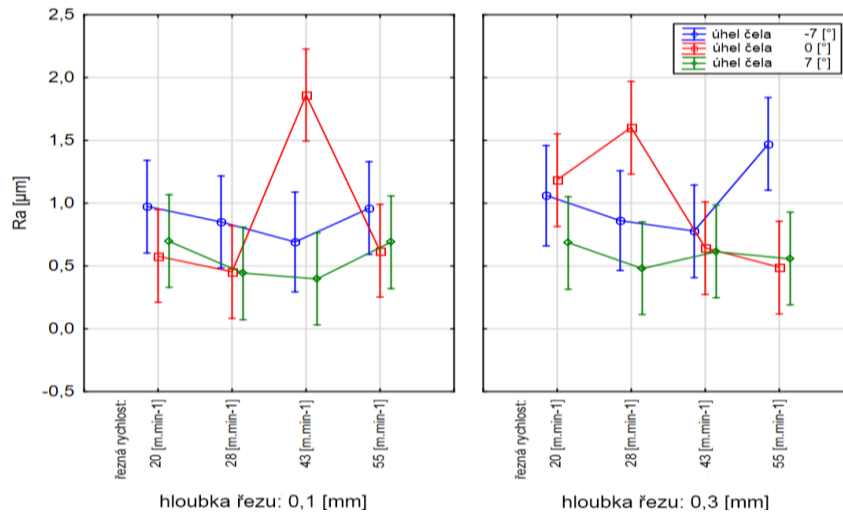
Po provedeném experimentu následuje vyhodnocení opotřebení břitových destiček na hřbetu a čele břitu (hodnoty VB_{max} a KB_b) a měření drsnosti obrobeného nástřiku. Pro detailnější představu průběhu jednotlivých řezů byly provedeny záznamy na vysokorychlostní kameru, z kterých je možné hodnotit stabilitu obrábění a tvorbu třísky. Maximální drsnost povrchu Ra je stanovena na hodnotě $Ra \leq 0,8 \mu m$ [37].

Při porovnání s hodnotou drsnosti R_a bylo dosaženo stejné nebo lepší hodnoty hned u několika vzorků. Nejlepší naměřený výsledek drsnosti byl zjištěn u vzorku číslo 11 a 17. Zde se naměřená drsnost povrchu pohybovala na hodnotě $R_a = 0,25 \mu\text{m}$. Při zkoumání záznamů z jednotlivých řezů je patrné, že u několika vzorků nedošlo k odřezávání nastavené hloubky řezu z důvodu špatného zaříznutí břitu, viz Obrázek 19 [37].



Obrázek 19: Rozdíl v utváření třísky při variantě úhlu čela $\gamma = -7^\circ, +7^\circ$ [37]

Pro lepší pochopení celého procesu obrábění je provedeno zpracování experimentu formou statistického vyhodnocení (Graf 3) pro parametry drsnosti R_t , R_a , R_z a R_q . Ze získaných grafů statistického vyhodnocení vyplývá, že všechny variované parametry mají významný vliv na obrobenou drsnost povrchu, v případě hloubky řezu se doporučuje obrábět s ohledem na vzniklé opotřebení s $a_p = 0,1 \text{ mm}$. Z hlediska tvorby třísky je vhodné obrábět s negativním úhlem čela $\gamma = -7^\circ$ se střední řeznou rychlostí $v_c = 28$ a 43 m/min [37].



Graf 3: Vliv nastavení úhlu čela, hloubky řezu a řezné rychlosti na drsnosti povrchu R_a [37]

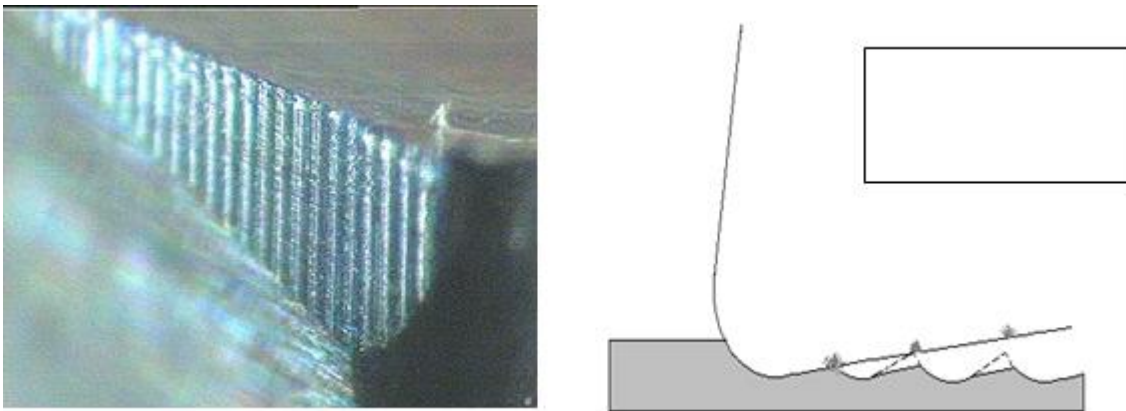
Na závěr lze konstatovat, že provedený experiment a statistické vyhodnocení bylo přínosné, jelikož byla zmapována další oblast problematiky obrábění zárovňných nástřiků. Získané informace lze částečně využít při řešení dalších procesů obrábění například metodou soustružení nebo frézování. Z diplomové práce vznikl odborný článek publikovaný na zahraniční konferenci.

Publikace s názvem „*Turning of thick thermal spray coatings*“ [36] se zabývá obrobitelností žárového nástřiku s názvem METCO 450, který se vyrábí z prášku s obsahem tvrdých částic Al_2O_3 s obsahem 5 % niklu. Nikl zvyšuje odolnost proti oxidaci, zatímco částice Al_2O_3 zvyšují oteruvzdornost povlaku. Žárový nástřik METCO 450 se využívá pro povlakování dílů plynových turbín z hliníku, oceli nebo slitin niklu [36] [49].

Použitou technologií byl zvolen proces soustružení polotovaru dlouhých 250 mm, průměru 100 mm z uhlíkové oceli. Jako řezné materiály byly vybrány destičky ze slinutého karbidu K10 ve variantě CCGX 120404 a CNGP 120412 od firmy Sandvik. Pro obrábění za vysokých řezných rychlostí byl vybrán kubický nitrid bóru s označením PCBN 120408 z firmy Mitsubishi. Cílem experimentů bylo zkoumání řezných podmínek v následujících hodnotách [36].

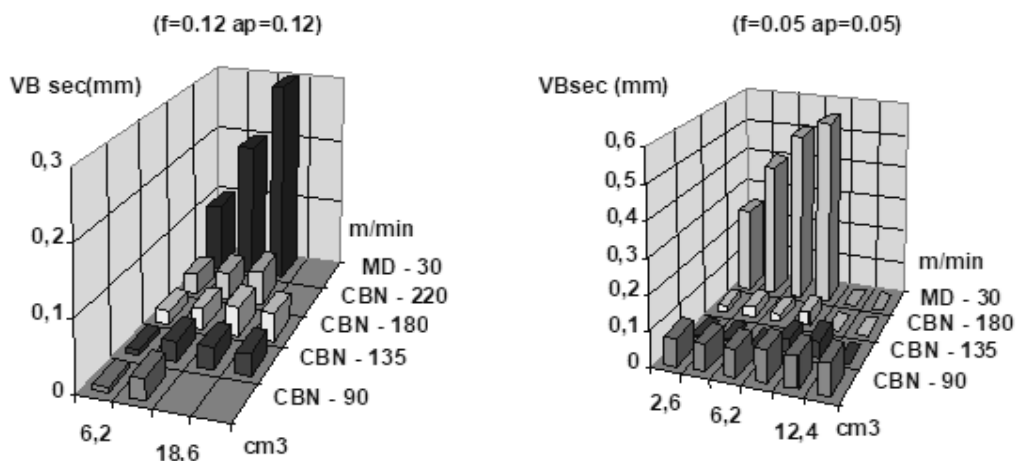
Zvolená řezná rychlost pro SK byla 30 m/min, pro PCBN v rozmezí 90–220 m/min. Hloubka řezu a posuv byl zvolen pouze ve dvou hodnotách 0,05 a 0,12 mm (mm/ot). Zkoumala se závislost řezných podmínek na opotřebení břitových destiček do vrubu 0,3 mm [36].

Provedený experiment a jeho výsledky ukazují, že vzniklé opotřebení u SK bylo vždy pozorováno na hřbetu vedlejšího ostří a posouvalo se směrem ke špičce. Uvedené opotřebení je specifické pro dokončovací operace s nízkou hloubkou řezu. Opotřebení ve formě drážek je způsobeno abrazivním třením hřbetu o obrobený povrch (Obrázek 20). Při měření rozestupu vzniklých drážek se ukázalo, že hodnoty odpovídají nastaveným hodnotám posuvu. Tyto rýhy se v případě nástroje PCBN objevují podstatně méně z důvodu větší tvrdosti [36].



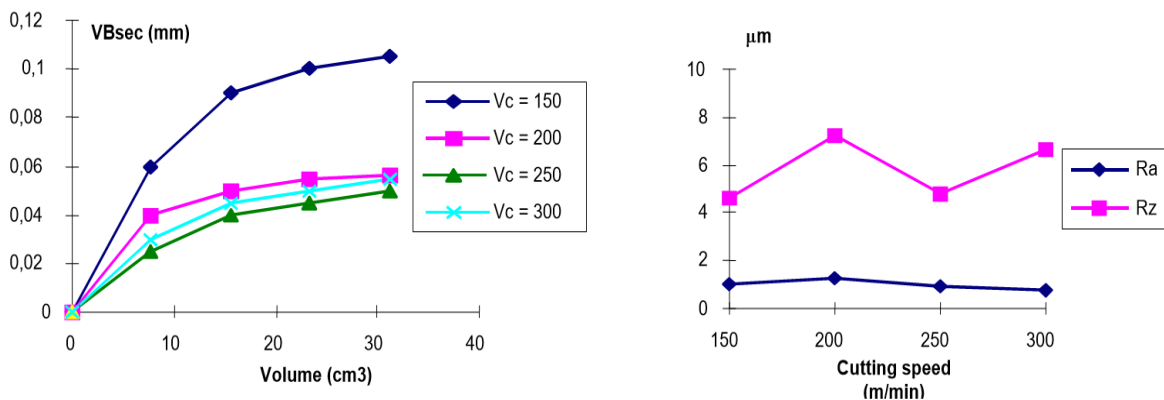
Obrázek 20: Opatření sekundárního boku z důvodu malé hloubky řezu [36]

Graf 4 prezentuje výsledky opotřebení při různých řezných podmínkách. Při porovnání opotřebení nástrojů je zcela patrné výrazně menší opotřebení u CBN nástrojů. Z grafů vyplývá, že nejmenší míra opotřebení byla při rychlostech od 135–220 m/min nezávisle na nastaveném posuvu a hloubce. Při dlouhodobém testu se potvrdilo, že s jednou řeznou hranou CBN při rychlosti 200 m/min bylo možné obrobit 12 obrobků se zachováním stejné kvality povrchu s konečným opotřebením v hodnotě 0,16 mm [36].



Graf 4: Výsledky při obrábění SK a CBN při rozdílných řezných rychlostech [36]

Ze získaných výsledků byl navržen experiment druhý, s použitím CBN s konstantní hloubkou řezu a posuvem v hodnotě 0,15 mm (mm/ot). Řezná rychlost byla ve čtyřech úrovních v rozmezí 150–300 m/min. Výsledkem byly dva grafy (Graf 5) znázorňující závislost drsnosti Ra a Rz na řezné rychlosti a míře opotřebení na odebraném objemu třísky. Z grafu je patrné, že při rychlosti 200 m/min a více nejsou pozorovatelné zásadní rozdíly v opotřebení nástroje. V případě drsnosti Ra se ve všech variantách pohybuje okolo $Ra = 1 \mu\text{m}$ s velmi mírnou klesající tendencí [36].



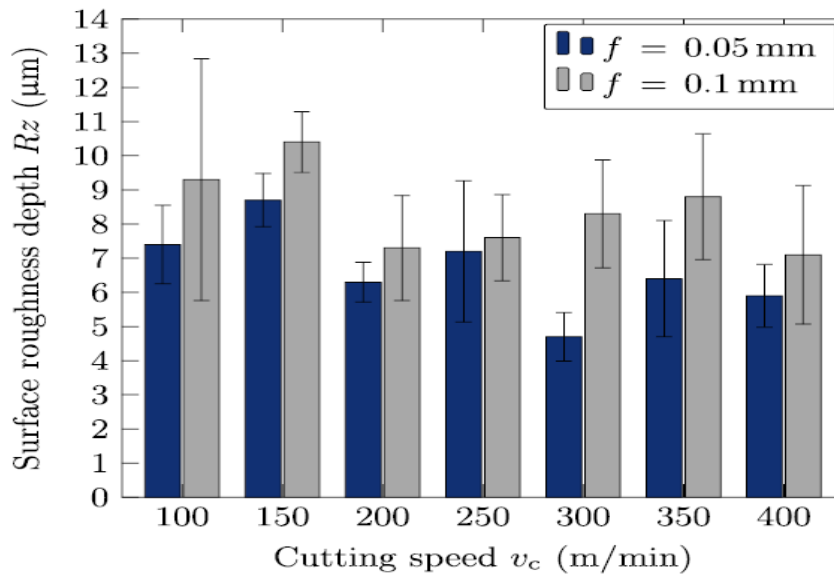
Graf 5: Výsledky experimentu 2 při obrábění s CBN [36]

Publikace s názvem „*Influence of the cutting parameters on the surface properties in turning of a thermally sprayed AlCoCrFeNiTi coating*“ [50] se věnuje obrábění žárového nástřiku (Tabulka 3) vytvořeného HEA metodou. HEA (High Efficiency Airless) je metoda stříkání založena na principu nanášení povlaku při sníženém stříkajícím tlaku. V experimentální části je podrobně popsán i způsob přípravy polotovaru včetně operací pro přípravu povrchu pro nástřik. Po aplikaci nástřiku byl proveden rozbor nástřiku zaměřený na tvrdost ($600 \text{HV}_{0,3}$), tloušťku nástřiku ($500 \mu\text{m}$) a chemické složení [50].

Tabulka 3: Chemické složení povlaku AlCoCrFeNiTi [50]

Prvek	Al	Co	Cr	Ni	Ti	Fe
%	18,4	16,4	15,2	16,4	17,1	16,6

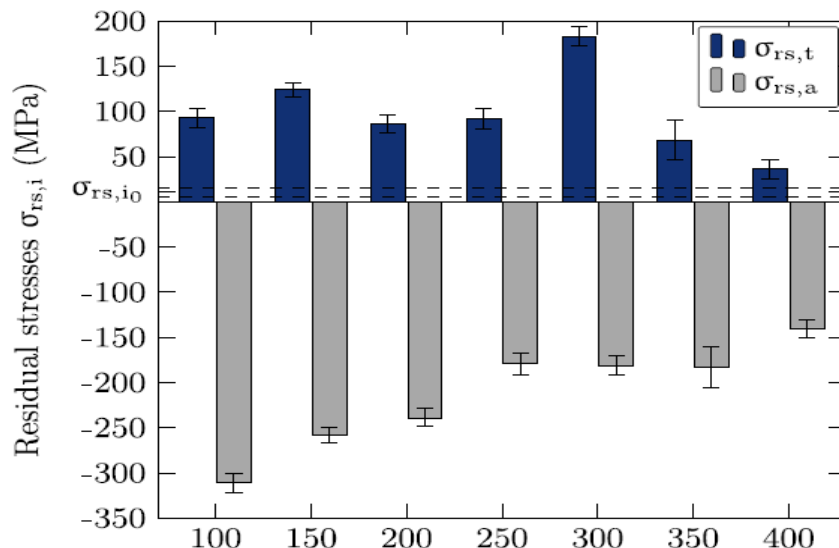
Pro soustružení válcového polotovaru byly vybrány destičky s CBN s podílem 90–95 % o velikosti 1 μm s kobaltovým pojivem. Destička s označením CCGW 09T304 s úhlem čela γ 0°, hřbetu α 7°, zaoblení špičky r_s 0,4 mm a zaoblení břitu okolo 2-3 μm . V držáku byl úhel nastavení hlavního ostří 95°. Při experimentu proběhlo před-obrobení z důvodu dosažení jednotného stavu. Variované parametry byly řezná rychlost v_c rozmezí 100–400 m/min při hloubce řezu $a_p = 0,1$ mm a posuvu $f = 0,05$ a 0,1 mm/ot. Hodnotila se kvalita a drsnost obrobeného povrchu a zbytkové napětí po obrobení [50].



Graf 6: Hodnocení závislosti řezné rychlosti a posuvu na drsnost Rz [50]

Graf 6 ukazuje, že lepších výsledků drsnosti Rz bylo dosaženo vždy s menším posuvem, nezávisle na řezné rychlosti. Z uvedeného grafu nelze pozorovat výraznou vazbu mezi řeznou rychlostí a drsností Rz. Nejlepší výsledek byl dosažen při menším posuvu a řezné rychlosti 300 m/min. Stejný průběh byl pozorován i u parametru drsnosti R_{vk} [50].

Proces obrábění ovlivňuje kromě geometrických vlastností i fyzikální vlastnosti povrchu. V publikaci byla zkoumána závislost řezné rychlosti na zbytková napětí v materiálu v axiálním a tangenciálním směru. Hloubka řezu zůstala na nastavené hodnotě $a_p = 0,1$ s konstantním posuvem $f = 0,05$ mm/ot [50].



Graf 7: Závazlost řezné rychlosti na zbytková napětí v povrchu [50]

V článku je popsáno, že při měření zbytkových napětí v nástřiku před obrobením nebyly zaznamenány výraznější hodnoty. Vlivem vysoké teploty během procesu stříkání vznikly v obou směrech tahová zbytková napětí (tangenciální směr 6 MPa, axiální směr 16 MPa). Měření zbytkových napětí v povrchu po obrobení představuje Graf 7. Vlivem vzniklých deformací při obrábění se výrazně změnila hodnoty a znaménko zbytkových napětí v axiálním směru, kdy nejvyšších hodnot cca -300 MPa (v tlaku) bylo dosaženo při nejmenší řezné rychlosti 100 m/min. Se zvyšující se řeznou rychlostí mají tlaková napětí klesající charakter. V tangenciálním směru vznikla tahová napětí nezávisle na velikosti řezné rychlosti v hodnotách kolem +100 MPa (v tahu). Nejvyšší hodnota tlakových zbytkových napětí byla naměřena při řezné rychlosti 300 m/min [50].

Studie s názvem „*Machinability of Stellite-6 Coatings with Ceramic Inserts and Tungsten Carbide Tools*“ [51] se zabývala obráběním žárového nástřiku Stellite 6. Jedná se o chrom-kobaltovou slitinu s vysokým obsahem karbidů ve struktuře a niklu do 3 %, viz Tabulka 4. Cílem této studie bylo naleznout nejlepší řezné podmínky pro nástroj ze slinutého karbidu a řezné keramiky v závislosti na drsnosti obrobené plochy Ra. Nástřík byl nanesen na obrobek ve tvaru mezikruží a zvolenou technologií bylo podélné vnější soustružení. Výběr řezných podmínek pro oba nástroje je popsán na v Tabulce 4. Hloubka řezu je konstantní s hodnotou $a_p = 0,25$ mm [51].

Tabulka 4: Chemické složení nástřiku Stellite 6 [52]

Prvek	Co	Cr	W	C	Ni	Fe	Si	Mo	Mn
%	45-60	27-32	4-6	0,9-1,4	max. 3	max. 3	max. 1.5	max. 1	max. 1

Keramická destička s označením RNGN 120700 od firmy Sandvik je na bázi Al_2O_3 a je vyztužena vlákny z karbidu křemíku (whiskery). VBD je usazena do držáku s negativním úhlem čela $\gamma = -6^\circ$. Druhý typ řezného nástroje je karbid wolframu třídy K20 s pozitivní geometrií čela. Při obrábění byla použita řezná kapalina ve formě olejové emulze pouze u karbidu wolframu.

Tabulka 5: Plán experimentu a naměřené hodnoty drsnosti Ra [51]

Insert type	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Average surface roughness (μm)	Tool type	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Average surface roughness (μm)
	V	f	Ra		V	f	Ra
Whisker-reinforced ceramic CC670	30	0.25	2.48	Tungsten carbide	30	0.1	2.6
		0.3	3.44			0.15	3.8
		0.35	4.74			0.20	5.1
	50	0.25	2.42		40	0.1	2.1
		0.3	3.29			0.15	3.1
		0.35	4.63			0.20	4.7
	70	0.25	2.30		50	0.1	1.8
		0.3	3.19			0.15	2.5
		0.35	4.54			0.20	4.0
	90	0.25	2.21				
		0.3	3.10				
		0.35	4.40				

Tabulka 5 přiřazuje k dosaženým drsnostem povrchu Ra použité řezné podmínky. Při porovnání řezných rychlostí lze konstatovat, že při tomto experimentu neměla řezná rychlost zásadní vliv na hodnotu drsnosti Ra. S narůstající rychlostí se tato hodnota lehce snižuje. U Karbidu wolframu je tato změna výraznější než u řezné keramiky [51].

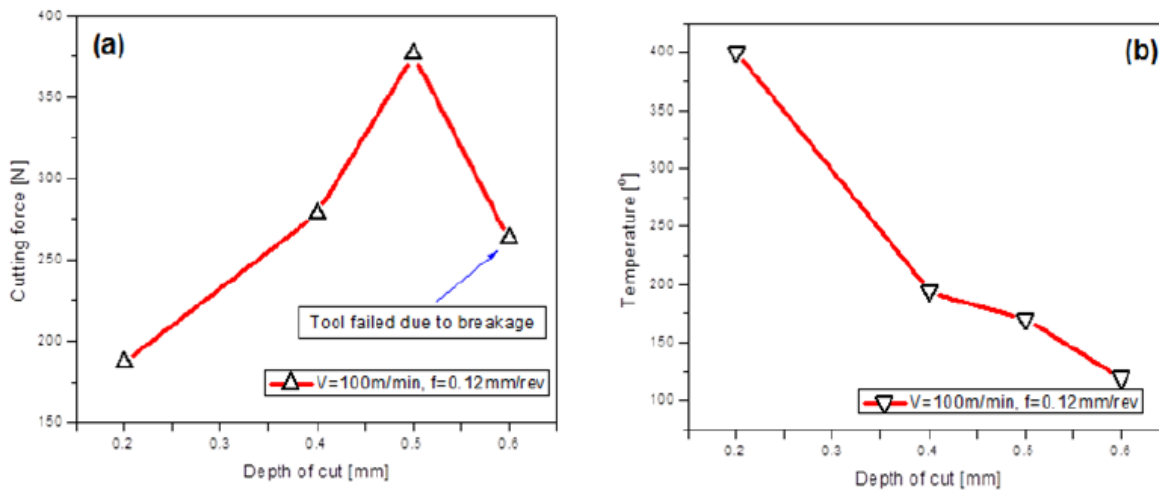
Naopak zásadní vliv na drsnost, který se projevil u obou řezných materiálů, byl parametr posuvu. Nejlepších hodnot drsnosti bylo dosaženo vždy s nejmenší variantou posuvu, což je i předpokladem z teorie obrábění. Nejlepší výsledek drsnosti Ra = 1,8 μm byl dosažen u karbidu wolframu, při nejvyšší řezné rychlosti $v_c = 50$ m/min a nejmenším posuvem $f = 0,1$ mm/ot [51].

Další publikace s názvem „*Effects of depth of cut during machining of Inconel 718 using uncoated WC tool*“ [53] detailně zkoumá vznikající opotřebení řezné hrany ze slinutého karbidu při obrábění niklové slitiny Inconel 718. Tato slitina má vysoký obsah niklu a chromu, viz Tabulka 6. Měřeno bylo vzniklé opotřebení VBD v závislosti na hloubce řezu při neměnné řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min a posuvu $f = 0,1$ mm/ot. Dále je měřena teplota a řezné síly během obrábění. Zvolenou technologií bylo soustružení kruhového polotovaru průměru 60 mm [53].

Tabulka 6: Chemické složení Inconelu 718 [54]

Prvek	Ni	Cr	C	Mo	Nb	Co	Ti	Si	Cu	Al
%	50-55	17-21	0,08	2.8-3.3	4.7-5.5	1.0	0,3	0,35	0,2-0,8	0,65-1,15

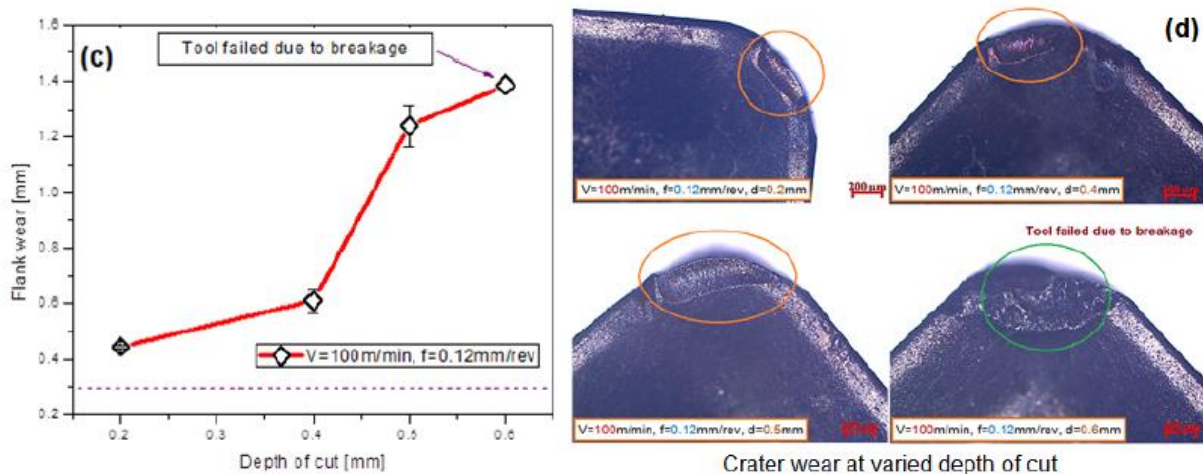
Břítová destička WC nese označení ANSI SNMG 120408. V držáku je geometrie nástroje s negativním úhlem čela $\gamma = -6^\circ$, úhlem sklonu hlavního ostří $\lambda_s = -6^\circ$, úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 75^\circ$ se zaoblením špičky 0,8 mm. Hloubka řezu a_p byla zkoumána v hodnotách 0,2 – 0,6 mm. Doba řezání pro každou variantu je určena na 30 vteřin [53].



Graf 8: Závislost řezné síly a teploty během řezání v závislosti na hloubce řezu [53]

Z teorie vyplývá, že hloubka řezu a tím větším množstvím odebíraného materiálu zákonitě vede k větším řezným silám. Toto tvrzení potvrzuje i Graf 8, kde s narůstající hloubkou řezu se zvětšují řezné síly až do okamžiku selhání nástroje u hloubky řezu $a_p = 0,6\text{ mm}$. Řezná teplota se naopak se zvyšující se hloubkou řezu snižovala, protože větší tloušťka třísky odvádí z místa řezu větší množství vznikajícího tepla. Získaný graf není ovlivněn chlazením řeznou kapalinou, jelikož obrábění probíhalo za sucha [53].

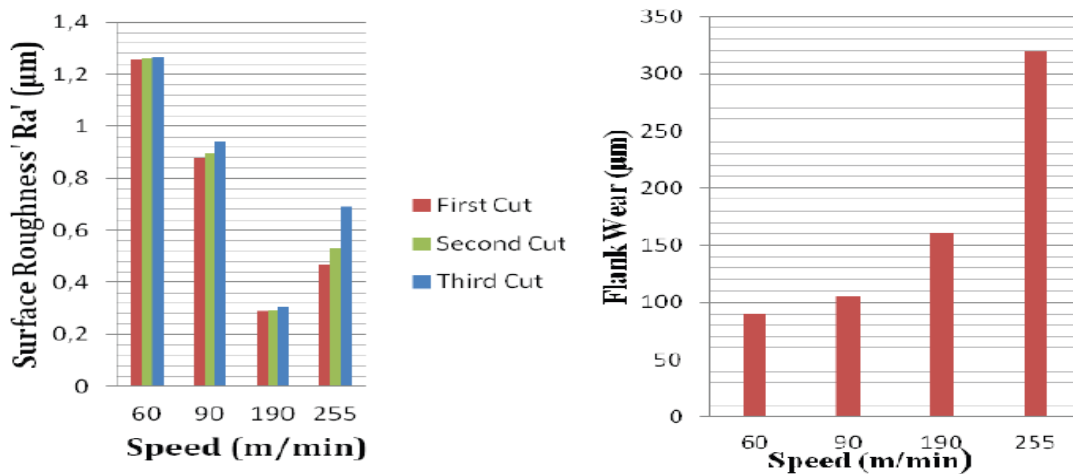
Opotřebení na hřbetě nástroje mělo stejný charakter jako u řezných sil. Hloubka řezu zvyšuje kontaktní plochu s břitem a způsobuje tak větší obroušování na hřbetu nástroje. Z experimentu vyšlo, že i s nejmenší hloubkou řezu se po 30 vteřinách dosáhlo větší opotřebení, než bylo stanoveno za limitující (Obrázek 21). Během experimentu se také projevilo opotřebení ve formě výmolu na čele nebo vylamování řezného břitu. Po experimentech často zůstával nárůstek na čele VBD, což je typické pro nikl a jeho slitiny [53].



Obrázek 21: Snímek velikosti a druhu opotřebení v závislosti na hloubce řezu [53]

Poslední zde uvedená publikace „*High speed machining of Inconel 718: tool wear and surface roughness analysis*“ [55] řeší problematiku obrábění Inconelu 718 při soustružení v závislosti na drsnosti obrobeneho povrchu. Variovaný parametr byla tentokrát řezná rychlost při nastaveném konstantním posuvu $f = 0,1$ mm/ot a hloubce řezu $a_p = 0,5$ mm. Zkoumala se navíc míra opotřebení břitové destičky ze slinutého karbidu [55].

Břítová destička s označením WNMA 060408 je připevněna do držáku MWLNL 2020 – K06. Geometrie nástroje je negativní s úhlem čela $\gamma = -6^\circ$, úhlem sklonu hlavního ostří $\lambda_s = -6^\circ$, úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 95^\circ$ a zaoblení špičky 0,8 mm. Řezná rychlost v_c byla zkoumána ve 4 úrovních (60, 90, 190, 255 m/min). Délka jednoho obrobění byla nastavena na 30 mm s tím, že každá varianta se opakovala pro ověření výsledků 3x [55].



Graf 9: Velikost drsnosti Ra a opotřebení v závislosti na řezné rychlosti [55]

Graf 9 představuje hodnocení drsnosti Ra a velikost opotřebení v závislosti na řezné rychlosti. Z hodnocení drsnosti je patrné, že výrazně nejlepších výsledků drsnosti kolem $Ra = 0,3$ μm bylo dosaženo při rychlosti 190 m/min. Při rychlosti 255 m/min bylo dosaženo také dobré drsnosti okolo $Ra = 0,5$ μm . Zároveň bylo dokázáno, že výsledky jsou věrohodné vzhledem k minimálním rozdílům během opakování. Obecně lze říci, že u všech rychlostí byla dosažena dobrá drsnost povrchu [55].

Graf znázorňující opotřebení naopak ukazuje, že s větší řeznou rychlostí stoupá míra opotřebení nástroje. Při nízkých rychlostech bylo zaznamenáno pouze typické opotřebení hřbetu bez známek poškození. Při vyšších rychlostech se začalo projevovat vylamování břitu a postupné odlupování povlaku ze zaoblení špičky. Při vysoké rychlosti se totiž zvyšuje teplota v místě řezu, která přispívá k tvorbě těchto poškození na řezné hraně VBD [55].

4.5 Souhrn získaných poznatků

Myšlenka žárového stříkání zasahuje již do roku 1909, kdy Dr. Ing. Max Ulrich Schoop provedl první experimenty povlakování za pomoci stlačeného vzduchu a taveniny. Po podání patentu Dr. Schoop dále rozvíjel myšlenku žárového stříkání a popularizoval ji. Žárové stříkání, tak jak jej známe dnes, prošlo obrovským technologickým vývojem. V dnešní době existuje hned několik desítek metod stříkání a nespočet variovaných procesních parametrů, pro vytváření žárových nástřiků různých materiálů a jejich vlastností. Jednotlivé metody se dělí především podle použitého zdroje tepelné energie. Každá metoda vzhledem k použitému zdroji dosahuje rozdílných teplot hoření. To probíhá ve spalovací komoře, ve které je taven přídavný materiál ve formě prášku nebo drátu. Vybrat správnou metodu stříkání je tedy závislé na přídavném materiálu (nebo kombinaci materiálů) a jejich teploty tavení. Úplné natavení částic přídavného materiálu je jedním z předpokladů vytvoření kvalitního nástřiku.

Slitiny na bázi niklu mají v dnešní době široké využití v mnoha průmyslových oborech. Slitiny niklu jsou obecně pevnější, houževnatější a také tvrdší než většina slitin neželezných kovů. Niklové slitiny se rozdělují podle použití na slitiny konstrukční, se zvláštními vlastnostmi a slitiny žáruvzdorné (žárupevné). Žáruvzdorné slitiny na bázi niklu – chrom a dalších přísad (hliník, titan, wolfram) mají velké zastoupení v leteckém a energetickém průmyslu. Mezi nejznámější slitiny niklu patří bezpochyby Inconel, Hastelloy nebo Colmonoy. Slitina NiCrBSi (Colmonoy) se obvykle využívá z důvodu zvýšení odolnosti proti opotřebení, korozi a oxidaci, a to i v případě zvýšených teplot až do 800 °C. Při oxidaci dochází na povrchu slitiny ke vzniku oxidu křemíku a chromu, které se vytvářejí v pórech slitiny a brání tak následnému průchodu korozivních médií. Často se využívají jako náhrada za tvrdé chromování i v oblasti žárových nástřiků.

Stříkané povlaky NiCrBSi vykazují typickou diskovitou strukturu žárového nástřiku s výskytem různých nečistot, póru a defektů. Z teorie víme, že množství těchto vad závisí na použité metodě stříkání. Při porovnání technologií žárového stříkání plyne, že nejlepších vlastností a kvality povlaku je dosaženo s technologií vysokorychlostního nástřiku pomocí plamene (HVOF). Křemík a bor obsažený ve slitině pomáhá ke snížení teploty tavení slitiny a v natavování jednotlivých částic. Přítomnost uhlíku umožňuje vytvářet karbidy, které vedou ke zvýšení tvrdosti a odolnosti povlaku. Všechny tyto aspekty ale naopak zhoršují obrobitelnost žárového nástřiku.

Drsnost žárového nástřiku se po aplikaci metodou HVOF pohybuje okolo $Ra = 7 \mu\text{m}$. Takto velká drsnost povrchu není vhodná v případě, kdy se jedná o funkční plochu. Následné obrobení povlaku je proto důležité pro získání menší drsnosti povrchu a k dosažení geometrických a rozměrových tolerancí. Žárové nástřiky s vysokým obsahem niklu a chromu obecně spadají do kategorie těžkoobrobitelných materiálů z důvodu velkého množství tvrdých karbidů, které způsobují intenzivní abrazi na řezném břitě. Nikl zvyšuje teplotu v místě řezu z důvodu nízké tepelné vodivosti. Zvyšuje také houževnatost slitiny a má tendenci ke zpevňování, což vede k tvorbě nárůstku a k nestabilním podmínkám během obrábění.

Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů se v současné době využívají vyměnitelné břitové destičky (VBD) třídy ISO-S a ISO-H. Použití monolitních nástrojů z nástrojové oceli nebo slinutých karbidů není v této oblasti příliš ekonomické, vlivem rychlého otupování řezné hrany. V závislosti na obráběném materiálu se pro VBD využívají v největší míře slinuté karbidy. Mezi tvrdší materiály patří například řezná keramika, cermet, kubický nitrid bóru nebo polykrystalický diamant. Problémy při soustružení žárových nástřiků vznikají zejména ze dvou důvodů. Prvním důvodem je přílnavost žárového nástřiku k podkladovému substrátu vlivem kritických řezných podmínek a velké plastické deformace. Při nevhodně nastavených řezných podmínkách dochází k vytrhávání nástřiku mimo okraje nebo k úplnému odloupení nástřiku z obrobku. Z tohoto důvodu je pro nástřiky charakteristické obrábění s velmi malou hloubkou řezu. Druhým důvodem je vysoká tvrdost a obsah těžkoobrobitelných prvků, které zhoršují obrobitelnost a způsobují intenzivní opotřebení na řezném břitu.

Broušení žárových nástřiků je vzhledem k velmi malým tloušťkám řezů poměrně časově náročné. S procesem broušení je také spojena řada komplikací, které je potřeba brát v úvahu. Možné problémy mohou vzniknout nesprávným výběrem kotouče, u kterého se zohledňuje velikost zrna, výběr materiálu a pojiva. Při nevhodně nastavených podmínkách dochází k delaminaci žárového nástřiku, vzniku trhlin a tvorbě pórů, z důvodu lamelární struktury. Například v publikaci [10] zabývající se broušením Inconelu 718 jsou uvedeny problémy při hledání optimálních řezných podmínek, při kterých nebylo docíleno požadované drsnosti $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Na povrchu obrobku bylo po broušení zaznamenáno příčné zvlnění a po určitém čase broušení také nastávalo postupné zanášení brusného kotouče.

Jedna z prvních myšlenek obrábění s lineární řeznou hranou je popsána v knize „*Teória a prax trieskového obrábania*“ [39], ve které se prof. Vasilko zabývá lineární řeznou hranou v závislosti na dosažení lepší kvality povrchu R_z . Ve svých publikacích provedl několik experimentů, kde byla obráběna ocel s označením C45 s hloubkou řezu $a_p = 1 \text{ mm}$. Výsledky experimentů jsou věnovány měření řezných sil a měření drsnosti povrchu. Další publikaci lze dohledat o autora A. V. Filippova, kde se zabývá průřezu odebíraného materiálu v závislosti na poloměrech obráběných ploch, úhlu sklonu ostří a hloubky řezu. V jedné z prvních publikací s názvem „*Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning*“ [45] popisuje tento vztah při obrábění s lineární hranou pod úhlem $\lambda_s = 45^\circ$ s hloubkou řezu $a_p = 1 \text{ mm}$.

Publikací na téma obrábění žárových nástřiků není mnoho. Publikace týkající se nástřiku NiCrBSi jsou zaměřeny především na mechanické testování nástřiku nebo závislosti procesních parametrů na kvalitu nástřiku. Vzhledem k rozsáhlým možnostem metod vytváření žárových nástřiků a použití širokého spektra možných materiálů bylo potřeba dohledat materiály, které se svým složením nejvíce přibližují nástřiku NiCrBSi. Bylo tedy potřeba se zaměřit na materiály, které obsahují určité procentu niklu a chromu z důvodu specifického chování při obrábění.

V mé diplomové práci s názvem „*Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje*“ [37] byl zkoumán základní proces obrábění žárového nástřiku pomocí ortogonálního volného řezání. Obráběný materiál byl žárový nástřik Stellite 6 vytvořený metodou vysokorychlostního nástřiku HVOF. Cílem práce bylo vyhodnotit vliv jednotlivých řezných parametrů v závislosti na drsnost povrchu R_t , R_a , R_z a R_q . Zvýšení produktivity bylo docíleno změnou technologie výroby z broušení na proces obrábění (ortogonální volné řezání). Získané informace lze částečně využít při řešení dalších procesů obrábění například metodou soustružení nebo frézování.

Z publikace „*Turning of thick thermal spray coatings*“ [36] se potvrdilo, že při obrábění žárových nástřiků má smysl využívat velmi tvrdých materiálů jako např. CBN (i přes jeho vyšší cenu) kvůli podstatně větší trvanlivosti, než je u slinutého karbidu. Zároveň z uvedených grafů vyplývá, že s rostoucí řeznou rychlostí (200–300 m/min) se lehce zlepšuje drsnost obrobeneho povrchu a zároveň se zmenšuje míra opotřebení na řezném nástroji. Opotřebení, které se během testování objevovalo, bylo především ve formě drážek na sekundárním hřbetu nástroje.

Publikace s názvem „*Influence of the cutting parameters on the surface properties in turning of a thermally sprayed AlCoCrFeNiTi coating*“ [50] se věnuje vlivu řezné rychlosti a posuvu na drsnost R_z u nástroje z CBN. Z komplexního hlediska lze říci, že menší posuv vždy zlepšil hodnotu drsnosti R_z . Nejlepší hodnota drsnosti R_z byla dosaženo při obrábění $v_c = 300$ m/min a menšího posuvu $f = 0,05$ mm/ot. Zároveň se potvrdilo, že se po obrobení vytváří v povrchu nástřiku tlaková zbytková napětí v axiálním směru. Tlaková napětí v axiálním směru se s rostoucí řeznou rychlostí zmenšují.

Studie s názvem „*Machinability of Stellite-6 Coatings with Ceramic Inserts and Tungsten Carbide Tools*“ [51] ukazuje rozdíl mezi řeznou keramikou a slinutým karbidem v závislosti na hodnotě drsnosti R_a . Z Tabulky 5 je patrné, že se opět s vyšší řeznou rychlostí a menším posuvem zlepšovala drsnost povrchu R_a .

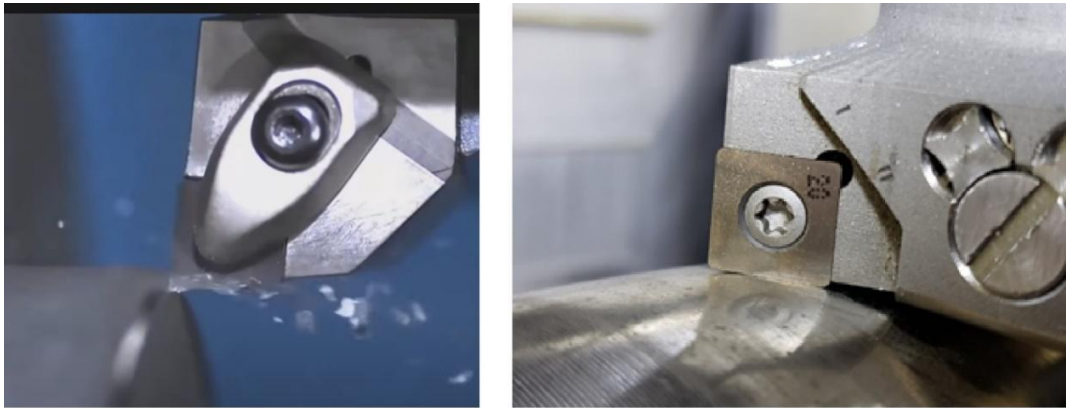
Další publikace s názvem „*Effects of depth of cut during machining of Inconel 718 using uncoated WC tool*“ [53] sleduje velikost řezných sil, teplotu a míru opotřebení v závislosti na hloubce řezu. Řezné síly a míra opotřebení se s rostoucí hloubkou řezu zvyšují. Naopak při odebrání většího objemu klesá teplota v místě řezání. Během experimentu se vytvářelo opotřebení ve formě výmolu na čele nebo vylamování řezného břitu. Po experimentech často zůstával nárůstek na čele destičky, což je typické pro nikl a jeho slitiny.

Poslední zde uvedená publikace „*High speed machining of Inconel 718: tool wear and surface roughness analysis*“ [55] řeší problematiku obrábění Inconelu 718 s destičkou ze slinutého karbidu. Z grafů vyplývá, že nejlepší drsnost povrchu $R_a = 0,3$ μm bylo dosaženo při řezné rychlosti $v_c = 190$ m/min. Zároveň je z grafu vidět, že opotřebení se s rostoucí řeznou rychlostí (do 190 m/min) lehce zvětšuje. Při řezné rychlosti 255 m/min je však hodnota opotřebení téměř dvojnásobná při porovnání s hodnotou při rychlosti 190 m/min.

5 Praktická část

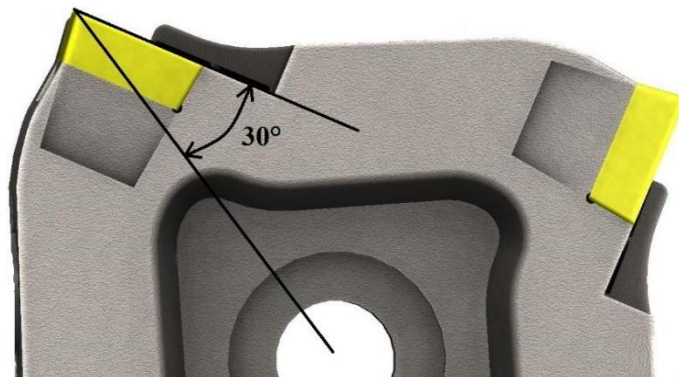
5.1 Návrh prototypu obráběcího nástroje

V teoretické fázi návrhu speciálního nástroje byly zjištěny „nedostatky“ konvenčních nástrojů, které jsou v současné době nabízeny výrobcí nástrojů. Zmiňované „nedostatky“ se především týkají schopnosti použití těchto nástrojů na navrženou technologii obrábění lineární řeznou hranou. Při běžném obrábění vniká do materiálu řezná část nástroje tvořená špičkou a částí řezného břitu, která je závislá na hloubce odebírané vrstvy (Obrázek 22 vlevo). Po otupení této části zbytek řezného břitu nelze použít. Naopak při obrábění lineární řeznou hranou lze pomocí osy Y pozicovat břitovou destičku po celé délce ostří na rozdíl od běžného obrábění radiálním nožem (Obrázek 22 vpravo). Z ekonomického hlediska je proto myšlenka obrábění lineární řeznou hranou velmi výhodná především při obrábění s předpokládanou nízkou životností řezné hrany.



Obrázek 22: Porovnání konvenčního způsobu obrábění a obrábění s lineární řeznou hranou

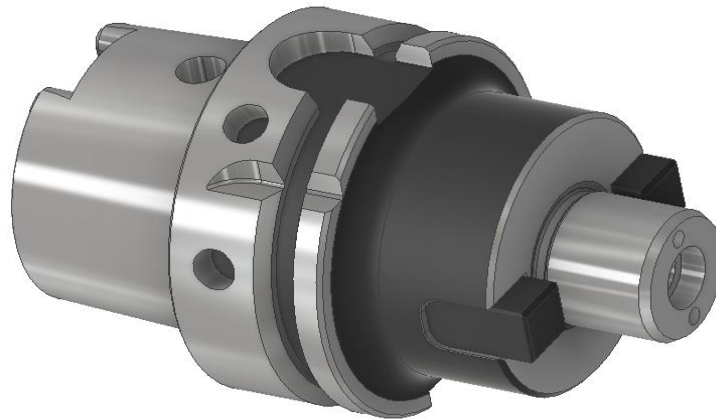
Specifická pozice výměnných břitových destiček byla navržena za účelem použití nástroje jednak pro soustružení (s možností rychlé výměny břitové destičky během procesu), ale také pro možnost frézování. Konstrukce nástroje je unikátní svým uložením břitové destičky vzhledem k ose nástroje. Ostří VBD nesměruje do osy nástroje, jak je tomu běžné u konvenčních fréz, ale je vykloněné pod úhlem 30° , viz Obrázek 23.



Obrázek 23: Pozice břitové destičky v těle speciálního nástroje QCA

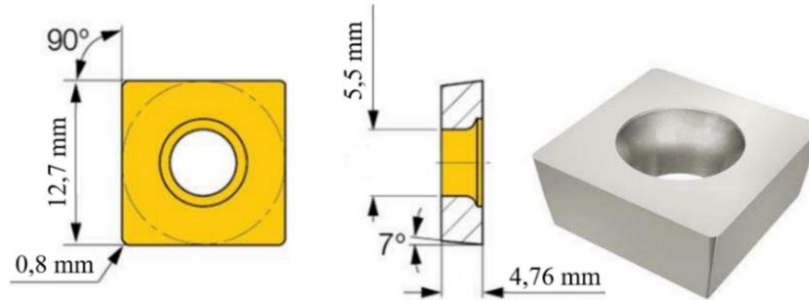
Žárové nástřiky s vysokým obsahem niklu a chromu obecně spadají do kategorie těžkoobrobitelných materiálů z důvodu velkého množství tvrdých karbidů, které způsobují intenzivní abrazi na řezném břitu. Při obrábění má proto zásadní význam použití řezné kapaliny i s ohledem na vznik velkého množství tepla v místě řezu. Vysoké procento niklu ve slitině NiCrBSi zvyšuje teplotu v místě řezu z důvodu nízké tepelné vodivosti. Nikl zvyšuje také houževnatost slitiny a má tendenci ke zpevňování, což vede k tvorbě nárůstku a k nestabilním podmínkám během obrábění. Při správně navrženém a intenzivním chlazení je možné dosáhnout až několikanásobně větší trvanlivosti břitu, při stejných řezných podmínkách. Řezná kapalina pomáhá i odvodu tepla z místa řezu společně s třískou. Zároveň je žádoucí použití řezné kapaliny za účelem zlepšení kvality obrobeného povrchu, která je v této problematice významná.

Návrh, konstrukce a optimalizace speciálního nástroje pro obrábění žárového nástřiku NiCrBSi byla provedena v softwaru Autodesk Inventor. Průběh návrhu a konstrukce nástroje s označením QCA byla pravidelně konzultována s vedoucím disertační práce. Z důvodu velmi vysokých nákladů na výrobu byl nástroj následně využit do projektu NCKS. Při návrhu chlazení bylo nejprve potřeba určit způsob upínání speciálního nástroje a tím způsob vedení řezné kapaliny skrz nástroj. Pro upnutí nástroje byl využit držák HSK 63 A (Obrázek 24) pro frézy s vnitřním průměrem 22 mm. Chladičí kapalina prochází skrz HSK upínač a vystupuje ze dvou kanálek Ø 3 mm do těla frézy. Zde byla kapalina rozvedena pomocí vytvořených vnitřních kanálek směrem k břitovým destičkám.

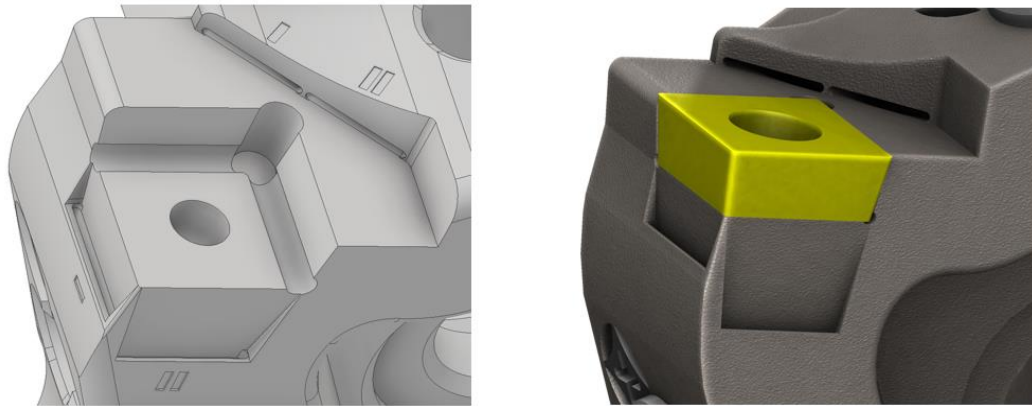


Obrázek 24: Nástrojový držák typu HSK 63 A

Před samotným návrhem chlazení také proběhla specifikace tvaru výměnné břitové destičky, která bude využívána při testech obrobitelnosti žárového nástřiku NiCrBSi. S ohledem na využití lineární řezné hrany je nejlepší variantou použít čtvercové destičky s označením S. Výhodou použití této destičky je rovná řezná hrana s délkou 11,1 mm (bez krajních zaoblení špičky $r = 0,8$ mm). Vzhledem k tomu, že pro obrábění nástřiku NiCrBSi je předpokladem využit destičky s větší tvrdostí (kubický nitrid bóru CBN, polykrystalický diamant PKD) je ekonomické využít všechny části řezné hrany těchto VBD. Rozměry zvolené břitové destičky s obecným označením SCMW 120408 jsou zakótovány níže (Obrázek 25).



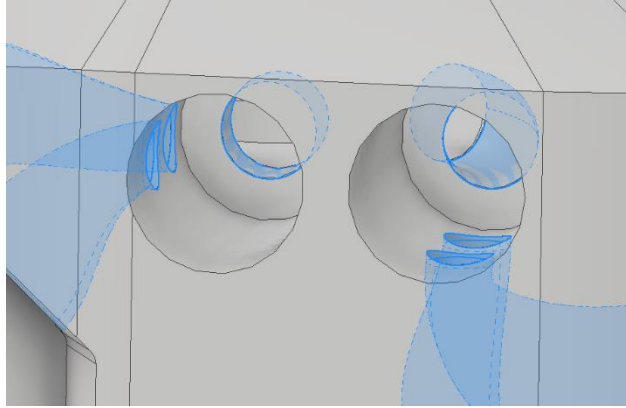
Obrázek 25: Rozměry břitové destiček s označením SCMW 120408



Obrázek 26: Návrh lůžka pro VBD tvaru S

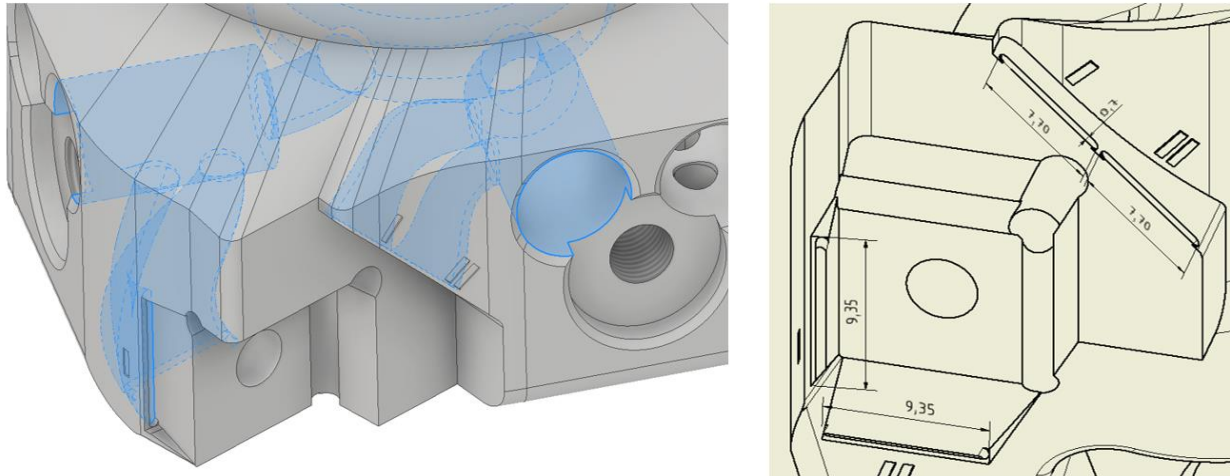
Z výše uvedených specifikací bude břitová destička umístěna pod sklonem 30° od osy nástroje s konečným průměrem 80 mm. Strany lůžka jsou skloněna pod úhlem 7° , aby kopírovala hřbet břitové destičky. Ostré hrany uvnitř lůžka jsou odvrtnuty pro správné dosednutí destičky, viz Obrázek 26. Poslední úpravou je posunutí středové díry M5 pro upnutí destičky o 0,1 mm směrem do středu nástroje pro přitažení VBD směrem do lůžka.

Při specifikaci pozice břitové destičky je dále potřeba navrhnout chlazení řezného břitu. K využití maximální účinnosti chlazení by bylo vhodné přivést řeznou kapalinu co nejbližší k místu obrábění. Při obrábění lineární řeznou hranou je třeba chladit celou délku řezné hrany na rozdíl od konvenčních nástrojů, u kterých je chlazená pouze špička břitové destičky. Z uvedených publikací vyplynulo, že významné opotřebení břitu bylo zaznamenáno především na hřbetu břitové destičky. Z tohoto důvodu budou vytvořeny kanálky pro přívod chladicího média na čelo i hřbet břitové destičky. S ohledem na tyto skutečnosti by bylo prakticky nemožné vyrobit takovouto síť kanálků konvenčními metodami obrábění. Po zhodnocení všech těchto aspektů bude nástroj vytvořen pomocí kovového 3D tisku. Tím v podstatě dostáváme neomezené možnosti v konstrukci celého nástroje včetně vnitřních kanálků. Primární funkcí kanálků je zajištění intenzivního chlazení, ale při takové hustotě kanálků lze na ně pohlížet i jako určitý způsob odlehčení nástroje. Kanálky pro chladicí médium jsou konstruovány s úmyslem na co nejmenší ztráty při proudění. Rozvod řezné kapaliny začíná v části, kde budou umístěny regulátory, které jsou popsány na následující stránce.



Obrázek 27: Rozvod chladicí kapaliny směrem k břitové destičce

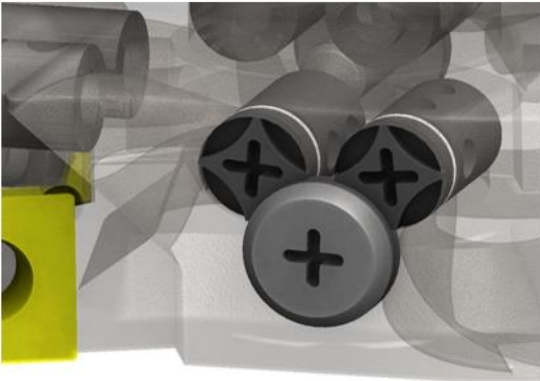
Při obrábění metodou soustružení, tj. využití pouze jedné řezné hrany je snaha dosáhnout co největší intenzity chlazení na břitovou destičku. Skrz upínač HSK je kapaliny přiváděna skrz dva otvory s průměrem 3 mm. Podmínkou pro rozvod kapaliny skrz nástroj je tedy zachovat vstupní průřez, viz Obrázek 27. Chladicí kanálky jsou konstruovány tak, že směrem k výstupu mění svůj kruhový průřez na průřez tvaru obdélníku pro chlazení celé délky ostří (Obrázek 28). Zároveň se při této změně budou mírně zužovat za účelem zvýšení výstupního tlaku řezné kapaliny.



Obrázek 28: První návrh chladicích kanálků pro jednu VBD

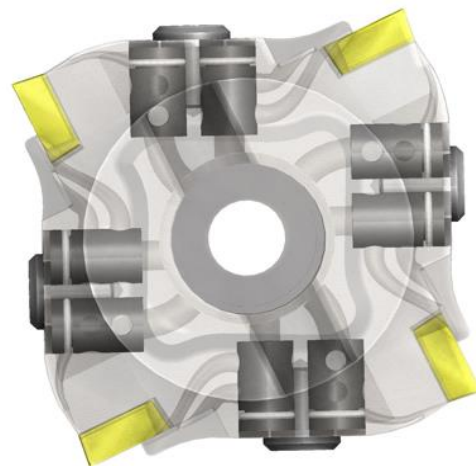
Významný vliv na chlazení má také tlak kapaliny. Nástroj bude osazen čtyřmi břitovými destičkami, ale pomocí specifického uložení lze využít tento nástroj staticky jako soustružnický nůž. Vzhledem k tomu, že při obrábění zárovňných nástřiků dochází k velmi intenzivní abrazi na břitu VBD, lze více destiček využít jako rychlá výměna destičky při pouhé rotaci nástroje o 90°. Z uvedených důvodů je vhodné vymyslet možnou regulaci těchto chladicích kanálků pro zvýšení výstupního tlaku kapaliny.

Vytvořené regulátory fungují na principu otevírání a zavírání jednotlivých kanálků. Dle čtyř stanovených pozic je možné nastavit, zda bude do místa řezu přivedena procesní kapalina v těchto variantách: na čelo i hřbet VBD, pouze na hřbet, pouze na čelo, nebo zda nebude médium přiváděno do místa řezu vůbec. Tímto způsobem lze na nástroji nastavit kteroukoliv kombinaci chlazení, kde najednou může být otevřeno až šestnáct chladicích kanálků pro všechny čtyři břitové destičky.



Obrázek 29: Návrh a reálná podoba regulačních členů nástroje

Pro každou břitovou destičku jsou použity dva regulační členy, tak aby byla zajištěna regulace hlavního tak i vedlejšího ostří, viz Obrázek 29. Regulátor je v podstatě váleček s různou kombinací děr, který je zasazen do předem připraveného otvoru v nástroji. Nastavení správné pozice děr regulátoru je zajištěno pojistných šroubem vymezující jednak vypadnutí tak i rotaci regulátorů. Vytvořené značení laserem slouží ke správné orientaci regulátoru. Na regulátoru se také nachází drážka pro těsnění o rozměrech $\varnothing 8 \times 1$ mm. Výhodou této regulace je v již zmiňované možnosti regulovat chlazení i pro destičky, které během soustružení nejsou v řezu. Tímto způsobem je umožněno nastavit maximální tlak a objem řezné kapaliny přímo do místa řezu konkrétní břitové destičky.



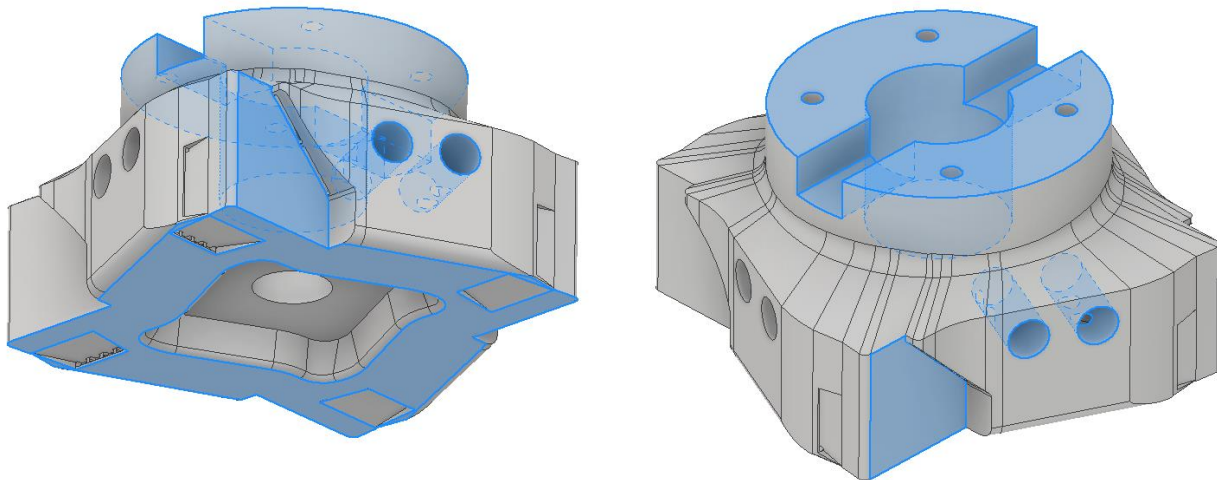
Obrázek 30: Síť vnitřních kanálků a dutin za účelem odlehčení nástroje

Abychom plně využili potenciál kovového 3D tisku, je v masivních částech nástroje, především v oblasti upínání vytvořeno několik dutin za účelem odlehčení nástroje a úspore kovového prášku. V těchto dutinách byla vytvořena gyroidní struktura (Obrázek 30), za účelem zachování tuhosti nástroje. Odlehčení nástroje také pomáhá síť vnitřních kanálků, které byly detailně popsány výše.

Na základě možností využití prášků pro 3D tisk v laboratořích RTI, požadovaných vlastností tištěného nástroje a nákladů na tisk byl zvolen materiál z nástrojové oceli (MS1), který se vyznačuje vynikajícími pevností v kombinaci s vysokou houževnatostí. Produkty z materiálu MS1 jsou dobře obrobitelné, proto je jejich využití velmi široké např. ve strojírenském, automobilovém i leteckém průmyslu. Výrobky vytisknuté z tohoto materiálu mají následující mechanické vlastnosti.

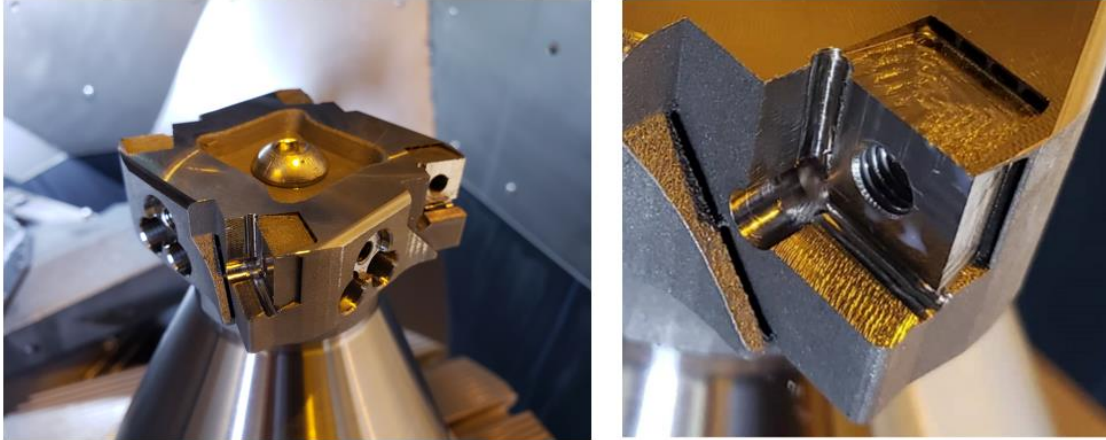
- Tepelné zpracování po 3D tisku – žihání na odstranění pnutí
- Mez kluzu – 900 MPa
- Mez pevnosti – 1100 MPa

Při tištění nástrojů z kovu je potřeba předpokládat horší drsnost povrchu než při klasickém obrábění. Z tohoto důvodu budou na funkční části nástroje přidány přídávky 1 mm pro následné přesné obrobení na stroji. Funkční části nástroje jsou především v místě upnutí destičky a upnutí nástroje do HSK upínače. Přídavek byl dále přidán do otvorů pro regulátory a na spodní část nástroje, jelikož se předpokládá špatná kvalita povrchu po odstranění podpor, viz Obrázek 31.



Obrázek 31: Vyznačené funkční plochy s přídávkem 1 mm

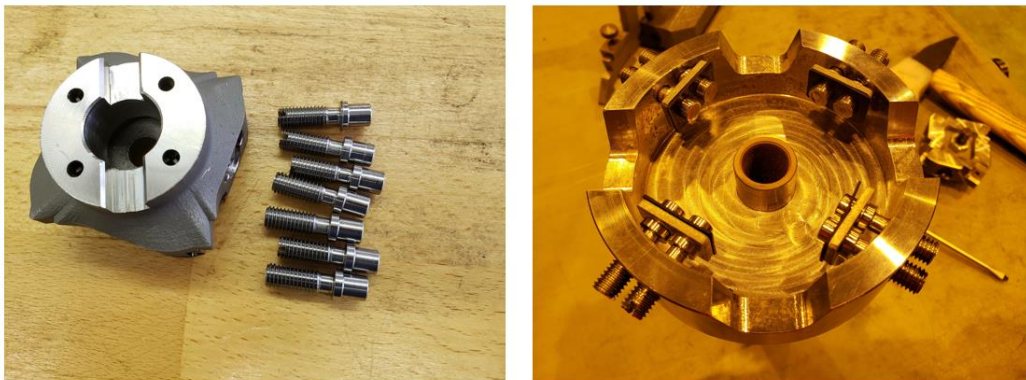
Po vytisknutí nástrojů proběhlo odstranění podpor ve spodní části a tepelné zpracování pro odstranění pnutí. Zároveň byl povrch opískován a očištěn od zbylého prášku. Následovalo obrobení funkčních ploch, které jsou vyznačeny modře (Obrázek 31). Aby byla zajištěna přesnost nástroje, byla potřeba nejprve obrobřit horní upínací část nástroje. Následně byl vytvořen přípravek (Obrázek 32), za který byl nástroj upnut z již obrobene části a obráběla se spodní část včetně lůžek pro VBD a děr pro regulační členy nástroje.



Obrázek 32: Obrobení funkční ploch speciálního nástroje

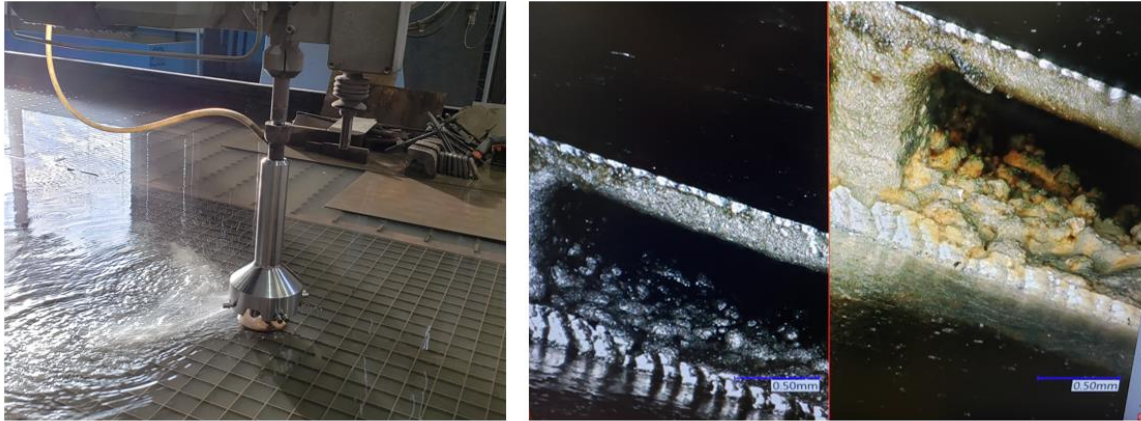
Tento návrh lze považovat za první prototyp, při kterém se předpokládají další možné úpravy ve všech oblastech řešení konstrukce nástroje, regulace i chlazení. Případné nedostatky se ukáží až během plánovaných experimentů, při kterých se zaměříme především na funkčnost regulace chlazení, tuhost nástroje, vhodnou pozici břitu a plynulost proudění řezné kapaliny.

Po vyrobení prvního prototypu byl nástroj proměřen na mikroskopu, abychom zjistili správnost a přesnost výroby. Z pohledu obrobených funkčních ploch bylo vše v pořádku. Lze říci, že jediným funkčním neobrobeným prvkem byly vnitřní kanálky pro přívod řezné kapaliny. Je možné předpokládat, že při špatné kvalitě a vysoké drsnosti povrchu ($R_a = 10 \mu\text{m}$) budou při proudění vznikat ztráty vlivem tření a různým typům víření. Myšlenka následujícího experimentu byla ve snížení drsnosti v místě proudění kapaliny pomocí tekoucího abraziva z vodního paprsku.



Obrázek 33: Přípravek pro experiment na vodní paprsek

Pro upnutí na vodní paprsek byl nejprve navržen a vyroben přípravek pro upnutí nástroje. Přípravek se skládal z prodloužené vstupní trubice se závitem pro snížení síly vodního paprsku. Spodní část přípravku se skládá z části pro upínání a osmy děr se závitem. Nástroj je v přípravku upevněn pomocí speciálních šroubů umístěných do otvorů pro regulátory. Na šrouby je pro těsnost nasazeno těsnění. Obrázek 33 ukazuje kompletní přípravek s těsněním a šrouby.

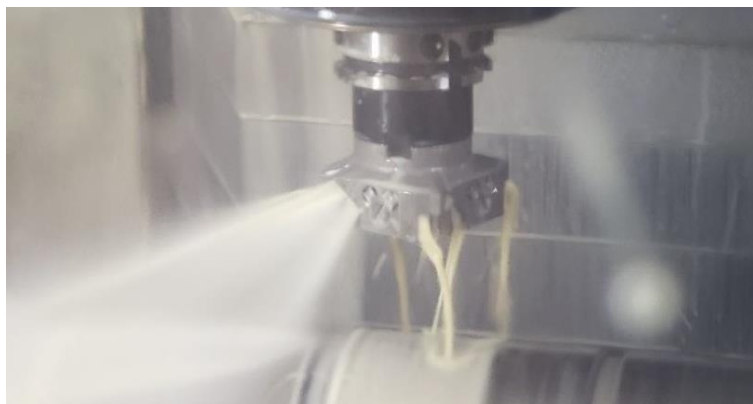


Obrázek 34: Experiment s cílem snížení drsnosti povrchu kanálku

Před experimentem se provedl scan povrchu chladicího kanálku pro následné porovnání. Během experimentu bylo použito několik kombinací rychlosti vodního paprsku. Obrázek 34 ukazuje, že docházelo i k lehkému zahřívání nástroje při proudění abraziva skrz chladicí kanálky. Pro větší intenzitu byly otevřeny kanálky pouze pro jednu břitovou destičku. Po několika průběžných scanech nebyly pozorovány žádné změny ve kvalitě povrchu vnitřních kanálků. Naopak při dlouhodobém proudění kapaliny se začali objevovat stopy koroze. Experiment tedy úspěšný nebyl, nicméně nepředpokládáme, že by to mělo výrazný vliv pro experimentů obrábění žárového nástřiku.

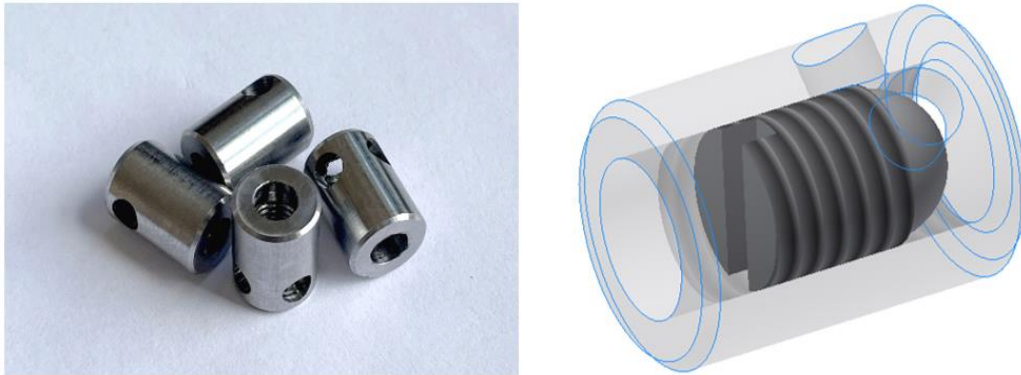
5.2 Optimalizace nástroje

Během experimentu se ukázalo hned několik věcí, které by bylo dobré při tisku druhého nástroje optimalizovat. Všechny zjištěné nedostatky se týkaly řešení regulace v nástroji. Regulátor měl zásadní problém s těsností. Těsnící kroužek na konci regulátoru fungoval správně, problém se týká zadní části regulátoru, která i při pozici zavření vnitřních kanálků stále v menší míře propouští řeznou kapalinu, viz Obrázek 35. Problém se částečně vyřešil výrobou přesnějších regulátorů, které dokázali lépe utěsnit otvor kanálku. S vyšší přesností však došlo ke zhoršení manipulace a otáčení regulátorů. Toto řešení tak není příliš vhodné pro používání a je potřeba vymyslet řešení jiné.



Obrázek 35: Speciální nástroj s vnitřním chlazením při soustružení

Zároveň byl prvotní návrh konstruován tak, aby bylo možné obrábět podélným tak i příčným břitem destičky. Při experimentech jsme se však zaměřili pouze na podélné ostří (podélné soustružení), tudíž bylo možné odstranit chladicí kanálky pro příčné ostří. Tím se zredukoval počet regulátorů o polovinu a vzniklo tím více prostoru pro nalezení lepšího řešení. Nový návrh spočívá v nalisování regulátorů o $\varnothing 10$ mm s délkou 14 mm, v kterém se bude posouvat stavěcí šroub M6 x 1, viz Obrázek 36. Závít nebude vyříznutý po celé hloubce regulátoru, tím je zajištěn šroub proti úplnému vyšroubování. Zároveň bude šroub při regulaci uzavírat přímo vstupní část, tím bude zajištěna úplná těsnost proti předchozímu řešení.



Obrázek 36: Návrh a realizace nového typu regulátoru

Před implementací nového typu regulace a tiskem speciálního nástroje verze 2.0 je vhodné nový typ regulace vyzkoušet při zjednodušeném experimentu. Obrázek 37 zobrazuje návrh přípravku, který se skládá ze vstupní části pro uchycení do těsněné kleštiny ve stroji. Přípravek obsahuje dva regulátory, na kterých se ověřila funkčnost nového řešení. Návrh je tedy možné implementovat do těla nástroje verze 2.0.



Obrázek 37: Přípravek pro vyzkoušení funkčnosti nového typu regulace

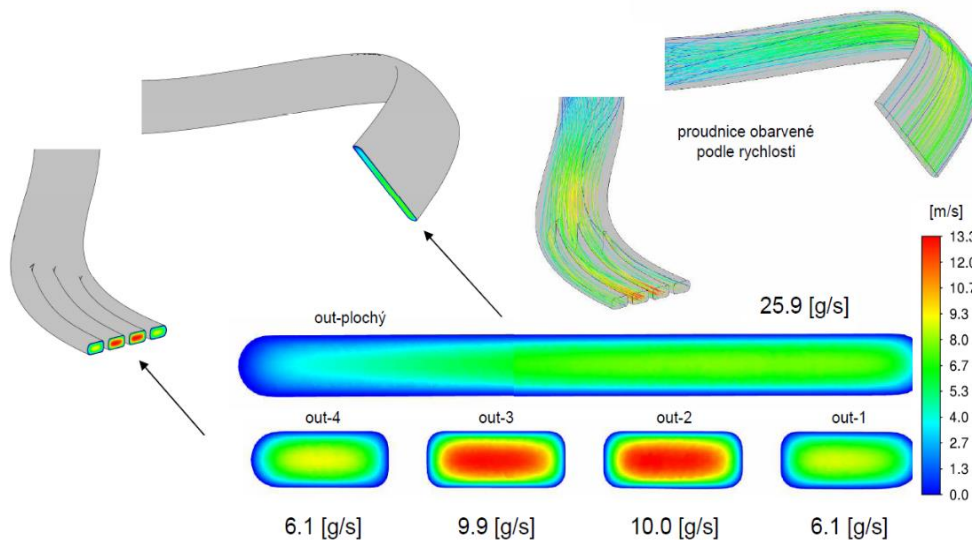
Během experimentů se také ukázalo, že pro návrh chladicích kanálků je vhodné provést simulaci proudění kapaliny. Na Obrázku 38 je vidět, jakým způsobem se kapalina po výstupu z kanálku rozbíhá převážně do stran. Tento problém byl zaznamenán ve stavu otevření kanálků všech břitových destiček. Obrázek 38 ukazuje, jak velký vliv to může mít na proces obrábění, vzhledem k tomu, že výstupní část kanálku je od řezu vzdálená pouze cca 15 mm. Při

experimentech zároveň nebyly pozorovány tepelné deformace řezné hrany vlivem vysoké teploty v místě řezu. Na druhou stranu lze na ZČU využít výzkumné laboratoře NTC, kde se zabývají simulacemi proudění kapalin a zvýšit tak účinnost chlazení.



Obrázek 38: Rozptýlení kapaliny po výstupu z kanálku

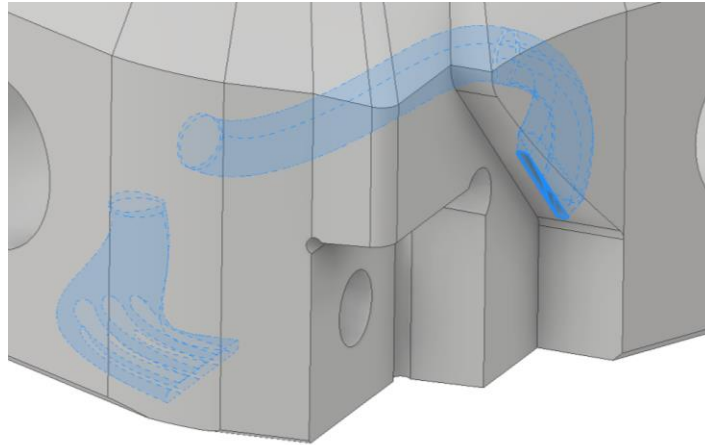
Nový návrh nástroje byl ve vhodném formátu odeslán do NTC, za účelem vylepšení rovnoměrnosti průtoku řezné kapaliny. Ze simulace proudění navržených tvarů lze vidět zmiňovaný problém nerovnoměrnosti proudění, viz Obrázek 39. S ohledem na to, že se do výpočtu proudění zadává mnoho parametrů stroje a vlastností kapaliny, lze tento výpočet simulace prohlásit za správný. Problém s prouděním se vyskytuje i u hřbetních kanálků, kde žebra usměrňují kapalinu především do středu výstupního tvaru.



Obrázek 39: Simulace proudění původního tvaru kanálku

Pro rovnoměrné rozložení objemu kapaliny v čelním kanálku byl navržen tvar, který je ve výstupní části značně rozšířen (Obrázek 40). Dle simulace se tak kompenzuje stranové vychýlení kapaliny. Úprava na hřbetním kanálku proběhla pouze úpravou pozice a tvaru tří žebër, které musí být v kanálku zachovány z důvodu schopnosti provedení 3D tisku. Zároveň je třeba konzultovat

výraznou změnou tvaru a pozice čelního chlazení pro vhodnost tohoto tvaru pro 3D tisk. Po provedení simulace 3D tisku se objevilo problematické místo v části zahnutí kanálku směrem k výstupu. Úprava tvaru spočívá v zachování kruhového průřezu až do tohoto problematického místa, následně dojde ke změně tvaru průřezu se zakomponováním rozšířeného tvaru před výstupní částí. Finální úprava čelního a hřbetního kanálku je vidět níže (Obrázek 40).



Obrázek 40: Optimalizace chladicích kanálků

Po provedené optimalizaci chlazení v regulačních členech, tak i ve tvaru chladicích kanálků je možné také vytvořit větší odlehčení nástroje. S ohledem na to, že nástroj se choval během obrábění velice stabilně, je možné provést větší odlehčení. Nástroj byl jednak snížen z výšky $h = 35$ mm na $h = 32$ mm. Zároveň byla rozšířena dutina v upínací části nástroje.

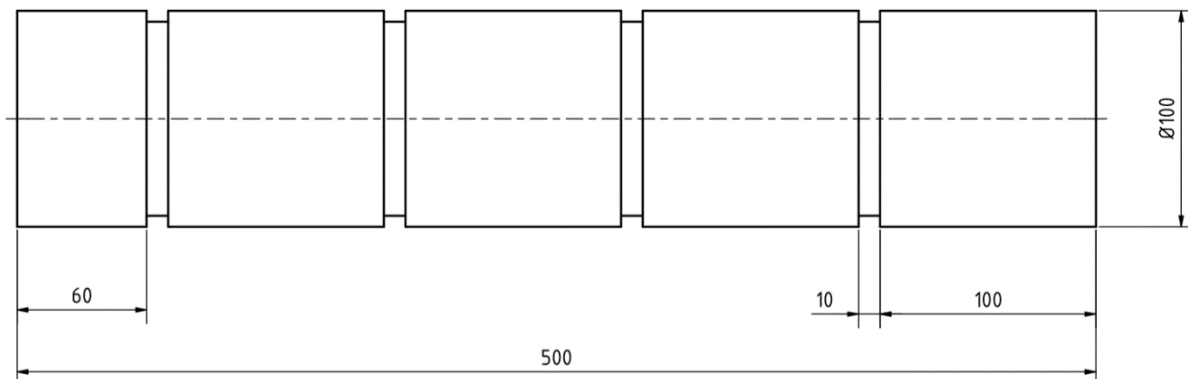
5.3 Příprava, výroba a modifikace zkušebních vzorků

Společně s firmou Plasmametal byl konzultován návrh zkušebních vzorků. Snahou bylo se co možná nejvíce přiblížit reálnému stavu výroby. Firma Plasmametal se zabývá žárovým stříkáním především objemových součástí pro kolejová vozidla. Před návrhem polotovarů je žádoucí specifikovat stroj, na kterém budou experimenty obrábění probíhat. Vzhledem k tomu, že většina objemových součástí, na které firma aplikuje žárové nástřiky, jsou rotačního tvaru, byl vybrán stroj od firmy DMG MORI s názvem CTX Beta 1250 (Obrázek 41), který se vyskytuje v halových laboratořích RTI. Tento stroj svou koncepcí umožňuje pohyb ve dvanácti osách, pomocí kterých dává téměř neomezené technologické možnosti kompletní výroby. Předností tohoto stroje je frézovací vřeteno, které lze synchronizovat během obrábění i se spodní revolverovou hlavou. Stroj disponuje vysokotlakým chlazením o velikosti až sto barů a možností automatického přeupnutí z hlavního vřetene do protivřetene. Maximální rozměry polotovaru se u tohoto stroje udávají $\varnothing 500$ mm a maximální délka až 1,2 metru.



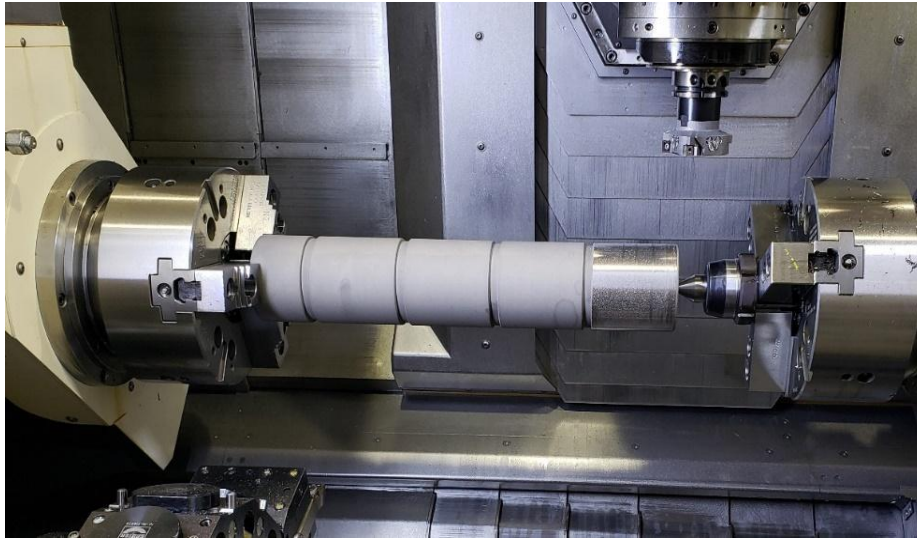
Obrázek 41: Stroj DMG MORI CTX Beta 1250 TC [56]

Po zohlednění všech aspektů a možností stroje byl navržen polotovar o rozměrech $D = \text{Ø}100 \text{ mm}$ a délkou $l = 500 \text{ mm}$ z materiálu ocel 12050 dle ČSN. Polotovar je rozdělen čtyřmi zápichy o šířce 10 mm. Tímto způsobem vznikly čtyři plochy o délce 100 mm a upínací část o délce 60 mm. Pro zajištění maximální tuhosti soustavy během obrábění je na obou koncích polotovaru vyroben středící důlek pro upnutí v kombinaci sklíčidlo – hrot. Návrh a rozměry polotovaru jsou graficky zobrazeny (Obrázek 42). Předpokládá se využití všech pěti ploch, kde na krátké části je plánováno optimalizace zkušebních podmínek a nalezení správné pozice nástroje spolu s obrobkem.



Obrázek 42: Návrh polotovaru pro nástřik NiCrBSi

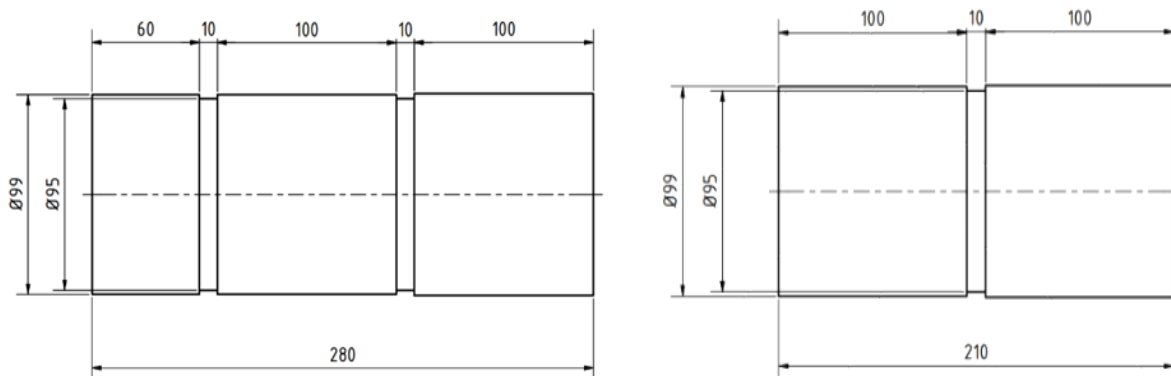
Po vyrobení čtyř polotovarů dle zadaných rozměrů následovala expedice do firmy Plasmametal, kde byl metodou vysokorychlostního stříkání (HVOF) nanesen žárový nástřik „NiCrBSi“ o tloušťce 0,5 mm na plochu (1 mm v průměru). Takto připravený polotovar měl tedy finální rozměr $\text{Ø}101 - 500 \text{ mm}$. Polotovar je upnutý do připravených měkkých čelistí a z druhé strany je podepřen otočným hrotem. Pohled do stroje s připraveným nástrojem je zobrazen na obrázku níže (Obrázek 43).



Obrázek 43: Připravený polotovár ve stroji CTX Beta 1250

Během prvního experimentu bylo zjištěno, že délka polotovaru 500 mm není pro tento stroj příliš vhodná, z důvodu nižší tuhosti, především v oblasti podpěrného hrotu. Snížená tuhost způsobovala vznik vibrací, které ovlivnily vzhled a kvalitu obrobeného povrchu. Při následných experimentech se ukázalo, že největší vliv na tuhost neměla délka polotovaru, ale právě otočný hrot, který z principu své funkčnosti potřebuje v uložení ložisek stanovenou vůli. Při dalších experimentech se proto upravil program pro pevný hrot tak, že se synchronizovali otáčky hlavního vřetene spolu s protivřetenem.

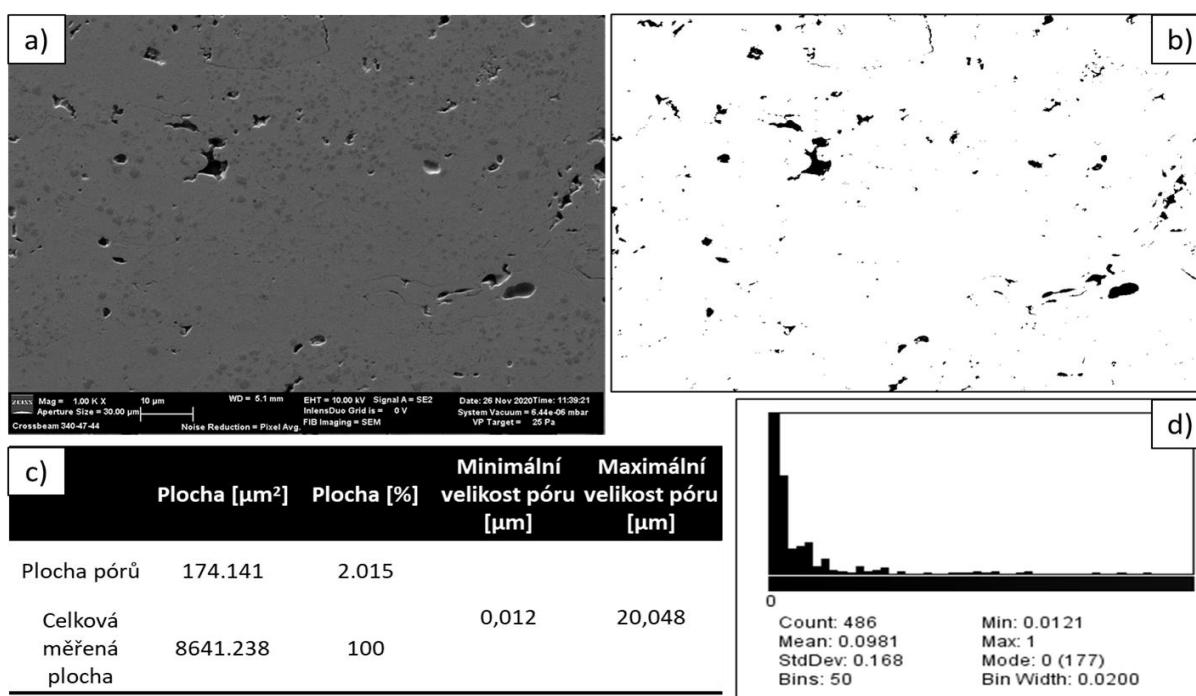
S ohledem na zjištění, že délka polotovaru může mít za následek snížení tuhosti a tím vznik vibrací, byly obrobené tyče (8 kusů) po prvním experimentu rozříznuty na dva kusy pro zajištění vyšší tuhosti během obrábění. Polotovary se následně soustružily na průměr 99 mm pro odstranění zbytkového nástřiku. Nově vzniklé polotovary (16 kusů) byly odeslány do firmy Plasmametal pro zhotovení nového nástřiku NiCrBSi. Rozměry nových polotovarů jsou zobrazeny Obrázek 44.



Obrázek 44: Rozměry nově navržených polotovarů

5.4 Metalografické hodnocení HVOF nástřiku slitiny NiCrBSi

Před samotným obráběním proběhlo metalografické hodnocení nástřiku materiálu NiCrBSi, který byl zhotoven metodou HVOF. Pro hodnocení byly zhotoveny metalografické výbrusy z příčného i podélného směru a zároveň bylo provedeno hodnocení na lomu tohoto nástřiku. Pro pozorování byl použit v první fázi světelný mikroskop, který však neposkytl dostatečné informace o mikrostruktuře nástřiku. Z toho důvodu byl následně použit řádkovací elektronový mikroskop Zeiss Crossbeam, vybavený duálním paprskem a detektory pro elektronovou disperzní spektrometrii, kterou bylo měřeno chemické složení materiálu, a pro pozorování v režimu zpětně odražených elektronů. Pro analýzu pórovitosti získaného nástřiku byl použit detektor sekundárních elektronů (Obrázek 45).



Obrázek 45: a) mikrostruktura HVOF nástřiku materiálu NiCrBSi ze skenovacího elektronového mikroskopu, b) měření pórovitosti povlaku, c) výsledky měření po naprahování obrazu, d) histogram zobrazující velikostní zastoupení pórů od 0 do 1 [μm^2]

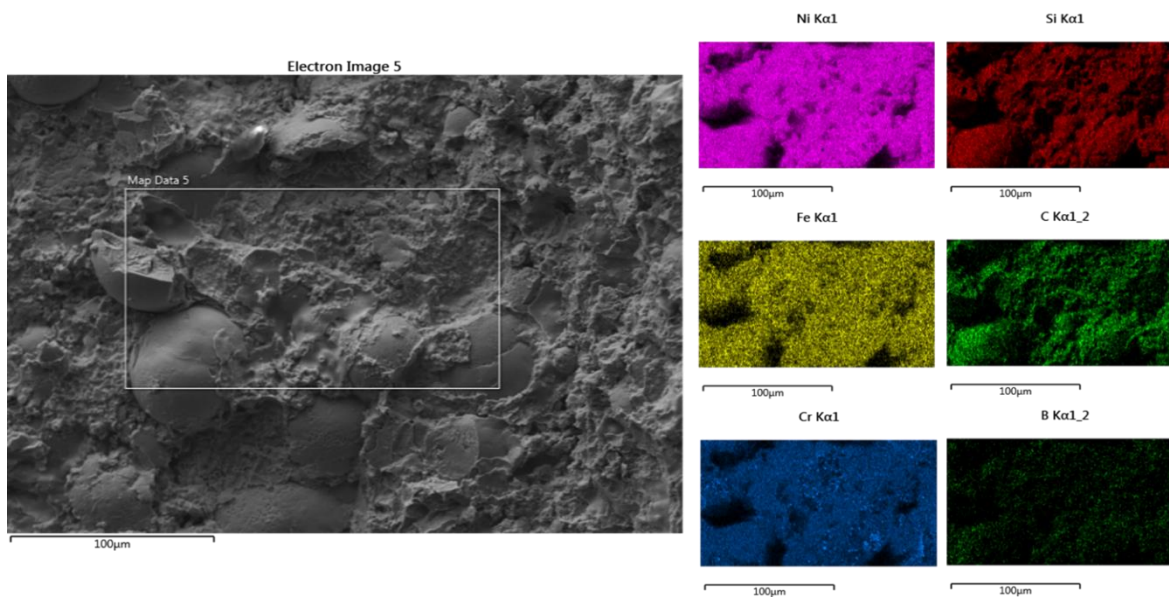
Nejmodernější metodu, kterou lze použít pro zhotovení zkoumaného nástřiku NiCrBSi je metoda vysokorychlostního nástřiku HVOF, viz Tabulka 7. Vzhledem k plazmovému stříkání je výstupní rychlost ze speciální trysky až 3x vyšší. Naopak pracovní teplota se pohybuje maximálně do 5000 °C, takže u této metody nedochází k nežádoucím fázovým a strukturním změnám, jako v případě použití plazmy. Díky vysoké výstupní rychlosti, která dosahuje až 1000 m/s lze dosáhnout velmi vysoké kvality nástřiku s velmi nízkou pórovitostí (dle měření na provedeném výbrusu je pórovitost okolo 2 % - Obrázek 45) a vysokou adhezí k základnímu materiálu převyšující 90 MPa. V žárovém nástřiku lze dokonce při správném zvolení vstupních podmínek zaznamenat i tlakové

napětí mezi natavenými částicemi nástřiku. To může mít příznivý vliv na odolnost nástřiku proti vzniku a šíření trhlin a tím i na celkovou životnost žárového nástřiku. [1] [3] [13]

Tabulka 7: Vliv použité technologie na vlastností nástřiku NiCrBSi [3]

	Nástřik plamenem	Nástřik plazmou	HVOF
Pórovitost (%)	5,0 ± 0,2	2,5 ± 0,1	0,5 ± 0,02
Drsnost (μm)	---	13,0	6,8
Tvrдость (HV _{0,3})	610 ± 92	750 ± 75	890 ± 63
Adheze (MPa)	33 ± 3	45 ± 5	65 ± 6
Youngův model (GPa)	49 ± 5	55 ± 6	81 ± 8

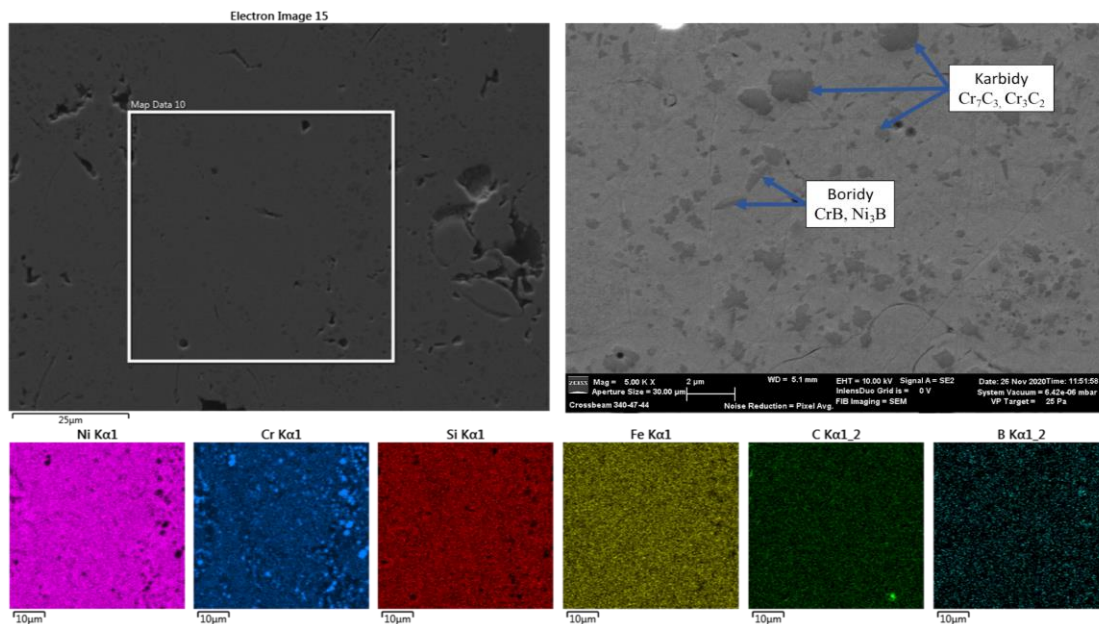
Polotovarem pro nanášený povlak byl kovový prášek vzniklý atomizací. Částice tohoto prášku byly jasně patrné i při pozorování povrchu nástřiku pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (Obrázek 46). Vlivem vysoké rychlosti nanášení se kinetická energie částic při kontaktu se základním materiálem přemění a částice vytvoří homogenní vrstvu. Na povrchu této vrstvy lze pozorovat nedokonale natavené částice, které jsou odstraněny v průběhu dalšího zpracování polotovaru s nástřikem. Z EDS analýzy (energy dispersive spectroscopy) je patrné, že během procesu nanášení nástřiku nedošlo k výrazné chemické segregaci (například vlivem dlouhodobě působící vysoké teploty). Na povrchu jsou patrné pouze částice chromu, avšak z EDS analýzy není patrné, zda se jedná o boridy, nebo karbidy.



Obrázek 46: SEM snímek povrchu HVOF nástřiku materiálu NiCrBSi a jeho EDS analýza prokazující homogenní chemické rozložení legujících prvků bez výrazné segregace.

Mikrostruktura povlaku NiCrBSi získaného metodou HVOF je tvořena základní Ni-Si-Fe maticí s kubickou plošně středěnou mřížkou (γ Ni), ve které jsou rozptýleny chromové částice. Ty se ve struktuře vyskytují ve dvou modifikacích, a to karbidy chromu při kombinaci s uhlíkem a boridy chromu při kombinaci s borem. V takto získaných nástřicích se běžně vyskytují karbidy

Cr_7C_3 , případně Cr_3C_2 a boridy CrB a Ni_3B , přičemž boridy mají obvykle spíš protáhlý tvar (Obrázek 47). Částice chromu byly v mikrostruktuře rovnoměrně rozptýlené. Rovněž bylo možné v mikrostruktuře pozorovat póry, které dosahovaly velikosti od $0,01 \mu\text{m}^2$ až do $20 \mu\text{m}^2$, přičemž většina pórů spadala do intervalu $0-1 \mu\text{m}^2$. Tyto póry zaujímalu plochu cca 2 % z celkové měřené plochy, což odpovídá kvalitě dosahované při použití metody HVOF. [57] [58]

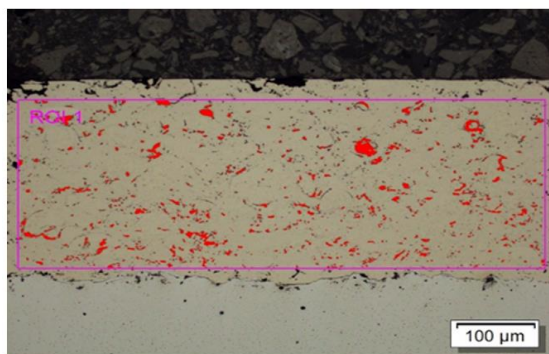


Obrázek 47: Mikrostruktura HVOF nástřiku NiCrBSi pozorovaná skenovacím elektronovým mikroskopem a EDS analýza rozložení chemických prvků ve struktuře.

5.5 Modifikace žárového nástřiku NiCrBSi

Přídavný materiál NiCrBSi ve formě prášku patří k levnější skupině kovových přídavných práškových materiálů. Výchozí dosažené vlastnosti povlaku s doporučenými technologickými parametry povlakování od výrobce technologických zařízení nesplňovaly predikované vlastnosti (Obrázek 48), především z hlediska reprodukovatelnosti procesu a homogenity struktury povlaku a efektivity procesu.

Modifikaci žárového nástřiku za účelem zlepšení obrobitelnosti řešila samostatně firma Plasmametal v rámci probíhajícího projektu NCKS. Pro optimalizaci parametrů bylo použito zařízení americké spol. Praxair. Toto zařízení patří k systémům, u kterých je rozmezí nastavování jednotlivých technologických parametrů velmi detailní, proto je provedení komplexní optimalizace velmi důležité. Vybrané technologické parametry byly množství kyslíku, množství kerosinu, průtok dopravního plynu, množství přídavného materiálu, obvodová a příčná rychlost substrátu a vzdálenost stříkání.



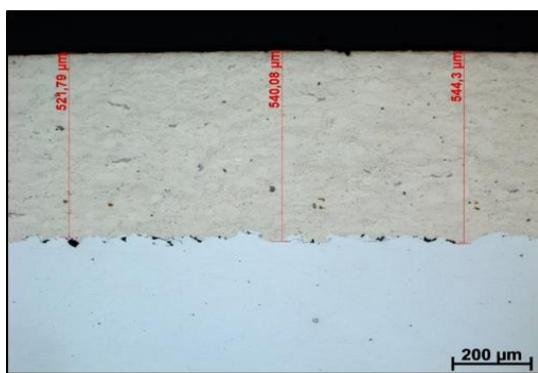
Strukturní trhliny	0
Delaminace struktury	0
Deadheze	1,5 %
Kontaminace mezifázového rozhraní	1 %
Měření tloušťky funkčního povlaku	308,9 μm
Měření pórovitosti	2,8±0,5 %
Měření tvrdosti	HV 0,3 695,5
Měření přilnavosti	45,65 MPa
Efektivita procesu	45,5 %

Obrázek 48: Struktura a vlastnosti nevyhovujícího nástřiku NiCrBSi

V první fázi optimalizace byly zvoleny technologické parametry, které dle zkušeností a získaných informací z odborné literatury ovlivňují mechanické a strukturní vlastnosti povlaků. V této fázi bylo ověřeno, které parametry ovlivňují plynulé podávání práškového přídavného materiálu společně se stabilním prouděním v plamenu.

V druhé fázi optimalizace je sledován vliv jednotlivých parametrů, jako je velikost průtoku kyslíku, množství kerosinu, poměru a průtok dopravního plynu a množstvím přídavného práškového materiálu na vlastnosti výsledného povlaku. Na závěr byla provedena optimalizace pohybových parametrů (vzdálenost nástřiku, obvodová rychlost povrchu substrátu a příčná rychlost). Vzhledem k tvaru vzorků (rotační válcový tvar) byla obvodová rychlost povrchu substrátu realizovaná počtem otáček za minutu a příčná rychlost podélným posuvem hořáku rovnoběžně s osou rotace, s definovanou vzdáleností stopy na jednu otáčku.

Výsledky dosažené v jednotlivých etapách potvrdily predikované vlastnosti a spojením dosažených výsledků v jednotlivých etapách byl vytvořen povlak s vlastnostmi splňující standardy uváděné v zahraniční odborné literatuře. Povlak vytvořený z tohoto přídavného materiálu je z hlediska struktury podstatně homogennější a vykazuje výrazně lepší strukturní charakteristiky při porovnání s povlaky stejného chemického složení vytvořenými jinými způsoby žárového stříkání. Optimalizací technologických a pohybových parametrů bylo dosaženo výrazně lepších mechanických vlastností (Obrázek 49).



Strukturní trhliny	0
Delaminace struktury	0
Deadheze	0
Kontaminace mezifázového rozhraní	0,5 %
Měření tloušťky funkčního povlaku	540,08 μm
Měření pórovitosti	do 0,25 %
Měření tvrdosti	HV _{0,3} 641,4
Měření přilnavosti	53,65 MPa
Efektivita procesu	57,8 %

Obrázek 49: Struktura a vlastnosti optimalizovaného nástřiku NiCrBSi

Shrnutí optimalizace žárového nástřiku NiCrBSi

- min. pórovitosti pod 1 % (standardně se udává velikost pórovitosti 1 – 1,5 %)
- min. tvrdost 600 HV 0,3
- min. přilnavosti 50 MPa
- homogenity povlaku v celém průřezu
- dosažení maximální reprodukovatelnosti procesu nanášení a dosahování výše uvedených parametrů s min. odchylkami a efektivitou nad 50 %.

5.6 Výroba a úprava makrogeometrie řezného nástroje

Žárové nástřiky jsou obecně kvůli své specifické kombinaci prvků velmi těžko obrobitelné. Z důvodu vysoké pevnosti a abrazivním účinkům je potřeba volit materiály s vyšší tvrdostí a oteřuvzdorností, viz kapitola 3.1. Pro obrábění žárového nástřiku NiCrBSi byly vybrány následující varianty výměnných břitových destiček. Jedná se o čtvercové břitové destičky s hřbetem 7° s označením SCMW 120408, viz Obrázek 50.

Experimentální řešení

- Rotana PCBN – 0 (45 % CBN)
- Rotana PCBN – 1 (90 % CBN)
- Rotana PCBN – 2 (65 % CBN)

- Rotana CVD – D RHE - 0574
- Rotana CVD – D RHE - 0733–0
- Rotana CVD – D RHE - 0733–1
- Rotana CVD – D RHE - 0733–2

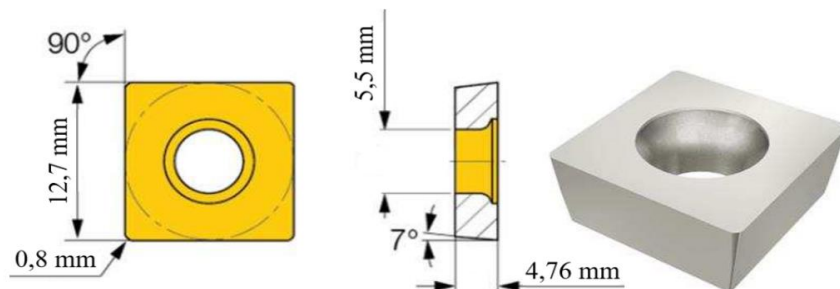
Komerční řešení

- Iscar SK IC20 (nepovlakovaný, bez fazetky)
- Iscar SK IC6015 (s povlakem)

- Bonar PCBN – 120404 (fazetka $0,1 \times 5^\circ$)
- Bonar PCBN – 120404 (fazetka $0,1 \times 10^\circ$)
- Bonar PCBN – 120404 (fazetka $0,2 \times 20^\circ$)
- Bonar PCBN – 120404 (bez fazetky)

Břitová destička Iscar SCMW 120408

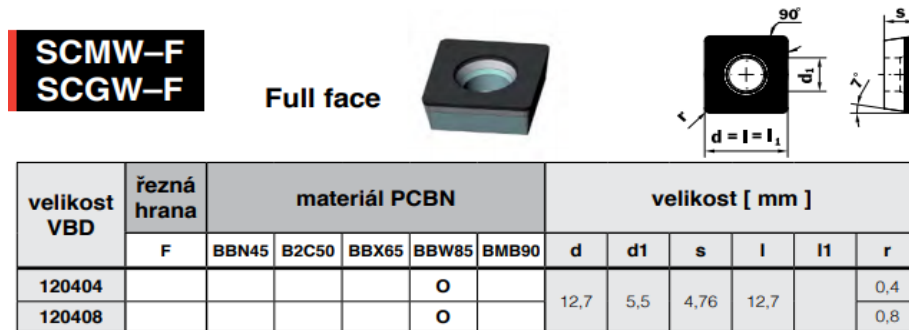
Břitové destičky ze slinutého karbidu od firmy Iscar lze v nástroji otáčet, proto je možné využít všechny čtyři hrany břitové destičky. Jedna z variant je destička z karbidu třídy IC20 bez povlaku s ostrou hranou bez fazetky. Ve druhém případě se jedná o destičku z karbidu IC6015 s povlakem ($\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$), kterou výrobce doporučuje na obrábění těžkoobrobitelných materiálů v kategorii ISO-S a ISO-H.



Obrázek 50: Rozměry břitové destiček SCMW 120408

Břítová destička Bonar CBN - 120404 F

Břítová destička SCMW 120404-F od firmy Bonar (Obrázek 51) je full face destička s napájenou řeznou částí z CBN o obsahu 85 % po celé vrchní ploše. Destičku lze proto otáčet v nástroji a využít tak všechny čtyři řezné hrany. Celkem byly zakoupeny čtyři typy těchto destiček. Prvním typem je ostrá řezná hrana, zbylé tři typy jsou opatřeny fazetkou o rozměrech 0,1 a 0,2 mm s rozdílným sklonem ve variantách 5°, 10° a 20°.



Obrázek 51: Rozměry břítové destiček Bonar PCBN – 120404

Břítová destička Rotana SCMW 120405 (PCBN, CVD-D)

Destičky od firmy Rotana s napájenými segmenty z CBN a CVD nelze v nástroji otáčet. Segmenty přesahují okraje destičky, tudíž při otočení nezajistí úplné dosednutí boků destičky směrem do lůžka. Z tohoto důvodu lze využít jen jednu řeznou hranu pro podélné soustružení a druhou hranu pro soustružení čelní, viz Obrázek 52.



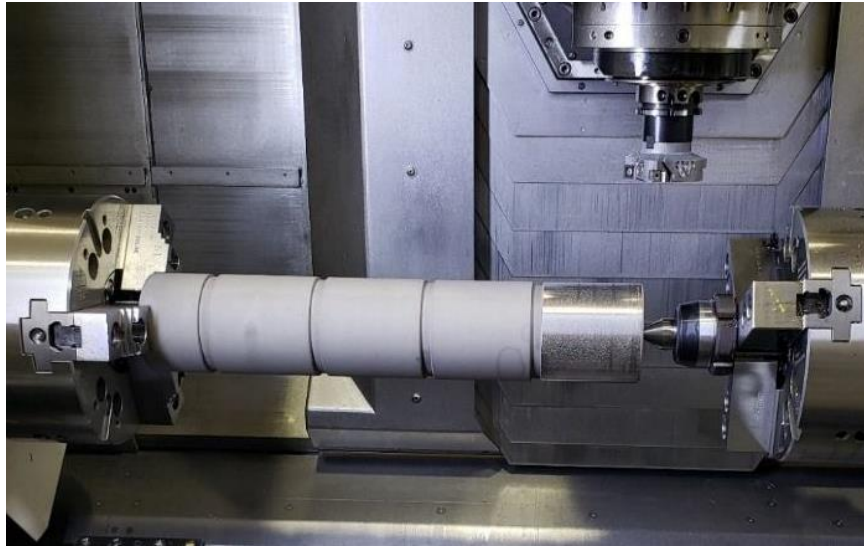
Obrázek 52: Rozměry břítové destiček SCMW 120405

Po provedení prvotních experimentů byl zjištěn problém s vylamováním řezné hrany v místě špičky, kde se spojují oba segmenty. Z tohoto i ekonomického důvodu se vytvořil nový návrh destičky pouze s jedním řezným břitem pro podélné soustružení. Zároveň byly navrženy čtyři varianty uložení segmentu s rozdílným úhlem čela a fazetkou, viz seznam výše. U varianty s kubickým nitridem bóru (PCBN) bude testován vliv obsahu CBN na trvanlivosti VBD. U varianty s polykrystalickým diamantem (CVD) bude testován vliv naklonění úhlu čela ve čtyřech variantách, a to -15°, 0° s fazetkou, 0° ostrá a 5°.

5.7 Testování a optimalizace řezivosti řezného nástroje

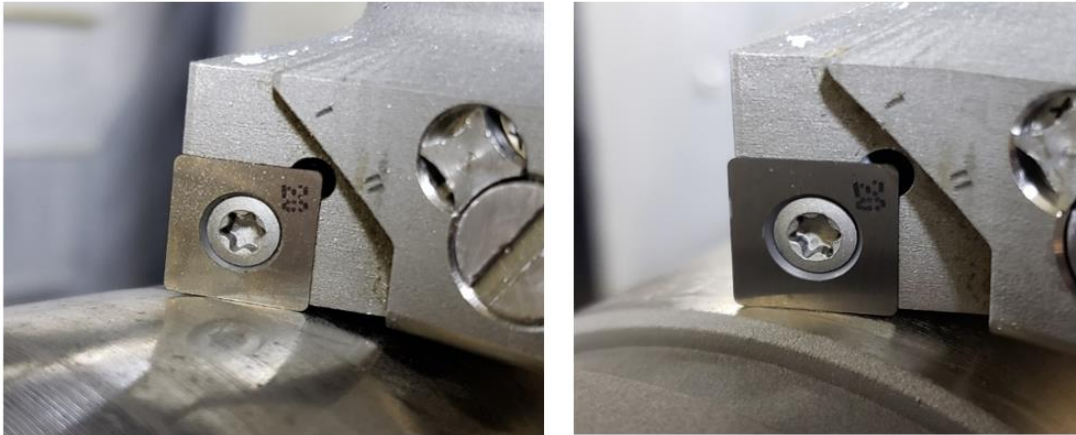
5.7.1 Zkušební test obrábění

Veškeré testy obrábění žárového nástřiku NiCrBSi proběhly na stroji CTX Beta 1250 TC, který se nachází v halových laboratořích RTI, viz předchozí kapitola. První experiment se provedl dne 15. 11. 2019 za účelem poznání procesu obrábění s lineární řeznou hranou. Zkoumala se především správná pozice výměnné břitové destičky v řezu, správné zaměření nástroje a odzkoušení programu. Po prvním (zkušebním) experimentu následovalo několik dalších experimentů, které se zabývají poznáním procesu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi. Na závěr jsou vybrány nejlepší řezné podmínky, s kterými jsou provedeny dlouhodobé zkoušky řezivosti. Z dlouhodobých zkoušek je zjištěna hodnota trvanlivosti řezných podmínek pro konkrétní břitové destičky. Trvanlivost je určována na základě výsledků opotřebení břitu a dosažené kvality obrobku.



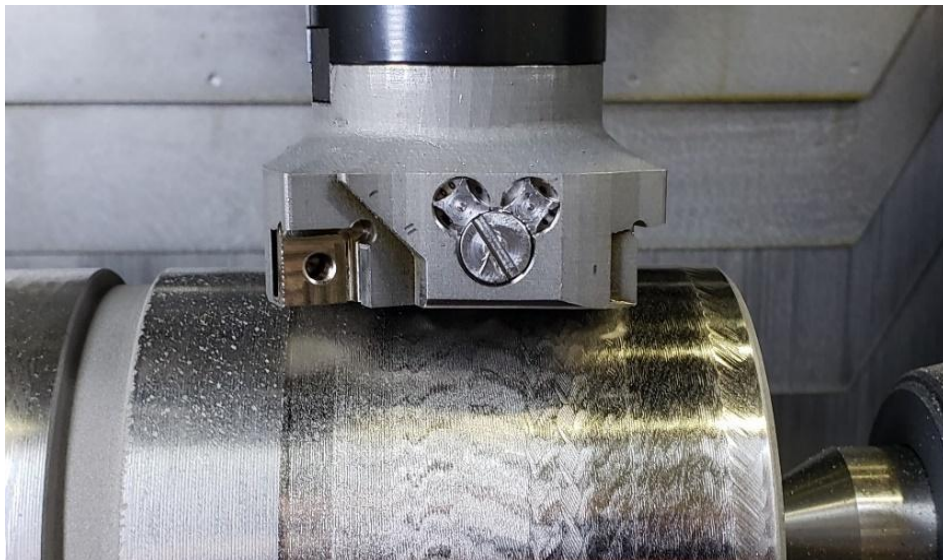
Obrázek 53: Průběh zkušebního obrábění s nástrojem QCA4

Pro zkušební experiment (Obrázek 53) byla vybrána destička z nepovlakovaného slinutého karbidu IC20. Z důvodu velké houževnatosti je s touto VBD možnost zastavení v řezu a sledování správné polohy řezného břitu. První myšlenkou je nalezení správné pozice břitové destičky a využití celé délky řezné hrany. Pomocí osy Y je tedy nastavena hodnota posunutí při prvním kontaktu destičky s obrobkem a zároveň změna Y osy po ujetí dané vzdálenosti. Břitová destička není zaměřena na špičku břitu stejně jako u konvenčních nástrojů, ale na střed břitu. Pohyb y osy během obrábění je proto nastavován od kladné hodnoty do záporné např. $y = +3, -3$. Při nastavení kladné korekce y osy se nástroj posune vzhledem k ose obrobku více na špičku břitové destičky naopak při záporné hodnotě směrem k patě destičky. Tímto nastavením je možné využít celou délku řezné hrany při jednom přejezdu s rovnoměrným opotřebením. Obrázek 54 zachycuje pozici y osy při vstupním kontaktu s obrobkem a pozice břitu po ujetí stanovené dráhy 100 mm.



Obrázek 54: Nastavení pozice s nástrojovou korekcí v Y ose

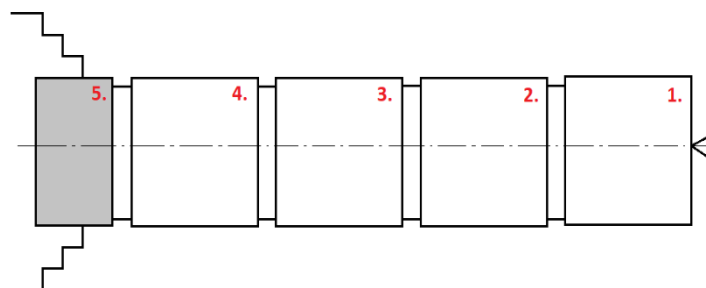
Pokračovala řada několika krátkých řezů s různou variací úhlu sklonu ostří λ_s , řeznou rychlostí v_c a posuvem f , viz Obrázek 55. Z prvních výsledků bylo zjištěno, že při nevhodně nastavených podmínkách, především hloubky řezu a posuvu, vzniká intenzivní chvění, které má za následek výrazné zhoršení obrobeneho povrchu. Podle dosažených výsledků byly vytipovány řezné podmínky pro provedení prvního experimentu s destičkou ze slinutého karbidu IC20. Zároveň se předpokládá, že výsledky dosažené z experimentu nebudou vyhovovat nastaveným kritériím v podobě kvality povrchu a intenzity opotřebení. Cílem experimentu je zjištění základního chování během obrábění pro stanovené řezné podmínky ze zkušebního experimentu.



Obrázek 55: Obrobený povrch při zkušebním testování řezných podmínek

5.7.2 Experimentální obrábění se slinutým karbidem IC20 – SCMW 120408

Dle zkušebního experimentu byly vybrány řezné podmínky pro obrábění nepovlakové břitové destičky ze slinutého karbidu s označením SCMW 120408. Obráběný materiál se svým složením a vlastnostmi klasifikuje jako těžkoobrobitelný materiál, proto lze očekávat horší výsledky opotřebení a kvality povrchu. Cílem tohoto experimentu je vyzkoušet základní chování nástroje s různými variantami chlazení a pohybu Y osy při přejezdu jedné plochy o délce 100 mm (Obrázek 56). Řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a nastavení úhlu sklonu ostří zůstávají konstantní.



Obrázek 56: Schéma rozdělení jednotlivých ploch polotovaru

Tabulka 8: Souhrn a naměřené výsledky při obrábění s destičkou IC20

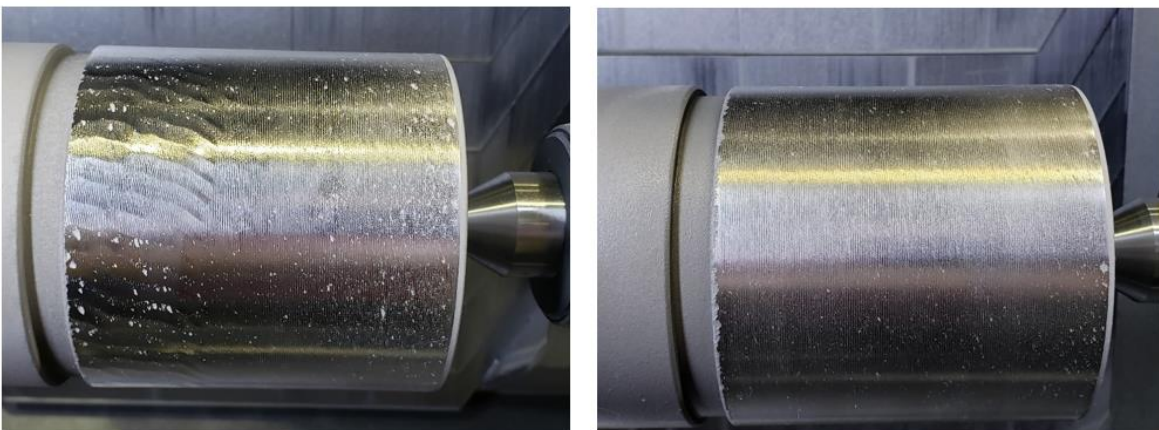
VBD	Číslo	Drsnost	Průměr	Opotřebení		Podmínky							Vzhled povrchu
				VBD		Vc [m/min]	f [mm/ot]	ap[mm]	λ_s	Y osa	Chlazení	Plocha	
SK IC20	1.1	Ra [μm]	2,34	Hřbet: 0,27	0,27	80	0,6	0,15	70°	konst.	ne	č. 3	Sjednocený bez vibrací
		Rz [μm]	12,80	Čelo: KB 0,24									
SK IC20	2.1	Ra [μm]	2,94	Hřbet: 0,26	0,26	80	0,6	0,15	70°	pohyb	ano	č. 4	Sjednocený bez vibrací
		Rz [μm]	16,63	Čelo: KB 0,26									
SK IC20	3.1	Ra [μm]	2,48	Hřbet: 0,28	0,28	80	0,6	0,15	70°	pohyb	ne	č. 1	Nesjednocený vibrace
		Rz [μm]	13,66	Čelo: KB 0,25									
SK IC20	4.1	Ra [μm]	3,00	Hřbet: 0,16	0,16	80	0,6	0,15	70°	pohyb	vzduch	č. 2	Nesjednocený vibrace
		Rz [μm]	15,41	Čelo: KB 0,23									
SK IC20	5.1	Ra [μm]	2,32	Hřbet: 0,29	0,29	80	0,6	0,15	70°	konst.	ano	č. 3	Sjednocený bez vibrací
		Rz [μm]	14,29	Čelo: KB 0,22									
SK IC20	6.1	Ra [μm]	2,26	Hřbet: 0,29	0,29	80	0,6	0,15	70°	konst.	ano	č. 4	Sjednocený bez vibrací
		Rz [μm]	13,00	Čelo: KB 0,24									
SK IC20	7.1	Ra [μm]	1,97	Hřbet: 0,11	0,11	80	0,6	0,15	70°	konst.	ano	č. 1	Sjednocený bez vibrací
		Rz [μm]	11,41	Čelo: KB 0,25									

Z provedeného experimentu byla vytvořena Tabulka 8 s popisem řezných podmínek, dosažené drsnosti povrchu, vzniklého opotřebení VBD a celkovým vzhledem obrobenej plochy. Pro měření a vyhodnocení vzniklého opotřebení byl využit optický mikroskop Keyence VHX 6000 (Obrázek 57). Opotřebení břitových destiček bylo měřeno na čele (hodnota KB_b) a hřbetu (hodnota VB_{max}). Pro měření drsnosti byl využit drsnoměr od firmy Mahr s označením Marsurf M300.

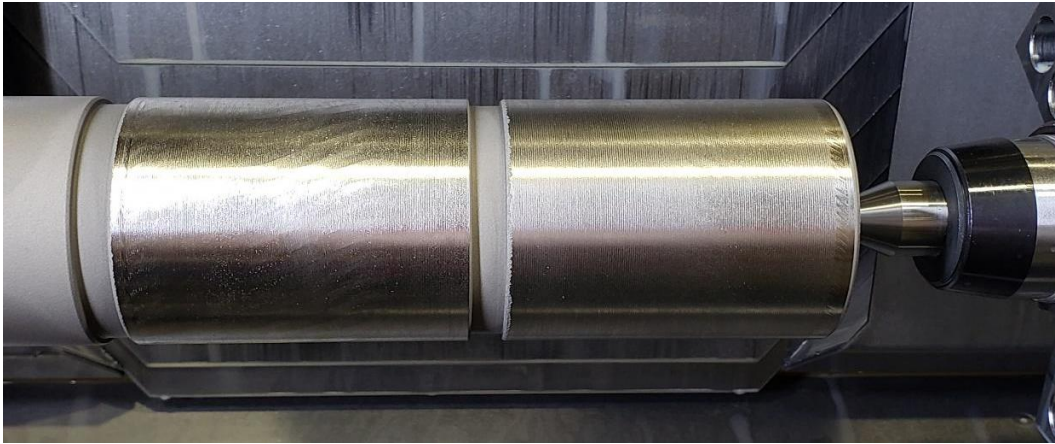


Obrázek 57: Mikroskop Keyence VHX 6000

Z dosažených výsledků s destičkou ze slinutého karbidu IC20 je na první pohled zřejmé, že obrábění tímto materiálem jednoznačně nedosahuje definovaných požadavků na obrobenou plochu. Během experimentu byl zkoumán především vliv tuhosti během obrábění a vliv chlazení na výslednou obrobenou plochu. Z experimentu bylo zjištěno několik základních informací o tomto způsobu obrábění. Z Tab. 8 je patrné, že zapojení pohybu Y osy během obrábění má negativní vliv na vzhled obrobené plochy z důvodu velkých vibrací. Vibrace se při obrábění nevyskytovaly po celé obráběné délce, ale zhruba v jedné třetině plochy, viz Obrázek 58. Při obrábění vzorku 2.1 byl vzhled plochy sjednocený bez zaznamenaných vibrací, zároveň však drsnost obrobeného povrchu R_a a R_z vyšla výrazně horší než u ostatních vzorků. Horší drsnost R_a a R_z vyšla také u vzorků se zapojením pohybu v Y ose (Obrázek 58). Sjednocený vzhled povrchu byl naopak dosažen při obrábění s konstantní hodnotou Y. Nejlepší naměřená drsnost $R_a = 1,97 \mu\text{m}$ byla dosažena u vzorku 7.1 na ploše č. 1 s použitím chlazení (Obrázek 59). Při porovnání vzorků číslo 1.1 a 5.1 však vyplývá, že zapojení kapaliny během obrábění nemá významný vliv na drsnost obrobeného povrchu.

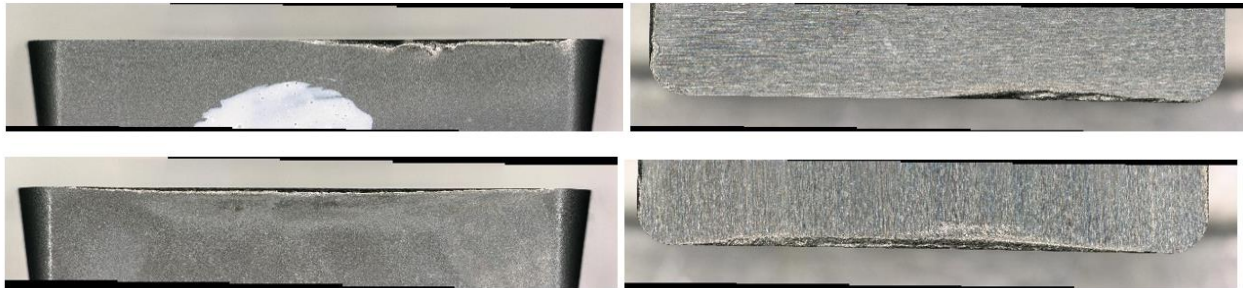


Obrázek 58: Porovnání povrchů při obrábění s /bez pohybu Y osy



Obrázek 59: Obrobený povrch u vzorku č. 7.1 (vpravo) a 4.1 (vlevo)

Opotřebení břitových destiček bylo měřeno na mikroskopu Keyence VHX 600 na čele a hřbetu VBD. Z dosažených výsledků nelze jednoznačně určit vazbu mezi obrobeným povrchem a vzniklým opotřebením. Z naskenovaných snímků lze potvrdit správnost nastavení Y osy při pohybu, i při konstantní hodnotě, viz Obrázek 60. Správná pozice VBD je důležitá při následném testování břitových destiček z kubického nitridu bóru a polykrystalického diamantu (CBN a PKD).



Obrázek 60: Porovnání opotřebení s/bez použití pohybu v Y ose

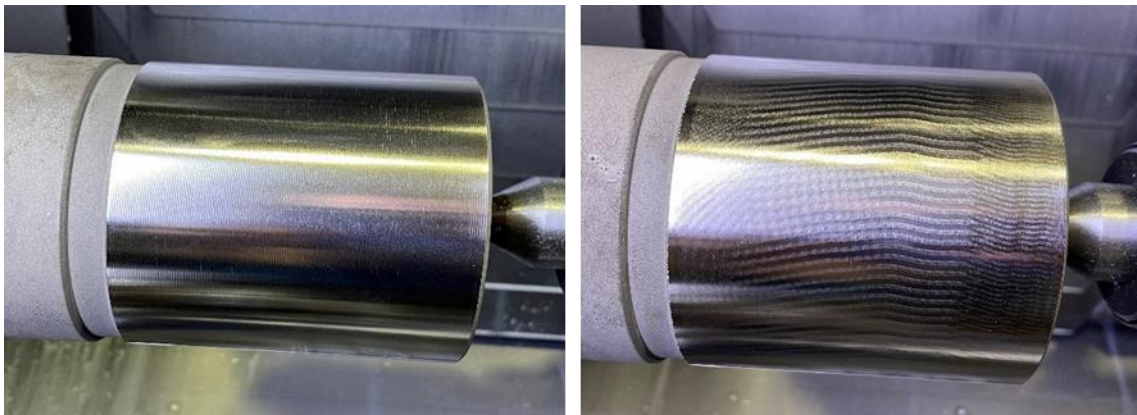
Závěrem lze z tohoto experimentu konstatovat, že využití pohybu osy Y se během obrábění příliš neosvědčila z důvodu snížení tuhosti soustavy SNO. Zároveň je možné říci, že samotná myšlenka využití celé délky řezné hrany se v tomto experimentu potvrdila. Z prvních pokusů se lze domnívat, že pohyb osy během obrábění přispívá ke vzniku chvění a tím ke zhoršení kvality obrobeného povrchu. Toto tvrzení však nelze jednoznačně potvrdit, jelikož existuje celá řada dalších neznámých, které nám vstupuje do procesu obrábění. Druhou možností je zadávání konstantní hodnoty a tím nastavování řezné hrany do několika pozic, což by v ideálním případě znamenalo využití řezné hrany až čtyřikrát. Při tomto způsobu obrábění a typem čtvercové destičky to znamená, že na jedné břitové destičce je možné využít až šestnáct částí břitu, které se budou vzájemně překrývat jen minimálně.

Do kategorie obrábění se slinutým karbidem byl zařazen i poslední test s břitovou destičkou, kterou nám doporučila a dodala firma Pramet. Jedná se o povlakovaný slinutý karbid určený na dokončovací operace pro velmi tvrdé a abrazivní materiály s utvařečem s označením RM. Vzhledem k tomu, že jde o slinutý karbid, byla doporučená řezná rychlost na hodnotě $v_c = 60$ m/min. Nejprve byl testován posuv stanovený na hrubování $f = 0,4$ mm/ot, poté byl posuv snížen na posuv dokončovací $f = 0,2$ mm/ot (Tabulka 9).

Tabulka 9: Doporučené řezné podmínky pro destičku SK Pramet

Řezná rychlost v_c	Posuv f	Hloubka řezu a_p	Typ VBD	Sklon ostří λ
60 m/min	0,2 mm/ot	0,05 mm	Pramet SK	70°

Vzhled a naměřená drsnost povrchu jsou po prvním řezu na velmi dobré úrovni. Naměřená drsnost povrchu $R_a = 0,25 - 0,31$ μm a $R_z = 1,5 - 2,1$ μm se zhoršuje směrem ke vřetenu, kde také narůstá obrobený průměr s rozdílem 0,02 mm. Negativně lze pohlížet na opotřebení břitové destičky, které bylo výrazné a s dalším řezem lze s jistotou očekávat zhoršení stability řezu a tím i drsnosti povrchu. Pro potvrzení byl proveden opětovný test se stejnou řeznou hranou břitové destičky, kde došlo vlivem otupení hrany ke vzniku chvění. Porovnání těchto řezů ukazuje Obrázek 61. Špatný výsledek byl také z hlediska naměřené průměru 99,75 až 99,77, což odpovídá skutečné hloubce řezu $a_p = 0,02$ mm z nastavených 0,05 mm.



Obrázek 61: Výsledek obrábění se slinutým karbidem od firmy Pramet (řez 1 a 2)

Závěrem je možné porovnat všechny výsledky při obrábění se slinutým karbidem, kde destička od firmy Pramet, která dosáhla nejlepších výsledků z hlediska vzhledu a drsnosti povrchu R_a i R_z . I přesto, že se jednalo o povlakovaný slinutý karbid s utvařečem určený pro obrábění velmi tvrdých materiálů, je výsledek spíše průměrný i z hlediska produktivity výroby. Z hlediska opakovatelnosti výroby a dodržení stanovené hloubky řezu také tuto destičku nelze považovat za adekvátní náhradu za technologii broušení.

5.7.3 Experimentální obrábění s polykrystalickým diamantem CVD-D

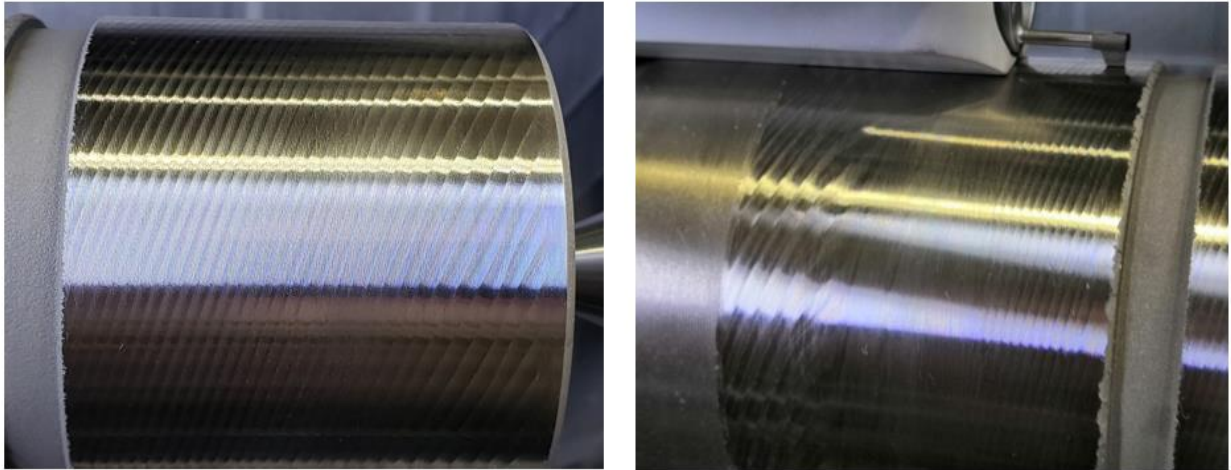
Z předchozího experimentu je zřejmé, že pro dosažení výsledků, které mohou konkurovat kvalitě broušení, je potřeba zvolit produktivnější materiály s nejvyšší tvrdostí a ořezuvzdorností. Pro další experiment budou proto testovány destičky s polykrystalickým diamantem od firmy Rotana, které byly společně navrženy pro metodu obrábění s lineární řeznou hranou s označením CVD-D SCMW 120405. Jedna se o variantu s jedním napájeným diamantovým segmentem s úhlem čela $\gamma = 0^\circ$ a úhlem hřbetu $\alpha = 7^\circ$. Testování proběhne obdobně jako se slinutým karbidem. Úhle sklonu ostří a hloubka řezu zůstanou konstantní. S ohledem na nízkou tepelnou odolnost diamantu bude břit intenzivně chlazen jak na čele, tak hřbetu VBD. Cílem je již naleznout optimální řezné podmínky s vypovídající kvalitou povrchu v nejhorším případě do $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$. Tabulka 10 zaznamenává řezné podmínky společně s výsledky kvality povrchu Ra a Rz a stav opotřebení řezné hrany po jednom přejezdu o délce 100 mm.

Tabulka 10: Souhrn a naměřené výsledky při obrábění s destičkou CVD-D

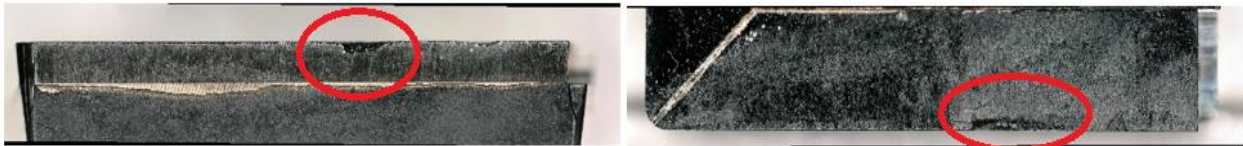
VBD	Číslo	Drsnost	Art. průměr	Opotřebení		Řezné podmínky						
				Hřbet: VBmax	VBD [mm]	Vc [m/min]	f [mm/ot]	ap[mm]	λ_s	Y osa	Chlazení	Plocha
CVD-D	10.1	Ra [μm]	0,81	Hřbet: VBmax	0,1	120	0,2	0,15	70°	konst.	ano	č.5
		Rz [μm]	3,92	Čelo: KB	0,08							
CVD-D	11.1	Ra [μm]	0,84	Hřbet: VBmax	0,25	130	0,18	0,15	70°	konst.	ano	č. 4
		Rz [μm]	4,30	Čelo: KB	0,42							
CVD-D	12.1	Ra [μm]	0,43	Hřbet: VBmax	0,18	95	0,2	0,15	70°	konst.	ano	č.5
		Rz [μm]	1,73	Čelo: KB	0,31							
CVD-D	13.1	Ra [μm]	0,44	Hřbet: VBmax	0,24	80	0,25	0,15	70°	pohyb	ano	č.5
		Rz [μm]	2,95	Čelo: KB	0,71							
CVD-D	14.1	Ra [μm]	0,49	Hřbet: VBmax	0,18	80	0,25	0,15	70°	konst.	ano	č.4
		Rz [μm]	2,64	Čelo: KB	0,51							
CVD-D	15.1	Ra [μm]	0,23	Hřbet: VBmax	0	80	0,2	0,15	70°	konst.	ano	č.4
		Rz [μm]	1,51	Čelo: KB	0							
CVD-D	15.2	Ra [μm]	0,17	Hřbet: VBmax	0	80	0,2	0,15	70°	konst.	ano	č.3
		Rz [μm]	1,02	Čelo: KB	0							
CVD-D	16.1	Ra [μm]	0,50	Hřbet: VBmax	0,13	80	0,2	0,15	70°	pohyb	ano	č.3
		Rz [μm]	3,38	Čelo: KB	0,54							

Po prvním přejezdu s destičkou CVD-D bylo zaznamenáno celkově nízké opotřebení, které by se dalo přirovnat k počátečnímu zaříznutí destičky i přesto, že během obrábění byl slyšet velmi nestabilní řez. Ten se samozřejmě projevil na výsledném povrchu i přes naměřenou nižší drsnost povrchu $Ra = 0,81 \mu\text{m}$, viz Obr 62. Povrch je na pohled velmi zvlněný, právě z důvodu nízké tuhosti spolu s nevhodně nastavenými řeznými podmínkami.

Při zvýšení řezné rychlosti na $v_c = 130$ m/min nebyl zaznamenán lepší výsledek kvality povrchu (Obrázek 62). Při měření břitové destičky již bylo zaznamenáno místo, kde došlo k drobnému vyštípnutí řezné hrany, viz Obrázek 63. Z tohoto důvodu byla následně testována i nižší řezná rychlost $v_c = 95$ m/min s posuvem $f = 0,2$ mm/ot, která přinesla první použitelné výsledky s ohledem na kvalitu obrobeného povrchu, která byla již pod hranicí drsnosti $R_a = 0,5$ μm .

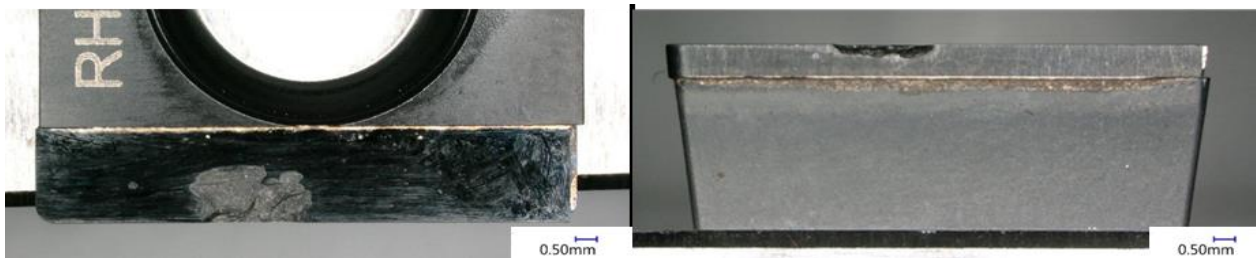


Obrázek 62: Výsledný povrch z testu č. 10.1 (vlevo) a 11.1 (vpravo)



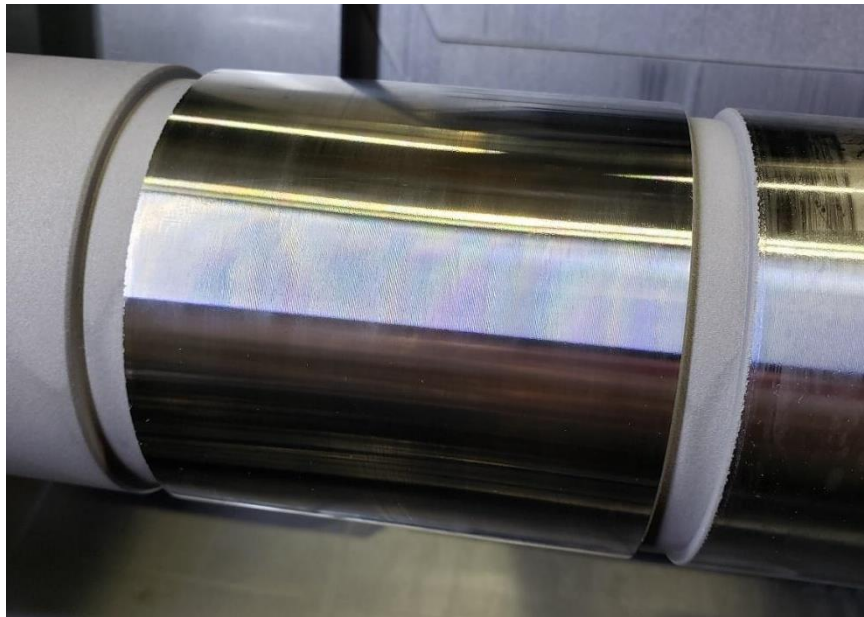
Obrázek 63: Zaznamenané opotřebení testu č. 11.1 s vyštípnutím hrany

Při testování řezu číslo 13.1 byla zachována rychlost z předešlého řezu se změnou posuvu na hodnotu $f = 0,3$ mm/ot. Při takto velkém posuvu sice vzhled a drsnost povrchu byla naměřena opět pod hranici $R_a = 0,5$ μm , ale na břitu VBD bylo na první pohled vidět známky poškození, které při zvětšení v mikroskopu Keyence odpovídalo úplné destrukci břitu v místě kontaktu s nástřikem (Obrázek 64). Následující pokus č. 14.1 se sníženým posuvem na hodnotu $f = 0,25$ mm/ot dopadl o něco lépe, ale opět došlo k destrukci řezné hrany naměřené přes 0,5 mm na čele břitové destičky (Hodnota KB_b).



Obrázek 64: Destrukce řezné hrany u testu č. 13.1

První opravdu pozitivní výsledek ve všech ohledech přinesl pokus č. 15.1, kde byla opět snížena hodnota posuvu na hodnotu $f = 0,2$ mm/ot se zachováním řezné rychlosti na hodnotě $v_c = 80$ m/min. S tímto posuvem a rychlostí poprvé nedošlo jak k destrukci břitu, tak ani k měřitelnému poškození na čele a hřbetu břítové destičky. Zároveň byla dosažena nejlepší drsnost povrchu $R_a = 0,23$ μm a $R_z = 1,51$ μm , která se svými parametry může konkurovat drsnosti povrchu po broušení, viz Obrázek 65. Stejně řezné podmínky jsou vyzkoušeny opět při řezu č. 15.2 s ještě lepším výsledkem. Na závěr samotného testování s polykrystalickým diamantem byla opět vyzkoušena myšlenka rovnoměrného pohybu v Y ose při podmínkách z pokusu č. 15., při kterém došlo opět k vylomení části břitu.



Obrázek 65: Výsledek obrábění při řezu č. 15.1 s CVD-D

Závěrem lze konstatovat, že byl konečně nalezen řezný materiál a podmínky pro obrábění, které mohou při technologii soustružení konkurovat technologii broušení. Nejlepší dosažená drsnost povrchu $R_a = 0,17$ μm a $R_z = 1,02$ μm byla dosažena při podmínkách $f = 0,2$ mm/ot a řeznou rychlostí $v_c = 80$ m/min. Ostatní zkoušené podmínky ve většině případů způsobily viditelné vyštípnutí až destrukci řezné hrany. Polykrystalický diamant prokázal, že svou tvrdostí dokáže obrobit i velmi tvrdé materiály jako je žárový nástřiku NiCrBSi, zároveň je ale velmi křehký při nevhodně nastavených řezných podmínkách. Co se týče produktivity těmito podmínkami, tak obrábění žárového nástřiku o délce 100 mm na průměru 100 mm trvá necelé 2 minuty. Z informací z firmy Plasmametal by broušení takového kusu trvalo cca 20 minut. Při porovnání těchto technologií by to znamenalo desetinásobné zvýšení produktivity, což lze považovat za velmi dobrý výsledek.

5.7.4 Experimentální obrábění s kubickým nitridem bóru

5.7.4.1 PCBN firma Rotana

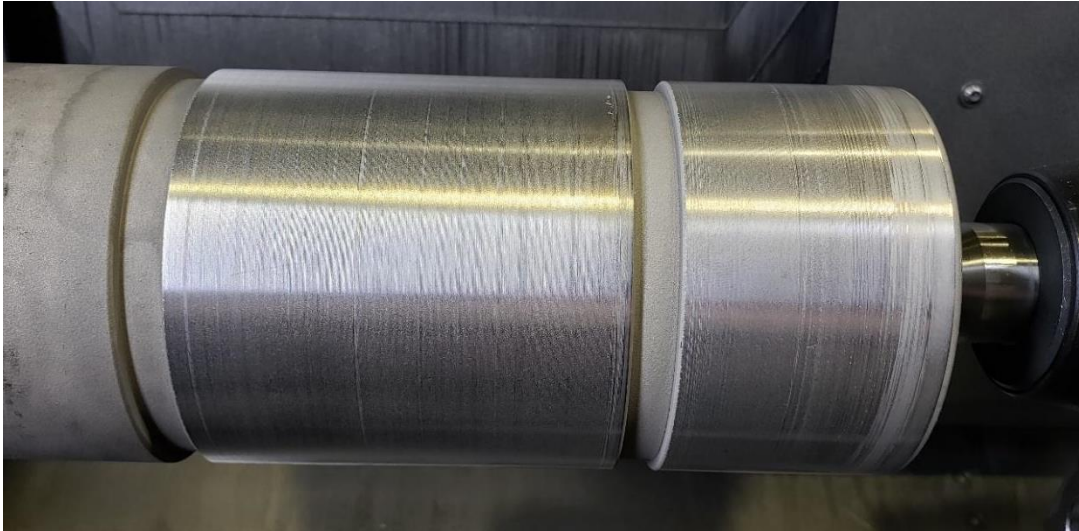
S ohledem na předešlé výsledky z testování je potřeba najít rozumný kompromis mezi tvrdostí a houževnatostí řezného materiálu. Při testování slinutého karbidu docházelo k intenzivnímu opotřebení čela a hřbetu řezné hrany. Proto byl pro další testování obrobitelnosti žárového nástřiku vybrán polykrystalický diamant, z důvodu své vysoké tvrdosti. Při obrábění s diamantem bylo dosaženo velmi dobrých výsledků, které již mohou konkurovat technologií broušení ve kvalitě obrobeného povrchu. Problém, který však vznikal při obrábění s CVD od firmy Rotana bylo vyštípování řezné hrany, což výrazně snižuje opakovatelnost výroby a životnost břitové destičky. Vyštípnutí řezné hrany bylo pravděpodobně způsobeno malou houževnatostí řezného materiálu na úkor tvrdosti a velmi ostrá geometrie řezné hrany s absencí různých typů utvařeče třísky nebo úprav v podobě fazetky. Firma Rotana nám po konzultaci těchto problémů dodala destičky s polykrystalickým kubickým nitridem bóru (obsah CBN 65 %) ve stejném provedení jako břitové destičky CVD-D.

Tabulka 11: Souhrn experimentu s PCBN destičkami Rotana

VBD	Číslo	Drsnost	Art. průměr	Řezné podmínky					Vzhled povrchu
				v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	λ_s	Chlazení	
PCBN	8.1	Ra [μm]	1,49	500	0,3	0,15	70°	ne	Sjednocený rýhy po břítu
		Rz [μm]	9,53						
PCBN	9.1	Ra [μm]	1,77	800	0,2	0,15	70°	ne	Sjednocený rýhy po břítu
		Rz [μm]	8,63						
PCBN	10.1	Ra [μm]	1,05	500	0,2	0,15	70°	ne	Sjednocený rýhy po břítu
		Rz [μm]	6,07						
PCBN	11.1	Ra [μm]	1,04	80	0,2 - 0,3	0,15	70°	ano	Vibrace vytrhaný povrch
		Rz [μm]	6,39						
PCBN	12.1	Ra [μm]	1,73	80	0,4 - 0,45	0,15	70°	ano	Vibrace vytrhaný povrch
		Rz [μm]	9,47						
PCBN	13.1	Ra [μm]	1,8	200	0,05	0,25	70°	ano	Vibrace hladký povrch
		Rz [μm]	9,41						
PCBN	14.1	Ra [μm]	0,547	200	0,1	0,25	70°	ano	Sjednocený broušený vzhled
		Rz [μm]	3,716						
PCBN	15.1	Ra [μm]	0,32	200	0,08	0,25	70°	ano	Sjednocený broušený vzhled
		Rz [μm]	2,234						

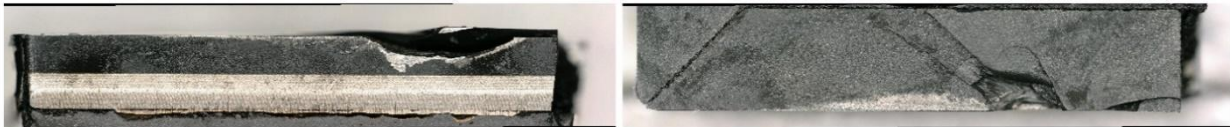
Kubický nitrid bóru se v oblasti obrábění využívá na velmi tvrdé a abrazivní materiály. Vzhledem k velmi dobré ořezuvzdornosti, tvrdosti ale i dostatečné vrubové houževnatosti se tento materiál používá také pro vysokovýkonné obráběcí operace, jako jsou např. vysokorychlostní HSC a vysokoposuvové HFC obrábění. Na základě těchto vlastností je plánováno vyzkoušet oba tyto režimy produktivního obrábění, viz Tabulka 11.

Jako první byl zkoušen HSC režim obrábění, při kterém je nastavena řezná rychlost $v_c = 500\text{--}800$ m/min při posuvu $f = 0,2 - 0,3$ mm/ot. Obrábění při takto vysokých řezných rychlostech probíhá za sucha (viz teorie HSC obrábění) při stále stejném nastavení sklonu úhlu ostří na hodnotu 70° a hloubkou řezu $a_p = 0,15$ mm.



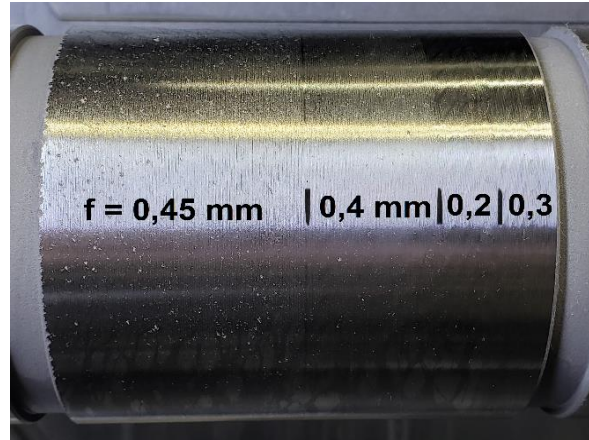
Obrázek 66: HCS obrábění vzorku č. 8.1 a 10.1 s PCBN

Obrobené plochy se liší v řezných podmínkách pouze v posuvu na otáčku (Obrázek 66). Vzhled je na první pohled sjednocený, avšak kvalita povrchu je nedostatečná. I přesto, že obrábění bylo klidné bez vibrací, jsou zde vidět nepravidelné stopy a rýhy po obrábění. Na levé straně byla naměřena drsnost povrchu $R_a = 1,05$ μm z důvodu nižšího posuvu. Bohužel ve všech třech případech obrábění v HSC režimu došlo k fatálnímu poškození řezné hrany, viz Obrázek 67.

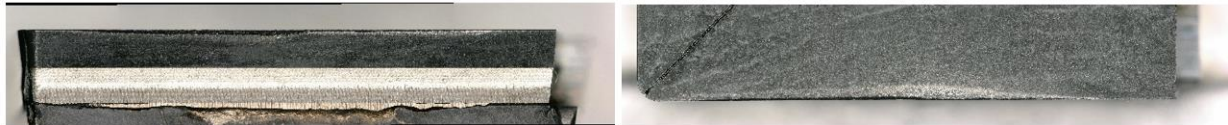


Obrázek 67: Poškození řezné hrany PCBN testu č. 10.1

Druhá varianta testování se blíží podmínkám obrábění s CVD, kdy byly dosaženy velmi dobré výsledky, řezná rychlost $v_c = 80$ m/min s posuvem $0,2 - 0,45$ mm/ot, které lze považovat částečně za vysokoposuvové HFC obrábění. Při jednom řezu byl pomocí potenciometru nastavován stanovený posuv. Při nízkém posuvu stroj vydával nepříjemný zvuk v podobě intenzivních vibrací. S vyšším posuvem se řez uklidňoval, avšak na úkor kvality povrchu. Na obrobku je vidět průběh testování posuvu s ohledem na kvalitu povrchu, kde jsou patrné intenzivní vibrace na začátku řezu a s vyšším posuvem zhoršení kvality povrchu v podobě vytrhaných částic žárového nástřiku (Obrázek 68). Alespoň částečně pozitivní výsledek přineslo měření opotřebení destičky (Obrázek 69), kde řezná hrana zůstala vcelku bez známek vylomení s naměřeným opotřebením na hřbetu $V_{b_{\max}} = 0,15$ mm a čele $KB_b = 0,1$ mm.



Obrázek 68: HFC obrábění s PCBN destičkou Rotana

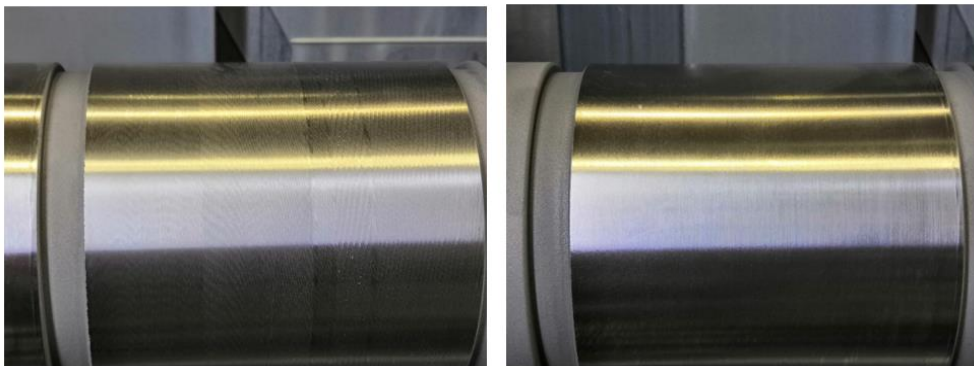


Hřbet: VBmax	0,150 mm	Ra [μm]	1,28	1,26	0,57	\bar{x}	1,04
Čelo: KB	0,100 mm	Rz [μm]	7,53	7,62	4,04	\bar{x}	6,39

Obrázek 69: Snímek řezné hrany PCBN z testu 11.1 a 12.1

Na závěr byl proveden test s navýšenou řeznou rychlostí na $v_c = 200$ m/min, kde byl opět zkoumán posuv $f = 0,05 - 0,1$ mm. S ohledem na nižší posuv a předpoklad opětovných vibrací byla zvednuta hloubka řezu a_p z 0,15 mm na 0,25 mm, která by měla pomoci snížit nežádané vibrace.

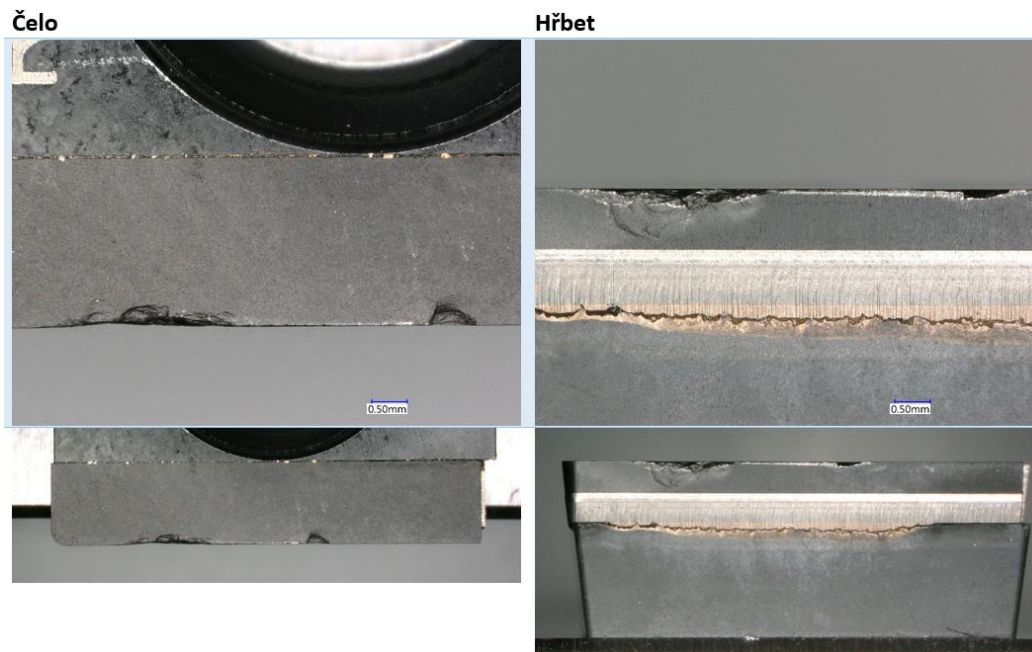
První test s číslem 13.1 s nejnižším nastaveným posuvem doprovázely opět vibrace, které však neměly takovou intenzitu jako v předešlých případech. Lze usuzovat, že vyšší hloubka řezu měla opravdu pozitivní vliv na zmírnění vibrací. Obrobený povrch na první pohled vypadá sjednoceně s nepatrnou texturou (Obrázek 70 vlevo) vlivem již zmiňovaných vibrací. Při měření drsnosti povrchu však tato textura výrazně zhoršuje drsnost povrchu ($R_a = 1,8 \mu\text{m}$, $R_z = 9,41 \mu\text{m}$). Při měření obrobeného průměru bylo zjištěno velmi vysoké odtažení nástroje, z čehož vyplynulo, že skutečná hloubka řezu a_p byla pouze 0,04 mm.



Obrázek 70: Porovnání testu č. 13.1 (vlevo) a 14.1 (vpravo)

Při zvýšení posuvu u testu č. 14.1 na hodnotu $f = 0,1$ mm byl při obrábění pozorován klidný chod, který se projevil jednak na vzhledu obrobeného povrchu, viz Obrázek 70 vpravo, tak i na naměřených hodnotách drsnosti, které jsou pod hranicí $Ra \leq 0,6 \mu\text{m}$. Při měření obrobeného průměru se vyskytl drobný kužel, který na délce 100 mm byl do 0,04 mm a skutečná hloubka řezu při vyšším posuvu již odpovídá hloubce nastavené.

Poslední testovací řez s břitovou destičkou PCBN Rotana proběhl s lehce sníženým posuvem $f = 0,08$ mm, při kterém se očekávalo zlepšení drsnosti povrchu, pokud bude řez stabilní jako v předešlém případě. Při porovnání výsledků byl vzhled identický jako v předchozím případě. Naměřené hodnoty drsnosti $Ra = 0,32 \mu\text{m}$ a $Rz = 2,234 \mu\text{m}$ znamenají téměř dvojnásobné zlepšení. Při měření průměru odpovídala skutečná hloubka řezu a_p s hloubkou nastavenou s kuželovitostí do 0,01 mm. Špatný výsledek přineslo bohužel měření řezných hran, při kterém bylo zjištěno vyštípnutí řezné hrany ve všech třech případech testování, viz Obrázek 71.



Obrázek 71: Snímek řezné hrany PCBN z testu č. 15.1

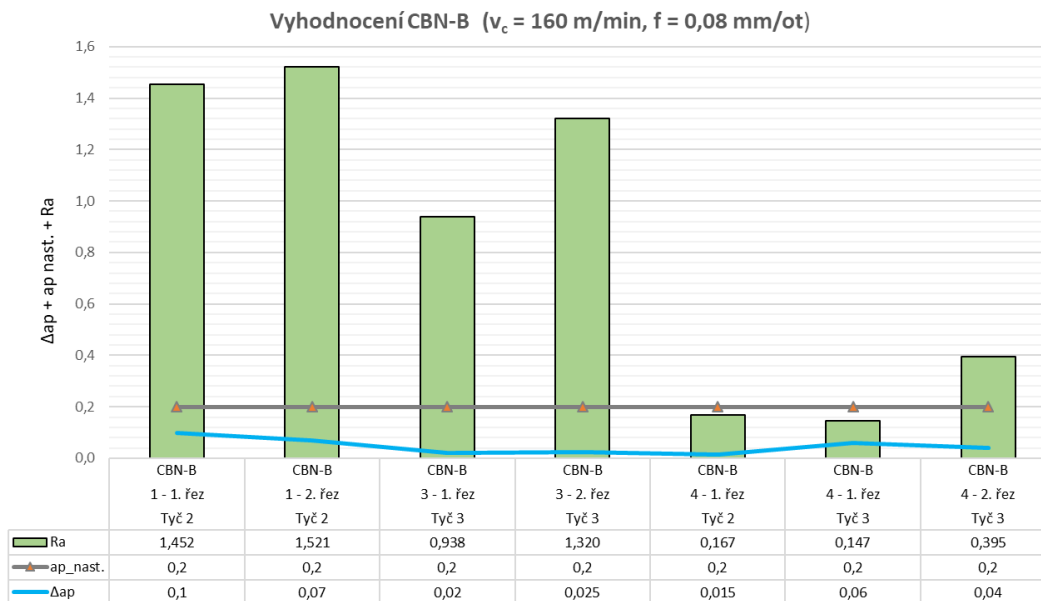
Závěrem testování břitových destičky od firmy Rotana lze konstatovat, že se opět povedlo dosáhnout dobrých výsledků při rychlostech $v_c = 200$ m/min a posuvem $f = 0,1$ mm/ot. Problém s vyštípnutím řezné hrany však zůstává stejný jako při obrábění s diamantovým řezným břitem od stejné firmy. Produktivita obrábění s PCBN zůstává i při vyšších řezných rychlostech přibližně stejná, jelikož stanovený posuv byl poloviční. Při testování řezné rychlosti $v_c = 80$ m/min se bylo možné zbavit intenzivního chvění pouze při vyšších hodnotách posuvu, které ale měly zásadní vliv na kvalitu obrobeného povrchu. Kvalita povrchu v podobě Ra a Rz je pro účely firmy Plasmametal nepoužitelná. Lepší výsledky nepřineslo ani testování HSC režimu obrábění, při kterém docházelo ke kompletní destrukci pájeného segmentu CBN.

5.7.4.2 PCBN firma Bonar

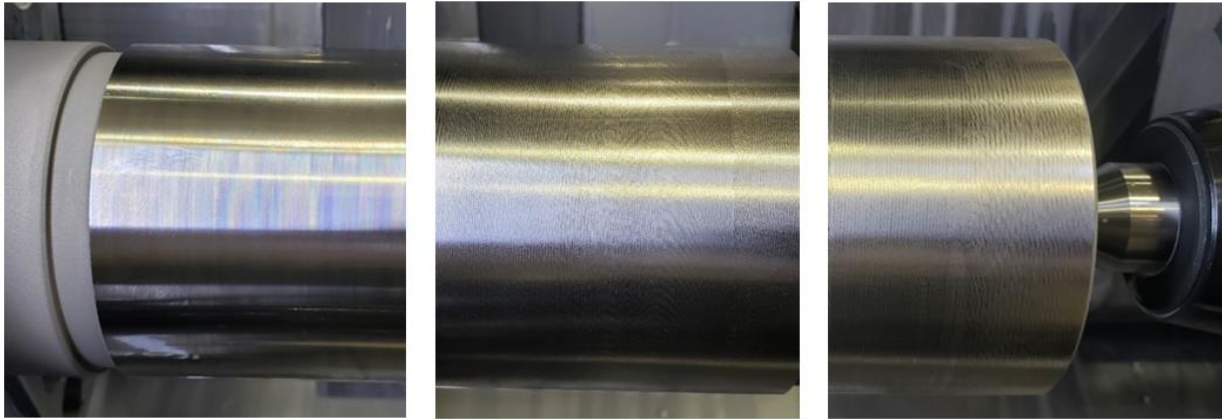
Společnost Bonar se specializuje na břitové destičky z PCBN, kde stejně jako firma Rotana pájí PCBN segmenty na destičky ze slinutého karbidu, které slouží jako podkladový materiál. Hlavní zaměření této společnosti je v oblasti obrábění velmi tvrdých a abrazivních materiálů jako jsou kalená a nástrojová ocel, práškové kovy nebo vysoce legované oceli. S ohledem na předešlé výsledky, především tedy na vyštipování řezné hrany byl vybrán typ PCBN s označením BBW85. Tento typ VBD obsahuje 85 % kubického nitridu bóru s velikostí zrna 1–2 μm , který je vhodný pro dokončovací operace u velmi tvrdých a abrazivních materiálů. Výhodou tohoto typu VBD je v provedení označeném fullface, kde je segment CBN po celém horním povrchu břitové destičky. Tím je možné pro obrábění využít všechny čtyři řezné hrany břitové destičky, a tím výrazně snížit celkové náklady na obrobení žárových nástřiků. Řezná hrana má také upravenou makrogeometrii s fazetkou o velikosti 0,2 mm se záporným úhlem 20°. Vzhledem k velikosti hloubky řezu, která bývá maximálně 0,2 mm, je dopředu zřejmé, že obrábění bude probíhat pouze v části fazetky, tedy s negativním úhlem čela $\gamma = -20^\circ$.

Při testování PCBN destiček od firmy Bonar proběhla celá řada testování různých řezných rychlostí a posuvů, jako v předchozích případech testování CVD a PCBN od firmy Rotana. Ze všech provedených řezů bylo zkoumáno několik závislostí, které budou podrobněji rozepsány v následujících grafech.

Obecně lze říci, že destičky s vyšším obsahem CBN potvrdili predikci vyšší houževnatosti a tím i menší křehkosti řezné hrany. Drobné vyštipnutí řezné hrany bylo pozorováno pouze u několika málo řezů. Zároveň úprava makrogeometrie v podobě fazetky 0,2x20° přinesla znatelné zvýšení tuhosti a životnosti řezné hrany.

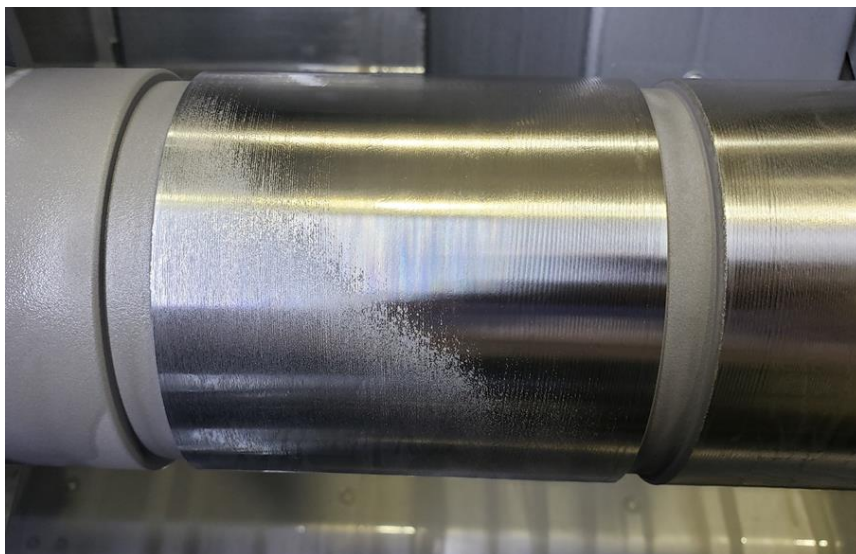


Graf 10: Testování tuhosti soustavy SNO za stanovených podmínek



Obrázek 72: Testování tuhosti soustavy SNO (plocha 4, plocha 3, plocha 1)

Prvním záměrem z komplexního testování destiček PCBN od firmy Bonar, bylo zkoumání vlivu tuhosti soustavy SNO. Za tímto účelem byly zvoleny řezné podmínky $v_c = 160$ m/min, posuv $f = 0,08$ mm/ot a hloubka řezu $a_p = 0,2$ mm, které vyplynuly z výsledků předchozího testování. Při zpětném ohlédnutí na Obrázek 42 je vidět schéma polotovaru, na kterém je jedna krátká upínací plocha a čtyři plochy o délce 100 mm. Číslování začíná směrem od otočného hrotu, tedy krátká část nese označení pět. Graf 10 zobrazuje, jak velký vliv má tuhost soustavy při obrábění za stejných podmínek. Předpoklad nejvyšší tuhosti na ploše číslo čtyři byl dle výsledků potvrzen jak při hrubování neobrobeného nástřiku, tak i při dokončování již obrobeného nástřiku. Zároveň se nejnižší tuhost při obrábění vyskytuje na ploše číslo jedna pravděpodobně vlivem otočného hrotu. Obrázek 72 zaznamenává stav po obrobení stejnými podmínkami související s grafem č. 10. Na ploše čtyři s nejlepší tuhostí (plocha vedle upnutí) byl dosažen nejlepší výsledek drsnosti $R_a \cong 0,15$ μm se sjednoceným lesklým vzhledem, kde při měření opotřebení bylo zjištěno zanedbatelné opotřebení na čele i hřbetu břitové destičky.

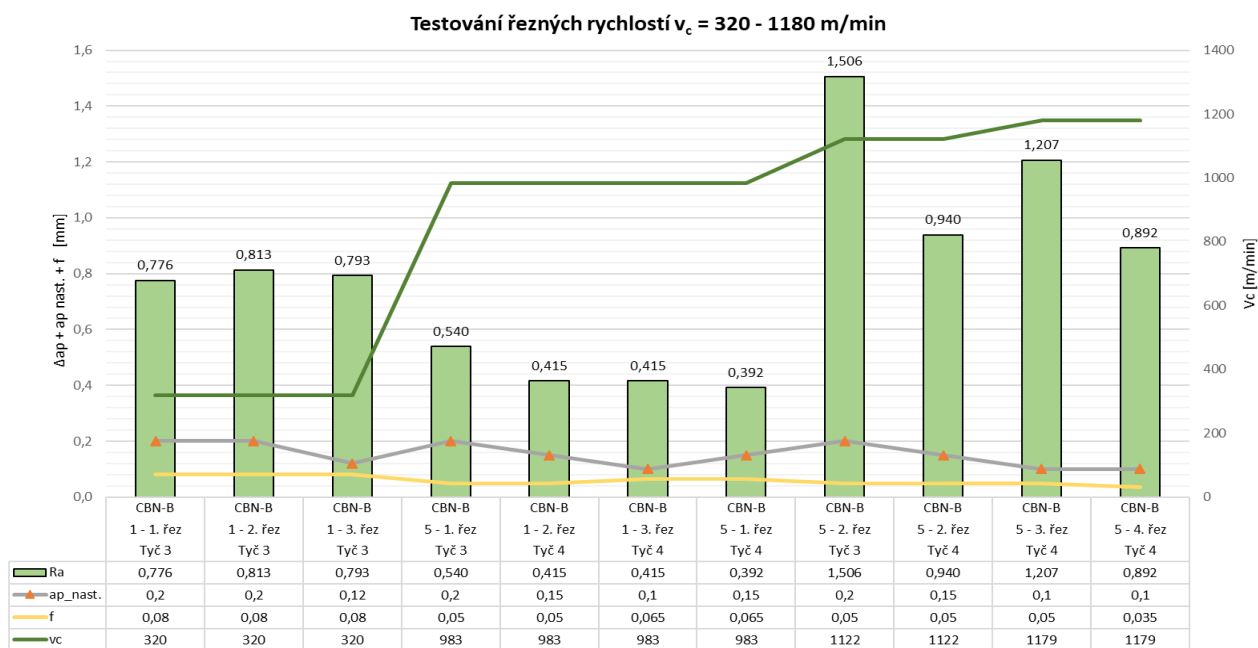


Obrázek 73: Výsledek testu č. 4–3 řez s nedostatečnou tloušťkou nástřiku

Při obrábění plochy číslo čtyři si lze všimnout bodu zlomu v tuhosti polotovaru zhruba ve 2/3 plochy při stejných řezných podmínkách z grafu 10. Zároveň je vidět, jak dobře zpracovaný proces má firma Plasmametal při nanášení žárového nástřiku NiCrBSi (Obrázek 73). I přes částečné obrobení nástřiku až na základní (podkladový) materiál zůstal nástřik ukotvený na základním materiálu, a to i přes svou minimální tloušťku.

5.7.4.3 Vysokorychlostní obrábění nástřiku s destičkou CBN-B

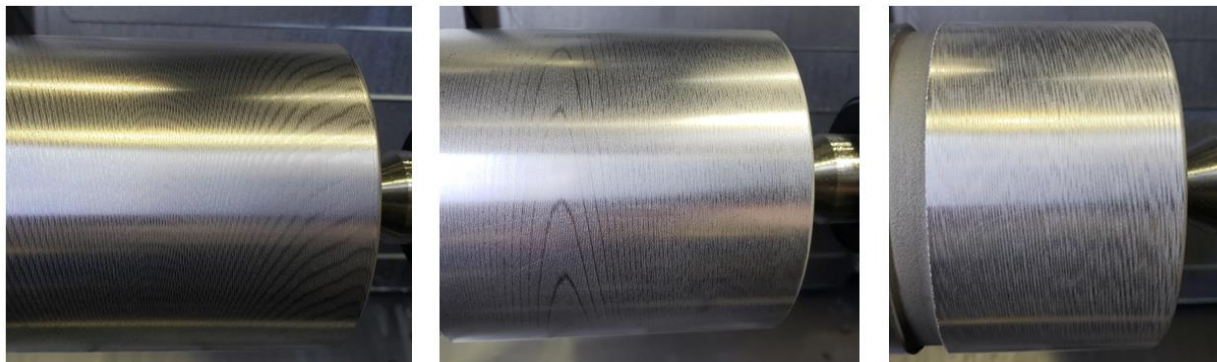
S ohledem na vynikající výsledky na plochách s vysokou tuhostí je cílem naleznout optimální řezné podmínky i na ploše číslo jedna. Pro testování byly využity i kratší upínací plochy polotovaru s číslem pět, tak že byl ve stroji polotovar otočen a držen za obrobenou plochu číslo 1.



Graf 11: Testování vlivu řezné rychlosti na plochy s nízkou tuhostí

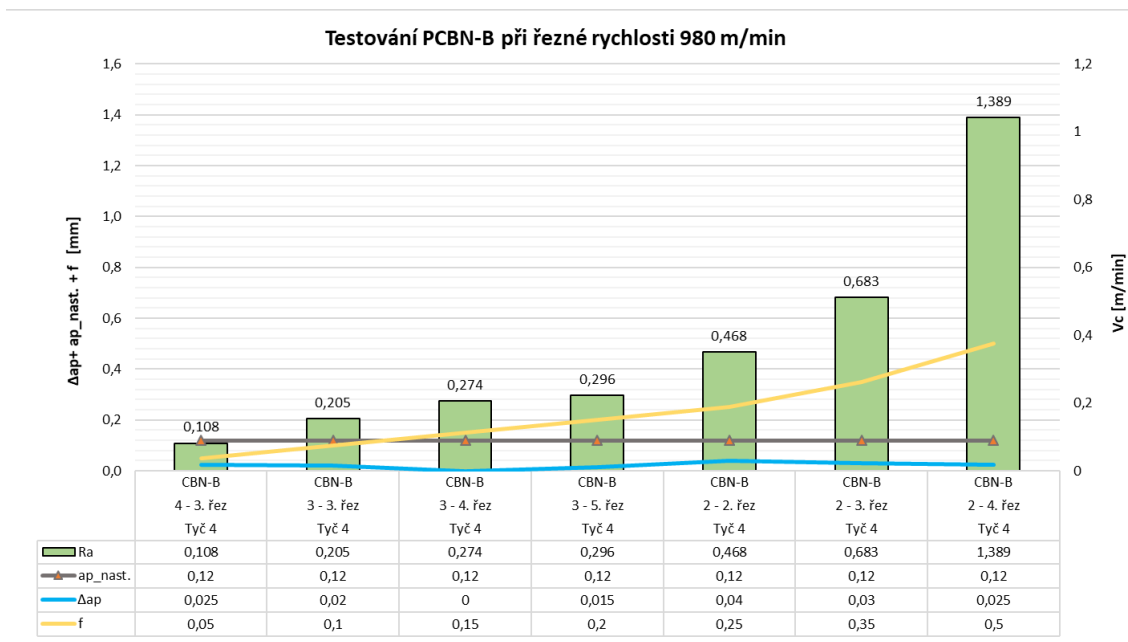
Při testování krajních ploch s nízkou tuhostí byla vyzkoušena řezná rychlost v rozmezí $v_c = 320 - 1180$ m/min. Do testování lze zahrnout i výsledky s předchozího testování kdy při řezné rychlosti $v_c = 160$ m/min byl výsledek drsnosti obrobeného povrchu větší než $Ra \geq 1,4$ μ m. Při zobrazení těchto výsledků je patrná klesající tendence hodnoty drsnosti do řezné rychlosti cca 1000 m/min (Graf 11). Po přesáhnutí těchto hodnot řezné rychlosti nastalo výrazné zhoršení hodnot drsnosti i vzhledu obrobeného povrchu.

Obrázek 74 demonstruje vliv řezné rychlosti na vzhledu obrobeného povrchu. Při testování byla na plochy s nízkou tuhostí variována i velikost hloubky řezu v rozmezí $a_p = 0,1 - 0,2$ mm. Z výsledků vyplývá, že hloubka řezu má minimální vliv na kvalitu a vzhled obrobeného povrchu Graf 11. Z obrázku je také zajímavé pozorovat vytvořenou strukturu, která by mohla přispět k lepšímu zadržení mazacího média na těchto třecích plochách.



Obrázek 74: Testování vlivu řezné rychlosti na plochy s nízkou tuhostí ($v_c = 320, 980, 1180$ m/min)

Poslední sekce testování destiček od firmy Bonar navazuje na předešlý test řezných rychlostí, kde byly nejlepší hodnoty kvality povrchu dosaženy při rychlostech nepřesahující $v_c = 1000$ m/min. Při posledním testování byl zkoumán vliv hodnoty posuvu f při konstantních řezných podmínkách stanovených z předešlého testování na řeznou rychlost $v_c = 980$ m/min, hloubka řezu $a_p = 0,12$ mm a úhel sklonu ostří $\lambda_s = 70^\circ$.



Graf 12: Testování vlivu posuvu na hodnotu drsnosti Ra

Velikost drsnosti obrobeneho povrchu je pro firmu Plasmametal velmi důležitá z důvodu různého využití obrobenech ploch a není vždy žádoucí, aby povrch měl velmi nízkou hodnotu drsnosti, která vzniká po broušení. Naopak bylo zjištěno, že pro některé účely obrobenech ploch je vyhovující drsnost okolo $Ra = 0,8$ μm pro lepší mazací účinky. Z těchto důvodů bylo provedeno testování s konstantními řeznými podmínkami s výjimkou posuvu f v rozmezí $f = 0,05 - 0,5$ mm/ot.

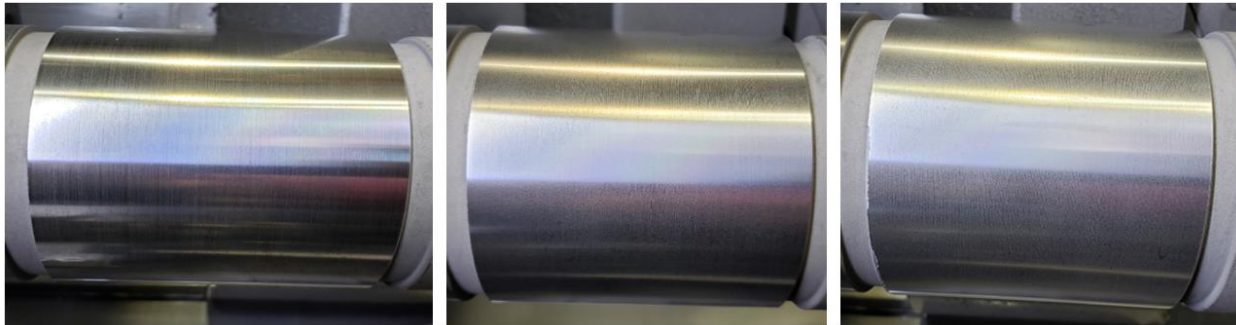
Graf 12 znázorňuje vliv posuvu na hodnotu drsnosti obrobeneho povrchu. Z teorie pro klasické soustružení logicky vyplývá, že s rostoucím posuvem se zvyšuje hodnota drsnosti povrchu

a naopak. Při obrábění s lineární řeznou hranou toto pravidlo potvrzuje, avšak s mnohonásobně lepší hodnotou drsnosti, viz teorie. Při podmínkách běžného hrubování např. s destičkou typu C s $r_e = 0,8$ mm a posuvem $f = 0,2$ mm/ot vzniká povrch přibližně s hodnotou drsnosti cca $R_a = 2,64$ μm dle dostupných tabulek.



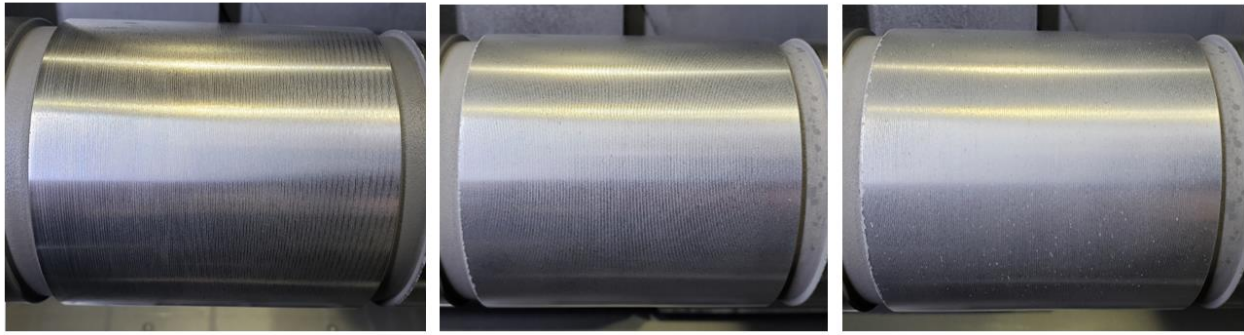
Obrázek 75: Snímek břitové destičky PCBN Bonar po obrobení ve čtyřech Y pozicích

Samozřejmě je hodnota drsnosti R_a závislá na mnoha dalších faktorech, ale pokud porovnáme čistě výsledek obrábění s lineární řeznou hranou je obrobený povrch minimálně 10x lepší než při běžném způsobu obrábění. V tomto experimentu se také potvrdila myšlenka využití celé délky řezné hrany (Obrázek 75), jelikož lze během obrábění nastavovat pozici obrábění na zvoleném ostří. Při tomto nastavení úhlu ostří a hloubky řezu lze využít délku řezné hrany až na 4 pozice Y (+4, +1,33, -1,33, -4). U destiček od firmy Bonar lze navíc použít všechny čtyři řezné hrany, to odpovídá celkem 16 řezným hranám při hodnotách nastavení úhlu ostří $\lambda_s = 70^\circ$ a hloubce řezu $a_p = 0,05$ mm. S vyšší hloubkou řezu nebo s větším úhlem sklonu ostří se šířka této záběrové plochy rozšiřuje. Při testování nebyl zároveň zaznamenán vliv nastavené pozice ostří na kvalitu obrobené plochy stejně tak na velikost opotřebení.



Obrázek 76: Vliv posuvu f ($f = 0,05, 0,1, 0,15$ mm/ot) při konst. řezné rychlosti $v_c = 980$ m/min

Na obrázku 76 jsou snímky z obrábění při konstantních řezných podmínkách s výjimkou posuvu v rozmezí $f = 0,05 - 0,15$ mm/ot. Ve všech případech je povrch sjednocený bez známek vibrací. Výsledek z tohoto testování potvrdilo zlepšení tuhosti frézovací hlavy při obrábění pouze v jedné ose (Y konstantní, pohyb v Z). Při nejnižším nastaveném posuvu $f = 0,05$ mm/ot byla na obrobené ploše naměřena drsnost $R_a = 0,108$ μm a $R_z = 0,86$ μm .

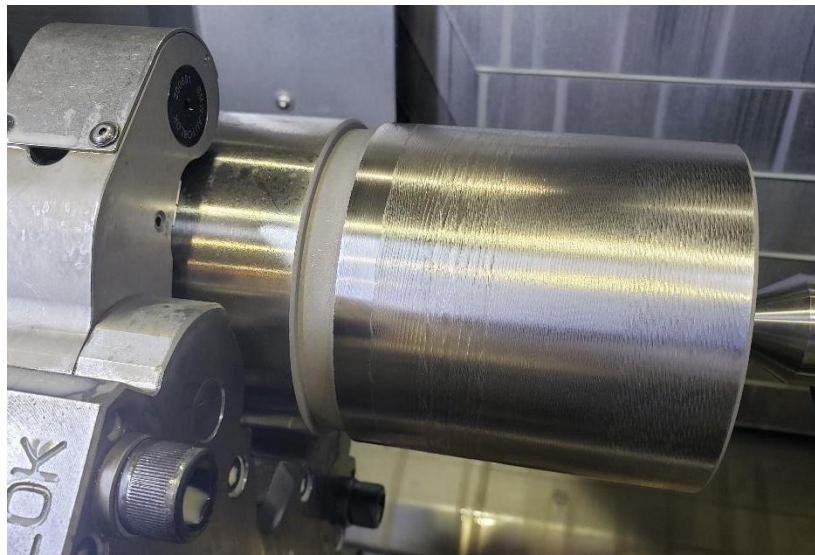


Obrázek 77: Vliv posuvu f ($f = 0,25, 0,35, 0,5$ mm/ot) při konstantní $v_c = 980$ m/min

Z hlediska použitelnosti pro firmu Plasmametal bylo vybráno kritérium do $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, které z výsledků odpovídá posuvu maximálně do $f = 0,4$ m/ot (Graf 12). Vyšší posuvy při těchto podmínkách a sklonu ostří již neodpovídají předem zvolenému kritériu, a to i z hlediska vzhledu, kde se nástřik začíná vytrhávat z povrchu vlivem velké plastické deformace, viz Obrázek 77 vpravo. Prostřední snímek odpovídá posuvu $f = 0,35$ mm/ot s $R_a = 0,683 \mu\text{m}$, při kterém je vzhled matnější s jemnou šroubovicí (vysvětleno na Obrázku 15) bez známek vytrhávání povlaku.

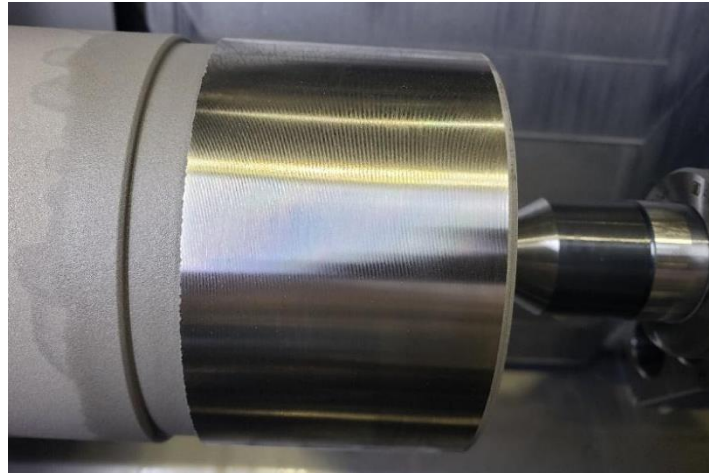
5.7.4.4 Vysokoposuvové obrábění nástřiku s destičkou CBN-B

V závislosti na probíhající projekt NCKS a konzultaci s firmou Plasmametal by měla být testována i nižší řezná rychlost s ohledem na jejich strojový park, kde ne všechny stroje dokážou vyvinout řeznou rychlost dosahující $v_c = 1000$ m/min. Při předešlém testování však byl při nízkých řezných rychlostech problém s tuhostí stroje na krajních plochách. Pro zlepšení tuhosti bylo zkoušeno nejprve zapojení lunety do procesu obrábění, kde luneta podpírala plochu s číslem 2. Z dosaženého výsledku je zřejmé, že luneta problém s tuhostí nevyřešila (Obrázek 78).



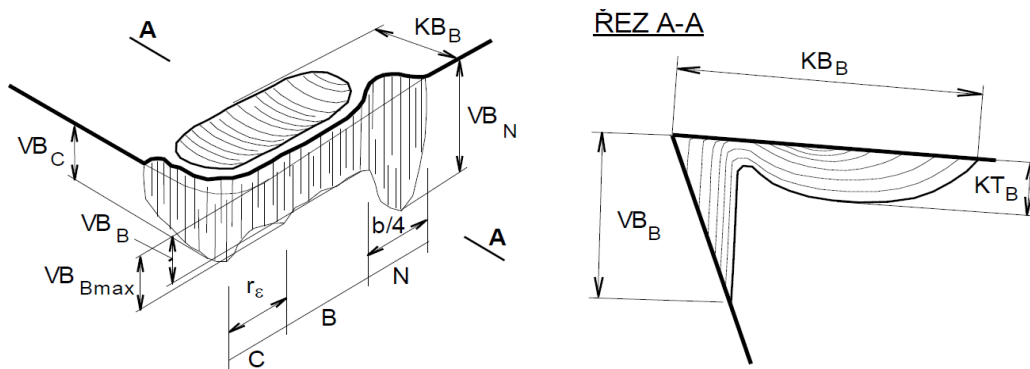
Obrázek 78: Zapojení lunety při obrábění žárového nástřiku

Další pokus o zvýšení tuhosti obrobku se týkal změny podepření pomocí pevného hrotu. Otočný hrot totiž funguje na principu otáčení v ložisku, které pro svoji činnost potřebuje určitou vůli. Při výměně otočného hrotu za pevný byl upraven program pro jednotnou synchronizaci obou vřeten současně. Z několika kontrolních přejezdů při stejných podmínkách obrábění (experiment na grafu č. 11) bylo konečně zaznamenáno výrazné zvýšení tuhosti na krajní ploše a tím sjednocení výsledků obrábění v celé délce polotovaru, viz Obrázek 79.



Obrázek 79: Obrobená krajní plocha při testování pevného hrotu

Poslední experiment, který byl naplánován pro krátkodobé testy s destičkami CBN od firmy Bonar se týká testování vysokoposuvového obrábění. Z předchozích výsledků (Graf 12) bylo při posuvu $f = 0,35 \text{ mm/ot}$ dosažena limitující drsnost povrchu, která je stanovena na maximální hodnotu $R_a = 0,8 \text{ } \mu\text{m}$. Cílem tohoto experimentu je otestovat vyšší hodnoty posuvu f s rozdílným úhlem sklonu ostří v závislosti na kvalitě obrobeného povrchu. Dosažené výsledky budou sloužit ke stanovení podmínek obrábění pro dlouhodobé testy řezivosti, u kterého zároveň proběhne statistické vyhodnocení. S ohledem na dlouhodobé testy řezivosti budou již zaznamenávány hodnoty opotřebení čela KB_b a hřbetu VB_{max} (viz Obrázek 80) pomocí Mikroskop Keyence.



Obrázek 80: Obecné tvary opotřebení řezné hrany

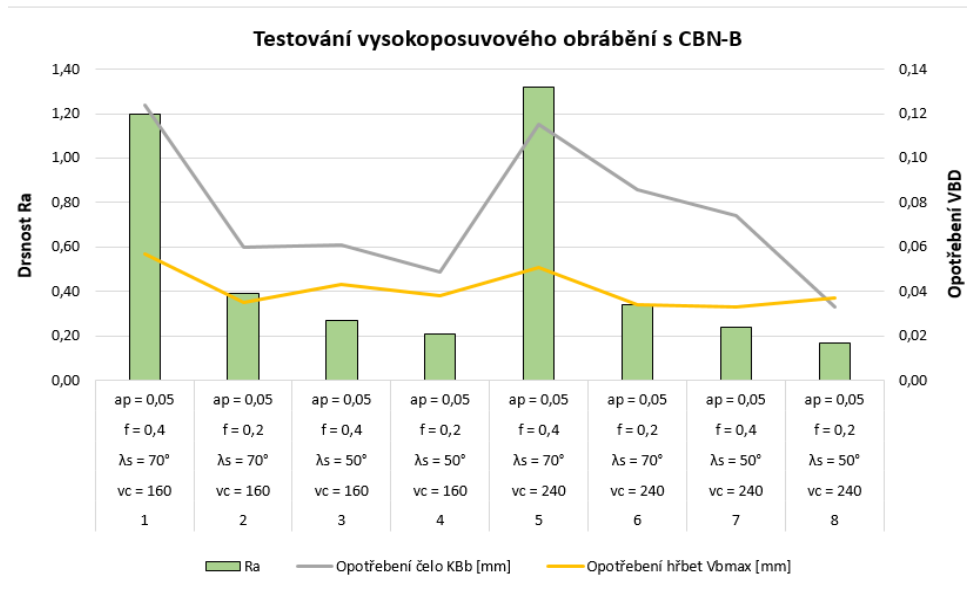
Při experimentu byl testován úhel sklonu ostří v rozmezí $\lambda_s = 80\text{--}40^\circ$ a posuv v rozsahu $f = 0,08 - 0,4$. Pro statistické vyhodnocení byl vybrán tří faktorový experiment o dvou úrovních, který zkoumá závislost řezné rychlosti v_c , posuvu f a úhel sklonu ostří λ_s na kvalitu obrobeného povrchu a velikost vzniklého opotřebení. Opotřebení břitových destiček nebude stanoveno na čas, ale na délku obrobení při stanovených podmínkách řezu. Z výsledků zkušebního testování byla pro statistické vyhodnocení navržena Tabulka 12, kde jsou zvoleny tři faktory o dvou úrovních, a to řezná rychlost, posuv a úhel sklonu ostří. S ohledem na cenu a množství odebraného nástřiku je celková délka obrobení stanovena na alespoň $4x 100$ mm. Pro snížení chybovosti statistického vyhodnocení byl každý testovaný vzorek nejprve předhrubován na stanovený průměr. Obrábění proběhne u všech vzorků (1-8) vždy na stejné ploše (Schéma polotovaru Obrázek 42) s jednotnou hloubkou řezu $a_p = 0,05$ mm. Po obrobení jedné plochy o délce $L = 100$ mm bude měřeno opotřebení břitové destičky a drsnost R_a a R_z obrobeného povrchu ve třech místech.

Tabulka 12: Souhrn experimentu pro dlouhodobé testy řezivosti

Číslo	v_c [m/min]	sklon λ_s	f [mm/ot]	a_p [mm]	R_a [μm]	R_z [μm]	Opotřebení čelo KB_b [mm]	Opotřebení hřbet V_{bmax} [mm]
1	$v_c = 160$	$\lambda_s = 70^\circ$	$f = 0,4$	$a_p = 0,05$	1,20	5,77	0,12	0,06
2	$v_c = 160$	$\lambda_s = 70^\circ$	$f = 0,2$	$a_p = 0,05$	0,39	2,33	0,06	0,035
3	$v_c = 160$	$\lambda_s = 50^\circ$	$f = 0,4$	$a_p = 0,05$	0,27	2,03	0,061	0,043
4	$v_c = 160$	$\lambda_s = 50^\circ$	$f = 0,2$	$a_p = 0,05$	0,21	1,30	0,049	0,038
5	$v_c = 240$	$\lambda_s = 70^\circ$	$f = 0,4$	$a_p = 0,05$	1,32	5,73	0,115	0,051
6	$v_c = 240$	$\lambda_s = 70^\circ$	$f = 0,2$	$a_p = 0,05$	0,34	2,30	0,086	0,034
7	$v_c = 240$	$\lambda_s = 50^\circ$	$f = 0,4$	$a_p = 0,05$	0,24	1,67	0,074	0,033
8	$v_c = 240$	$\lambda_s = 50^\circ$	$f = 0,2$	$a_p = 0,05$	0,17	1,07	0,033	0,037

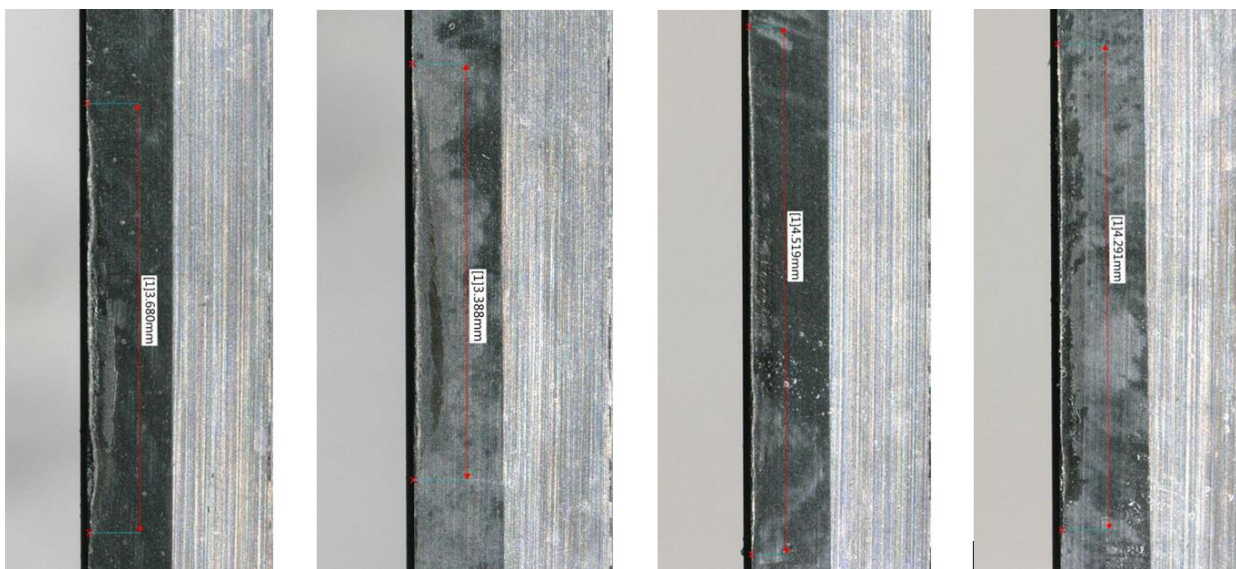
Pro hodnocení vysokoposuvového obrábění bude vyhodnocen pouze první řez o délce $L = 100$ mm u všech zvolených vzorků z Tab. 9. Naměřené hodnoty drsnosti a opotřebení VBD jsou pro lepší přehlednost zaznamenány – viz Graf 13.

Z dosažených výsledků vyobrazených na grafu číslo 13 je zřejmé, že řezná rychlost v těchto úrovních nemá významný vliv na obrobenou drsnost povrchu R_a . Při porovnání hodnot drsnosti R_z z Tab. 12 je tento trend stejný (např. vzorek 1 – vzorek 5 atd.). Výraznou zaznamenanou změnou ovlivňující velikost řezné rychlosti se týká vzniklého opotřebení na čele břitové destičky při porovnání vzorku 2 a 6, kde se s vyšší řeznou rychlostí zvětšilo opotřebení na čele zhruba o 40 %. Opotřebení hřbetu lze vyhodnotit za nezávislé na řezné rychlosti, ale z vyšší hodnotou naměřené drsnosti R_a se zvyšuje. Hlavní informace získaná z testování se týká využitelnosti zvýšeného posuvu $f = 0,4$ mm/ot v souvislosti s úhlem sklonu ostří, kde lze tento posuv nastavit pouze u varianty s $\lambda_s = 50^\circ$, kde s tímto úhlem dojde až k čtyřnásobnému zlepšení drsnosti povrchu R_a i R_z . Posuv s hodnotou $f = 0,2$ mm/ot lze využít u obou variant sklonu ostří, avšak s nižším úhlem sklonu $\lambda_s = 50^\circ$ je hodnota drsnosti R_a i R_z na poloviční hodnotě.



Graf 13: Výsledky z vysokoposuvového obrábění s CBN-B

Lepší hodnota drsnosti povrchu při variantě $\lambda_s = 50^\circ$ souvisí s širším záběrem řezné hrany, která pak dokáže kompenzovat vznikající šroubovici i při vysokém posuvu. Nevýhodou tohoto nastavení je naopak ve využití délky řezné hrany pouze ve dvou nebo třech pozicích, pokud se nemají opotřebovaná místa na řezné hraně překrývat, u varianty $\lambda_s = 70^\circ$ jsou to pozice čtyři na jedné řezné hraně. Šířka řezu je také významně ovlivněna hloubkou řezu a_p , kde s rostoucí hloubkou řezu výrazně roste. Posuv je posledním parametrem řezných podmínek, který ovlivňuje šířku řezu, ale v daleko menší míře (v řádu desetin milimetru) než zmiňovaný úhel sklonu ostří a hloubka řezu. Obrázek 81 zobrazuje snímky řezných hran z mikroskopu Keyence pro vzorky č. 1–4 pro experiment výše zmíněný experiment (Graf 13).



Obrázek 81: Šířka řezu a vzhled opotřebenění VBD u vzorků č. 1, 2, 3, 4

5.8 Statistické vyhodnocení dlouhodobých testů řezivosti s CBN-B

V souladu s metodikou DoE budeme v následujícím rozboru pracovat s jednotlivými zkoumanými parametry y_i , $i = 1,2,3,4$ (Tabulka 13), tj. s hodnotami nezávislých proměnných x_j , $j = 1,2, 3$ v kódovaném měřítku (Tabulka 14).

Jako výchozí (obecný) model použijeme rovnici ve tvaru:

$$\hat{y} = b_0 \cdot x_0 + \sum_{j=1}^N b_j \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^N b_{uj} \cdot x_u \cdot x_j \quad (1)$$

kde b_0 , b_{uj} , b_j jsou příslušné regresní koeficienty a x_j jsou příslušné nezávislé proměnné faktory

Tabulka 13: Stanovený plán experimentu s dosaženými výsledky

Číslo	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	λ_s [$^\circ$]	f [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]	a_p [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]	KB_b [mm]	VB_{max} [mm]
1	160	70	0,4	0,05	1,20	5,77	0,12	0,06
2	160	70	0,2	0,05	0,39	2,33	0,06	0,035
3	160	50	0,4	0,05	0,27	2,03	0,061	0,043
4	160	50	0,2	0,05	0,21	1,30	0,049	0,038
5	240	70	0,4	0,05	1,32	5,73	0,115	0,051
6	240	70	0,2	0,05	0,34	2,30	0,086	0,034
7	240	50	0,4	0,05	0,24	1,67	0,074	0,033
8	240	50	0,2	0,05	0,17	1,07	0,033	0,037

Tabulka 14: Plán experimentu v kódované podobě

Číslo	x_1	x_2	x_3	a_p [mm]	y_1	y_2	y_3	y_4
1	-1	+1	+1	0,05	1,20	5,77	0,120	0,060
2	-1	+1	-1	0,05	0,39	2,33	0,060	0,035
3	-1	-1	+1	0,05	0,27	2,03	0,061	0,043
4	-1	-1	-1	0,05	0,21	1,30	0,049	0,038
5	+1	+1	+1	0,05	1,32	5,73	0,115	0,051
6	+1	+1	-1	0,05	0,34	2,30	0,086	0,034
7	+1	-1	+1	0,05	0,24	1,67	0,074	0,033
8	+1	-1	-1	0,05	0,17	1,07	0,033	0,037

$x_1 - v_c$ [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], $x_2 - \lambda_s$ [$^\circ$], $x_3 - f$ [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$], $y_1 - Ra$ [μm], $y_2 - Rz$ [μm], $y_3 - KB_b$ [mm], $y_4 - VB_{max}$ [mm]

5.8.1 Drsnost obrobeného povrchu Ra

Základní rozbor použitého matematicko-statistického modelu (1) poukazuje na skutečnost, že index determinace dosahuje hodnoty 98,972 %. Korekcí indexu determinace o počet nezávisle proměnných získáme upravený index determinace, který vyjadřuje skutečnou hodnotu procenta variability zkoumané proměnné y_1 , kterou lze vysvětlit použitým modelem. Upravený index determinace dosahuje pro Ra hodnoty 98,201 %, lze tedy hovořit o funkční závislosti. RMSE (Root Mean Square Error) dosahuje hodnoty 0,07314 a průměrná hodnota drsnosti obrobeného povrchu Ra pro všechny pokusy v rámci experimentu je 0,6325 μm .

Z hlediska metodiky DoE je nutné analyzovat model (1) jako takový. Model představuje složku regresního tripletu, jejíž správnost je základním východiskem pro numericky a statisticky správné výsledky. Vlastní verifikace modelu se provádí pomocí ANOVA (analýza rozptylu), jejíž princip je založen na jeho statistické nulové hypotéze (H_0). Nulová hypotéza říká, že všechny odhady regresních koeficientů modelu jsou rovny nule. V rámci použitého modelu tedy neexistuje jediná nezávislá proměnná x_j , která by významně ovlivňovala hodnotu zkoumané proměnné Ra na zvolené hladině významnosti (Tabulka 15).

Tabulka 15: Tabulka ANOVA pro model Ra

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p
Model	3	2,05975	0,686583	128,3333	0,0002*
Error	4	0,0214	0,00535		
C. Total	7	2,08115			

Z Tabulky 15 vyplývá, že dosažená hladina významnosti ($p = 0,0002$) je významná na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$, a proto můžeme zamítnout nulovou hypotézu rozptylové analýzy a zároveň přijmout závěr, že v rámci aplikace obecného modelu (1) existuje alespoň jedna nezávislá proměnná, jejíž odhad regresního koeficientu je statisticky odlišný od nuly.

Vzhledem k tomu, že sledovaný parametr profilu drsnosti povrchu Ra je ve své podstatě náhodná veličina, je nutné k němu přistupovat statisticky. Po ověření druhé složky regresního tripletu, je možné numericky a statisticky správně odhadnout hodnoty regresních členů obecného modelu (1). Tabulka 16 uvádí pouze ty členy, které jsou statisticky významné na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, tedy významně ovlivňují změnu hodnoty zkoumaného parametru Ra.

Tabulka 16: Odhady regresních koeficientů modelu $Ra = f(vc, f, \lambda_s)$

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	p	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept (b_0)	0,6325	0,02586	24,46	<0,0001*	0,560701	0,704299	.
x_2	0,3125	0,02586	12,08	0,0003*	0,240701	0,384299	1
x_3	0,2725	0,02586	10,54	0,0005*	0,200701	0,344299	1
$x_2 \cdot x_3$	0,2925	0,02586	11,31	0,0003*	0,220701	0,364299	1

$x_2 - \lambda_s$ [°], $x_3 - f$ [mm·ot⁻¹], * - signifikantné na hladině významnosti 5 %, VIF – Variance Inflation Factor

Tabulka 16 ukazuje několik zajímavých skutečností. V první řadě je to vliv absolutního členu modelu (Intercept), který zahrnuje všechny neuvažované vlivy a zahrnuje i vliv použitých intervalů jednotlivých vstupních proměnných. Její celkový příspěvek ke změně hodnoty zkoumané proměnné je 41,891 % ($p < 0,0001$). Sledujeme-li vliv procesních faktorů použitých v experimentálním výzkumu, je nejvýznamnějším regresorem, který ovlivňuje hodnotu zkoumaného parametru Ra, úhel sklonu hlavního břitu (x_2). Podíl úhlu sklonu hlavního břitu jako hlavního vlivu na změnu hodnoty Ra je 20,688 % ($p = 0,0003$). Zvýšením hodnoty úhlu sklonu hlavního břitu se podmíněně zvýší hodnota zkoumaného parametru Ra. Druhým nejvýznamnějším prediktorem v rámci obecného modelu (1) a Tabulky 16 je vzájemná interakce posuvu a úhlu sklonu hlavního břitu s 19,370% podílem na změně hodnoty drsnosti obrobené plochy Ra ($p = 0,0003$). Samotný posuv (x_3) se podílí na změně hodnoty Ra 18,051 % ($p = 0,0005$), zde také platí, že zvýšením hodnoty posuv se podmíněně zvýší hodnota studované proměnné Ra. Tabulka také ukazuje, že řezná rychlost není v používaných intervalech významným faktorem ovlivňujícím změnu hodnoty drsnosti obrobené plochy Ra, a to ani jako hlavní efekt, ani jako interakční člen.

Na základě odhadu regresních koeficientů uvedených v Tab. 16 lze obecný model (1) specifikovat v následující podobě:

$$\hat{y} = 0.6325 + 0.3125 \cdot x_2 + 0.2725 \cdot x_3 + 0.2925 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (2)$$

Celková analýza dat probíhá v kódované podobě standardizace DOE, z důvodu zajištění ortogonality řešení a s tím související numerická a statistická správnost dosažených výsledků s ohledem na vztah kódování ve tvaru:

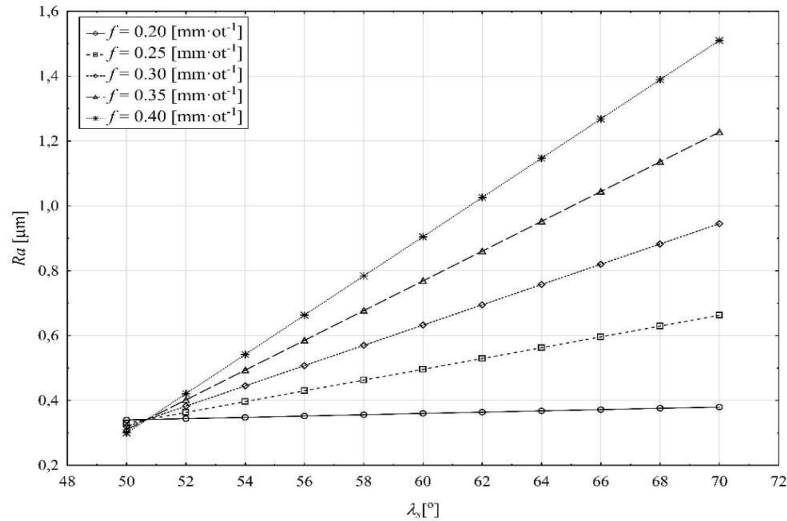
$$x_d(i) = \frac{x(i) - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \quad (3)$$

kde $x(i)$ – původní základní proměnná, kde i představuje počet základních faktorů, x_{\max} – maximální hodnota původní proměnné $x(i)$, x_{\min} – minimální hodnota původní proměnné $x(i)$, je možné model (2) převést do podoby přirozeného měřítka jednotlivých vstupních procesních faktorů ve tvaru:

$$Ra = 3.205 - 0.057 \cdot \lambda_s - 14.825 \cdot f + 0.293 \cdot \lambda_s \cdot f \quad (4)$$

Poslední částí testování správnosti regresního modelu (3) je analýza reziduí jako třetí složky regresního tripletu. Na základě Shapiro – Wilksova testu normality ($p = 0,895$) rezidua vykazují Gaussovo normální rozdělení s průměrnou hodnotou $-1,39 \cdot 10^{-17} \mu\text{m}$. Na základě výše uvedených rozborů lze matematicko – statistický vztah, který popisuje závislost studovaného parametru Ra na změně základních technologických faktorů (v_c, f, λ_s), považovat za numericky a statisticky správný, a proto lze v rámci použitých intervalů vstupních faktorů vyvozovat správné závěry.

Grafické zobrazení (Graf 14) vlivu významných technologických faktorů vyplývající z odhadu regresních koeficientů (Tabulka 16) a modelu (3) v přirozeném měřítku se změnou hodnoty drsnosti povrchu Ra.



Graf 14: Závislost úhlu sklonu ostří řezné hrany a posuvu na změnu hodnoty drsnosti Ra

5.8.2 Drsnost obrobeného povrchu Rz

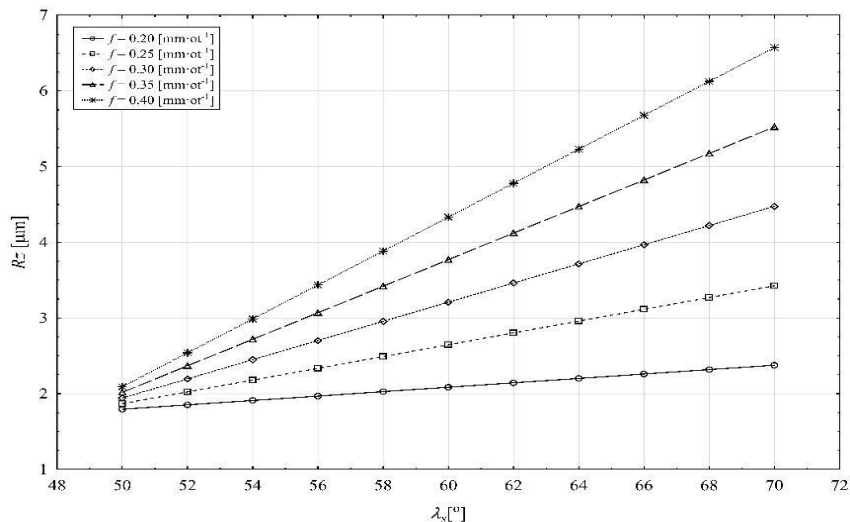
Stejným způsobem jako vyhodnocení parametru drsnosti povrchu Ra proběhlo hodnocení drsnosti povrchu Rz. Na základě odhadu regresních koeficientů lze obecný model (1) specifikovat v následující podobě:

$$\hat{y} = 3.2088 + 1.2663 \cdot x_2 + 1.1238 \cdot x_3 + 1.1163 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.1412 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (5)$$

S uvážením převodového vztahu je možné vzorec převést do podoby přirozeného měřítka jednotlivých vstupních procesních faktorů ve tvaru:

$$Rz = 25.045 - 6.356 \cdot 10^{-2} \cdot v_c - 0.420 \cdot \lambda_s - 98.113 \cdot f + 1.059 \cdot 10^{-3} \cdot v_c \cdot \lambda_s + 0.212 \cdot v_c \cdot f + 1.823 \cdot \lambda_s \cdot f - 3.531 \cdot 10^{-3} \cdot v_c \cdot \lambda_s \cdot f \quad (6)$$

Při rozboru drsnosti povrchu Rz se nově objevuje vliv řezné rychlosti, ale pouze jako interakční člen spolu s posuvem a úhlem sklonu hlavního břitu. Celkový vliv této interakce na změnu hodnoty drsnosti Rz je 2,061 % ($p = 0,0465$). Nejvýznamnějším regresorem, který ovlivňuje hodnotu parametru Rz, je úhel sklonu ostří (x_2), jako v případě hodnocení Ra. Podíl úhlu sklonu ostří jako hlavního vlivu je 18,466 % ($p = 0,0001$). Druhým nejdůležitějším prediktorem v rámci obecného modelu posuv. Jeho vliv na změnu hodnoty drsnosti Rz je 16,392 % ($p = 0,0001$). Stejně jako u úhlu sklonu ostří i u posuvu roste s nárůstem posuvu i hodnota drsnosti Rz. Třetím nejvýznamnějším členem použitého modelu je vzájemná interakce posuvu a úhlu sklonu hlavního břitu s 16,279 % podílem (Graf 15).



Graf 15: Závislost úhlu sklonu ostří řezné hrany a posuvu na změnu hodnoty drsnosti Rz

5.8.3 Opotřebení čela břitové destičky KBb

Základní rozbor použitého modelu (1) poukazuje na fakt, že index determinace dosahuje hodnoty 88,673 %. Korekcí indexu determinace o počet nezávisle proměnných získáme upravený index determinace, který vyjadřuje skutečnou hodnotu procenta variability zkoumané proměnné y_1 , kterou lze vysvětlit použitým modelem. Modifikovaný index determinace dosahuje u KB_b hodnoty 84,143 %, lze tedy mluvit o výrazné závislosti. RMSE (Root Mean Square Error) dosahuje hodnoty 0,12184 a průměrná hodnota opotřebení břitu KB_b pro všechny pokusy v rámci experimentu je 3,2088 μm .

Z hlediska metodiky DoE je nutné analyzovat model (1) jako takový (Tabulka 17).

Tabulka 17: Tabulka ANOVA pro model opotřebení čela KB_b

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p
Model	2	0,006193	0,003096	19,5717	0,0043*
Error	5	0,000791	0,000158		
C. Total	7	0,006984			

Z Tabulky 17 vyplývá, že dosažená hladina významnosti ($p = 0,0043$) je významná na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ a proto můžeme zamítnout nulovou hypotézu rozptylové analýzy a zároveň přijmout závěr, že v rámci aplikované obecné model (1) existuje alespoň jedna nezávislá proměnná, jejíž odhad regresního koeficientu je statisticky odlišný od nuly. Vzhledem k tomu, že sledovaný parametr opotřebení čela KB_b je ve své podstatě náhodná veličina, je nutné k němu přistupovat statisticky. Tabulka 18 uvádí pouze ty pojmy, které jsou statisticky významné na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, tedy významně ovlivňují změnu hodnoty parametru KB_b .

Tabulka 18: Odhady regresních koeficientů modelu $KB_b = f(v_c, f, \lambda_s)$

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	p	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept (b_0)	0,07525	0,004447	16,92	<0,0001*	0,063819	0,086681	.
x_2	0,021	0,004447	4,72	0,0052*	0,009569	0,032431	1
x_3	0,01825	0,004447	4,1	0,0093*	0,006819	0,029681	1

$x_2 - \lambda_s [^\circ]$, $x_3 - f [\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$, * - signifikantné na hladine významnosti 5 %, VIF – Variance Inflation Factor

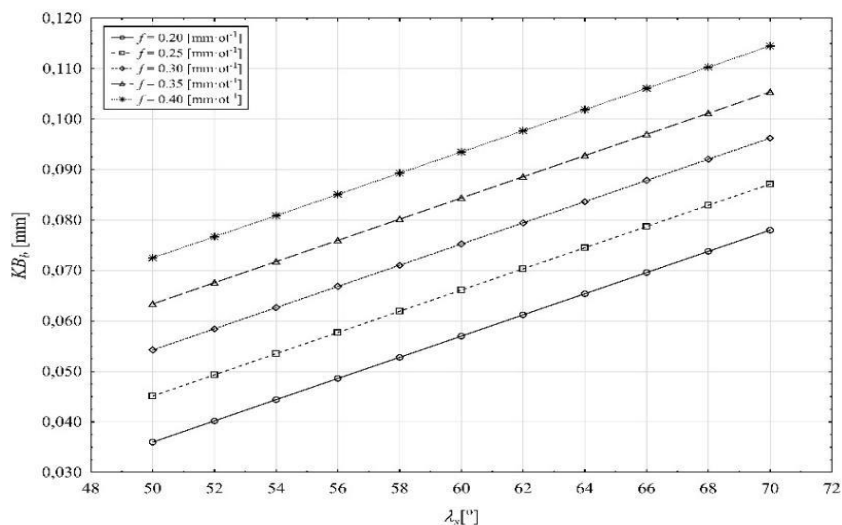
Tabulka 18 v první řadě ukazuje vliv absolutního členu modelu (Intercept), který zahrnuje všechny neuvažované vlivy a zahrnuje i vliv použitých intervalů jednotlivých vstupních proměnných. Její celkový podíl na změně hodnoty zkoumané proměnné je 68,734 % ($p < 0,0001$). Sledujeme-li vliv procesních faktorů použitých v experimentálním výzkumu, je nejvýznamnějším regresorem, který ovlivňuje hodnotu zkoumaného parametru KB_b , úhel sklonu hlavního břitu (x_2) s hodnotou 18,337 % ($p = 0,0052$). Zvýšením hodnoty úhlu sklonu hlavního břitu se podmíněně zvýší i hodnota zkoumaného parametru KB_b . Druhým významným prediktorem v rámci obecného modelu (1) a Tab. 18 je posuv. Jeho vliv na změnu hodnoty opotřebení čela KB_b představuje 15,929 % ($p = 0,0093$). Stejně jako u úhlu sklonu hlavního břitu i u posuvu se s nárůstem posuvu zvyšuje i podmíněná hodnota zkoumaného čelního opotřebení KB_b .

Na základě odhadu regresních koeficientů (Tabulka 18) lze obecný model (1) specifikovat v následující podobě:

$$\hat{y} = 7.525 \cdot 10^{-2} + 2.100 \cdot 10^{-2} \cdot x_2 + 1.825 \cdot 10^{-2} \cdot x_3 \quad (7)$$

S ohledem na převodní vztah je možné převést kódovaný model do podoby přirozeného měřítko nezávisle proměnných ve tvaru:

$$KB_b = 2.100 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda_s + 0.183 \cdot f - 0.106 \quad (8)$$



Graf 16: Závislost úhlu sklonu ostří a posuvu na hodnotě opotřebení čela KB_b

Poslední částí testování správnosti regresního modelu je analýza reziduí jako třetí složky regresního tripletu. Na základě Shapiro-Wilksova testu normality ($p = 0,690$) rezidua vykazují Gaussovo normální rozdělení s průměrnou hodnotou na úrovni $0 \mu\text{m}$. Na základě výše uvedených analýz základních technologických faktorů (v_c , f , λ_s) lze výsledek považovat za numericky a statisticky správný, a tak na jejím základě lze vyvozovat správné závěry v používaných intervalech vstupních faktorů. Grafické znázornění vlivu významných technologických faktorů z hlediska odhadu regresních koeficientů (Tabulka 18) a modelu v přirozeném měřítku na změnu opotřebenění čela KB_b zobrazuje Graf 16.

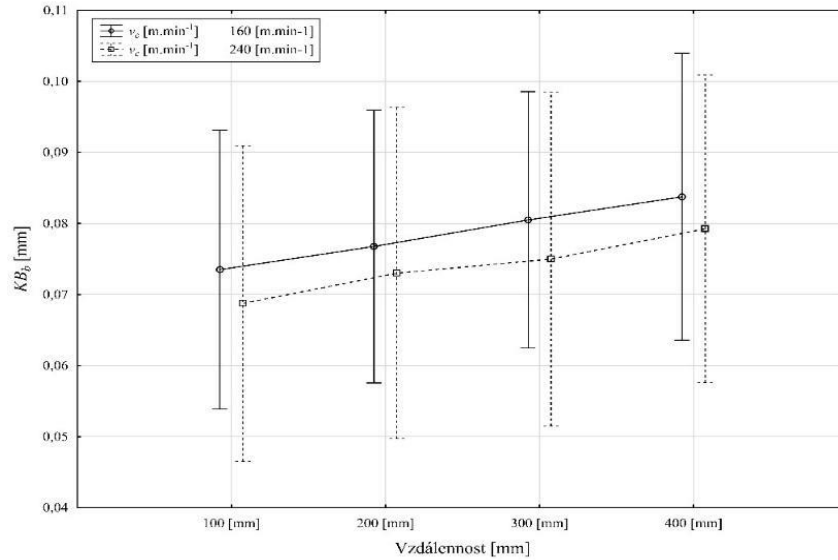
5.8.4 Analýza opotřebenění čela KB_b s uvážením vlivu vzdálenosti obrábění

Protože délku obrábění nelze z metodického hlediska zahrnout do hodnocení experimentu při zachování základních kritérií kladených na metodiku DoE, je nutné se jejímu vlivu věnovat samostatně. Pokud považujeme jednotlivé vstupní nezávislé proměnné (v_c , f , λ_s , l) za ordinální a zkoumanou odezvu, opotřebenění čela KB_b za interval, pak nejrozumnějším způsobem analýzy experimentu bude Fisher's Analysis of Variance (ANOVA).

V prvním kroku rozebereme vliv jednotlivých základních prediktorů (v_c , f , λ_s) v interakci s délkou obrábění (l) a budeme sledovat vliv jednotlivých interakcí na změnu hodnoty opotřebenění čela KB_b . Za prvé, průměrná hodnota KB_b pro použité řezné rychlosti bez uvažování dalších prediktorů, tedy pokud analyzujeme řeznou rychlost jako hlavní vliv, pak pro $v_c = 160 \text{ [m/min]}$ je průměrná hodnota opotřebenění čela $0,0786 \pm 0,0065 \text{ mm}$ a pro $v_c = 240 \text{ [m/min]}$ je průměrná hodnota KB_b $0,0740 \pm 0,0086 \text{ mm}$. Rozdíl mezi použitými rychlostmi představuje hodnotu $0,00462$ a není významný na zvolené hladině významnosti $\alpha = 5 \%$ ($p = 0,094$). Závěr podpořený výsledky analýzy plánovaného experimentu je, že řezná rychlost jako hlavní efekt neovlivňuje podmíněnou hodnotu zkoumané proměnné KB_b .

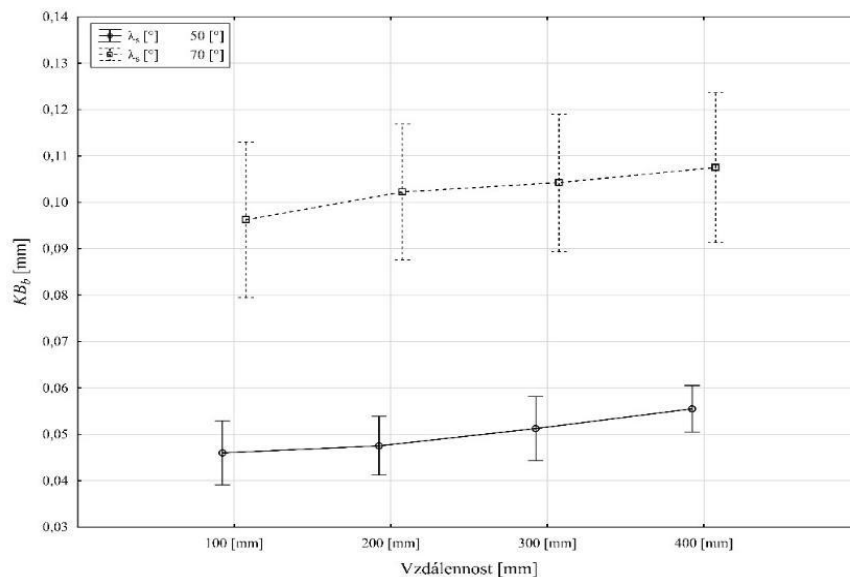
Druhým sledovaným interakčním členem je délka obrábění (l). Při délce obrábění $l = 100 \text{ mm}$ je průměrná hodnota čelního opotřebenění $0,0711 \pm 0,0137 \text{ mm}$, při délce obrábění $l = 200 \text{ mm}$ je průměrná hodnota čelního opotřebenění $0,0749 \pm 0,0139 \text{ mm}$, při délce obrábění $l = 300 \text{ mm}$ je průměrná hodnota čelního opotřebenění $0,0778 \pm 0,0137 \text{ mm}$ a při délce obrábění $l = 400 \text{ mm}$ je průměrná hodnota čelního opotřebenění $0,0815 \pm 0,0137 \text{ mm}$. Významný rozdíl mezi použitými délkami obrábění ($p = 0,042$) je pozorován pouze mezi $l = 400 \text{ mm}$ a $l = 100$, přičemž hodnota rozdílu je na úrovni $0,0103 \pm 0,0101 \text{ mm}$.

Délka obrábění jako hlavní vliv však není významným faktorem ($p = 0,058$), který ovlivňuje změnu hodnoty zkoumaného parametru KB_b . Při uvažování vzájemné interakce řezné rychlosti a délky obrábění dojdeme k závěru, že tato interakce není statisticky významná ($p = 0,922$) a tudíž významně neovlivňuje změnu hodnoty opotřebenění čela KB_b (Graf 17).



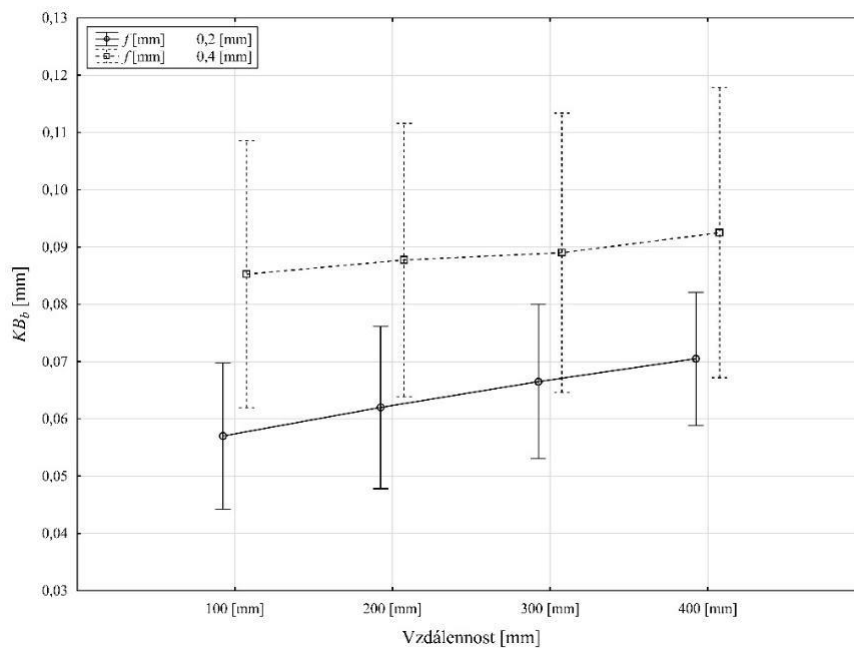
Graf 17: Vliv interakce řezné rychlosti a vzdálenosti na změnu hodnoty KB_b

Existují však některé významné rozdíly ve změně průměrné hodnoty opotřebení čela v rámci uvažované interakce (graf 18). Jedná se především o rozdíl hodnoty KB_b při řezné rychlosti $v_c = 160$ m/min mezi $l = 400$ mm a $l = 100$ mm s hodnotou 0,0102 mm a při řezné rychlosti $v_c = 240$ m/min mezi $l = 400$ mm a $l = 100$ mm s hodnotou 0,0105 mm. Úhel sklonu hlavního ostří λ_s je významným faktorem ($p = 0,000$) ovlivňujícím změnu hodnoty opotřebení čela. Při $\lambda_s = 50^\circ$ je průměrná hodnota opotřebení čela $0,0501 \pm 0,0029$ mm a při $\lambda_s = 70^\circ$ je průměrná hodnota opotřebení čela $0,1026 \pm 0,0070$ mm. Rozdíl v hodnotách opotřebení je tak na hladině $0,0525 \pm 0,0054$ mm a je statisticky významný ($p = 0,000$). Vzájemná interakce vzdálenosti a úhlu sklonu však není významným prediktorem ($p = 0,360$), který ovlivňuje změnu hodnoty opotřebení čela (Graf 18).



Graf 18: Vliv interakce úhlu sklonu ostří a vzdálenosti na změnu hodnoty KB_b

Stejně jako při rozboru interakce řezné rychlosti a vzdálenosti, tak i při rozboru úhlu sklonu hlavního řezného břitu a vzdálenosti jsou však mezi jednotlivými hodnotami zkoumaných faktorů značné rozdíly. Posuv jako poslední prediktor v podobě hlavního efektu ovlivňuje změnu hodnoty opotřebení čela významně ($p = 0,000$). Průměrná hodnota opotřebení čela dosahuje hodnoty $KB_b = 0,0640 \pm 0,0059$ mm při posuvu $f = 0,20$ mm/ot a hodnoty $KB_b = 0,0886 \pm 0,0107$ při posuvu $f = 0,40$ mm/ot. Rozdíl v hodnotách opotřebení pro použité hodnoty posuvu je na úrovni $0,0246 \pm 0,0054$ mm a je statisticky významný na 5 % hladině významnosti ($p = 0,000$). Při analýze vzájemné interakce posuvu a vzdálenosti však opět dojdeme k závěru, že tato interakce není významným prediktorem, který by významně ovlivnil změnu hodnoty opotřebení čela KB_b (Graf 19).

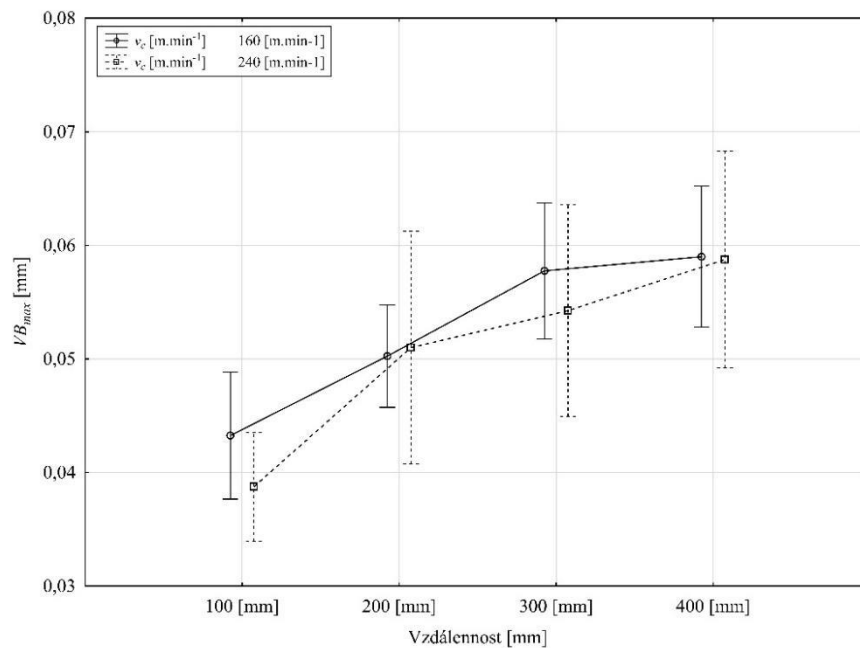


Graf 19: Vliv interakce posuvu a vzdálenosti na změnu hodnoty KB_b

5.8.5 Analýza opotřebení hřbetu VB_{max} s uvažováním vlivu vzdálenosti obrábění

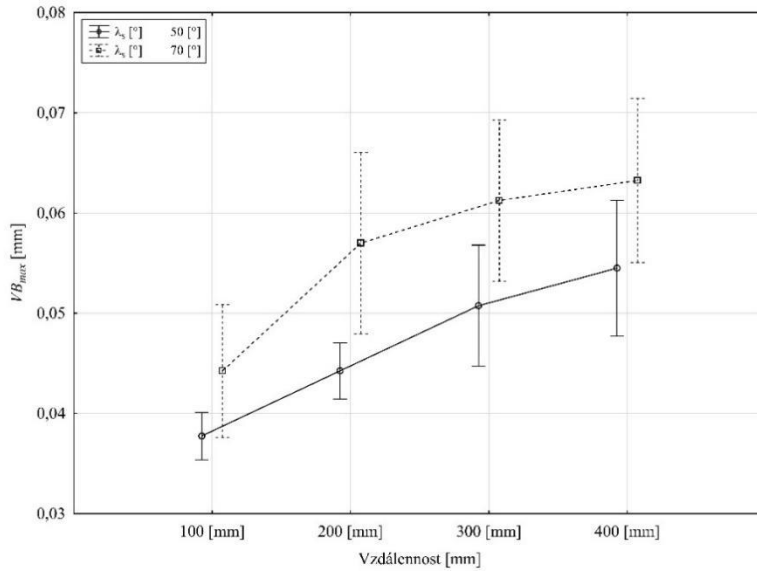
Stejný postup výpočtu jako pro opotřebení čela bude zvolen i pro analýzu opotřebení hřbetu VB_{max} . V prvním kroku rozebereme vliv jednotlivých základních prediktorů (v_c , f , λ_s) v interakci s délkou obrábění (l) a budeme sledovat vliv jednotlivých interakcí na změnu hodnoty opotřebení hřbetu VB_{max} . Za prvé, průměrná hodnota VB_{max} pro použité řezné rychlosti bez uvažování dalších prediktorů, tedy pokud analyzujeme řeznou rychlost jako hlavní vliv, pak pro $v_c = 160$ m/min je průměrná hodnota opotřebení hřbetu $0,0516 \pm 0,0027$ mm a pro $v_c = 240$ m/min je průměrná hodnota VB_{max} $0,0507 \pm 0,0044$ mm. Rozdíl mezi použitými rychlostmi představuje hodnotu $0,0019$ a není významný na zvolené hladině významnosti $\alpha = 5$ % ($p = 0,274$). Řezná rychlost jako hlavní efekt neovlivňuje podmíněnou hodnotu zkoumané proměnné VB_{max} .

Druhým sledovaným interakčním členem je délka obrábění (l). Při délce obrábění $l = 100$ mm je průměrná hodnota čelního opotřebení na úrovni $0,0410 \pm 0,0035$ mm, při délce obrábění $l = 200$ mm je průměrná hodnota čelního opotřebení $0,0506 \pm 0,0051$ mm, při délce obrábění $l = 300$ mm je průměrná hodnota čelního opotřebení $0,0560 \pm 0,0052$ mm a při délce obrábění $l = 400$ mm je průměrná hodnota čelního opotřebení $0,0589 \pm 0,0052$ mm. Významný rozdíl mezi použitými délkami obrábění je pozorován mezi $l = 400$ mm a $l = 100$, přičemž hodnota rozdílu je na úrovni $0,0179 \pm 0,0063$ mm ($p = 0,000$), mezi vzdálenostmi 200 mm a 100 mm s hodnotou rozdílu $0,0096 \pm 0,0063$ mm ($p = 0,001$), mezi vzdálenostmi 300 mm a 100 mm s hodnotou rozdílu $0,0150 \pm 0,0063$ mm ($p = 0,000$) a mezi vzdálenostmi 400 mm a 200 mm s hodnotou rozdílu $0,0 \pm 0,0063$ mm ($p = 0,005$). Délka obrábění jako hlavní vliv je významným faktorem ($p = 0,000$), který ovlivňuje změnu hodnoty zkoumaného parametru VB_{max} . Při uvažování vzájemné interakce řezné rychlosti a délky obrábění dojdeme k závěru, že tato interakce není statisticky významná ($p = 0,135$) a tudíž významně neovlivňuje změnu hodnoty opotřebení čela VB_{max} (Graf 20).



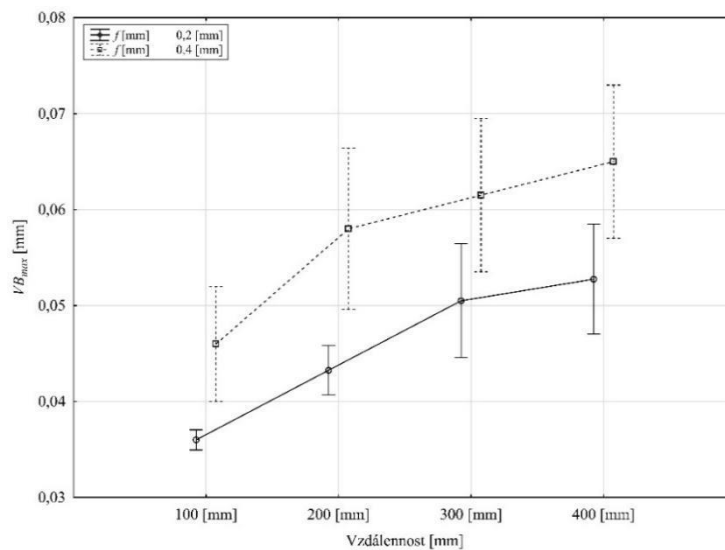
Graf 20: Vliv interakce řezné rychlosti a vzdálenosti na změnu hodnoty VB_{max}

Existují však některé významné rozdíly ve změně průměrné hodnoty opotřebení zadní části v rámci uvažované interakce. Úhel sklonu hlavního ostří λ_s je významným faktorem ($p = 0,000$) ovlivňujícím změnu hodnoty opotřebení hřbetu. Při $\lambda_s = 50^\circ$ je průměrná hodnota opotřebení hřbetu na úrovni $VB_{max} = 0,0468 \pm 0,0029$ mm a při $\lambda_s = 70^\circ$ průměrná hodnota opotřebení hřbetu na úrovni $VB_{max} = 0,0564 \pm 0,0042$ mm. Rozdíl hodnot opotřebení zad je tak na hladině $0,0096 \pm 0,0034$ mm a je statisticky významný na zvolené hladině významnosti ($p = 0,000$). Vzájemná interakce vzdálenosti a úhlu sklonu hlavního ostří však není významným prediktorem ($p = 0,104$), který ovlivňuje změnu hodnoty opotřebení hřbetu VB_{max} (Graf 21).



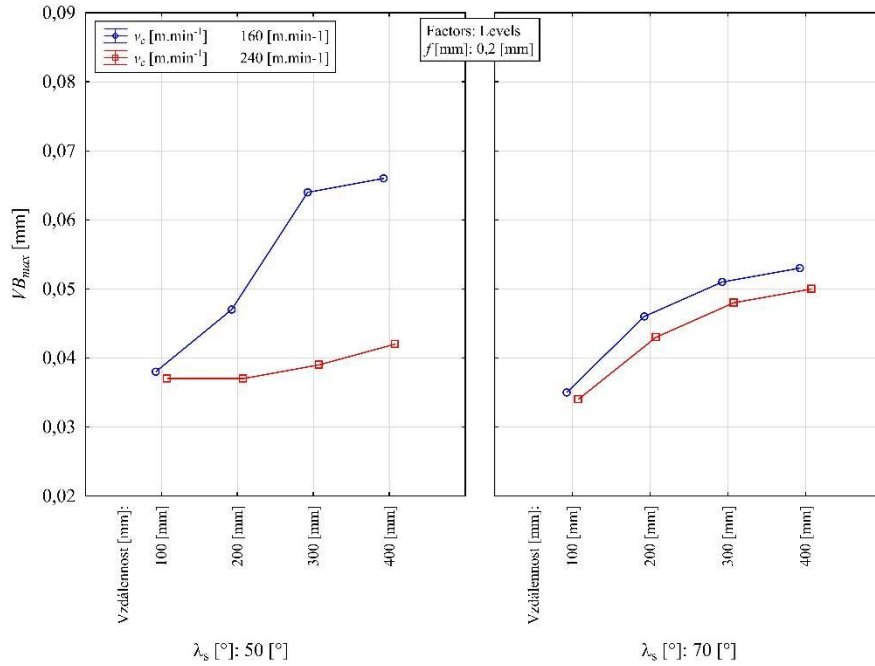
Graf 21: Vliv interakce úhlu sklonu ostří a vzdálenosti na změnu hodnoty VB_{max}

Jak při rozboru interakce řezné rychlosti a vzdálenosti, tak i při rozboru úhlu sklonu hlavního ostří a vzdálenosti jsou však mezi jednotlivými hodnotami zkoumaných faktorů značné rozdíly. Posuv jako poslední prediktor v podobě hlavního efektu ovlivňuje změnu hodnoty opotřebení zad významně ($p = 0,000$) na zvolené hladině významnosti. Průměrná hodnota opotřebení hřbetu dosahuje hodnoty $VB_{max} = 0,0456 \pm 0,0027$ mm při posuvu $f = 0,20$ mm/ot a hodnoty $VB_{max} 0,0576 \pm 0,0040$ mm při posuvu $f = 0,40$ mm/ot. Rozdíl v hodnotách opotřebení hřbetu pro použité hodnoty posuvu je na úrovni $0,0120 \pm 0,0034$ mm a je statisticky významný na 5 % hladině významnosti ($p = 0,000$). Při analýze vzájemné interakce posuvu a vzdálenosti však opět dojdeme k závěru, že tato interakce není významným prediktorem, který by významně ($p = 0,292$) ovlivnil změnu hodnoty opotřebení zadní části VB_{max} (Graf 22).

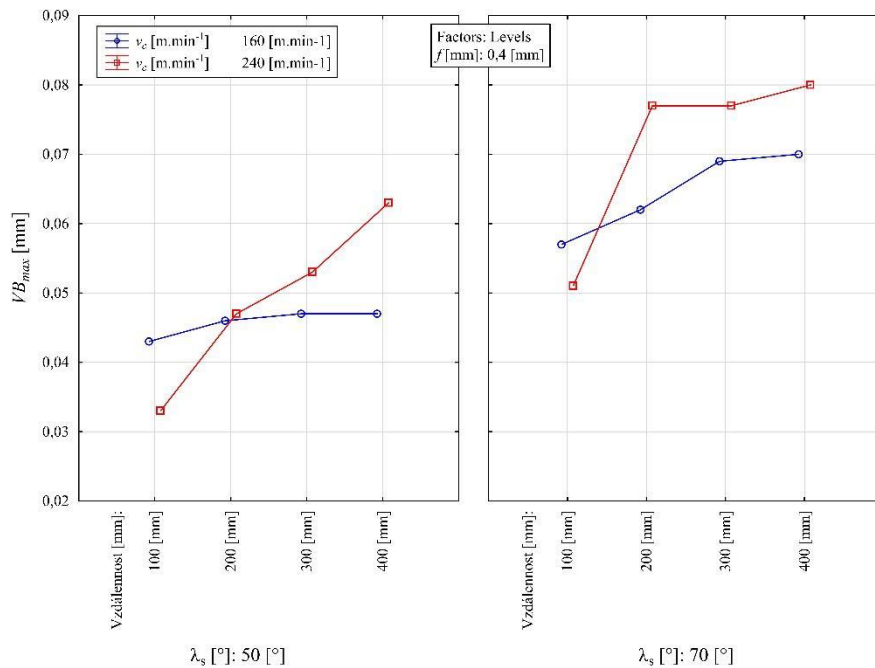


Graf 22: Vliv interakce posuvu a vzdálenosti na změnu hodnoty VB_{max}

Na závěr je uvedeno grafické znázornění interakce vlivu všech vstupních veličin (v_c , f , λ_s , l) na změnu hodnoty opotřebení hřbetu VB_{max} pro posuv $f = 0,20$ mm/ot (Graf 23) a pro posuv $f = 0,40$ mm/ot (Graf 24).



Graf 23: Vliv úhlu sklonu ostří, řezné rychlosti a vzdálenosti na VB_{max} při $f = 0,2$ mm/ot



Graf 24: Vliv úhlu sklonu ostří, řezné rychlosti a vzdálenosti na VB_{max} při $f = 0,4$ mm/ot

5.8.6 Funkční vzorky a výpočet produktivity obrábění

Pro vytvoření prvního funkčního vzorku (Příloha 2) pro projekt NCKS byla vybrána destička PCBN od firmy Bonar s fazetkou 0,2 x 20°. Jedná se o destičky s označením SCMW 120408 ve variantě fullface. S destičkami proběhla celá řada experimentů při různých variacích řezných podmínek. S ohledem na cíle projektu proběhlo testování v oblasti produktivních podmínek v podobě vysokorychlostního obrábění s řeznou rychlostí dosahujících $v_c = 1000$ m/min. Funkční vzorek poté vznikl na základě několika zkušebních experimentů, při kterých byly zjišťovány nejlepší řezné podmínky s ohledem na stav drsnosti obrobeného povrchu a velikosti vzniklého opotřebení.

Takto navržený funkční vzorek je tedy schopen obrábění vysokými řeznými rychlostmi dosahujících až $v_c = 1000$ m/min, s dosaženou kvalitou obrobeného povrchu v podobě drsnosti $R_a < 0,4$ μm a opotřebením hřbetu $V_{b_{\max}} = 0,065$ mm a čela $K_{b_b} = 0,082$ mm po obrobení 500 mm žárového nástřiku NiCrBSi.

Dle stanovených parametrů od firmy Plasmametal je hodnota úběru při broušení $U_{\text{krit}} = 100$ cm^2/min . Pro splnění cílů projektu je potřeba zvýšit účinnost procesu minimálně o 30 % tedy na hodnotu $U_{\text{opt}} = 130$ cm^2/min . Zároveň je kritérium obrobit s jednou řeznou hranou VBD minimálně 500 mm nástřiku s opotřebením na řezné hraně do $V_{B_{\max}} < 0,3$ mm. Do výpočtu dosadíme hodnoty pro výpočet otáček.

$$\text{Výpočet otáček: } v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 983}{\pi \cdot 100} = 3129 \text{ ot/min}$$

$$\text{Úběr materiálu: } U = f_{ot} \cdot n \cdot (\pi \cdot D) = 0,05 \cdot 3129 \cdot (\pi \cdot 100) = 49150 \text{ mm}^2 / = 491,5 \text{ cm}^2$$

Dle uvedeného výpočtu narostla účinnost procesu o **391,5 %** z požadovaných 30 %.

Druhý funkční vzorek (Příloha 3) je vytvořen z experimentů pro vysokoposuvové obrábění. Ze stanovených variovaných podmínek byla zjištěna nejlepší kombinace následujících parametrů. Během obrábění je nástroj pootočen na hodnotu úhlu sklonu ostří $\lambda_s = 50^\circ$. Tento způsob natočení břitové destičky rozšiřuje délku záběru během obrábění. Takto navržený funkční vzorek je tímto schopen obrábění vysokými posuvovými rychlostmi až $f_{ot} = 0,4$ mm s dosaženou drsností obrobeného povrchu $R_a < 0,4$ μm . Opotřebením bylo změřeno na čele $K_{b_b} = 0,073$ mm a hřbetu $V_{b_{\max}} = 0,053$ mm po obrobení 500 mm žárového nástřiku.

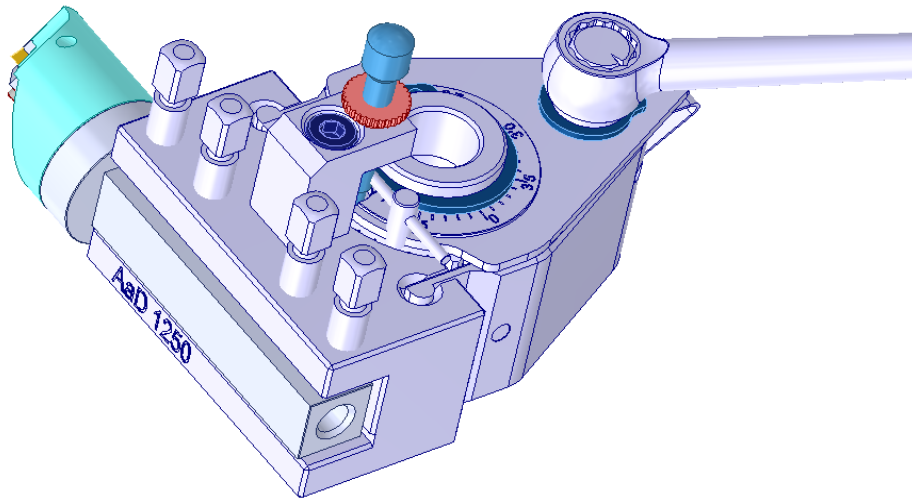
$$\text{Výpočet otáček: } v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 250}{\pi \cdot 100} = 795,8 \text{ ot/min}$$

$$\text{Úběr materiálu: } U_{\text{opt}} = f_{ot} \cdot n \cdot (\pi \cdot D) = 0,4 \cdot 795,8 \cdot (\pi \cdot 100) = 100003,2 \text{ mm}^2 / = 1000 \text{ cm}^2$$

Dle uvedeného výpočtu narostla účinnost procesu o **900 %** z požadovaných 30 %.

6 Implementace technologie obrábění s lineární řeznou hranou

Implementace technologie obrábění je pouze doplňující částí disertační práce a týká se především úspěšného uzavření projektu NCKS, ve kterém se zkoumala problematika obrábění žárového nástřiku NiCrBSi a Fe13Cr, bylo potřeba vytvořit výzkumnou zprávu s několika funkčními vzorky (FV) a ověřenou technologií (OT). Zároveň však tato implementace může potvrdit funkčnost a správnost řešení v problematice, o které pojednává tato disertační práce. V rámci spolupráce s firmou Plasmametal, spol. s r.o. je dále potřeba implementovat navrženou technologii přímo do provozu. S ohledem na jejich výrobní stroje je však potřeba vyhotovit nový obráběcí nástroj, který bude obsahovat důležité segmenty z nástroje QCA4 jako je např. chlazení čela a hřbetu břitové destičky, tvar lůžka pro čtvercovou VBD, princip naklonění řezné hrany do správné pozice úhlu ostří λ , uchycení nástroje do nožové hlavy atd. viz Obrázek 82.

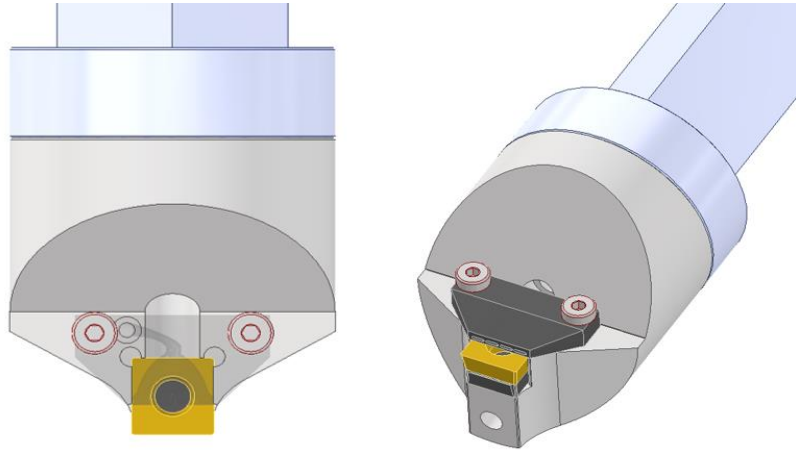


Obrázek 82: Model upnutí speciálního nástroje pro firmu Plasmametal

Ve firmě Plasmametal se nachází několik konvenčních soustruhů, které jsou svojí velikostí uzpůsobeny pro obrábění masivních a dlouhých obrobků. Jedním z typických obráběných dílů ve firmě je např. hřídel pro vlakové podvozky, které se vlivem opotřebení renovují. Opotřebovanou hřídel je třeba nejprve obrobit pro zmenšení průměru na funkčních plochách, poté nanést dostatečnou vrstvu žárového nástřiku a na závěr obrobit technologií broušení na požadovaný rozměr s danou rozměrovou a geometrickou tolerancí. Z teoretické části této disertační práce je rozebrána problematika broušení těchto ploch, a především časová náročnost pro získání požadovaných výsledků, která vychází ze zkušeností a znalostí firmy Plasmametal.

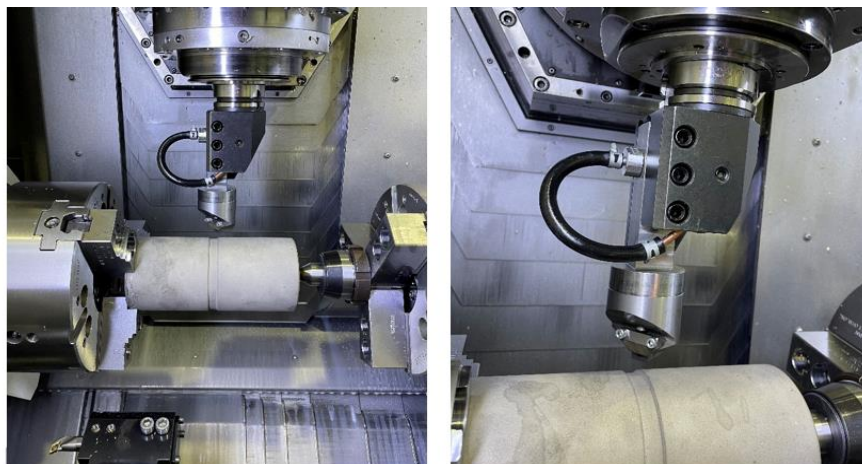
Při novém návrhu nástroje pro obrábění lineární řeznou hranou se nejprve navrhla upínací část, která má rozměry 25 mm x 25 mm, viz Obrázek 83. Následně byla vytvořena otočná hlava s lůžkem pro destičku. Princip otáčení a aretace otočné hlavy v požadovaném naklonění funguje na principu vkládání kaleného kolíku do připravených děr rozmístěných po obvodu osy nástroje. Po natočení nástrojové hlavy následuje finální dotažení pomocí středového šroubu za destičkou.

Na rozdíl od nástroje QCA4 je tento nástroj vyroben konvenčními metodami jako je soustružení a frézování. Za účelem vytvoření efektivního chlazení byl využit patent regionálního výzkumného institutu RTI s názvem ECHO. Princip tohoto efektivního chlazení spočívá ve vytvoření vnitřních kanálků vrtáním, kde pro finální usměrnění řezné kapaliny slouží speciální tištěné segmenty z kovu. Na obrázku je vidět návrh těchto segmentů pro chlazení čela a segmentu pod břitovou destičkou pro chlazení hřbetu. Konečný návrh nástroje pro firmu Plasmametal je zobrazen níže (Obrázek 83).



Obrázek 83: Model speciálního nástroje pro obrábění žárového nástřiku NiCrBSi

Po schválení tohoto návrhu následovala výroba a zkušební testování v prostorách RTI na stroji CTX Beta (Obrázek 84), kde probíhaly i předchozí testy s nástrojem QCA4. Při tomto testování bylo v plánu vyzkoušet již otestované řezné podmínky a porovnat dosažené výsledky s výsledky předchozími. Zároveň byly vytipovány řezné podmínky vhodné pro stroje ve firmě Plasmametal. S ohledem na to, že se jedná o nezakrytovaný klasický číslicově řízený soustruh, jsou maximální povolené otáčky obrobku stanoveny na 650 ot/min z celkových 1000 ot/min. Při průměru obrobku 100 mm to odpovídá maximální řezné rychlosti $v_c = 205$ m/min.



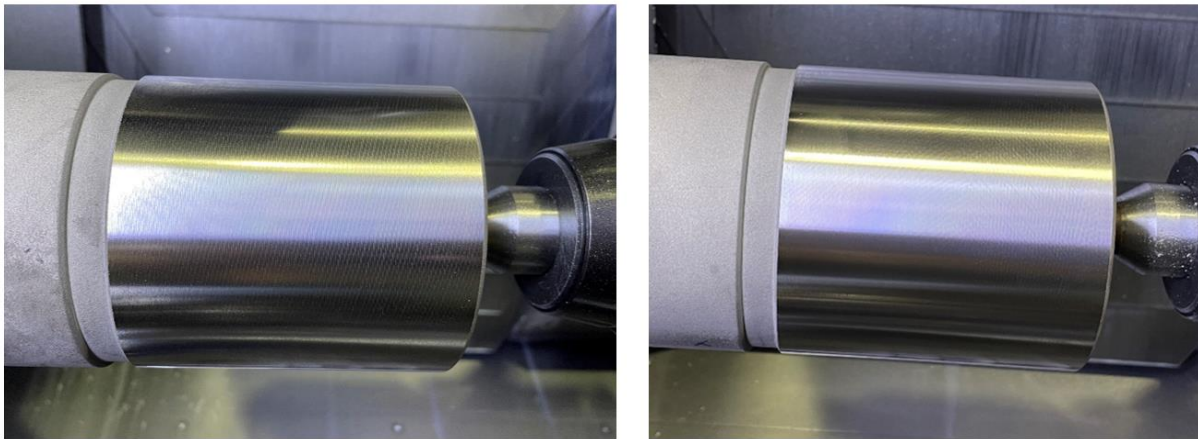
Obrázek 84: Zkušební testování speciálního nástroje na stroji CTX Beta

S ohledem na dosažené výsledky a životnost břitové destičky je zvolen pro obrábění nástřiku NiCrBSi kubický nitrid bóru, který dosahoval velmi kvalitních výsledků s dlouhou životností řezné hrany. Z předchozího testování jsou vytipovány řezné podmínky pro hrubování, viz Tabulka 19 s očekávanou drsností do $Ra = 0,4 \mu\text{m}$.

Tabulka 19: Test řezných podmínek pro hrubování nástřiku NiCrBSi

Řezná rychlost v_c	Posuv f	Hloubka řezu a_p	Typ VBD	Sklon ostří λ
200 m/min	0,4 mm/ot	0,1 mm	PCBN (0,2x20°)	50°

Před samotným hrubovacím řezem byla opět potřeba naleznout správnou pozici břitové destičky vůči obrobku jednak v ose Y tak v ose X. Pro tento obráběcí nástroj byla stanovena korekce $Y = 12 \text{ mm}$ a $X = 0,5 \text{ mm}$. Při měření neobrobeného nástřiku byla zjištěna kuželovitost 0,08 mm (100,13 – 100,05 mm). Výchozí průměr pro hrubování byl nastaven na 100,1 s hloubkou řezu $a_p = 0,1 \text{ mm}$. Hrubovací řez proběhl s velmi dobrým výsledkem dle očekávání (Obrázek 85), s naměřenou drsností $Ra = 0,24 - 0,2 \mu\text{m}$ a $Rz = 3,2 - 2,2 \mu\text{m}$, opotřebení na břitové destičce zanedbatelné s velmi malou kuželovitostí + 0,01 mm směrem od hrotu ke vřetenu na dráze 100 mm. Případný rozdíl průměrů (kuželovitost) lze předpokládat z hlediska změny tuhosti během obrábění a není problém tento rozdíl korigovat přímo v kontuře programu.



Obrázek 85: Vzhled obrobeného povrchu nástřiku po hrubování (vlevo) a dokončování (vpravo)

Naměřená drsnost po hrubování již lze považovat za dostatečnou jako náhrada za technologii broušení. Za účelem testování nového nástroje však vyzkoušíme i podmínky, které jsou stanoveny z předchozího testování na proces dokončení, viz Tabulka 20, kdy snížíme posuv na otáčku f z 0,4 na 0,2 mm/ot. Zároveň bude snížena hloubka řezu na $a_p = 0,05 \text{ mm}$ i řezná rychlost $v_c = 160 \text{ mm/min}$ což odpovídá $n = 510 \text{ ot/min}$.

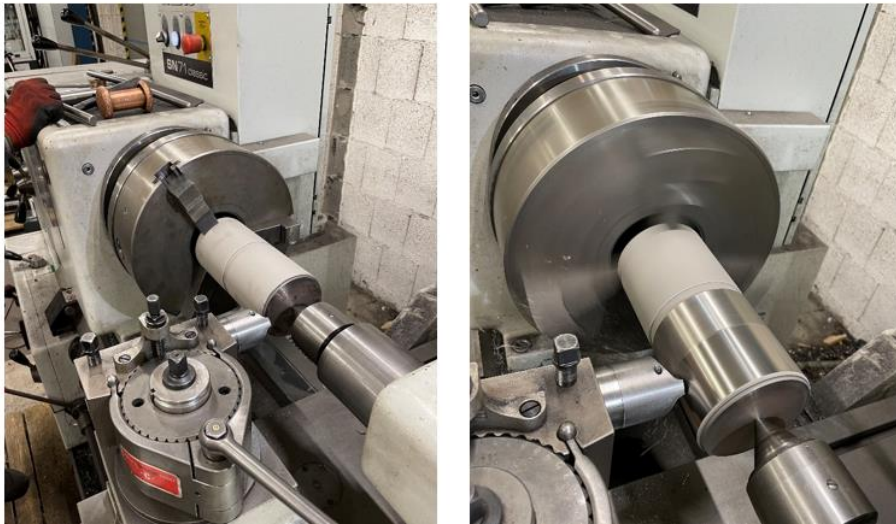
Tabulka 20: Test řezných podmínek pro dokončování nástřiku NiCrBSi

Řezná rychlost v_c	Posuv f	Hloubka řezu a_p	Typ VBD	Sklon ostří λ
160 m/min	0,2 mm/ot	0,05 mm	PCBN (0,2x20°)	50°

Dokončovací řez proběhl se stejnou řeznou hranou PCBN jako řez hrubovací, opět s velmi dobrým výsledkem drsnosti $R_a = 0,2 - 0,21 \mu\text{m}$ a $R_z = 1,4 - 1,6 \mu\text{m}$ (Obrázek 85 vpravo). Výchozí průměr pro obrobení byl nastaven podle předchozího měření po hrubování na hodnotu 99,9 mm. Po obrobení dokončovacím řezem byl naměřen průměr 99,8 mm, který odpovídá správně nastavené hloubce řezu $a_p = 0,05 \text{ mm}$. Při porovnání výsledků hrubovacího a dokončovacího řezu je zřejmý významný vliv velikosti posuvu na drsnost obrobeného povrchu především v hodnotě drsnosti R_z , která je na poloviční hodnotě v případě dokončení. Drsnost R_a se v těchto případech výrazně neliší, avšak na první pohled si lze všimnout výrazně lepšího vzhledu s menším posuvem $f = 0,2 \text{ mm/ot}$.

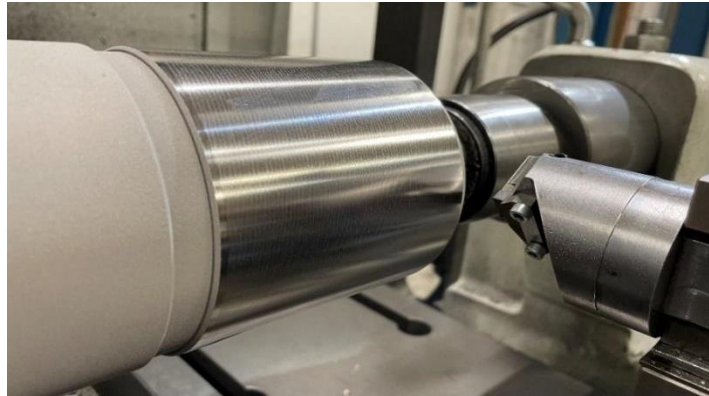
Z celkového pohledu můžeme konstatovat, že navržený nástroj pro firmu Plasmametal dosáhl stejně dobrých výsledků jako nástroj QCA4. Při testování bylo opět potvrzeno, že nejlepší potenciál na nahrazení technologie broušení mají destičky z kubického nitridu bóru s fazetkou $0,2 \times 20^\circ$ od výrobce Bonar.

Testování ve firmě Plasmametal proběhlo dne 22. 11. 2022. Cílem bylo dosáhnout stejných výsledků jako při testování v laboratořích RTI na stroji CTX Beta. Řezné podmínky, obráběný materiál (NiCrBSi) a navržený nástroj zůstanou pro porovnání stejné. Na konvenčním soustruhu bylo nastaveno 500 otáček za minutu a posuv $f = 0,38 \text{ mm/ot}$, to odpovídá řezné rychlosti $v_c = 157 \text{ m/min}$. Po upnutí obrobku a zaměření nástroje s vhodnou korekcí v obou osách byl testován řez hrubovací, viz Obrázek 86.



Obrázek 86: Testování speciálního nástroje ve firmě Plasmametal

Výsledek můžeme považovat za velmi pozitivní, jelikož se prokázalo, že navrženou technologii obrábění je vhodné použít i na starších soustružnických strojích, viz Obrázek 87. Drsnost obrobeného povrchu při hrubovacím řezu vyšla $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, tedy lehce horší než při testování na stroji CTX Beta, hodnota drsnosti $R_z = 2,7 \mu\text{m}$ je téměř totožná. Na první pohled lze opět vidět typický vzhled povrchu po hrubování se stylu jemné šroubovice. Po diskuzi s majitelem firmy vyšlo najevo, že tato šroubovice může mít dokonce i pozitivní efekt z hlediska mazání.



Obrázek 87: Vzhled obrobeneho povrchu po hrubování ve firmě Plasmametal

Po provedení hrubovacího řezu byl testován řez dokončovací opět se stejnou hranou CBN břitové destičky, vzhledem k tomu, že břit VBD po první řezu neměl známky jakéhokoliv opotřebení. Pro dokončovací řez byl opět snížen posuv, který podle tabulky stroje odpovídal $f = 0,24 \text{ mm/ot}$. Během obrábění se nástroj jevil velmi stabilně s klidným odchodem třísky ve tvaru drobnějších oblouků. Vzhled a drsnost povrchu již vyšla téměř totožná jako na stroji CTX Beta a to $Ra = 0,22 \text{ } \mu\text{m}$ a $Rz = 1,4 \text{ } \mu\text{m}$, viz Obrázek 88.



Obrázek 88: Vzhled obrobeneho povrchu po dokončování ve firmě Plasmametal

Obrobený vzorek byl následně odvezen zpět na ZČU, kde laboratoř metrologie provedla měření kruhovitosti a válcovitosti, viz Obrázek 89 a Obrázek 90. Kruhovitost vzorku byla v několika řezech změřena vždy pod hodnotu $3 \text{ } \mu\text{m}$ s válcovitostí nepřesahující $10 \text{ } \mu\text{m}$. Výsledek z prvního testování prokázal obrovský potenciál v této speciální technologii obrábění lineární řeznou hranou, který byl potvrzen jednak majitelem firmy tak i samotnou obsluhou stroje. Pokračování v testování této technologie s případným zavedením do výroby bude dále pokračovat, a to především na již reálných kusech jako jsou např. zmiňované hřídele pro vlakové podvozky.

Na získaném obrobku byla provedena kapilární zkouška dle ČSN EN ISO 3452. Vzorek byl před testováním očištěn vysušen. Následně byl nanesen penetrant, který vnikal do diskontinuit otevřených na povrch. Nanášení bylo prováděno opakovaně v pětiminutových intervalech. Po uplynutí stanovené doby byl přebytečný penetrant odstraněn a byla nanesena vývojka. Byla použita testovací sada, viz Obrázek 91.



Obrázek 91: Sada použitá pro provedení kapilární zkoušky dle ČSN EN ISO 3452

Byl použit barevný kontrastní penetrant a vývojka bezvodá vývojka. Výsledkem zkoušky bylo zjištěno, že na obrobku se nevyskytují žádné mikroskopické, ani makroskopické vady spojené s povrchem způsobené v procesu obrábění (Obrázek 92).



Obrázek 92: Postup provedení kapilární zkoušky s negativní detekcí mikro i makrotrhlin spojených s povrchem obrobku

7 Shrnutí dosažených výsledků

Hlavním cílem disertační práce je změna současného způsobu obrábění slitiny NiCrBSi za účelem zvýšení produktivity procesu. Zvýšení produktivity je plánováno docílit výměnou dosavadní technologie broušení za technologii obrábění s definovanou geometrií břitu. Z uvedeného důvodu byl navržen speciální nástroj QCA (Užitný vzor v Příloze 1) pro obrábění s lineární řeznou hranou. Toho se využilo, protože zde konvenční způsoby obrábění s definovanou geometrií břitu selhávají. Zároveň byla stanovena podmínka požadované kvality povrchu v podobě drsnosti povrchu Ra a Rz, kterou stanovila firma Plasmametal s.r.o., se kterou ZČU v Plzni dlouhodobě spolupracuje v oblasti výzkumu a vývoje.

V rámci spolupráce v projektu NCKS se firma věnovala optimalizaci parametrů žárového stříkání pro zlepšení vlastností nástřiku po aplikaci. Výsledky dosažené v jednotlivých etapách potvrdily predikované vlastnosti splňující standardy uváděné v zahraniční odborné literatuře. Optimalizací technologických a pohybových parametrů bylo dosaženo výrazně lepších mechanických vlastností. Povlaky jsou z hlediska struktury podstatně homogennější s 10x nižší hodnotou pórovitosti a celkově vykazují výrazně lepší strukturní vlastnosti pro následné obrábění, viz Obrázek 49.

Optimalizace řezného nástroje byla provedena za účelem zlepšení přívodu a regulace procesní kapaliny. Regulační člen měl zásadní problém s těsností ve vnitřní části, která při pozici "zavřeno" stále v malé míře propouštěla řeznou kapalinu. Nové řešení spočívalo v nalisování regulátorů o $\varnothing 10$ mm, ve kterých se posouvá stavěcí šroub M6 x 1. Zároveň šroub při regulaci uzavírá přímo vstupní část, a tím je zajištěna úplná těsnost proti předchozímu řešení. Pro rovnoměrné rozložení objemu kapaliny v čelním kanálku byl navržen tvar, který je ve výstupní části značně rozšířen. Tím se dle simulace kompenzuje stranové vychýlení kapaliny. Úprava na hřbetním kanálku proběhla změnou pozice a tvaru tří žeber, které jsou v nástroji zachovány z důvodu schopnosti provedení kovového 3D tisku.

Z prvního testování nástroje s lineární řeznou hranou s destičkou ze slinutého karbidu IC20 bylo zjištěno několik zásadních skutečností týkajících se způsobu chování nástroje během obrábění. Z prvních výsledků bylo zjištěno, že při nevhodně nastavených podmínkách, především velké hloubky řezu ($a_p \geq 0,2$ mm), vzniká intenzivní chvění. Dalším získanou informací bylo zjištění, že využití pohybu osy Y během obrábění pravděpodobně snižuje tuhost soustavy SNO. Snižovaná tuhost se projevuje vznikem vibrací, a tím i zhoršením kvality obrobeneho povrchu. Zároveň je možné konstatovat, že samotná myšlenka využití celé délky řezné hrany se v tomto experimentu ukázala jako správná, jelikož lze nastavovat konstantní korekci y osy pro několik pozic řezné hrany. Při tomto způsobu obrábění s typem čtvercové destičky je tedy možné využít až šestnáct částí břitu, které se budou vzájemně překrývat jen minimálně.

Při testování doporučené VBD od firmy Pramet byl testován povlakovaný slintutý karbid určený na dokončovací operace pro velmi tvrdé a abrazivní materiály s utvařečem s označením RM. Z hlediska vzhledu a drsnosti povrchu se jednalo již o velmi dobrý výsledek s $R_a = 0,25\mu\text{m}$ a $R_z = 1,5\mu\text{m}$. Negativně lze pohlížet na vzniklé opotřebení řezné hrany, které bylo po obrobení délky 100 mm limitní, což potvrdil opakovaný test. Při měření obrobeného průměru bylo zjištěno velké odtlačení nástroje, jelikož byla naměřena skutečná hloubka řezu $a_p = 0,02\text{ mm}$, proti požadovaným 0,05 mm. Z hlediska opakovatelnosti výroby a dodržení stanovené hloubky řezu tak destičku nelze považovat za adekvátní náhradu za technologii broušení.

Při testování polykrystalického diamantu od firmy Rotana lze konstatovat, že byl poprvé nalezen řezný materiál a podmínky pro obrábění, které mohou při technologii soustružení konkurovat technologii broušení. Nejlepší dosažená drsnost povrchu $R_a = 0,17\mu\text{m}$ a $R_z = 1,02\mu\text{m}$ byla dosažena při podmínkách $f = 0,2\text{ mm/ot}$ s řeznou rychlostí $v_c = 80\text{ m/min}$. Ostatní testované podmínky ve většině případů způsobily viditelné vyštípnutí až destrukci řezné hrany. Polykrystalický diamant prokázal, že svou tvrdostí dokáže obrobit i velmi tvrdé materiály jako je žárový nástřík NiCrBSi, zároveň je ale velmi křehký při nevhodně nastavených řezných podmínkách. Při porovnání s technologií broušení dojde při použití polykrystalického diamantu až k desetinásobnému zvýšení produktivity.

Společně s firmou Rotana byla navržena i destička s polykrystalickým kubickým nitridem bóru (PCBN) ve stejném provedení jako CVD-D. S těmito břitovými destičkami se opět podařilo dosáhnout dobrých výsledků při rychlostech $v_c = 200\text{ m/min}$ s posuvem $f = 0,1\text{ mm/ot}$. Problém s vyštípnutím řezné hrany však zůstával stejný jako při obrábění s diamantovým řezným břitem. Produktivita obrábění s PCBN byla i při vyšších řezných rychlostech přibližně stejná, jelikož stanovený posuv byl poloviční. Při testování řezné rychlosti $v_c = 80\text{ m/min}$ bylo možné eliminovat intenzivní chvění pouze při vyšších hodnotách posuvu, které ale měly zásadní vliv na kvalitu povrchu. Lepší výsledky nepřineslo ani testování HSC režimu obrábění, při kterém docházelo ke kompletní destrukci pájeného segmentu PCBN.

Při testování PCBN destiček od firmy Bonar proběhla celá řada testování různých řezných rychlostí a posuvů, jako v předchozích případech. Ze všech provedených řezů bylo zkoumáno několik závislostí, které jsou podrobněji rozepsány v textu.

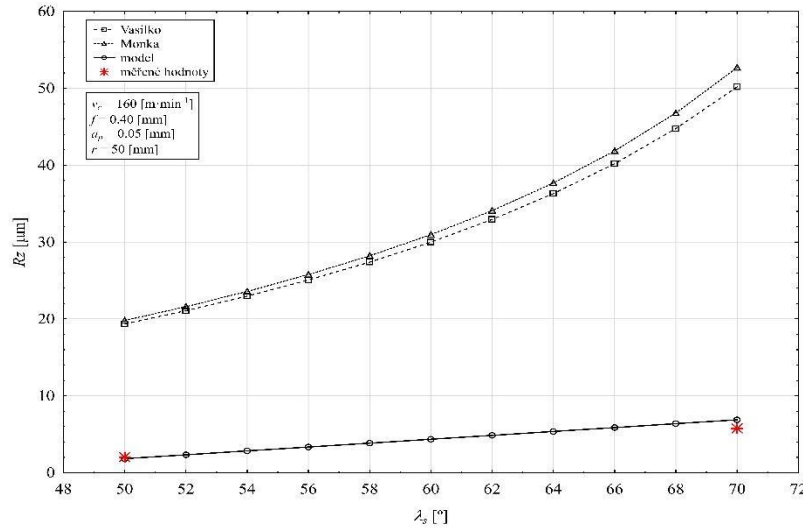
Obecně lze říci, že destičky s vyšším obsahem CBN potvrdily předpoklad vyšší houževnatosti a tím i menší křehkosti řezné hrany. Vyštípnutí řezné hrany bylo pozorováno pouze v malé míře. Zároveň úprava makrogeometrie v podobě fazetky $0,2 \times 20^\circ$ přinesla znatelné zvýšení tuhosti a životnosti řezné hrany. Na grafu č. 10 je vidět, jak velký vliv má tuhost soustavy při obrábění za stejných podmínek. Předpoklad nejvyšší tuhosti na ploše číslo čtyři byl dle výsledků potvrzen. Zároveň se nejnižší tuhost při obrábění vyskytovala na ploše číslo jedna, pravděpodobně vlivem otočného hrotu. Na ploše čtyři s nejlepší tuhostí (plocha vedle upnutí) byl dosažen nejlepší výsledek drsnosti $R_a \cong 0,15\mu\text{m}$ se sjednoceným lesklým vzhledem, kde při měření opotřebení bylo zjištěno zanedbatelné opotřebení VBD.

Při testování krajních ploch s nízkou tuhostí byla vyzkoušena řezná rychlost v rozmezí $v_c = 320\text{--}1180$ m/min. Při pozorování grafu č. 11 je patrná klesající tendence hodnoty drsnosti do řezné rychlosti cca 1000 m/min. Po přesáhnutí těchto hodnot řezné rychlosti nastalo výrazné zhoršení hodnot drsnosti i vzhledu obrobeného povrchu. Z grafu také plyne, že hloubka řezu má minimální vliv na kvalitu a vzhled obrobeného povrchu.

V grafu číslo 12 je znázorněn vliv posuvu na hodnotu drsnosti obrobeného povrchu. Z teorie pro klasické soustružení logicky vyplývá, že s rostoucím posuvem se zvyšuje hodnota drsnosti povrchu a naopak. Při obrábění s lineární řeznou hranou se toto pravidlo potvrzuje, avšak s mnohonásobně lepší hodnotou drsnosti. U destiček od firmy Bonar lze navíc použít všechny čtyři řezné hrany, tedy celkem 16 řezných hran při nastavení úhlu ostří $\lambda_s = 70^\circ$ a hloubce řezu $a_p = 0,05$ mm. S vyšší hloubkou řezu, nebo s větším úhlem sklonu ostří, se šířka této záběrové plochy rozšiřuje.

Poslední experiment, který byl naplánován pro krátkodobé testy s destičkami CBN od firmy Bonar se týkal testování vysokoposuvového obrábění. Z dosažených výsledků na grafu 13 je zřejmé, že řezná rychlost v těchto úrovních nemá významný vliv na drsnost povrchu Ra. Při porovnání hodnot drsnosti Rz z Tab. 12 je tento trend stejný. Výraznou faktorem, který ovlivňuje vzniklé opotřebení na čele, je řezná rychlost, kde se s vyšší řeznou rychlostí zvětšilo opotřebení na čele zhruba o 40 %. Opotřebení hřbetu lze vyhodnotit jako nezávislé na řezné rychlosti, ale s vyšší hodnotou naměřené drsnosti Ra se zvyšuje. Hlavní informace získaná během testování se týká zvýšeného posuvu $f = 0,4$ mm/ot v souvislosti s úhlem sklonu ostří, kde lze tento posuv nastavit pouze u varianty s $\lambda_s = 50^\circ$, kde s tímto úhlem dojde až k čtyřnásobnému zlepšení drsnosti povrchu Ra i Rz. Posuv s hodnotou $f = 0,2$ mm/ot lze využít u obou variant sklonu ostří, avšak s nižším úhlem sklonu $\lambda_s = 50^\circ$ je hodnota drsnosti Ra i Rz na poloviční hodnotě.

Z výsledků dlouhodobého testování (Příloha 5) PCBN od firmy Bonar bylo provedeno statistické vyhodnocení, při kterém byly zkoumány tři faktory o dvou úrovních, a to řezná rychlost, posuv a úhel sklonu ostří. S ohledem na množství odebraného nástřiku je celková délka obrobení stanovena na 400 mm. Pro snížení chybovosti statistického vyhodnocení byl každý testovaný vzorek nejprve předhrubován na stanovený průměr. Z detailního provedení statistického hodnocení vzniklo několik grafů zobrazujících interakce mezi jednotlivými zkoumanými faktory v závislosti na drsnosti Ra, Rz a opotřebení. Jednotlivé faktory jsou v grafech vykresleny jednak samostatně tak i ve společné kombinaci. Ze statistického vyhodnocení byl vytvořen vzorec pro výpočet drsnosti povrchu pro Ra i Rz. Za účelem porovnání vytvořených vzorců a vzorců uvedených v kapitole obrábění s lineární řeznou hranou byly vytvořeny grafy (graf 25 a Příloha 4), které porovnávají dosažené výsledky z provedeního experimentu u dlouhodobých testů řezivosti.



Graf 25: Porovnání teoretických vzorců a vytvořeného vzorce ze statistického vyhodnocení

Graf 25 znázorňuje porovnání teoretických vzorců získaných z rešeršní činnosti a vytvořeného vzorce z výpočtového modelu pro Rz. S ohledem na rozdílnost těchto křivek lze tvrdit, že námi zkoumaný proces obrábění s lineární řeznou hranou, včetně návrhu nástroje, stroje, řezného materiálu, makrogeometrie, chlazení, obráběného materiálu a řezných podmínek, dosahuje mnohonásobně lepších výsledků drsnosti povrchu Rz. Vzhledem k dostupným publikacím týkajících se obrábění s lineární řeznou hranou je zřejmé, že výzkum vedený v předchozích letech v této oblasti byl především na teoretické úrovni doplněný pouze několika experimenty.

Na obrobeném polotovaru z firmy Plasmametal byla provedena kapilární zkouška dle ČSN EN ISO 3452. Nanášení bylo prováděno opakovaně v pětiminutových intervalech. Po uplynutí stanovené doby byl přebytečný penetrant odstraněn a byla nanášena vývojka. Byla použita testovací sada

8 Diskuze výsledků

Hlavním cílem disertační práce byla změna současného způsobu obrábění slitiny NiCrBSi za účelem zvýšení produktivity procesu. Zvýšení produktivity bylo potvrzeno změnou dosavadní technologie broušení za technologii obrábění s definovanou geometrií břitu. Z hlediska splnění stanovené hypotézy byly vytvořeny dva funkční vzorky (Příloha 2, 3) s výpočtem účinnosti obráběcího procesu při porovnání s technologií broušení. První navržený funkční vzorek je schopen obrábět vysokými řeznými rychlostmi dosahujícími $v_c = 1000$ m/min, s kvalitním obroběným povrchem s drsností $R_a < 0,4$ μm . Dle provedeného výpočtu narostla účinnost procesu o **391,5 %** proti požadovaným 30 %. Druhý funkční vzorek je vytvořen z experimentů při nastavení úhlu sklonu ostří $\lambda_s = 50^\circ$, který rozšiřuje délku záběru během obrábění. Takto navržený funkční vzorek je schopen obrábět vysokými posuvovými rychlostmi $f_{ot} = 0,4$ mm s drsností obroběného povrchu $R_a < 0,4$ μm . Dle tohoto provedeného výpočtu narostla účinnost procesu o **900 %** proti požadovaným 30 %.

Dílčí krok ze stanovených cílů se týkal nalezení optimálního poměru mezi tloušťkou žárového nástřiku po aplikaci a odebranou tloušťkou s ohledem na adhezi povlaku. S ohledem na provedení optimalizace parametrů stříkání povlaků, kdy byl získán nástřík s minimálním množstvím defektů a vad (Obrázek 49), bylo možné předpokládat silnou adhezi nástřiku na základní materiál, což bylo potvrzeno (Obrázek 73). Z hlediska provedených experimentů je doporučeno provádět hrubovací řez s hloubkou řezu $a_p = 0,1$ mm z důvodu možné nerovnoměrné tloušťky nástřiku. Poté by následoval řez dokončovací s $a_p = 0,05$ mm pro získání požadovaných rozměrů a kvality povrchu. Zbývá tloušťka obroběného nástřiku již závisí na nastavených kritériích firmy Plasmametal a předpokládané náročnosti provozu zpracovávaných dílů.

Porovnání dosažených výsledků v této problematice je velice obtížné, jelikož neexistují publikace, které se zabývají konkrétně obrobitelností žárového nástřiku NiCrBSi. Při porovnání výsledků alespoň s publikacemi, které jsou tomuto tématu blízké, je zřejmé, že technologie obrábění s lineární řeznou hranou dosahuje mnohonásobně lepších výsledků kvality obroběného povrchu s vyšší životností řezné hrany. Disertační práce a její výsledky mohou být tímto základem pro další pokračování této studie např. v oblasti měření řezných sil při obrábění s lineární řeznou hranou nebo v nalezení dalších těžkoobrobitelných materiálů vhodných pro tento speciální způsob obrábění.

Na závěr je třeba zdůraznit, že tato disertační práce byla vypracována díky podpoře projektu Národního centra pro vědecký výzkum (NCKS), což jasně ukazuje význam investic do vědeckých projektů a vývoje nástrojů pro další rozvoj vědy. Realizace experimentů, opatření vzorků žárového nástřiku, konstrukce a výroba speciálního nástroje QCA a vývoj v oblasti břitových destiček bylo finančně velmi náročné a vyžadovaly významné investice. V tomto ohledu měl projekt NCKS klíčovou roli při zajištění těchto zdrojů, což umožnilo úspěšně provádět rozsáhlé experimenty v oblasti obrábění a vyvinout tak nezbytné kroky pro dokončení této disertační práce.

9 Závěr

V rámci spolupráce s firmou PLASMAMETAL, spol. s r.o. byla řešena problematika obrábění žárového nástřiků NiCrBSi vyrobeného metodou vysokorychlostního nástřiku plamenem (HVOF). Uvedený žárový nástřik je z důvodu svých specifických vlastností řazen do kategorie těžkoobrobitelných materiálů, proto se pro jeho obrobení využívá výhradně technologie broušení. Hlavní cíl disertační práce spočíval v nahrazení technologie broušení technologií soustružení speciální metodou obrábění s lineární řeznou hranou. Přínos změny technologie spočíval ve zkrácení výrobního času s výrazným snížením ekonomické náročnosti procesu. Dle uvedené hypotézy bylo minimální zvýšení účinnosti procesu stanoveno na 30 % proti současnému stavu.

V teoretické části byl zpracován ucelený odborný přehled všech ovlivňujících faktorů, které souvisí s problematikou obrábění žárového nástřiku NiCrBSi. Byl zde detailně rozebrán princip vytváření nástřiku včetně metalografického rozboru této slitiny a výsledné struktury nástřiku. V další části byl proveden soupis těžkoobrobitelných materiálů včetně přípustných materiálů pro jejich obrobení. Dále se práce zaměřovala na produktivní způsoby obrábění, včetně speciální technologie obrábění s lineární řeznou hranou. V rešeršní části bylo podrobně zpracováno několik publikací, které se věnují obrábění nástřiků a materiálů s vysokým obsahem niklu a chromu. Na závěr teoretické části byl proveden souhrn získaných informací, na jehož základě byl vypracován návrh cílů řešení disertační práce.

V úvodu experimentální části byl navržen speciální nástroj QCA (Užitný vzor v Příloze 1), ve kterém byl detailně rozebrán návrh tvaru a upnutí nástroje, zvolení velikosti a tvaru břitové destičky, způsob vedení procesní kapaliny do místa řezu a možnost regulace pomocí přidaných členů. Na tento nástroj byly v roce 2020 vytvořeny dva funkční vzorky a získány dva patenty s názvem *Obráběcí nástroj*. Následoval návrh typu použitých VBD, rozměry polotovarů pro nástřik, způsob upnutí a výběr testovacího stroje pro provedení experimentů. Hlavní část disertační práce se věnovala provedeným experimentům, ve kterých byly postupně získávány důležité znalosti v oblasti obrábění žárového nástřiku za použití technologie obrábění s lineární řeznou hranou. Při testování řezných materiálů byly využity i produktivní způsoby obrábění např. metoda vysokorychlostního obrábění HSC nebo vysokoposuvového obrábění HFC. V předposlední části došlo na základě předchozích experimentů ke zvolení optimálních řezných podmínek za účelem provedení statistického vyhodnocení při dlouhodobých testech řezivosti. Popis provedené implementace výsledků ve firmě Plasmametal s.r.o., spolu s požadavky pro uzavření projektu NCKS a výpočtem produktivity obrábění proti původnímu stavu, byl uveden v závěru práce.

S ohledem na dosažené výsledky z provedených experimentů lze konstatovat, že byly naplněny všechny stanovené cíle disertační práce, neboť byla potvrzena hypotéza optimalizace způsobu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi, a tím došlo ke zvýšení účinnosti procesu v řádu stovek procent. V sekci shrnutí dosažených cílů je charakterizován vliv procesních parametrů obrábění (v_c , f , λ_s , a_p) na drsnost obrobeného povrchu.

Na základě dosažených výsledků byla pro změnu způsobu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi vybrána čtvercová destička s označením SCMW 120408 z polykrystalického kubického nitridu bóru ve variantě s fullface a úpravou makrogeometrie v podobě fazetky $0,2 \times 20^\circ$. Při upevnění do nástroje QCA je možné využít celou délku břitu pro obrábění s lineární řeznou hranou v několika pozicích, pomocí korekce v Y ose. Z výsledků z dlouhodobých testů řezivosti (Příloha 5) byly vytvořeny dva funkční vzorky (Příloha 2, 3), s kterými je možné obrábět produktivními způsoby obrábění v HSC a HFC režimu s dosahovanou drsností povrchu $Ra < 0,4 \mu\text{m}$.

Graf 25 na stránce 112, znázorňuje porovnání teoretických vzorců získaných z rešeršní činnosti a vytvořeného vzorce z výpočtového modelu pro Rz. S ohledem na rozdílnost těchto křivek lze říci, že zkoumaný proces obrábění s lineární řeznou hranou dosáhl mnohonásobně lepších výsledků, než udává předpokládaná vypočtená hodnota drsnosti Rz na základě získaných publikací.

Získané výsledky, znalosti a vyhodnocení lze dále uplatnit v pokračování řešení problematiky obrábění v oblasti žárových nástřiků. Jednou z možných cest pokračování v tomto výzkumu je nalezení dalších řezných materiálů (např. řezná keramika, cermet), které dosáhnou podobně dobrých výsledků jako kubický nitrid bóru. Jako další způsob navázání na provedený výzkum je nasadě testování technologie obrábění s lineární řeznou hranou na jiných typech žárových nástřiků, např. Fe13Cr nebo Inconel, na které se také specializuje firma Plasmametal. Přímo na Katedře technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni navazujeme na získané výsledky z této disertační práce a dále pokračujeme ve zkoumání procesu obrábění s lineární řeznou hranou pomocí analýzy řezných sil a akustické emise. Z tohoto výzkumu vznikly čtyři diplomové práce v posledních dvou letech.

10 Literatura

- [1] HOUDKOVÁ, Š., VOSTŘÁK, M.: Comparison of NiCrBSi Coatings, HVOF Sprayed, Remelted by Flame and by High-Power Laser. *Brno, Czech Republic, (2013)*. Dostupné z: <http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/12/reports/1407.pdf>
- [2] Žárové nástřiky. *Tribo Engineering* [online]. Dostupné z: <https://www.triboing.cz/zarove-nastriky.html>
- [3] ČESÁNEK, Z.: *Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí*, [Disertační práce], (2015), Plzeň ZČU, FST, KMM
- [4] Žárové stříkání. *Plasmametal* [online]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [5] TAN, J. C., LOONEY, L., HASHMI, M. S. J.: Component Repair Using HVOF Thermal Spraying. *Journal of Materials Processing Technology. Volume 92-93 (1999) 203-208*. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00113-2
- [6] SIEGMANN, S., ABERT, Ch., 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop, *Surface and Coatings Technology. Volume 220, Pages 3-13, (2013)*, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.034>.
- [7] HERMANEK, F.J., Thermal Spray Terminology and Company Origins, *ASM International. (2001)*, ISBN: 0871707284.
- [8] ŘEHOŘ, Jan. *Závěrečná zpráva dílčího projektu NCK strojírenství TN01000015/08: Technologie žárových nástřiků a vývoj nástrojů pro jejich obrábění*, (2020). Plzeň: RTI ZČU v Plzni
- [9] KANDEVA, M., VENCL, A., KARASTOYANOV, D. Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies, (2016). ISBN: 978-954-322-858-4
- [10] HOUDKOVÁ, Š., SMAZALOVÁ, E., VOSTŘÁK, M., SCHUBERT, J. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies. *Surface and Coatings Technology* [online], Volume 253, 14–26, (2014). ISSN 02578972. Dostupné z: [doi:10.1016/j.surfcoat.2014.05.009](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.009)
- [11] BUYTOZ, S., ULUTAN, M., ISLAK, S., KURT, B., NURI ÇELIK, O. Microstructural and Wear Characteristics of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed NiCrBSi–SiC Composite Coating on SAE 1030 Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering* [online]. Volume 38(6), 1481–1491, (2013). ISSN 1319-8025, 2191-4281. Dostupné z: [doi:10.1007/s13369-013-0536-y](https://doi.org/10.1007/s13369-013-0536-y)

- [12] ZHANG, P. Performance of MCrAlX coatings: Oxidation, Hot corrosion and Interdiffusion, *Linköping Studies in Science and Technology*, [Disertační práce], (2019), Departement of Management and Engineering (IEI), Linköping University
- [13] LIU, J., WANG, Y., LI, H.: Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical behavior of NiCrBSi coatings during the plasma spray process. *Journal of Materials Processing Technology* 249, (2017). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.025
- [14] XAVIOR, A, MANOHAR, M., JEYAPANDIARAJAN, P., MADHUKAR, P. M.: Tool Wear Assessment During Machining of Inconel 718. *Published by Elsevier B.V. 2212-8271 © (2012)*. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.252
- [15] ZLÁMAL, T.: *Příspěvek k obrábění Ni superslitin a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*, [Disertační práce] (2015), Ostrava VŠB
- [16] BUKÁČEK, Z.: *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu*. Brno. [Diplomová práce], (2008). Vysoké učení technické v Brně, FST
- [17] HOFFMAN GROUP. GARANT ToolScout: Machining Handbook [online]. 2012 [cit. 2013-04-14]. ISBN 3-00-016882-6. Dostupné z: http://www.hoffmann-group.com/fileadmin/user_upload/1_International/catalog/en/ZHB/ZHB.pdf
- [18] Technická příručka Sandvik 2010, *RPB s.r.o.* [online]. (2010). Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_Intro.pdf
- [19] TEJKL, J.: *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. [Bakalářská práce], (2012). Vysoké učení technické v Brně, FST
- [20] STRAŽEJOVÁ, A.: *Supertvrdé řezné materiály a jejich efektivní využití* Brno. [Diplomová práce], (2009). Vysoké učení technické v Brně, FST
- [21] KOŽMÍN, P., KŘÍŽ, A., FULEMOVÁ, J. Frézování cermetovými nástroji. In *Strojírenská technologie Plzeň (2009)*. Plzeň: Západočeská univerzita. s. 1-6. ISBN: 978-80-7043-750-6
- [22] KŘÍŽ, A.: *Řezné materiály*, Podklady pro přednášky předmětu Materiály v obrábění. FST, ZČU, Plzeň
- [23] ŘEHOŘ, J.: Teoretické a experimentální studium problematiky HSC obrábění ocelí vysoké pevnosti a tvrdosti., [Disertační práce], (2004), Plzeň ZČU, FST, KTO.
- [24] KOCMAN, K., PROKOP, J., KOCMANOVÁ, A., Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění, *MM Průmyslové spektrum*. www.mmspektrum.com [online]. (2001), Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni>

- [25] ŘEHOŘ, J.: *Teorie obrábění*. Podklady pro přednášky předmětu Teorie obrábění (2017). ZČU Plzeň
- [26] BRYCHTA, J., *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*, (2011). Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [27] SPÁČIL, R., *Trvanlivost VBD při čelním frézování*. Brno. [Bakalářská práce], (2016). Vysoké učení Technické v Brně
- [28] Efektivita procesu HFM. *Modern Machine Shop* [online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>
- [29] RAUSCH, S., BIERMANN, D.: Grinding of Hard-material-coated Forming Tools on Machining Centers. *Published by Elsevier B.V. 1877-7058 © (2017)*. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.069
- [30] High Velocity Grind. *Cutting Tool Engineering, Volume 63 (2011)*. Dostupné z: http://www.ctemag.com/aa_pages/2011/110205-Grinding.html
- [31] FARSKÝ, J.: Grinding Inconel 718 Using a Galvanic Grinding Wheel. *Sborník příspěvků (2019)*, str. 127-132. DOI: 10.1007/s13369-014-1343-9. ISBN 978-80-261-0860-3. Dostupné z: https://fst.zcu.cz/export/sites/fst/Soubory/prostudenty/svocFST/ESborniky_SVOC_FST/V2_Svoc_2019_sbornik.pdf
- [32] HLAVATÝ, D. *Problematika broušení tvrdokovových materiálů*, [Diplomová práce], (2014), Ostrava VŠB
- [33] Orovnávání brusných kotoučů. *Tumplikovo* [online]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/orovnavani-brusnych-keramickych-kotoucu/>
- [34] LUBOVICS, I.: *Rychlostní broušení nástrojů a nářadí*, [Habilitační práce], (2006), Brno Vutbr
- [35] ZHANG, P., ZHANQIANG, L., DU, J.: On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: A review. *Journal of Manufacturing Processes 53:123-143*, (2020). DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.013
- [36] LÓPEZ, L., GUTIÉRREZ, A., LAMIKIZ, A.: Turning of Thick Thermal Spray Coatings. *ASM International (2001)*. JTTEE5 10:249-254. Dostupné z: <http://www.ehu.es/manufacturing/docpubli/43.pdf>
- [37] ZATLOUKAL, T.: *Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje*. [Diplomová práce], (2018), Plzeň ZČU, FST, KTO

[38] MONKA, P., MONKOVA, K., BALARA, M., HLOCH, S., REHOR, J., ANDREJ, A., SOMSAK, M., Design and experimental study of turning tools with linear cutting edges and comparison to commercial tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. Volume 85(9–12), 2325–2343, (2016). ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8065-3

[39] VASILKO, K., *Teória a prax trieskového obrábania*, (2009). Košice: Fakulta výrobných technológií v Košiciach. ISBN 9788055301523.

[40] Doporučené řezné podmínky. *Iscar* [online]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5568974&fnum=3757&map=IS&app=0&GFSTYP=M&isoD=1>

[41] Kvalita soustruženého povrchu. *Sandvik Coromant* [online]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>

[42] Břitové destičky typu Wiper. *Walter* [online]. Dostupné z: <https://cdn.walter-tools.com/files/sitecollectiondocuments/technicalinformation/cs-cz/wiper-indexable-inserts-application-information-cs-cz.pdf>

[43] VASILKO, K., Highly Productive Tools For Turning And Milling. *Technological Engineering*, Volume 12, (2015). Dostupné z: doi:10.1515/teen-2015-0009

[44] MONKA, P. Machining with Linear Cutting Edge. Vienna, *Springer Vienna*, s. 777-784, (1996). ISBN 978-3-7091-2678-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7091-2678-3_94

[45] FILIPPOV, A. V. Cut-layer cross section in oblique turning. *Russian Engineering Research*, Volume 34(11), 718-721, (2014). ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X14110070

[46] FILIPPOV, A. V., E. O. FILIPPOVA a P. A. CHAZOV. Cutting-force components in turning by tools with no cutting tip. *Russian Engineering Research*. Volume 36(12), 1040-1043, (2016). ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X16120066

[47] FILIPPOV, A. V. Cut-layer cross section in oblique turning by a single-edge tool with a curved front surface. *Russian Engineering Research*. Volume 35(5), 381-384, (2015). ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X15050123

- [48] Stellite 6 Alloy. *Doloro Stellite* [online]. Dostupné z: <http://exocor.com/downloads/product-datasheets/Stellite-6-Datasheet.pdf>
- [49] Thermal Spray Materials Guide. *Oerlikon metco* [online]. Dostupné z: http://www.sianco.com.ar/media/productos/TS_MaterialGuide_EN_2017.04.pdf
- [50] CLAUB, B., LIBORIUS, H., LINDNER, T., LOBEL, M., SCHUBLER, A., LAMPKE, T.: Influence of the Cutting Parameters on the Surface Properties in Turning of a Thermally Sprayed AlCoCrFeNiTi Coating. *Published by Elsevier B.V. 2212-8271 © 2020*. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.015
- [51] OZTURK, S.: Machinability of Stellite-6 Coatings with Ceramic Inserts and Tungsten Carbide Tools. *Arabian Journal for Science and Engineering* [online]. volume 39(10), 7375-7383, (2014). DOI: 10.1007/s13369-014-1343-9. ISSN 1319-8025. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s13369-014-1343-9>
- [52] Stellite 6 Alloy. *Doloro Stellite* [online]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/346436988/Stellite-6-Datasheet-pdf>
- [53] RAKESH, M., DATTA, S., MAHAPATRA, S. S.: Effects of Depth of Cut during Machining of Inconel 718 using Uncoated WC Tool. *Conference of Materials Processing and Characterization, ICMPC-2019 (2019)*. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.300
- [54] KOCIÁN, P.: *Obrábění materiálů typu Inconel 718*. [Bakalářská práce], (2012). Plzeň, ZČU, FST
- [55] D'ADONNA, D. M., RAYKAR, S., NARKE, M. M.: High speed Machining of Inconel 718: Tool Wear and Surface Roughness Analysis. *Published by Elsevier B.V. 2212-8271 © (2017)*. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.004
- [56] Stroj CTX Beta 1250. *DMG Mori* [online]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/soustruzeni/soustruzeni-frezovani/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc>
- [57] T.S. Sidhu, S. Prakash, R.D. Agrawal, Characterisations of HVOF sprayed NiCrBSi coatings on Ni – and Fe-based superalloys and evaluation of cyclic oxidation behaviour of some Ni-based superalloys in molten salt environment, *Thin Solid Films*, Volume 515, Issue 1, (2006), Pages 95-105, ISSN 0040-6090, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.041>.
- [58] T. Liyanage, G. Fisher, A.P. Gerlich, Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW), *Surface and Coatings Technology*, Volume 205, Issue 3, (2010), Pages 759-765, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.095>.

11 Přílohy

Příloha 1: Užitiná vzor nástroje QCA4

Užitný vzor

Obráběcí nástroj

DATUM ZÁPISU:

08. 12. 2020

ČÍSLO ZÁPISU:

34 647

EVIDENČNÍ ČÍSLO:

UV006-2020-21200

KONTAKTNÍ OSOBA:

doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.

Kontaktní tel.: + 420 377638500

rehor4@rti.zcu.cz

Ing. Tomáš Zatloukal

Kontaktní tel.: + 420 735715840

tzatlouk@rti.zcu.cz

Ing. Michal Povolný

Kontaktní tel.: +420 605165050

mpovolny@rti.zcu.cz

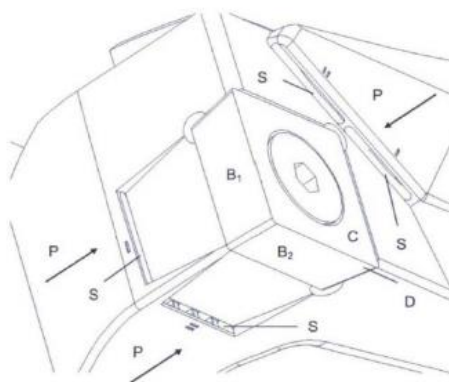
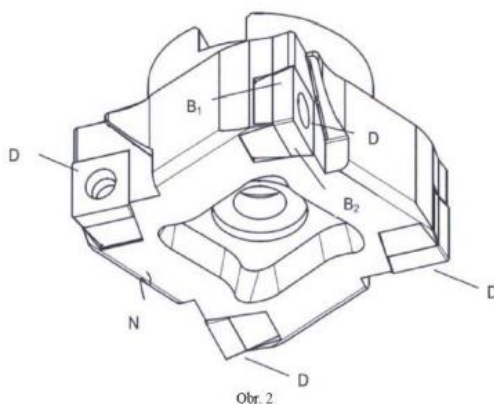
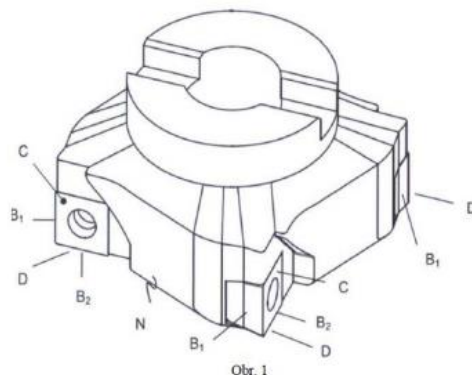
PRACOVNÍŠTĚ:

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta strojní

Regionální technologický institut

Univerzitní 8, 301 00 Plzeň



V souladu s definicí uvedenou v dokumentu Úřadu vlády ČR, Č.j.:26822/2017-OMP „Definice druhů výsledků“ jako samostatné přílohy č. 4 „Metodiky hodnocení výzkumných organizací a hodnocení programů účelové podpory výzkumu, vývoje a inovací (metodika 17+)“ je uplatňován užitný vzor „Obráběcí nástroj“.

Funkční vzorek vznikl v přímé souvislosti s dílčím projektem NCKS s označením TN01000015 - DP08.

Obráběcí nástroj je uzpůsobený pro upnutí do obráběcího stroje, tvořený alespoň jednou řeznou destičkou D, upevněnou v nosiči řezné destičky N, přičemž nosič řezné destičky obsahuje vícekanalový přívod chladicího média P. Nosič N je zčásti tvořen odlehčenou strukturou tvořenou prostorovou sítí. Vyměnitelná řezná destička D je určena k obrábění polotovaru z čela C řezné destičky D i obou boků B1 a B2 řezné destičky D, kde k čelům C a bokům B1 a B2 řezné destičky D je vyústěn přívod P chladicí kapaliny. Výhodné je, pokud je přívod chladicí kapaliny vyústěn spárou S, která umožňuje rovnoměrný řízený rozstřík chladicí kapaliny na celou délku řezného ostří/hrany řezné destičky. Výhodné rovněž je, pokud má přívodní kanál proměnlivý profil. Takové provedení umožňuje distribuci chladicí kapaliny s minimální průtočnou ztrátou na kritické oblasti řezné destičky o požadované intenzitě. Ve variantním provedení je spára členěna přepážkami z důvodu usměrnění toku chladicí kapaliny na břity řezné destičky.

Příloha 2: Funkční vzorek (FV1) projektu NCKS

Funkční vzorek

Řezný nástroj TTSL - NiCrBSi

EVIDENČNÍ ČÍSLO:
FV/036/2020/21200

KONTAKTNÍ OSOBA:

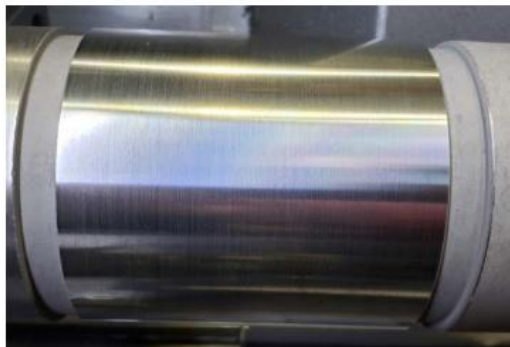
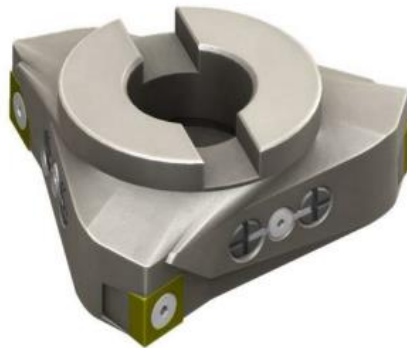
doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
Kontaktní tel.: + 420 377638500
rehor4@kto.zcu.cz

Ing. Tomáš Zatloukal
Kontaktní tel.: + 420 735715840
zatlouk@kto.zcu.cz
Jan Filipenský
Kontaktní tel.: +420 603481351
filipensky@plasmametal.cz

PRACOVNÍŠTĚ:

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta strojní
Regionální technologický institut
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Plasmametal, spol. s r.o.
Tovární 1e, 643 00 Brno-Chrlice



V souladu s definicí uvedenou v dokumentu Úřadu vlády ČR, Č.j.:26822/2017-OMP „Definice druhů výsledků“ jako samostatné přílohy č. 4 „Metodiky hodnocení výzkumných organizací a hodnocení programů úřadové podpory výzkumu, vývoje a inovací (metodika 17+) je uplatňován funkční vzorek „Řezný nástroj TTSL – NiCrBSi“

Funkční vzorek vznikl v přímé souvislosti s dílčím projektem NCKS s označením TN01000015 - DP08.

Hlavním přínosem funkčního vzorku je zvýšení produktivity při obrábění žárového nástřiku NiCrBSi na 5 – ti osém soustružnickém centru. Po nanesení žárového nástřiku je třeba tento nástřik obrobit pro dosažení požadovaných vlastností jako je např. drsnost povrchu, kruhovitost nebo válcovitost. Materiál NiCrBSi spadá do kategorie niklových slitin, které se řadí z důvodu svých vlastností mezi těžkoobrobitelné materiály. Pro obrobení nástřik NiCrBSi se v současné době využívá výhradně technologie broušení. Funkční vzorek se skládá z nástroje vytisknutého technologií kovového 3D tisku a břitové destičky s upravenou mikrogeometrií. V nástroji jsou vytvořeny odlehčující prvky v podobě gyroidních struktur. Navržené břitové destičky nejsou v nástroji orientovány řezným břitem do osy nástroje, ale jsou pootočený o 30°. S takto navrženým nástrojem lze břitovou destičku polohovat pro obrábění s lineární řeznou hranou. Použitá břitová destička je typu SCMW 120408 s (full face) pájenou řeznou hranou z kubického nitridu bóru, na které je vytvořena fazeta o velikosti 0,2 mm se záporným sklonem 20°. Funkční vzorek vznikl z několika zkušebních experimentů, při kterých byly zjišťovány řezné podmínky. Takto navržený funkční vzorek je schopen obrábění vysokými řeznými rychlostmi dosahujícími až $v_c = 1000$ m/min s požadovanou kvalitou obrobeného povrchu v podobě drsnosti $R_a < 0,4$ μm .

Příloha 3: Funkční vzorek (FV2) projektu NCKS

Funkční vzorek

Řezný nástroj TTSL - FeCr

EVIDENČNÍ ČÍSLO:
FV/037/2020/21200

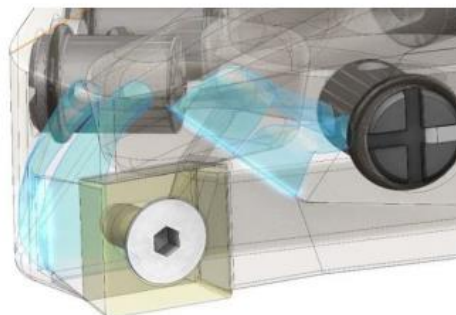
KONTAKTNÍ OSOBA:

doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
Kontaktní tel.: + 420 377638500
rehor4@kto.zcu.cz
Ing. Tomáš Zatloukal
Kontaktní tel.: + 420 735715840
zatlouk@kto.zcu.cz
Jan Filipenský
Kontaktní tel.: +420 603481351
filipensky@plasmametal.cz

PRACOVIŠTĚ:

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta strojní
Regionální technologický institut
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Plasmametal, spol. s r.o.
Továrni 1e, 643 00 Brno-Chrlice

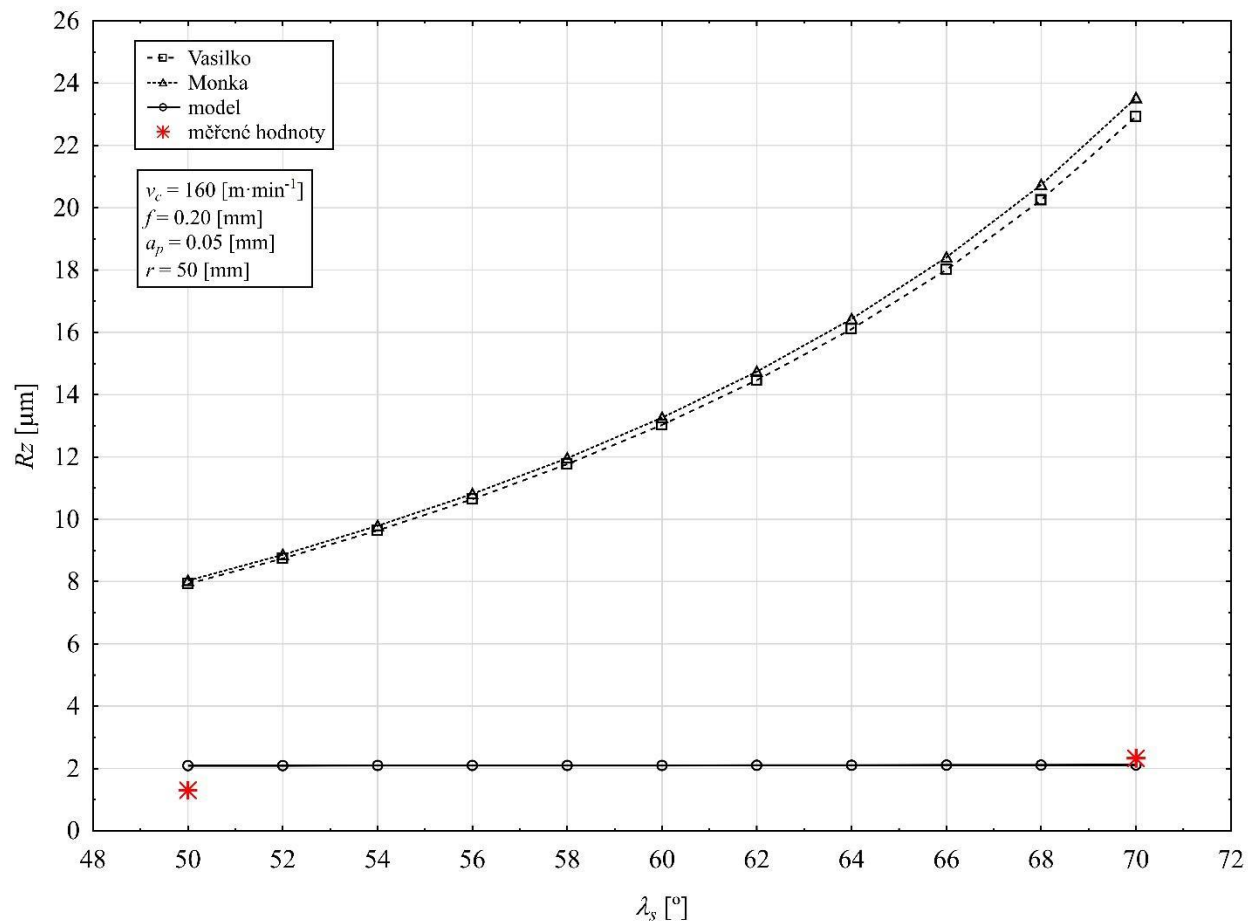


V souladu s definicí uvedenou v dokumentu Úřadu vlády ČR, Č.j.:26822/2017-OMP „Definice druhů výsledků“ jako samostatné přílohy č. 4 „Metodiky hodnocení výzkumných organizací a hodnocení programů účelové podpory výzkumu, vývoje a inovací (metodika 17+) je uplatňován funkční vzorek „Řezný nástroj TTSL – FeCr“.

Funkční vzorek vznikl v přímé souvislosti s dílčím projektem NCKS s označením TN01000015 - DP08.

Hlavním přínosem funkčního vzorku je zvýšení produktivity při obrábění žárového nástřiku na 5 – ti osém soustružnickém centru. Po nanesení žárového nástřiku je třeba tento nástřik obrobit pro dosažení požadovaných vlastností jako je např. drsnost povrchu, kruhovitost nebo válcovitost. Materiál FeCr spadá do kategorie niklových slitin, které se řadí z důvodu svých vlastností mezi těžkoobrobitelné materiály. Funkční vzorek se skládá z nástroje vytisknutého technologií kovového 3D tisku a břitové destičky s upravenou mikrogeometrií. V nástroji jsou navrženy vnitřní kanálky, které svojí konstrukcí zajišťují minimální ztráty tlaků řezné kapaliny. Umístění kanálků a jejich výstupní tvar umožňuje přívod procesní kapaliny po celé délce řezné hrany. Navržené břitové destičky nejsou v nástroji orientovány řezným břitem do osy nástroje, ale jsou pootočeny o 30°. S takto navrženým nástrojem lze břitovou destičku polohovat pro obrábění s lineární řeznou hranou. Použitá břitová destička je typu SCMW 120408 s (full face) řeznou hranou z kubického nitridu bóru a fazetou 0,2 mm. Během obrábění je nástroj pootočen o dalších 20° s výsledným úhlem sklonu ostří $\lambda_s = 50^\circ$. Tento způsob natočení rozšiřuje délku záběru během obrábění. Takto navržený funkční vzorek je tímto schopen obrábění vysokými posuvovými rychlostmi $f_{ot} = 0,4$ mm s kvalitou obrobeného povrchu a drsností $Ra < 0,4$ μm .

Příloha 4: Porovnání teoretických vzorců se vzorcem ze statistického vyhodnocení.



Příloha 5: Výsledky z dlouhodobých testů řezivosti

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebenění čelo	Opotřebenění hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1		
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
		1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER						1. pozice	2. pozice	3. pozice			
160	0,05	0,4	70,00	1,00	7_1															
1	100	1,2	1,18	1,22	1,20	6,7	5,4	5,2	5,77	0,12	0,06	99,51	0,010	99,41	99,405	99,40				
2	200	1,25	1,44	1,38	1,36	5,2	6,1	6,3	5,87	0,13	0,06	99,41	0,010	99,33	99,325	99,32				
3	300	1,39	1,46	1,42	1,42	5,6	6,3	7,2	6,37	0,13	0,07	99,31	0,020	99,24	99,23	99,22				
4	400	1,33	1,54	1,4	1,42	6,1	6,7	7,7	6,83	0,14	0,07	99,21	0,015	99,145	99,14	99,13				
5	500	1,74	1,72	1,63	1,70	7,4	6,7	6,6	6,90	0,14	0,07	99,11	0,020	99,04	99,035	99,02				

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebenění čelo	Opotřebenění hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1		
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
		1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER						1. pozice	2. pozice	3. pozice			
160	0,05	0,2	70	2	7_2															
1	100	0,39	0,41	0,38	0,39	2,8	2,0	2,2	2,33	0,06	0,035	99,41	0,01	99,335	99,33	99,325				
2	200	0,4	0,37	0,29	0,35	3,5	2,7	2,0	2,73	0,071	0,046	99,31	0,01	99,24	99,24	99,23				
3	300	0,37	0,4	0,39	0,39	2,3	2,8	2,4	2,50	0,072	0,051	99,21	0,01	99,145	99,14	99,135				
4	400	0,31	0,42	0,37	0,37	2,0	2,3	2,3	2,20	0,073	0,053	99,11	0,015	99,05	99,04	99,035				

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebenění čelo	Opotřebenění hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1		
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
		1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER						1. pozice	2. pozice	3. pozice			
160	0,05	0,4	50	3	7_3															
1	100	0,27	0,28	0,27	0,27	2,5	1,7	1,9	2,03	0,061	0,043	99,41	0,01	99,31	99,32	99,315				
2	200	0,30	0,28	0,27	0,28	2,0	1,8	1,7	1,83	0,062	0,046	99,31	0,02	99,24	99,24	99,22				
3	300	0,33	0,35	0,33	0,34	1,7	1,9	1,9	1,83	0,063	0,047	99,21	0,015	99,15	99,145	99,135				
4	400	0,31	0,28	0,31	0,30	1,9	1,7	1,7	1,77	0,063	0,047	99,11	0,015	99,05	99,04	99,035				

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebenění čelo	Opotřebenění hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1		
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
		1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER						1. pozice	2. pozice	3. pozice			
160	0,05	0,2	50	4	7_4															
1	100	0,19	0,23	0,22	0,21	1,2	1,4	1,3	1,30	0,049	0,038	99,35	0	99,23	99,23	99,23				
2	200	0,29	0,29	0,29	0,29	1,6	1,4	1,6	1,53	0,049	0,047	99,25	0,005	99,16	99,16	99,155				
3	300	0,34	0,22	0,28	0,28	1,9	1,2	1,6	1,57	0,06	0,064	99,15	0,01	99,09	99,09	99,08				
4	400	0,38	0,35	0,43	0,39	2,0	2,0	2,5	2,17	0,063	0,066	99,45	0,01	99,35	99,345	99,335				

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebenění čelo	Opotřebenění hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1		
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
		1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER						1. pozice	2. pozice	3. pozice			
240	0,05	0,4	70	5	8_1															
1	100	1,34	1,45	1,18	1,32	6,3	6,1	4,8	5,73	0,115	0,051	99,51	0,01	99,415	99,41	99,405				
2	200	1,42	1,62	1,34	1,46	7,6	7,5	7,4	7,50	0,121	0,077	99,41	0,01	99,315	99,315	99,305				
3	300	1,42	1,68	1,51	1,54	6,2	7,2	7,3	6,90	0,123	0,077	99,31	0,015	99,225	99,22	99,21				
4	400	1,51	1,76	1,52	1,60	6,5	7,0	6,3	6,60	0,124	0,08	99,21	0,015	99,125	99,12	99,11				

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebenění čelo	Opotřebenění hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1		
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
		1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER						1. pozice	2. pozice	3. pozice			
240	0,05	0,2	70	6	8_2															
1	100	0,32	0,35	0,34	0,34	1,7	3,1	2,1	2,30	0,086	0,034	99,82	0,01	99,73	99,73	99,725				
2	200	0,25	0,24	0,21	0,23	2,8	1,6	1,4	1,93	0,092	0,043	99,72	0,01	99,635	99,63	99,625				
3	300	0,37	0,27	0,45	0,36	2,1	1,7	2,4	2,07	0,095	0,048	99,62	0,01	99,54	99,54	99,53				
4	400	0,42	0,31	0,45	0,39	2,4	2,0	2,4	2,27	0,097	0,05	99,52	0,015	99,445	99,435	99,43				

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebení čelo	Opotřebení hřbet	Výchozí průměr	max. rozdíl	Rozměr - pootočení 1			
240	0,05	0,4	50	7	8_3	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	1. pozice	2. pozice	3. pozice					
1	100	0,21	0,28	0,22	0,24	1,8	1,8	1,4	1,67	0,041	0,033	99,53	0,010	99,455	99,45	99,445					
2	200	0,19	0,19	0,21	0,20	1,4	1,3	1,5	1,40	0,043	0,047	99,43	0,015	99,36	99,355	99,345					
3	300	0,26	0,25	0,26	0,26	1,7	1,5	1,6	1,60	0,043	0,053	99,33	0,010	99,26	99,255	99,25					
4	400	0,31	0,31	0,27	0,30	1,8	2,9	1,7	2,13	0,047	0,063	99,23	0,015	99,165	99,16	99,155					
5	500	0,35	0,3	0,28	0,31	2,3	1,7	1,7	1,90	0,048	0,065	99,13	0,015	99,065	99,06	99,05					
6	600	0,25	0,26	0,27	0,26	1,5	1,5	1,5	1,50	0,062	0,074	99,21	0,010	99,14	99,135	99,13					
7	700	0,25	0,24	0,21	0,23	1,6	1,5	1,3	1,47	0,063	0,075	99,35	0,010	99,28	99,28	99,27					
8	800	0,28	0,33	0,42	0,34	1,6	1,9	2,5	2,00	0,067	0,88	99,25	0,010	99,18	99,175	99,17					
9	900	0,4	0,41	0,50	0,44	2,3	2,0	2,5	2,27	0,068	0,089	99,15	0,010	99,08	99,075	99,07					
10	1000	0,42	0,48	0,41	0,44	2,2	2,6	3,3	2,70	0,069	0,091	99,13	0,010	99,07	99,065	99,06					

Vc [m/min]	ap [mm]	F [mm/ot]	λ [°]	Číslo vzorku	20° CBN	Drsnost - na stroji								Opotřebení čelo	Opotřebení hřbet	Výchozí průměr	Nominální průměr	Rozměr - pootočení 1		
240	0,05	0,2	50	8	8_4	Ra [μm]				Rz [μm]				[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Počet přejezdů	Vzdálenost [mm]	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	1. pozice	2. pozice	3. pozice	PRUMER	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	1. pozice	2. pozice	3. pozice				
1	100	0,18	0,16	0,18	0,17	1,1	1,1	1,0	1,07	0,033	0,037	99,68	0,01	99,60	99,595	99,59				
2	200	0,20	0,21	0,27	0,23	1,2	1,2	1,6	1,33	0,036	0,037	99,58	0,02	99,51	99,50	99,49				
3	300	0,24	0,26	0,31	0,27	1,5	1,4	1,7	1,53	0,039	0,039	99,48	0,02	99,415	99,405	99,395				
4	400	0,29	0,24	0,33	0,29	1,7	1,6	1,8	1,70	0,049	0,042	99,38	0,015	99,315	99,305	99,30				
5	500	0,24	0,23	0,27	0,25	2,0	1,3	1,6	1,63	0,056	0,044	99,28	0,015	99,215	99,21	99,20				

12 Přehled publikačních činností

Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu disertace:

- [1] POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J., ŘEHOŘ, J. a ZATLOUKAL, T. *Study of clamping system plasticity for reaming tool*. In Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation". Vídeň: DAAAM International Vienna, 2019. s. 1041-1048. ISBN: 978-3-902734-22-8, ISSN: 1726-9679
- [2] ZATLOUKAL, T., GOMBÁR, M., FULEMOVÁ, J., ŘEHOŘ, J. a POVOLNÝ, M. *Optimization of the thermal spraying process depending on the surface roughnes*. In Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation". Vídeň: DAAAM International Vienna, 2019. s. 1026-1033. ISBN: 978-3-902734-22-8, ISSN: 1726-9679
- [3] ZATLOUKAL, T., GOMBÁR, M., ŘEHOŘ, J., FULEMOVÁ, J. a POVOLNÝ, M. *Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů*. In Sborník příspěvků. Plzeň: ZČU v Plzni, 2019. s. 2-12. ISBN: 978-80-261-0829-0
- [4] ZATLOUKAL, T., ŘEHOŘ, J., FULEMOVÁ, J. a POVOLNÝ, M. *Optimization of the machining process of NiCrBSi thermal spraying*. In Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. Vienna: DAAAM International Vienna, 2020. s. 632-637. ISBN: 978-3-902734-29-7, ISSN: 1726-9679
- [5] POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a ŘEHOŘ, J. *Construction of tool for machining hard materials*. In Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Vienna: DAAAM International, 2021. s. 299-305. ISBN: 978-3-902734-33-4, ISSN: 1726-9679
- [6] FILIPENSKÝ, J. REHOR, J. ZATLOUKAL, T. *Žárový nástřík OT – FeCr*. 2020.
- [7] ZATLOUKAL, T. *APPLICATION OF LINEAR CUTTING EDGE TECHNOLOGY FOR MACHINING NICRBSI THERMAL SPRAY*. In Proceedings of the 33rd International DAAAM Virtual Symposium. Vienna: DAAAM International Vienna, 2022. s. 313-318. ISBN:978-3-902734-36-5, ISSN: 1726-9679
- [8] ZATLOUKAL, T. MARŠÁLEK, O. SYROVÁTKA, Š. *MACHINABILITY OF THERMAL SPRAY STELLITE 6 WITH CHEMICAL ANDMECHANICAL ANALYSIS*. 33RD DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION, 2022,roc. 33, c. 1, s. 307-312. ISSN: ISSN 1726-9679
- [9] FILIPENSKÝ, J. ZATLOUKAL, T. REHOR, J. *Žárový nástřík OT – NiCrBSi*. 2020.
- [10] MARŠÁLEK, O. HORÁK, L. SYROVÁTKA, Š. ZATLOUKAL, T. *INNOVATION IN THE PROBLEMATICS OF TURNING WITH A LINEAR CUTTING EDGE*. In Proceedings of the 33rd International DAAAM Virtual Symposium. Vienna: DAAAM International Vienna, 2022. s. 365-370. ISBN: 978-3-902734-36-5, ISSN: 1726-9679

Seznam vlastních prací nevztahujících se k tématu disertace:

- [1] ZATLOUKAL, T. POKORNÁ, V. MARŠÁLEK, O. SYROVÁTKA, Š. ANALYSIS OF AIR VALVE ASSEMBLY TECHNOLOGY. In Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Vienna: DAAAM International, 2021. s. 294-298. ISBN: 978-3-902734-33-4, ISSN: 1726-9679
- [2] ŘEHOŘ, J., FULEMOVÁ, J., KUTLWAŠER, J., GOMBÁR, M., HARNIČÁROVÁ, M., KUŠNEROVÁ, M., VAGASKÁ, A., POVOLNÝ, M., VALÍČEK, J. a ZATLOUKAL, T. ANOVA analysis for estimating the accuracy and surface roughness of precisely drilled holes of steel 42CrMo4 QT. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2023, roč. 126, č. 1-2, s. 675-695. ISSN: 0268-3768
- [3] SÝKORA, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., KROFT, L. a SYROVÁTKA, Š. Study of the influence of cutting tool geometry during turning of submillimetre nickel parts. In Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Vienna: DAAAM International, 2021. s. 395-401. ISBN: 978-3-902734-33-4, ISSN: 1726-9679
- [4] SYROVÁTKA, Š. CERMÁK, A. KOŽMÍN, P. MARŠÁLEK, O. ZATLOUKAL, T. TANGENTIAL LASER MACHINING USING FS-PULSED LASER. In Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Vienna: DAAAM International 2021. s. 685-691. ISBN: 978-3-902734-33-4, ISSN: 1726-9679
- [5] MILSIMEROVÁ, A. BÍCOVÁ, K. KROFT, L. KUTLWAŠER, J. ZATLOUKAL, T. Innovation of Teaching of Mechanical Engineering Technology using a 3D Print. In Annual International Conference on Business, Economics, Education Research and Social Sciences. THE ASSOCIATION OF RESEARCH & ACADEMIC TRAINING, 2019. s. 14. ISBN: 978-969-683-927-9
- [6] MARŠÁLEK, O. FULEMOVÁ, J. ZATLOUKAL, T. SYROVÁTKA, Š. MACHINABILITY OF SPRING STEEL 42SICR. In Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Vienna: DAAAM International 2021. s. 433-438. ISBN:978-3-902734-33-4, ISSN: 1726-9679
- [7] OPATOVÁ, K. ZATLOUKAL, T. JIRKOVÁ, H. VOLKMANNOVÁ, J. Testing of wear properties of inserts made from semi-solid processed experimental steel. In IOP Conference Series - Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing LTD, 2022. s. nestránkováno. ISBN: neuvedeno, ISSN: 1757-8981

Patenty:

- [1] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. Bubeneč, Praha 6, Česká republika, 2021.
- [2] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. Bubeneč, Praha 6, Česká republika, 2021.

Patenty:

- [1] ŘEHOŘ J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. 2021, RIV/49777513:23210/21:43964158
- [2] ŘEHOŘ J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. 2021, RIV/49777513:23210/21:43964159

Užitné vzory:

- [1] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. Praha, 2020, RIV/49777513:23210/20:43961640.
- [2] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. Praha, 2020, RIV/49777513:23210/20:43961641.

Souhrnné výzkumné zprávy:

- [1] POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J., ŘEHOŘ, J. a ZATLOUKAL, T. *Přípravek pro měření radiálních naklápěcích segmentů s balickou kontaktní plochou*. GTW BEARINGS, s.r.o., 2020, RIV/49777513:23210/20:43958693.

Ověřené technologie:

- [1] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O., VYSKOČIL, J., BLAŽEK, J. a MAREŠ, P. *Technologie HF obrábění*. 2020, RIV/49777513:23210/20:43961344.
- [2] KROFT, L., ZATLOUKAL, T., SÝKORA, J. a POVOLNÝ, M. *Technologie obrábění tenkých niklových dílů*. 2021, RIV/49777513:23210/21:43963217.
- [3] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O. a FILIPENSKÝ, J. *Technologie rotačního frézování Inconel 718 – HVOF*. 2022, RIV/49777513:23210/22:43967935.
- [4] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O., VYSKOČIL, J., BLAŽEK, J. a MAREŠ, P. *Technologie rotačního frézování Inconel 718 – DMLS*. 2022, RIV/49777513:23210/22:43967939.
- [5] FILIPENSKÝ J., ZATLOUKAL T., ŘEHOŘ J. *Žárový nástřik OT – NiCrBSi*. 2020, RIV/49777513:23210/20:43961342

Funkční vzorky:

- [1] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J. a FILIPENSKÝ, J. *Řezný nástroj TTSL – NiCrBSi*. 2020, RIV/49777513:23210/20:43961337.
- [2] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J. a FILIPENSKÝ, J. *Řezný nástroj TTSL – FeCr*. 2020, RIV/49777513:23210/20:43961345.
- [3] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., KROFT, L., FULEMOVÁ, J. a POVOLNÝ, M. *Řezný nástroj pro HF obrábění*. 2020, RIV/49777513:23210/20:43961339.
- [4] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M. a ZATLOUKAL, T. *Řezný nástroj pro rotační frézování*. 2022, RIV/49777513:23210/22:43967951.
- [5] FILIPENSKÝ J., ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL T. *Žárový nástřik OT – FeCr*, 2020, RIV/ z49777513:23210/20:43961338.