

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P0715D270026 – Strojírenské technologie a materiály

DISERTAČNÍ PRÁCE

Vývoj a konstrukce nástroje pro obrábění žárových
nástřiků

Autor: Ing. Michal Povolný

Školitel: doc. Ing. Miroslav Gombár, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

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. 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.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli doc. Ing. Miroslavu Gombárovi, Ph.D. za odborné vedení a motivaci při řešení této práce. Dále bych rád poděkoval kolektivu Laboratoře Technologie Obrábění za podporu při zpracovávání práce. V neposlední řadě patří poděkování také mé rodině, ti všichni mi byli oporou jak ve studiu, tak v osobním životě. Děkuji.

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni

Rok odevzdání: 2023

| | | |
|-----------------------------|---|----------|
| AUTOR | Ing. Povolný | Michal |
| STUDIJNÍ PROGRAM | P0715D270026 – Strojírenské technologie a materiály | |
| VEDOUCÍ PRÁCE | doc. Ing. Gombár, Ph.D. | Miroslav |
| PRACOVIŠTĚ VEDOUCÍHO | Katedra technologie obrábění, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni | |
| NÁZEV PRÁCE | Vývoj a konstrukce nástroje pro obrábění žárových nástřiků | |

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | | | |
|---------------|-----|--|---------------------|-----|--|--------------------------------|---|
| Celkem | 120 | | Textová část | 120 | | Grafická část (přílohy) | 0 |
|---------------|-----|--|---------------------|-----|--|--------------------------------|---|

| | |
|--|--|
| STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY | Tato práce se zaměřuje na hledání alternativních přístupů pro efektivnější a přesnější obrábění žárových nástřiků, které se používají v průmyslových odvětvích, jako je automobilový, letecký, energetický a petrochemický průmysl. V rámci práce navrhuji speciální nástroj s lineární řeznou hranou s využitím topologické optimalizace pro optimalizaci materiálu, zvýšení tuhosti a efektivní chlazení řezného břitu. Cílem je zlepšit produktivitu, přesnost a životnost nástroje pro obrábění žárových nástřiků. |
| KLÍČOVÁ SLOVA | žárové nástřiky, topologická optimalizace, lineární řezná hrana, obrábění |

ANNOTATION OF THE DISSERTATION

Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen

Year of submission: 2023

| | | |
|--------------------------|--|----------|
| AUTHOR | Ing. Povolný | Michal |
| FIELD OF STUDY | P0715D270026 – Engineering Technologies and Materials | |
| SUPERVISOR | doc. Ing. Gombár, Ph.D. | Miroslav |
| INSTITUTION | Department of machining technology, Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia | |
| TITLE OF THE WORK | Design and construction of a tool for machining thermally sprayed coatings | |

Number of pages (A4 and A4 equivalents)

| | | | | | | | |
|--------------|-----|--|------------------|-----|--|-----------------------------------|---|
| Total | 120 | | Text part | 120 | | Graphic part (attachments) | 0 |
|--------------|-----|--|------------------|-----|--|-----------------------------------|---|

| | |
|--|---|
| BRIEF DESCRIPTION OF THE FOCUS, THEME, OBJECTIVE, FINDINGS AND BENEFITS | <p>This work focuses on finding alternative approaches for more efficient and accurate machining of thermal sprayed coatings in industries such as automotive, aerospace, energy, and petrochemical. In this work, I design a special tool with a linear cutting edge using topological optimization to optimize the material, increase the stiffness and efficient cooling of the cutting edge. The aim is to improve the productivity, accuracy, and tool life of the thermal sprayed coatings.</p> |
| KEYWORDS | thermal sprayed coatings, topological optimization, linear cutting edge, machining |

Obsah

| | |
|--|------------|
| 1. ÚVOD..... | 7 |
| 1.1. STANOVENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE..... | 8 |
| 2. PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ ŽÁROVÝCH NÁSTRÍKŮ | 10 |
| 3. OBRÁBĚNÍ LINEÁRNÍ ŘEZNOU HRANOU..... | 17 |
| 4. VYUŽITÍ AM A TO V KONSTRUKCI NÁSTROJŮ..... | 23 |
| 4.1. OPTIMALIZACE KONSTRUKCE..... | 23 |
| 4.1.1. <i>Rozměrová optimalizace</i> | 24 |
| 4.1.2. <i>Tvarová optimalizace</i> | 24 |
| 4.1.3. <i>Topologická optimalizace</i> | 25 |
| 4.2. ADITIVNÍ TECHNOLOGIE (AM)..... | 28 |
| 4.3. SOUČASNÝ STAV VYUŽITÍ AM A TO V KONSTRUKCI NÁSTROJŮ | 30 |
| 5. SOUHRN A HODNOCENÍ POZNATKŮ | 40 |
| 6. VÝVOJ NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ ŽÁROVÝCH NÁSTRÍKŮ | 43 |
| 6.1. MATERIÁL MS1..... | 43 |
| 6.2. QCA PROTOTYP..... | 44 |
| 6.3. QCA 1.0..... | 45 |
| 6.3.1. <i>Experiment soustružení</i> | 49 |
| 6.4. QCA 2.0..... | 63 |
| 6.4.1. <i>Experiment rotačního frézování</i> | 69 |
| 6.5. QCA TO PROTOTYP..... | 90 |
| 6.6. QCA TO 1.0..... | 96 |
| 6.7. QCA TO 2.0..... | 99 |
| 6.8. OVĚŘENÍ A FEM ANALÝZY | 101 |
| 6.8.1. <i>Napětí</i> | 103 |
| 6.8.2. <i>Deformace</i> | 105 |
| 7. IMPLEMENTACE TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ LINEÁRNÍ ŘEZNOU HRANOU | 106 |
| 8. DISKUSE VÝSLEDKŮ | 109 |
| 9. ZÁVĚR..... | 111 |
| 10. POUŽITÁ LITERATURA | 112 |

Seznam použitých tabulek

| | |
|---|-----|
| Tab. 6-1 Chemické složení materiálu MS1 [49] | 43 |
| Tab. 6-2 Mechanické vlastnosti materiálu MS1 [49] | 43 |
| Tab. 6-3 Souhrnná tabulka podmínek a drsností z experimentu soustružení | 53 |
| Tab. 6-4 Porovnání nejlepších hodnot drsností pro jednotlivé VBD | 54 |
| Tab. 6-5 Hodnoty drsností Ra a Rz pro řeznou rychlost $V_c=983$ [m/min] | 54 |
| Tab. 6-6 Popisná statistika proměnné VBD | 56 |
| Tab. 6-7 ANOVA pro typ VBD | 57 |
| Tab. 6-8 Analýza rozdílů středních hodnot drsnosti povrchu Ra v závislosti na použité VBD | 57 |
| Tab. 6-9 Popisná statistika Ra v závislé proměnné V_c | 57 |
| Tab. 6-10 Popisná statistika Ra v závislé proměnné f | 58 |
| Tab. 6-11 Hierarchická ANOVA pro závislost Ra na typu VBD a V_c | 59 |
| Tab. 6-12 Popisná statistika Ra v závislosti na proměnné VBD a V_c | 60 |
| Tab. 6-13 Hierarchická ANOVA pro závislost Ra na typu VBD a f | 61 |
| Tab. 6-14 Popisná statistika Ra v závislosti na proměnné VBD a f | 61 |
| Tab. 6-15 Tabulka řezných podmínek a typu VBD pro materiál DMLS | 75 |
| Tab. 6-16 Tabulka řezných podmínek a typu VBD pro materiál HVOF | 75 |
| Tab. 6-17 Souhrnná tabulka experimentu rotačního frézování | 76 |
| Tab. 6-18 Základní plán experimentu | 79 |
| Tab. 6-19 Všeobecná tabulka ANOVA | 79 |
| Tab. 6-20 ANOVA pro drsnost obrobeného povrchu Ra | 80 |
| Tab. 6-21 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou odezvu Ra | 81 |
| Tab. 6-22 ANOVA pro drsnost obrobeného povrchu Rz | 81 |
| Tab. 6-23 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou odezvu Rz | 82 |
| Tab. 6-24 ANOVA pro kruhovitost | 83 |
| Tab. 6-25 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou kruhovitost | 84 |
| Tab. 6-26 ANOVA pro válcovitost | 85 |
| Tab. 6-27 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou válcovitost | 86 |
| Tab. 6-28 ANOVA pro přímost | 86 |
| Tab. 6-29 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou přímost | 87 |
| Tab. 6-30 ANOVA pro celkové házení | 88 |
| Tab. 6-31 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocené celkové házení | 89 |
| Tab. 7-1 Řezné podmínky pro testování implementace nástroje | 107 |

Seznam použitých obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 2-1 Závislost drsnosti na poloměru zaoblení řezné hrany a posuvu [11] | 12 |
| Obr. 2-2 Detail na HVOF nástřik NiCrBSi – zvětšení 1000x (vlevo) a 500x (vpravo)..... | 12 |
| Obr. 2-3 Topografie povrchu nástřiku NiCrBSi | 13 |
| Obr. 2-4 Plastické deformace při obrábění homogenního materiálu (a) a žárového nástřiku (b) [19]... | 14 |
| Obr. 2-5 Příklad poloměru ostří a fazetky 20° u VBD..... | 15 |
| Obr. 2-6 Vliv poloměru špičky nástroje na drsnost [20]..... | 15 |
| Obr. 2-7 Plocha odebírané vrstvy u obrábění lineární řeznou hranou..... | 16 |
| Obr. 3-1 Schéma průřezu odřezávané vrstvy při obrábění lineární řeznou hranou [25]..... | 18 |
| Obr. 3-2 Schéma plochy průřezu [25] | 18 |
| Obr. 3-3 Závislost hloubky řezu, poloměru a sklonu břitu na průřezu odřezávané vrstvy [25] | 19 |
| Obr. 3-4 Nástroj s lineární řeznou hranou a zakřivenou částí nástroje [26] [27]..... | 19 |
| Obr. 3-5 Přímé (a) a inverzní (b) soustružení lineární řeznou hranou [28] | 20 |
| Obr. 3-6 Nástroj pro experimenty s lineární hranou (vlevo) a s velkým rádiusem (vpravo) [30] | 20 |
| Obr. 3-7 Závislost řezných sil na obrábění lineární řeznou hranou [28] | 21 |
| Obr. 4-1 Typy optimalizační metody [4]..... | 23 |
| Obr. 4-2 Příklad rozměrové optimalizace [5] | 24 |
| Obr. 4-3 Příklad tvarové optimalizace [5] | 24 |
| Obr. 4-4 Příklad topologické optimalizace [5] | 25 |
| Obr. 4-5 Výsledky optimalizační metody SIMP podle použitých filtrů [32] | 26 |
| Obr. 4-6 Inspirace u bionických prvků rostlin při konstrukci v architektuře [35]..... | 27 |
| Obr. 4-7 Princip metody SLS [37]..... | 28 |
| Obr. 4-8 Příklad eliminace podpor s využitím bionické konstrukce a vhodného polohování dílu [39]..... | 29 |
| Obr. 4-9 Příklad mikroprutové soustavy [40] | 29 |
| Obr. 4-10 Typy použitých mřížek a výsledky tahové zkoušky [42] | 30 |
| Obr. 4-11 Frézovací nástroj s mikrostrukturou [25] | 31 |
| Obr. 4-12 Odlehčená fréza CoroMill 390 [43] | 32 |
| Obr. 4-13 Nástroj vyvinutý s využitím 3D tisku a optimalizace chladicích kanálků [44]..... | 32 |
| Obr. 4-14 Frézovací hlavička společnosti KOMET GROUP [45]..... | 33 |
| Obr. 4-15 Frézy vyrobené AM společnosti KOMET GROUP [45]..... | 33 |
| Obr. 4-16 Odlehčený nástroj „Bell“ s tlumícími vlastnostmi [46]..... | 34 |
| Obr. 4-17 Odlehčený nástroj s tělem z kompozitu [44] | 34 |
| Obr. 4-18 Odlehčená frézovací hlava s tělem z kompozitu [47]..... | 35 |
| Obr. 4-19 Frézovací hlava KRAKEN [48] | 35 |
| Obr. 4-20 Walter precision cooling [50]..... | 36 |
| Obr. 4-21 Soustružnický nůž od společnosti ICSAR s orientovaným chlazením [51]..... | 36 |
| Obr. 4-22 Porovnání orientovaného vysokotlakého chlazení s konvenčním [52] | 37 |
| Obr. 4-23 Patent nástroje s regulovatelným chlazením [53]..... | 38 |
| Obr. 4-24 Návrh rotačního nástroje s vnitřním chlazením [54] | 38 |
| Obr. 4-25 Rozprašovací tryska chladicí kapaliny [55]..... | 39 |
| Obr. 4-26 Příklady využití upínacího šroubu pro rozvod řezné kapaliny [56] [57] | 39 |
| Obr. 6-1 Prototyp obráběcího nástroje..... | 44 |
| Obr. 6-2 Obráběcí nástroj QCA 1.0..... | 45 |
| Obr. 6-3 Způsob vyvedení a výstupu chladicích kanálků | 45 |
| Obr. 6-4 Regulační čep procesní kapaliny | 46 |
| Obr. 6-5 Pohled na nástroj s vnitřním systémem vedení kanálků | 46 |

| | |
|---|----|
| Obr. 6-6 Pohled na nástroj s vnitřním odlehčením | 47 |
| Obr. 6-7 Vytištěný a obrobený nástroj QCA 1.0 | 47 |
| Obr. 6-8 Vytištěný nástroj v řezu | 48 |
| Obr. 6-9 Vyrobený nástroj při experimentu..... | 48 |
| Obr. 6-10 Návrh polotovaru pro nástřík NiCrBSi..... | 49 |
| Obr. 6-11 Upnutý polotovar ve stroji během pre-experimentu | 49 |
| Obr. 6-12 Obrobená plocha při vzniku vibrací | 50 |
| Obr. 6-13 Nově navržené polotovary pro nástřík NiCrBSi..... | 51 |
| Obr. 6-14 Nově navržený polotovar v průběhu experimentu s nástrojem nastaveným v řezu | 52 |
| Obr. 6-15 Třísky vzniklé při obrábění nástříku NiCrBSi..... | 52 |
| Obr. 6-16 Graf vyhodnocení nejlepší drsnosti Ra..... | 54 |
| Obr. 6-17 Graf závislosti drsnosti Ra na posuvu pro $V_c=983$ [m/min] | 55 |
| Obr. 6-18 Graf závislosti drsnosti Rz na posuvu pro $V_c=983$ [m/min] | 55 |
| Obr. 6-19 Grafické znázornění vlivu VBD na hodnotu drsnosti Ra | 56 |
| Obr. 6-20 Grafické znázornění vlivu V_c na hodnotu drsnosti Ra | 58 |
| Obr. 6-21 Grafické znázornění vlivu f na hodnotu drsnosti Ra | 59 |
| Obr. 6-22 Grafické znázornění vlivu rezné rychlosti a typu VBD na hodnotu drsnosti Ra | 60 |
| Obr. 6-23 Grafické znázornění vlivu posuvu a vlivu typu VBD na hodnotu drsnosti Ra | 62 |
| Obr. 6-24 Upravený výstup procesní kapaliny | 63 |
| Obr. 6-25 Upravený regulační čep | 64 |
| Obr. 6-26 Výstup kapaliny z chladicích kanálků..... | 64 |
| Obr. 6-27 Výpočtový model proudění v kanálku | 65 |
| Obr. 6-28 Analýza proudění: původní kanálek..... | 65 |
| Obr. 6-29 Tvar kanálku před a po optimalizaci | 66 |
| Obr. 6-30 Analýza proudění: optimalizovaný kanálek | 66 |
| Obr. 6-31 Graf rozložení hmotnostního průtoku na výstupu kanálku..... | 67 |
| Obr. 6-32 Obráběcí nástroj po úpravách regulačního čepu a kanálků..... | 67 |
| Obr. 6-33 Obráběcí nástroj ver 2.0 | 68 |
| Obr. 6-34 Nástroj s přídavky pro 3D tisk | 68 |
| Obr. 6-35 Schématické zobrazení rotačního frézování | 69 |
| Obr. 6-36 Nástroj a obrobek upnutý v obráběcí stroji před experimentem | 70 |
| Obr. 6-37 Obrobený povrch z pre-experimentu..... | 71 |
| Obr. 6-38 Drsnost měřeného vzorku | 71 |
| Obr. 6-39 Kruhovitost měřeného vzorku..... | 72 |
| Obr. 6-40 Válcovitost měřeného vzorku..... | 72 |
| Obr. 6-41 Vzorky HVOF před obráběním..... | 74 |
| Obr. 6-42 Vzorky DMLS po obrábění..... | 74 |
| Obr. 6-43 Graf drsnosti Ra po obrábění | 77 |
| Obr. 6-44 Graf drsnosti Rz po obrábění | 77 |
| Obr. 6-45 Graf drsnosti Ra pro jednotlivé technologie..... | 78 |
| Obr. 6-46 Graf drsností Rz pro jednotlivé technologie..... | 78 |
| Obr. 6-47 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy Ra..... | 80 |
| Obr. 6-48 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy Ra..... | 81 |
| Obr. 6-49 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy Rz..... | 82 |
| Obr. 6-50 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy Rz..... | 83 |
| Obr. 6-51 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy kruhovitosti..... | 83 |
| Obr. 6-52 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy kruhovitosti | 84 |
| Obr. 6-53 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy válcovitosti..... | 85 |

| | |
|--|-----|
| Obr. 6-54 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy válcovitosti | 86 |
| Obr. 6-55 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy přímosti | 87 |
| Obr. 6-56 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy přímosti | 88 |
| Obr. 6-57 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy celkového házení..... | 88 |
| Obr. 6-58 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy celkového házení..... | 89 |
| Obr. 6-59 Vlastnosti materiálu MS1 založeného v programu Solidworks..... | 92 |
| Obr. 6-60 Porovnání zatížení VBD v řezu u QCA 2.0 a prototypu QCA TO | 93 |
| Obr. 6-61 Desing space prototypu nástroje QCA TO | 94 |
| Obr. 6-62 Prototyp QCA TO | 95 |
| Obr. 6-63 Vytisknutý prototyp ve verzi 3břitého i 6břitého nástroje | 95 |
| Obr. 6-64 Desing space pro výpočet nástroje QCA TO 1.0..... | 96 |
| Obr. 6-65 Segment nástroje po TO..... | 96 |
| Obr. 6-66 Topologicky optimalizovaný nástroj QCA TO 1.0 | 97 |
| Obr. 6-67 Problematické místo 1 a 2 s ohledem na 3D tisk..... | 98 |
| Obr. 6-68 Problematické místo 3 s ohledem na 3D tisk | 98 |
| Obr. 6-69 Upravený chladič kanálek | 99 |
| Obr. 6-70 Desing space pro výpočet nástroje QCA TO 2.0 s výsledkem TO | 99 |
| Obr. 6-71 Topologicky optimalizovaný nástroj QCA TO 2.0 | 100 |
| Obr. 6-72 QCA TO 2.0 upravený pro 3D tisk | 100 |
| Obr. 6-73 QCA TO 2.0 po vytištění s podporami..... | 101 |
| Obr. 6-74 Vytištěný nástroj QCA TO 2.0..... | 101 |
| Obr. 6-75 Obrobený a osazený nástroj QCA TO 2.0 | 101 |
| Obr. 6-76 QCA TO 2.0 upnutý ve stroji | 102 |
| Obr. 6-77 Detailní pohled na nástroj | 102 |
| Obr. 6-78 FEM analýza QCA 2.0 - rozložení napětí | 103 |
| Obr. 6-79 FEM analýza QCA TO 2.0 - rozložení napětí | 104 |
| Obr. 6-80 FEM analýza QCA 2.0 - deformace | 105 |
| Obr. 6-81 FEM analýza QCA TO 2.0 - deformace..... | 105 |
| Obr. 7-1 Využití modifikovaného nástroje pro experimenty na RTI | 106 |
| Obr. 7-2 Testování implementace speciálního nástroje na RTI ZČU | 107 |
| Obr. 7-3 Výsledný povrch po hrubování (vlevo) a po dokončení (vpravo) | 107 |
| Obr. 7-4 Průběh implementace speciálního nástroje ve firmě Plasmametal | 108 |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| Symbol, zkratka | Popis | Jednotky |
|-----------------|-------------------------------------|------------|
| VBD | Výměnná břitová destička | [-] |
| HVOF | High Velocity Oxygen Fuel | [-] |
| AM | Additive manufacturing | [-] |
| TO | Topologická optimalizace | [-] |
| ZČU | Západočeská univerzita v Plzni | [-] |
| RTI | Regionální technologický institut | [-] |
| KTO | Katedra technologie obrábění | [-] |
| IC20 | Druh slinutého karbidu | [-] |
| SK | Slinutý karbid | [-] |
| PCBN | Polykrystalický kubický nitrid bóru | [-] |
| CBN | Kubický nitrid bóru | [-] |
| PKD | Polykrystalický diamant | [-] |
| CVD | Chemical vapour deposition | [-] |
| HSC | Vysokorychlostní obrábění | [-] |
| DoE | Design of experiment | [-] |
| 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] |
| n | Otáčky vřetene | [ot/min] |
| r_n | Poloměr zaoblení řezné hrany | [μ m] |
| r_e | Poloměr zaoblení špičky | [μ m] |
| D | Průměr polotovaru | [mm] |
| l | Délka polotovaru | [mm] |
| R_a | Průměrné aritmetická hodnota | [μ m] |
| R_z | Nejvyšší výška profilu | [μ m] |
| VBmax | Opotřebení hřbetu VBD | [mm] |
| KBb | 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] |

1. Úvod

Žárové nástřiky se staly významnou technologií v oblasti ochranných povlaků, které jsou široce využívány v průmyslových odvětvích, jako je automobilový, letecký, energetický a petrochemický průmysl. Tyto povlaky poskytují vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení, čímž chrání základní materiál před vlivem agresivního prostředí, abrazi, korozi a dalšími druhy opotřebení. Jednou z nejúčinnějších metod nanesení žárových nástřiků je metoda HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Metoda HVOF využívá plamen, který je vytvořen spalováním kyslíku a paliva, a to buď v práškové nebo drátové formě. Práškový materiál je předem zahříván na vysokou teplotu a urychlován na velkou rychlost, čímž je vytvořena vysoká kinetická energie částic. Při nástřiku tyto částice interagují se substrátem a vytvářejí pevný a adhezivní povlak s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. Metoda HVOF nabízí několik výhod oproti jiným technikám nástřiku. Povlaky vytvořené touto metodou mají extrémní tvrdost, vysokou hustotu a vynikající adhezi k substrátu. Jejich mikrostruktura je téměř bez pórů a trhlin, což zajišťuje jejich vysokou odolnost proti opotřebení a dlouhou životnost. Díky vysoké rychlosti nástřiku je také možné dosáhnout velmi tenkých vrstev s minimálním tepelným vstupem do substrátu, což snižuje riziko zkreslení nebo změny materiálových vlastností substrátu. Přestože metoda HVOF má nesporné výhody při aplikaci žárových nástřiků, přináší s sebou i výzvy v oblasti jejich obrábění. Povlaky HVOF jsou známé svou vysokou tvrdostí, což činí jejich obrábění tradičními metodami obtížným a náročným. U konvenčních nástrojů často dochází k výraznému opotřebení a poškozením, což zvyšuje náklady na obrábění a snižuje jejich životnost. Optimalizace řezných podmínek, chlazení a využití speciálních řezných materiálů je tak nezbytné pro dosažení efektivního a přesného obrábění žárových nástřiků [1] [2] [3].

V reakci na tyto výzvy v oblasti obrábění žárových nástřiků se práce zaměřuje na hledání alternativních přístupů a metod, které by umožnily zvýšit efektivitu a přesnost tohoto procesu. Jedním z navrhovaných přístupů je vývoj nástroje s definovanou geometrií břitu, konkrétně lineární řezné hrany. Tato metoda se jeví efektivní a nabízí zlepšení v produktivitě a přesnosti obrábění žárových nástřiků. Kromě toho se práce zaměřuje na aditivní technologie a topologickou optimalizaci pro návrh konstrukce nástrojů, které by poskytovaly efektivní rozložení materiálu, zvýšenou tuhost a optimální chlazení řezného břitu [1] [2] [3].

V rámci vývoje speciálního nástroje pro obrábění žárových nástřiků se nabízí zajímavá možnost využití topologické optimalizace. Topologická optimalizace je moderní technika, která umožňuje optimalizovat tvar a rozložení materiálu konstrukce s cílem dosáhnout nejlepších výkonových vlastností. Topologická optimalizace přináší řadu obecných přínosů při konstrukci nástrojů, bez ohledu na konkrétní aplikaci. Topologická optimalizace umožňuje identifikovat zbytečný nebo nadbytečný materiál v konstrukci nástroje. Tím se minimalizuje hmotnost nástroje, což může mít pozitivní vliv na jeho manipulaci, energetickou efektivitu a snižuje náklady na materiál. Dále je možné analyzovat a optimalizovat strukturu nástroje s ohledem na distribuci napětí. Tím se minimalizuje riziko vzniku nežádoucích napěťových koncentrací a zvyšuje se celková pevnost nástroje. Zároveň umožňuje optimalizovat rozložení materiálu v nástroji tak, aby byla zajištěna vysoká tuhost v kritických oblastech. To vede ke snížení deformací a posunů během obrábění a zvyšuje přesnost a opakovatelnost výrobního procesu. Díky optimalizaci geometrie nástroje a snížení materiálových nákladů lze dosáhnout

významných úspor ve výrobě. Méně materiálu a optimalizovaný design také mohou znamenat snížení času a nákladů spojených s výrobním procesem. Topologická optimalizace poskytuje větší volnost při tvorbě inovativních a netradičních tvarů. Tím se otevírají nové možnosti a příležitosti pro vylepšení výkonu nástroje a přizpůsobení se specifickým požadavkům aplikace. Výše uvedené přínosy topologické optimalizace ukazují, že tato metoda je neocenitelným nástrojem při vývoji speciálních nástrojů pro obrábění žárových nástřiků. Její aplikace může vést k výraznému zlepšení výkonu, efektivity a životnosti nástrojů, což přináší přínosy jak z hlediska výrobního procesu, tak i z hlediska konečného produktu [4] [5] [6].

Při navrhování nástroje pro obrábění žárových nástřiků je klíčové hledat optimální kombinaci geometrie břitu, materiálu nástroje a řezných podmínek. Tradiční metody návrhu často nedokáží zohlednit specifické vlastnosti žárových nástřiků a přinést optimální řešení. Topologická optimalizace přichází s inovativním přístupem. Pomocí matematických algoritmů a výpočetních metod je možné analyzovat a optimalizovat strukturu nástroje tak, aby bylo dosaženo efektivního rozložení materiálu, zvýšení tuhosti a optimalizovaného chlazení řezného břitu. Tím se minimalizuje opotřebení nástroje, zvyšuje jeho životnost a zlepšuje kvalita obráběných povrchů. Výhody topologické optimalizace při vývoji nástrojů pro obrábění žárových nástřiků jsou zřejmé. Tato metoda umožňuje inovativní a efektivní design nástroje s ohledem na specifické vlastnosti žárových nástřiků. Díky rovnoměrnému rozložení napětí a optimálnímu chlazení se minimalizuje riziko poškození VBD a celého nástroje a zvyšuje jeho odolnost vůči opotřebení. Navrhovaná kombinace využití lineární řezné hrany a topologické optimalizace přináší slibné výsledky v oblasti obrábění žárových nástřiků. Dosavadní výzkum a experimenty naznačují, že tato kombinace zlepšuje produktivitu, přesnost a životnost nástrojů při obrábění těchto povlaků. Cílem této práce je představit možnosti využití topologické optimalizace při vývoji speciálního nástroje pro obrábění žárových nástřiků. Budou prezentovány základní principy topologické optimalizace a výsledky dosažené v rámci dosavadního výzkumu. Zároveň se zaměřím na výhody a perspektivy této metody a možnosti jejího dalšího rozvoje. Poznatky získané v této oblasti mohou přispět k vývoji nových a efektivnějších nástrojů pro obrábění žárových nástřiků a posunout tuto technologii na další úroveň [4] [5] [6].

1.1. Stanovení cílů disertační práce

Cíle disertační práce se odvíjejí především ze zkušeností z výzkumné činnosti Regionálního Technologického Institutu a Katedry Technologie Obrábění Západočeské univerzity v Plzni v oblasti obrábění těžko obrobitelných materiálů a na základě požadavků vzniklých v rámci projektů s firmou Plasmametal, spol. s.r.o. a předešlých experimentů v oblasti obrábění žárových nástřiků. Hlavním požadavkem je vyvinout speciální nástroj pro obrábění žárových nástřiků s definovanou geometrií břitu a nahradit tak technologii broušení. S tím je spojeno i nalezení technologie, která by toto obrábění umožňovala. Hlavním benefitem takto navrženého nástroje bude efektivní obrábění žárových nástřiků a těžko obrobitelných materiálů technologií soustružení a frézování. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí, teoretické a praktické.

Teoretická část

Cílem teoretické části je především přehled o problematice žárových nástřiků a jejich obrábění. Další částí je shrnutí poznatků o obrábění s lineární řeznou hranou. Posledním bodem je poté řešerská část zaměřená na optimalizaci konstrukce a aditivní výrobu a hodnocení poznatků v oblasti aktuálního stavu v oblasti vývoje a konstrukce řezných nástrojů pomocí těchto technologií. Výstupem teoretické části je poté souhrn a hodnocení poznatků ve výše zmíněných oblastech a navržení dalšího postupu v praktické části práce.

Konkrétní struktura

- Problematika obrábění žárových nástřiků
- Obrábění lineární řeznou hranou
- Využití AM a TO v konstrukci nástrojů
 - Aditivní technologie (AM)
 - Optimalizace konstrukce
 - Současný stav využití AM a TO v konstrukci nástrojů
- Souhrn a hodnocení poznatků

Praktická část

Hlavním cílem praktické části je na základě získaných poznatků vyvinout funkční nástroj na obrábění žárových nástřiků s využitím lineární řezné hrany a aditivní výroby spolu s optimalizací konstrukce tak, aby nástroj splňoval veškeré požadavky vzešlé z teoretické části práce a jejích závěrů.

Konkrétní struktura

- Vývoj nástroje pro obrábění žárových nástřiků
- Experimentální ověření a FEM analýzy
- Implementace technologie obrábění s lineární řeznou hranou

Na základě cílů disertační práce byly zvoleny dvě základní výzkumné hypotézy:

H1: Topologická optimalizace nástroje (QCA TO 2.0) dosáhne o 50 % nižšího napětí než neoptimalizovaný nástroj (QCA 2.0).

H2: Topologickou optimalizací nástroje (QCA TO 2.0) dosáhneme příznivějších deformačních stavů, které sníží riziko prasknutí VBD ve srovnání s neoptimalizovaným nástrojem (QCA 2.0).

2. Problematika obrábění žárových nástřiků

Žárové nástřiky jsou inovativní technologií, která našla široké uplatnění v různých odvětvích průmyslu. Tato metoda nanášení povlaků se vyznačuje vysokou odolností a ochranou proti opotřebení a korozním účinkům. Díky svým vlastnostem se žárové nástřiky staly nedílnou součástí moderních výrobních procesů, kde slouží jako ochranný povlak na materiálech, které jsou vystaveny extrémním podmínkám, mechanickému namáhání nebo agresivním chemickým prostředím. Základní princip žárového nástřiku spočívá v rozpuštění nebo roztavení speciálního povlakového materiálu a jeho následném aplikování na povrch substrátu. Tím vzniká pevně přilnutý a vysoce adhezní povlak s unikátními vlastnostmi, které jsou dány jak samotným materiálem, tak i procesem nanášení. Žárové nástřiky umožňují nanášení povlaků na různé typy materiálů, včetně kovů, keramiky, skla a polymerních materiálů, což je důležité pro širokou škálu aplikací. Jednou z klíčových vlastností žárových nástřiků je jejich vysoká tvrdost. Povlaky dosahují vysokých hodnot tvrdosti, které často převyšují tvrdost původního materiálu substrátu. Tento fakt je klíčový při ochraně materiálu před mechanickým opotřebením, včetně otěru, tření a eroze. Díky vysoké tvrdosti dokážou povlaky odolávat extrémním podmínkám a prodlužovat životnost povrchu, což je zejména v průmyslových aplikacích velmi výhodné. Další významnou vlastností žárových nástřiků je jejich schopnost odolávat koroznímu působení. Povlaky chrání základní materiál před chemickými vlivy a oxidací, což je zásadní zejména v prostředí s agresivními látkami nebo vysokými teplotami. Díky této vlastnosti se žárové nástřiky využívají například v energetice, petrochemickém průmyslu, letectví, automobilovém průmyslu a dalších odvětvích, kde je klíčová ochrana materiálu proti korozi [1] [2] [3] [7].

Samotná problematika procesu tvorby žárových nástřiků je ve světě i na Západočeské univerzitě již dobře zmapovaná. Nejčastější metodou nanášení nástřiků, kterou se Západočeská univerzita spolu s výzkumným centrem NTC (Nové technologie – výzkumné centrum) Západočeské univerzity v Plzni zabývá, je metoda HVOF nástřiku. Jedná se o vysoko rychlostní nástřik plamenem o HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Samotnému procesu technologie nástřiku a s tím spojených vlastností nástřiku se na ZČU věnovalo několik závěrečných prací a publikací včetně disertačních prací.

Závěrečná práce na téma „*Studium vlastností vybraných HP/HVOF nástřiků*“ [8] se věnuje hodnocení žárových nástřiků z materiálů, které jsou vhodné při použití v provozních podmínkách kombinující tepelný a korozní vliv páry. Cílem práce bylo optimalizovat procesní parametry nástřiku u vytipovaných materiálů s cílem získat co nejvýhodnější vlastnosti v závislosti na podmínkách použití. Výsledkem bylo nalezení optimálních parametrů nástřiku pro testované materiály povlaku. Dále poté zmapování měřitelných mechanických vlastností nástřiků s ohledem na procesní parametry.

Podobnou problematikou se zabývá i práce „*Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí*“ [9]. Práce se věnuje hodnocení korozní odolnosti žárových nástřiků vytvořených HP/HVOF nástřiky. Úvod práce se detailněji věnuje použití metody HVOF a poté je popsán stav žárových nástřiků v souvislosti s jejich využitím v energetickém průmyslu. Hlavním přínosem je poté experimentální testování a měření mechanických

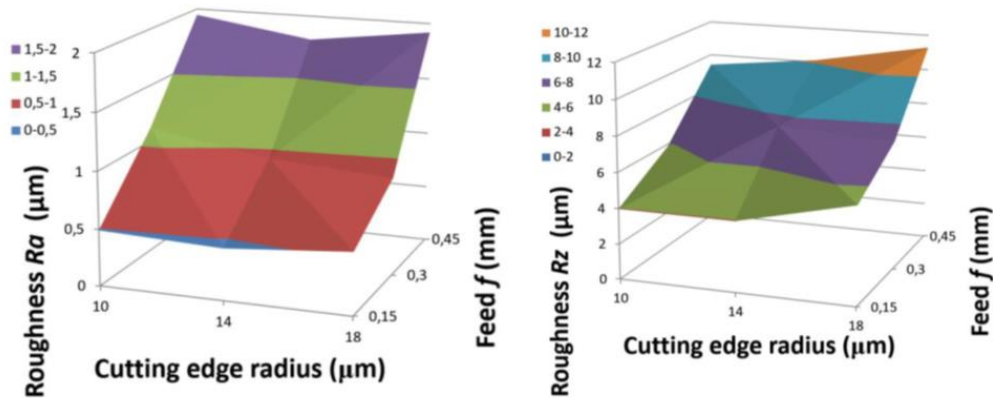
a fyzikálních vlastností jednotlivých materiálů a vyhodnocení vzhledem k vhodnosti použití pro korozně působící prostředí.

Hodnocení mechanických vlastností se věnuje i práce „*Hodnocení vztahu mikrostruktury a vlastností žárových nástřiků*“ [7], která je zaměřena na hodnocení mechanických vlastností nástřiků vzhledem k jejich mikrostruktuře. V úvodu je práce zaměřena na optimalizaci procesních parametrů nástřiku a druhá část se poté věnuje hodnocení makro a mikro tvrdosti, zbytkovému napětí v povlacích, teplotní odolnosti, třecí vlastnosti, odolnosti proti abrazi a přilnavosti k základnímu materiálu.

Detailnějšímu popisu technologie HVOF nástřiků a nejčastěji používaným superslitinám na nástřiky se věnuje práce „*Studium žárově stříkaných povlaků pro otěruvzdorné aplikace*“ [10]. Experimentální část je poté věnována tepelnému zpracování pomocí laseru. Díky laseru je možné tepelně ovlivnit nebo přetavit celou vrstvu nástřiku, a tím ovlivnit mikrostrukturu a určité vlastnosti nástřiku.

Problematicke se na Západočeské univerzitě rovněž věnuje doc. Houdková Šimůnková. V jednom ze svých článků „*Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings*“ [3] zkoumá mikrostrukturu a kluzné opotřebení nástřiků na bázi Co-Cr-W označovaných obecně jako Stellite 6 v závislosti na technologii nanášení. Ukázalo se, že použité nanášení a následná úprava ovlivnily mikrostrukturu, fázové složení a vlastnosti materiálu a následně kluzné opotřebení Stellite 6. Na základě provedených měření lze doporučit následnou laserovou úpravu nástřiku HVOF. Nejen ke zlepšení odolnosti proti korozi prostřednictvím eliminace pórovitosti, ale také ke zvýšení odolnosti proti kluznému opotřebení HVOF.

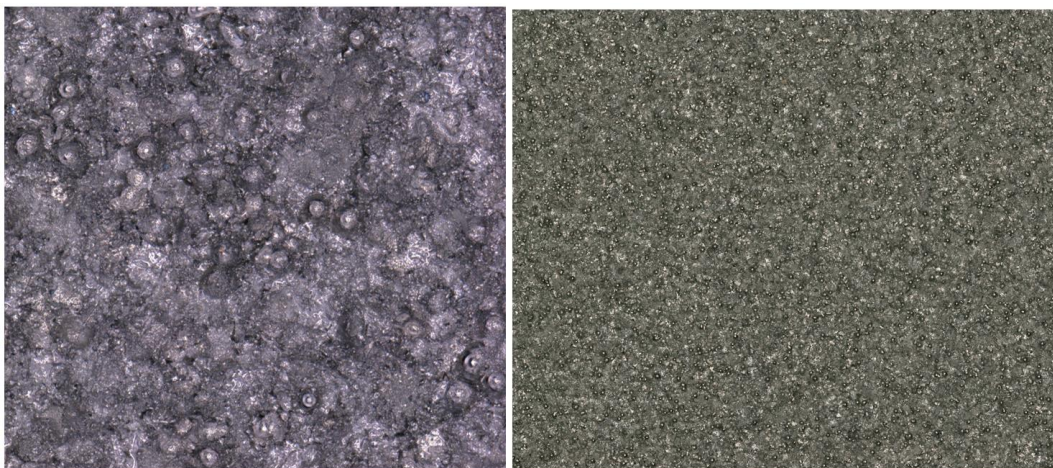
Další práce ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni se již zabývá obráběním žárového nástřiku Stellite 6 nastříkaného technologií HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), ale s využitím kruhových VBD o průměru 12mm. Článek „*Surface roughness evaluation after machining wear resistant hard coats*“ [11] se zabývá hodnocením kvality povrchu po obrábění otěruvzdorných tvrdých nástřiků. Polotovar byl kruhová tyč z mat. 12050.1 o průměru 60mm, na kterou by nástřikán žárový nástřik Stellite 6. Obrábění probíhalo za následujících řezných podmínek: řezná rychlost $v_c=25$ m/min, hloubka řezu $ap=0,2$ mm, posuv $f=0,15; 0,3; 0,45$ mm/ot. Cílem bylo porozumět hlavním faktorům, které ovlivňují výslednou kvalitu povrchu při obrábění nástřiku Stellite 6. Autoři hodnotili kvalitu povrchu nejen pomocí Abbottovy křivky, ale sledovali také závislost střední aritmetické hodnoty drsnosti na poloměru bříty i posuvu, viz obrázek níže. Analýzy opotřebení u vyměnitelných břitových destiček nástrojů ukázaly, že typické opotřebení má podobu vrubu. Na základě výsledků experimentů lze konstatovat, že v některých případech bylo dosaženo velmi rozdílných hodnot drsnosti povrchu, což může být způsobeno i odlišnou strukturou nástřiku např. v důsledku různé pórovitosti nebo v důsledku menší velikosti kohezních sil, což vede ke snadnějšímu odstranění částic nástřiku v průběhu obrábění. [11]



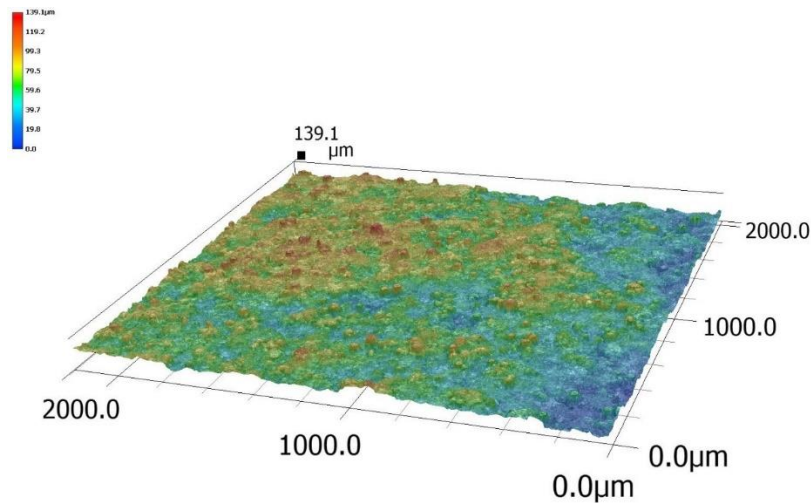
Obr. 2-1 Závislost drsnosti na poloměru zaoblení řezné hrany a posuvu [11]

V rámci projektů se na RTI již problematice obrábění žárových nástřiků věnovali doc. Řehoř a doc. Gombár. Výzkum byl zaměřen především na obrábění nástřiku Stellite 6, avšak bez využití lineární řezné hrany. V rámci článků, které na toto téma vznikly, byl řešen především vliv samotného nástřiku a poté řezných parametrů na výslednou drsnost a integritu povrchu. Blíže popisují problematiku následující články: „*Optimization of the thermal spraying process depending on the surface roughness*“ [12], „*Investigation of surface roughness and predictive modelling of machining Stellite 6*“ [13], „*Prediction of cutting parameters of HVOF-Sprayed Stellite 6*“ [14] a „*Investigation of machining of Stellite 6 alloy deposited on steel substrate*“ [15]

V jednom z projektů byl předmětem výzkumu i nástřik NiCrBSi, konkrétně frézování kulových ploch nástřikaných tímto nástřikem. Z tohoto výzkumu vzešly dva články. „*Thermodynamics and mechanics of thermal spraying of steel on 10060 substrate with NiCrBSi alloy after milling*“ [16] a „*Milling of complex surfaces of EN 10060 steel after HVOF sprayed NiCrBSi coatings*“ [17]. Články popisují zejména vliv termodynamických a mechanických vlastností nástřiku na samotný proces frézování a výslednou drsnost povrchu.



Obr. 2-2 Detail na HVOF nástřik NiCrBSi – zvětšení 1000x (vlevo) a 500x (vpravo)



Obr. 2-3 Topografie povrchu nástřiku NiCrBSi

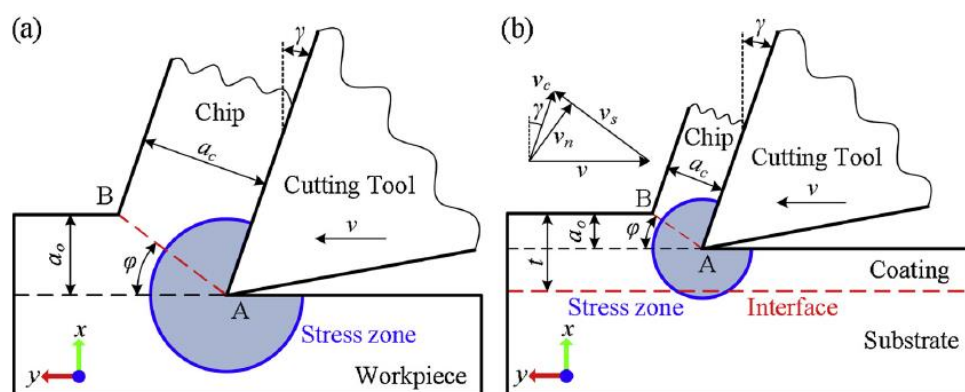
Z výše uvedených článků a prací je zřejmé, že technologie HVOF žárových nástřiků je na Západočeské univerzitě detailně probádána. Výsledkem je široká znalost procesních parametrů při nanášení nástřiků a jejich vliv na výsledné vlastnosti nástřiku. Zároveň z rešerše na toto téma vyplývá, že nejčastěji používanými nástřiky jsou nástřiky založené na bázi Niklu a Kobaltu. Mezi nepoužívanější z těchto skupin poté patří superslitiny NiCrBSi a Stellite 6. Nicméně samotný proces obrábění již v rámci výzkumu na ZČU nebyl řešen, nebo jen okrajově. A je tedy nutné blíže specifikovat problematiku obrábění žárových nástřiků.

Žárové nástřiky jsou nejčastěji aplikovány formou tenkých vrstev (povlaků) na rotační součásti. Běžná tloušťka nástřiků dosahuje okolo 0,5 mm. Cílem je vytvořit co nejtenčí vrstvu s co možná nejmenším přídavkem na obrábění. To je dáno zejména velmi vysokou cenou materiálu. Je také nezbytné, aby množství materiálu, který se odstraní obráběním, bylo co nejmenší. V současné době je nejčastější způsob obrábění žárových nástřiků broušení. Díky broušení je možné dosáhnout velmi malé tloušťky odebírané vrstvy a vysoké kvality obrobeneho povrchu jak z hlediska geometrických tolerancí, tak také drsnosti povrchu. Rovněž je broušení vhodné při obrábění tvrdých a těžko obrobiteľných materiálů, kam řadíme i žárové nástřiky. Broušení ovšem přináší i řadu problémů. Tím hlavním je ekonomičnost celého procesu broušení. Z důvodu velmi malého objemu odebraného materiálu v porovnání se soustružením a frézováním je broušení velmi málo produktivní. Je nutné broušení provádět na speciálních a velmi drahých strojích z důvodu požadavků na přesnost. Poměrně drahé jsou i samotné brusné kotouče kvůli materiálům používaným při obrábění žárových nástřiků. Všechny tyto nedostatky vedou k navýšení výsledné ceny výrobků, které jsou velmi nákladné již z důvodu použití žárových nástřiků. Dalším problémem spojeným s broušením jsou vysoké teploty při obrábění, díky kterým může dojít k materiálu ke vzniku tahových zbytkových napětí a následnému vzniku trhlin či delaminaci nástřiku. Vysoká teplota také může způsobit změny ve struktuře nástřiku, což rovněž vede ke ztrátě původních mechanických vlastností nástřiku, vzniku trhlin a delaminaci. Z výše uvedených důvodů je snaha nahradit broušení nástrojem s definovanou geometrií břitu a využití konvenčních strojů pro soustružení a frézování těchto nástřiků [18] [19].

Soustružení žárových nástřiků ovšem přináší řadu problémů, které bylo třeba vyřešit. Předně se jedná o velmi malou hloubku řezu, do 0,2 mm, která je nutná z důvodu úspor při stříkání žárového nástřiku. Rovněž je třeba dosáhnout požadovaných kvalitativních parametrů povrchu. Tím je myšlena především drsnost obrobeneho povrchu obdobná jako při broušení. Velkým problémem je také zvýšená intenzita opotřebení VBD vlivem vysokých teplot vznikajících při obrábění a také opotřebení z důvodu jeho zhoršené obrobiteľnosti [18] [19].

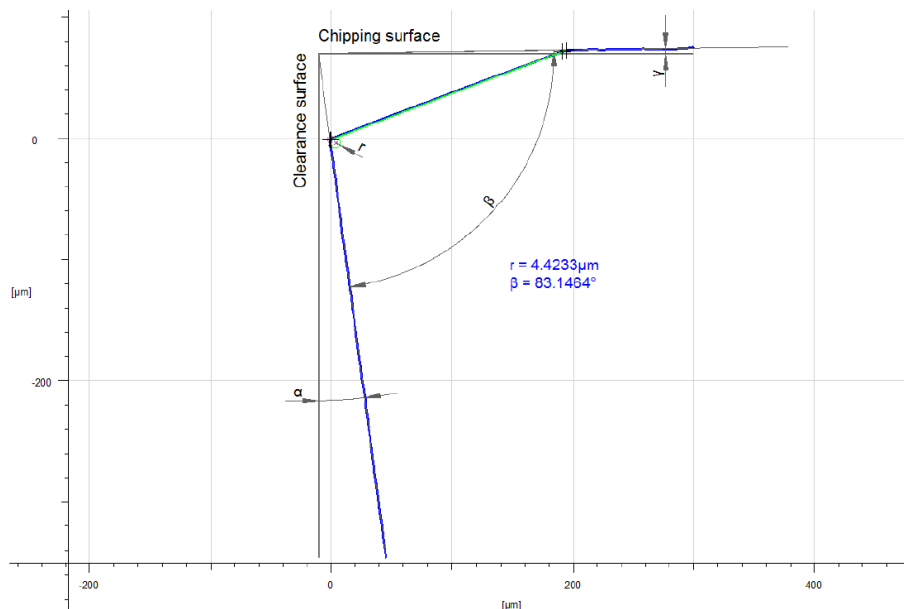
Na základě výše uvedených nedostatků při konvenčním soustružení je možné využít obrábění za pomoci „lineární řezné hrany“. Při tomto obrábění nástroj neobrábí špičkou, ale využívá celou délku lineárního ostří postaveného vůči obrobku pod určitým úhlem sklonu ostří λ_s . Jde v podstatě o princip zapichovacího nože, ale skloněného o úhel λ_s . V následující části se věnuji rozboru, proč je vhodné nahradit konvenční soustružení lineární řeznou hranou [18] [19].

Jak již bylo zmíněno, při obrábění špičkou nástroje jsme omezeni hloubkou řezu do velikosti rádiusu zaoblění špičky R_ϵ , jak je uvedeno v teorii obrábění. Poloměr zaoblění špičky R_ϵ může dosahovat hodnoty 0,2 mm, při obrábění tvrdých a těžko obrobiteľných materiálů je to ale velmi často více a hodnoty R_ϵ začínají na 0,8 mm. Při malém poloměru zaoblění hrozí deformace, případné zlomení VBD z důvodu kombinace velkého namáhání vlivem tvrdého a pevného nástřiku a velmi „ostré“ geometrii nástroje. Při větším zaoblění špičky zase může hrozit ovlivnění nástřiku a základového materiálu vlivem velkých plastických deformací, jak je uvedeno na obrázku níže. Při obrábění tak může docházet ke změně adheze povlaku, změně tvrdosti či vzniku zbytkových napětí. Tyto jevy poté mohou způsobit vytrhávání či praskání nástřiku [19].



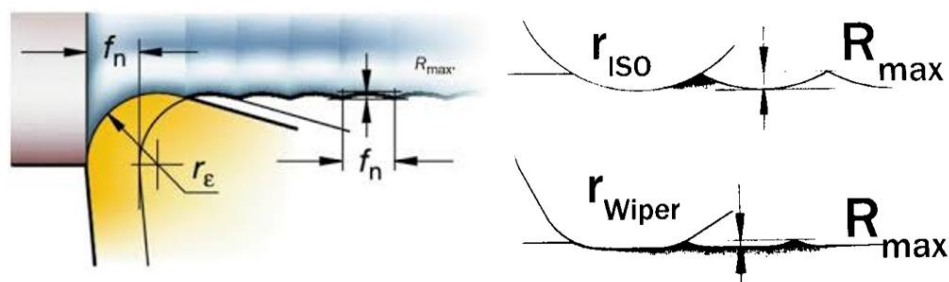
Obr. 2-4 Plastické deformace při obrábění homogenního materiálu (a) a žárového nástřiku (b) [19]

Při obrábění lineární řeznou hranou se využívá pouze poloměru ostří R_n a špička nástroje vůbec není v řezu. Díky tomu je možné obrábět velmi malé hloubky řezu bez ovlivnění materiálu velkými plastickými deformacemi. Poloměr ostří R_n dosahuje řádově menší hodnoty, běžně od 4 do 40 μm . Díky takto malému zaoblění je možné odebírat tloušťku odřezávané vrstvy od 0,05 mm.



Obr. 2-5 Příklad poloměru ostří a fazetky 20° u VBD

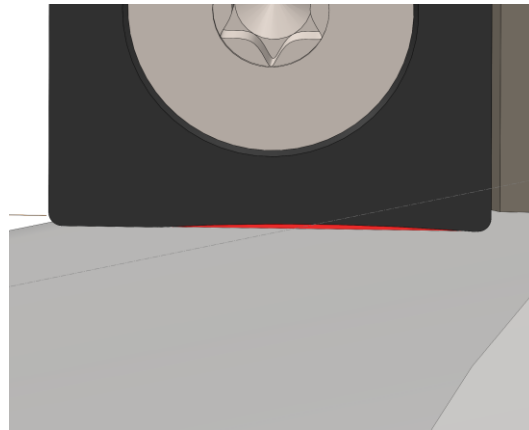
Soustružení standardními poloměry špičkou má přímý vliv i na kvalitu obrobeného povrchu a spolu s posuvem nejvíce ovlivňují výslednou drsnost, jak je uvedeno na obrázku níže. S využitím tzv. hladicích destiček, „Wiper“ destiček, je možné drsnost povrchu snížit. Případně dosáhnout stejné drsnosti povrchu při vyšších posuvech. Tyto hladicí destičky využívají mnohem větší poloměr zaoblení. Zvyšováním poloměru špičky nástroje blížícímu se nekonečnu se dostáváme k nástroji s lineární řeznou hranou [20].



Obr. 2-6 Vliv poloměru špičky nástroje na drsnost [20]

K problémům při soustružení žárových nástřiků patří také zvýšená intenzita opotřebení VBD vlivem vysokých teplot vznikajících při obrábění a vysoká tvrdost a obsah těžkoobrobitelných prvků a karbidů v nástřicích. Problémům s otupováním nástroje vlivem vysoké teploty se dá již dnes do jisté míry předejít orientovaným vysokotlakým chlazením přímo do místa řezu. Někteří výrobci nástrojů již dnes nabízejí vysokotlaké chlazení na čelo i hřbet VBD a touto problematikou se v další části práce dále zabývám. Mezi hlavní výrobce zabývající se orientovaným vysokotlakým chlazením patří Sandvik Coromant, Walter Tools, Iscar a další. Ovšem nikdo z těchto výrobců se nevěnuje konkrétně nástrojům a jejich chlazení na obrábění žárových nástřiků s lineární řeznou hranou. Zvýšená intenzita opotřebení vlivem těžkoobrobitelných prvků a karbidů v nástřicích lze do jisté míry vyřešit použitím řezných materiálů k tomu určených, jako je CBN, PKD a různé druhy povrchových úprav a tenkých vrstev. Nicméně i tak je obtížné zvýšené intenzitě opotřebení předejít.

Využitím lineární hrany v kombinaci s velmi malými hloubkami řezu můžeme v závislosti na velikosti obrobku a řezných podmínkách dosáhnout až 4 nových řezných částí na jedné délce ostří. Tím, že se využívá celá délka ostří, je možné destičku v řezu posunout na neopotřebovanou část a nemusí se po opotřebení hned otočit či nasadit nová, jako je tomu u destičky při obrábění špičkou nástroje. Při využití čtvercové destičky tak můžeme teoreticky dosáhnout až na 16 nových řezných hran na jedné VBD díky možnosti využití až 4x nové místo na jednu řeznou hranu a možnosti destičku 4x otočit. To je oproti klasickému soustružení destičkou typu C, kde můžeme využít pouze 2 řezné hrany, 8x vyšší životnost. Tím jsou obdobné ceně destiček 8x sníženy náklady spojené s opotřebením. Obrázek níže zobrazuje teoretickou plochu řezu při obrábění lineární řeznou hranou.



Obr. 2-7 Plocha odebírané vrstvy u obrábění lineární řeznou hranou

3. Obrábění lineární řeznou hranou

Na základě výše zmíněné problematiky byla provedena rešerše v oblasti obrábění lineární řeznou hranou s cílem lépe pochopit zákonitosti a myšlenky tohoto typu obrábění. V další části práce jsou uvedeny články a publikace věnující se myšlenke obrábění lineární řeznou hranou a ověřování získaných závěrů.

Jedním z prvních, kdo se zabýval myšlenkou soustružení nástrojem s lineární řeznou hranou, je prof. Vasilko z Technické univerzity v Košicích. Ve své knize „*Teória a prax trieskového obrábania*“ [18] popisuje základní myšlenku využití lineární hrany k dosažení lepší drsnosti povrchu. V rámci publikace popisuje a odvozuje vztahy k získání rovnice vyjadřující drsnost povrchu Rz . Tyto výpočty podložil několika experimenty, kde je lineární hrana využita jako dokončovací nástroj po klasickém soustružení. V práci rovněž zmiňuje možnost využití dokončovací destičky s lineární řeznou hranou při frézování.

U obrábění lineární řeznou hranou je pak výsledná drsnost závislá kromě posuvu i na úhlu λ_s a poloměru obrobku. Naproti tomu u klasického obrábění je drsnost závislá zejména na posuvu, jak je uvedeno v odvozených vzorcích níže [18].

Vzorec pro teoretický výpočet drsnosti Rz při soustružení špičkou nástroje [18],

$$Rz = \frac{f^2}{8R_\varepsilon} \quad (2.1)$$

kde Rz je drsnost povrchu [μm], f posuv [mm/ot], R_ε poloměr zaoblení nástroje [mm]

Vzorec pro teoretický výpočet drsnosti Rz při soustružení lineární řeznou hranou [18],

$$Rz = \sqrt{\frac{f^2}{4} \text{tg}^2 \lambda_s + r^2} - r \quad (2.2)$$

kde Rz je drsnost povrchu [μm], f posuv [mm/ot], λ_s úhel sklonu ostří [$^\circ$], r poloměr obrobku [mm].

Díky faktu, že při obrábění s lineární řeznou hranou může být použito vyšších hodnot posuvů a menších hloubek řezu, zohledňuje následující vzorec změny geometrických parametrů způsobené posuvem. Díky tomu může být přesnější [21].

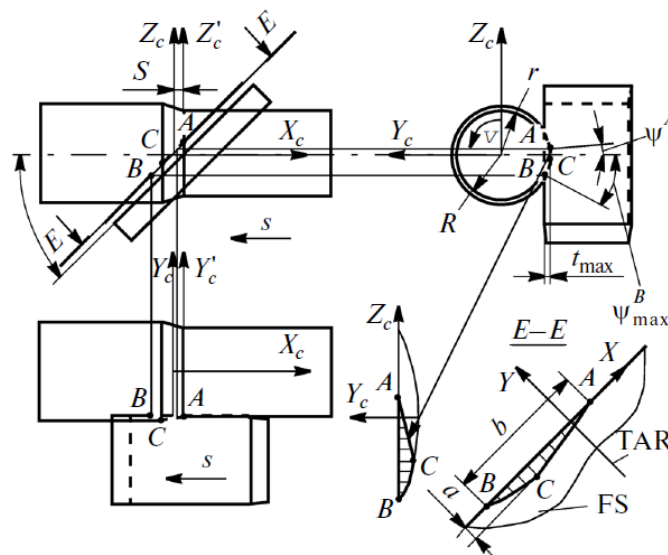
$$Rz = \sqrt{\frac{f^2 \text{tg}^2 \lambda_s}{4[1 - \text{tg} \lambda_s \frac{f}{2\pi r}]^2} + r^2} - r \quad (2.3)$$

kde Rz je drsnost povrchu [μm], f posuv [mm/ot], λ_s úhel sklonu ostří [$^\circ$], r poloměr obrobku [mm]

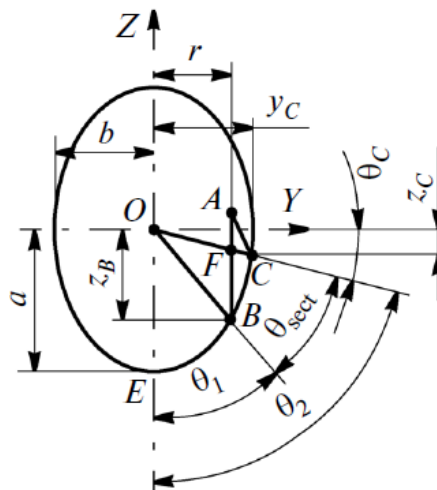
Na základě této myšlenky vznikly ještě další články věnující se využití lineární řezné hrany v závislosti na drsnosti povrchu. Mezi nejvýznamnější patří „*Highly productive tools for turning and milling*“ [22], „*Integrated Tool for High-Feed Turning*“ [23], „*Machining with linear cutting edge*“ [24] a „*Design and experimental study of turning tools with linear cutting edges and comparison to commercial tools*“ [21], nicméně všechny tyto články se zabývají experimenty při obrábění ocelí, nejčastěji 12050.1 a hloubkou řezu $a_p = 1 \text{ mm}$. Společným znakem je poté zkoumání závislosti drsnosti povrchu na řezných podmínkách.

Neřeší se zde tedy obrábění zárovňných nástřiků, ani velmi malé hloubky řezu a vysoké posuvy. Poslední z uvedených článků popisuje výsledky, jež ukazují, že nástroj s lineárním břitkem dosahuje při vyšších posuvech nižších hodnot parametru profilu povrchu R_z ve srovnání s komerčním nástrojem, který je speciálně určen pro dokončovací operace soustružení. Rovněž je v článku odvozena přesnější rovnice pro výpočet drsnosti R_z u lineární řezné hrany [21].

Myšlenkou obrábění lineární řeznou hranou se zabýval i A.V. Filippov a kol. V úvodu svého výzkumu se věnuje popisu závislosti hloubky řezu, poloměru obrobených ploch a sklonu bříty na průřezu odřezávané vrstvy a pracovní délce řezné hrany. V článku „*Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning*“ popisuje a odvozuje tyto závislosti pro základní schéma zobrazené na obrázku níže. Obrázek popisuje obrábění lineární řeznou hranou s úhlem $\lambda = -45^\circ$, obráběný průměr 20 mm a hloubku řezu 1 mm [25].

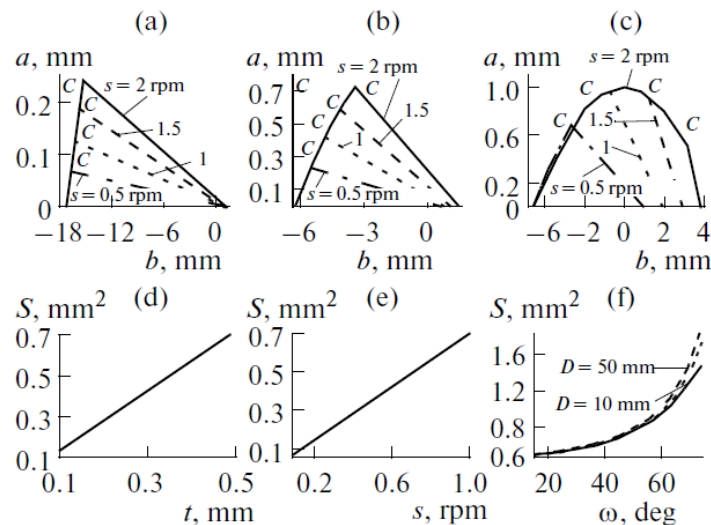


Obr. 3-1 Schéma průřezu odřezávané vrstvy při obrábění lineární řeznou hranou [25]



Obr. 3-2 Schéma plochy průřezu [25]

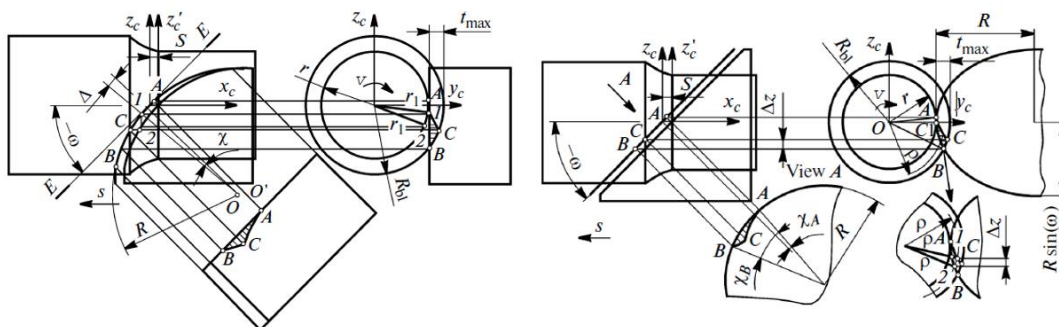
Na základě těchto podmínek poté odvodil vzorce pro výpočet průřezu odřezávané vrstvy, její průřezové plochy a pracovní délky řezné hrany. Díky tomu mohl popsat závislosti hloubky řezu, poloměru a sklonu břitu na průřezu odřezávané vrstvy a pracovní délce řezné hrany. Tyto závislosti jsou uvedené na grafech níže [25].



Obr. 3-3 Závislost hloubky řezu, poloměru a sklonu břitu na průřezu odřezávané vrstvy [25]

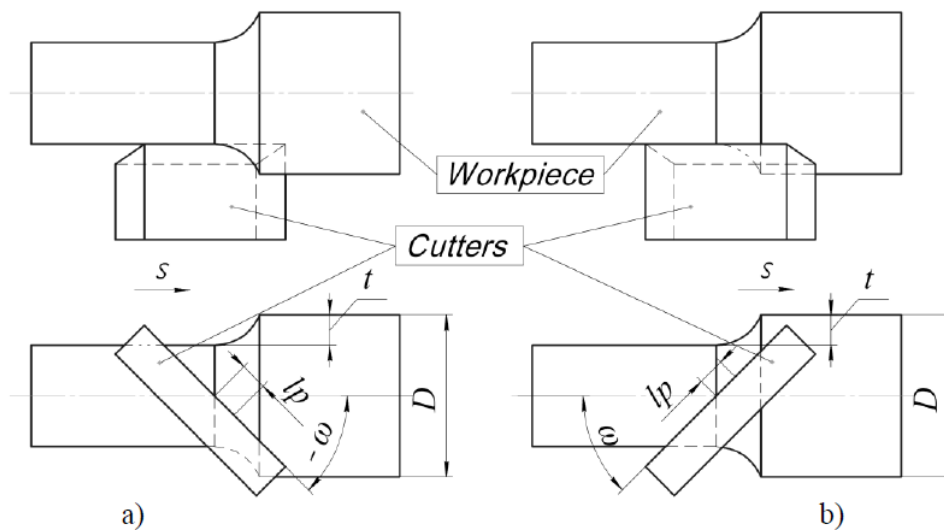
Grafy (a), (b) a (c) popisují závislost tloušťky odřezávané vrstvy a v délce odřezávané vrstvy b pro různé úhly $\lambda_s = -15^\circ$ (a), -45° (b), a -75° (c). Grafy (d), (e) a (f) poté popisují závislost plochy odřezávané vrstvy vzhledem k hloubce řezu (d), otáčkám (e) a úhlu λ_s (f). Získané výsledky byly ověřeny za pomoci 3D programu KOPMPAS a rozdíl oproti simulacím není větší než 3-5 % [25].

V dalších člancích „Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning by a Single-Edge Tool with a Curved Front Surface“ [26] a „Cut-Layer Cross Section in Oblique Turning by a Single-Edge Tool with a Curved Rear Surface“ [27] se A.V. Filippov věnuje obdobným závislostem jako v předchozím případě s tím rozdílem, že využívá „zakřivení přední a zadní části nástroje“. Využívá tak poloměru na čele nástroje a hřbet je rovný a poté je rovné čelo a hřbet zakřivený. Avšak autor se v tomto článku pouze zabýval matematickým popisem vlivu poloměru zakřivení na průřez odřezávané vrstvy a délku efektivního ostří. Z výpočtů poté vyplývá, že s narůstajícím úhlem λ dochází ke zkrácení efektivní délky řezné části nástroje.



Obr. 3-4 Nástroj s lineární řeznou hranou a zakřivenou částí nástroje [26] [27]

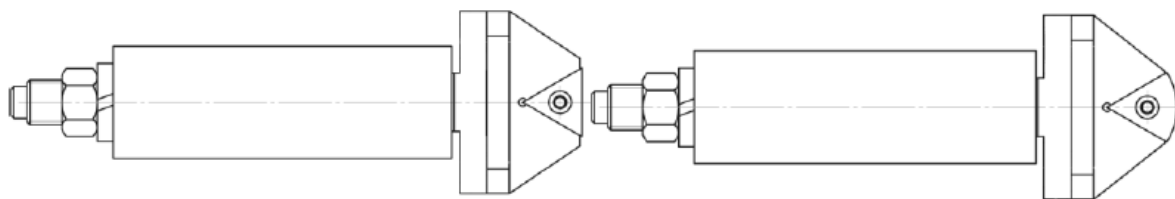
Myšlenku s využitím řezného břitu s velkým radiusem ověřuje A. V. Filippov v článku „Cutting-Force Components in Turning by Tools with No Cutting Tip“ [28]. Článek experimentálně zkoumá soustružení nástroji, které se vyznačují lineárním nebo zakřiveným břitem, ale nemají řeznou špičku. Zkoumá se vliv hloubky, řezné rychlosti, polohy a sklonu břitu na složky F_z a F_y řezné síly při inverzním a přímém řezání.



Obr. 3-5 Přímé (a) a inverzní (b) soustružení lineární řeznou hranou [28]

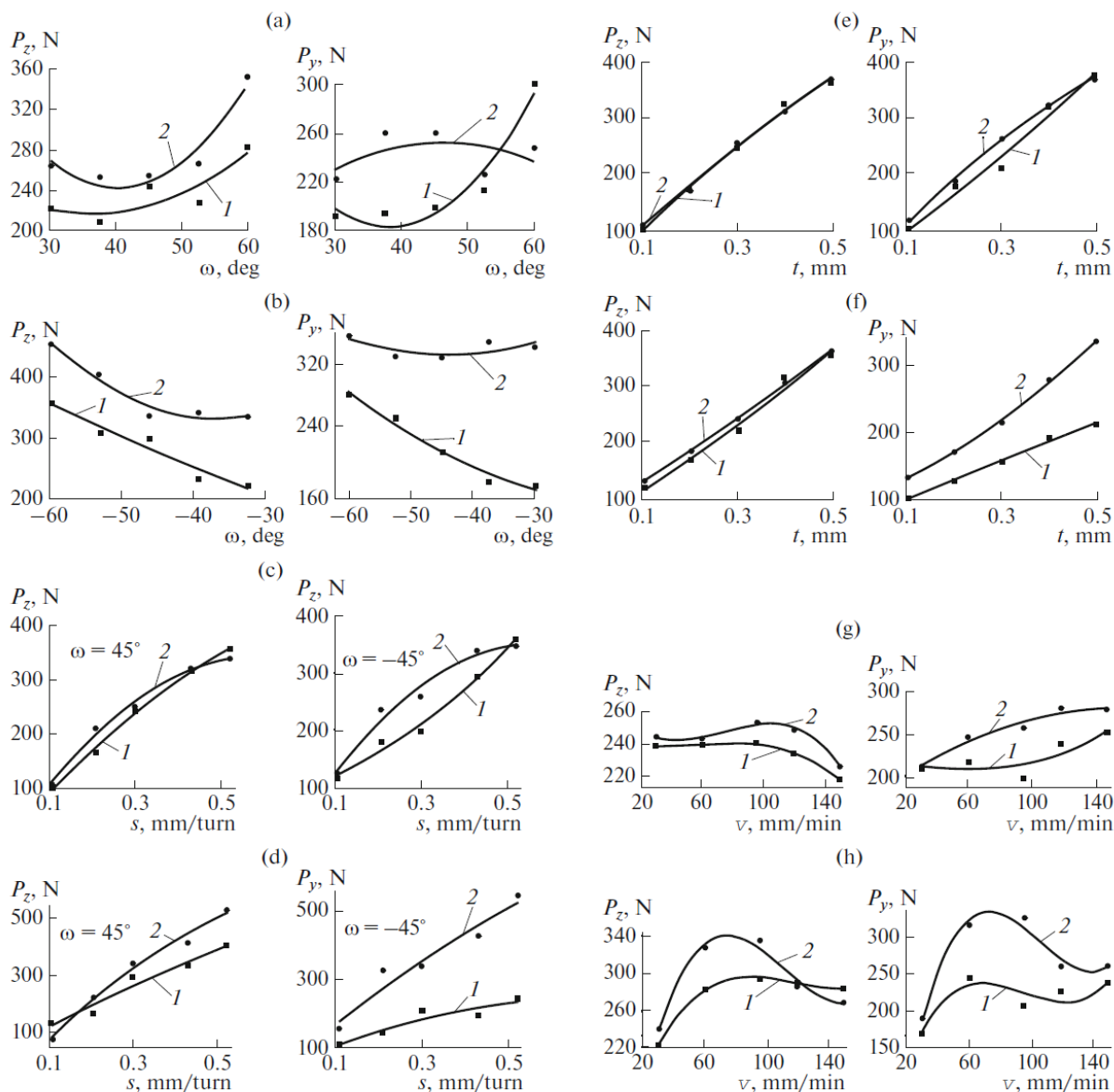
Nástroje, které nemají řeznou špičku, vytvářejí relativně hladké povrchy při řezání rychlostí podstatně vyšší než běžně používané řezné rychlosti u nástrojů s řeznou špičkou. Současně je ale použití nástrojů, které nemají špičku, omezeno nedostatky jako jsou vibrace, které provázejí řezání, a prostor potřebný pro vyjmutí nástroje. Posledně jmenovaný problém lze odstranit zavedením další osy otáčení nástroje. Vibrace lze eliminovat volbou optimálních řezných podmínek, geometrických parametrů a konfigurace nástroje. To obnáší stanovení vlivu těchto faktorů na řezný proces a řezné síly. Teoretická analýza soustružení bezhrotými nástroji s lineárními a zakřivenými břity ukazuje, že základní parametry, které určují proces tvoření třísky těmito nástroji, jsou následující: hloubka řezu, poloha nástroje a sklon nástroje (λ) [28] [29] [30].

V souladu s tímto A.V. Filippov ve své práci experimentálně zkoumá vliv těchto parametrů na síly při soustružení bezhrotými nástroji. Vliv řezné rychlosti na síly při soustružení bezhrotými nástroji dosud nebyl důkladně studován. Proto v této práci také předkládáme předběžný popis toho, jak řezná rychlost ovlivňuje složky F_z a F_y řezné síly pro bezhroté obráběcí stroje s lineárními břity a břity s velkými radiusy [28].



Obr. 3-6 Nástroj pro experimenty s lineární hranou (vlevo) a s velkým radiusem (vpravo) [30]

Následující grafy popisují výsledky z provedených experimentů pro následující parametry. Vliv sklonu λ_s (ω) (a, b), posuvu f (c, d), hloubky řezu ap (e, f) a řezné rychlosti v_c (g, h) na složky F_z a F_y řezné síly při přímém (b, d, e, g) a inverzním (a, c, f, h) řezání bez hrotu s lineárním (1) a zakřiveným (2) ostřím. Základní řezné podmínky: $D = 40$ mm; poloměr hrotu $R_w = 30$ mm; $v_c = 95$ m/s; $f = 0,3$ mm/otáčku; $ap = 0,3$ mm; $\lambda_s = 45^\circ$ (c, e, g) a -45° (d, f, h) [28].



Obr. 3-7 Závislost řezných sil na obrábění lineární řeznou hranou [28]

Na grafech výše jsou znázorněny závislosti složek řezných sil F_z (P_z) [N] a F_y (P_y) [N] průběh F_z je podobný u přímého (b) i inverzního obrábění (a). Hodnoty F_z jsou však přibližně o 35 % vyšší pro zakřivený nůž (2) než pro přímý nůž (1). Je také zřejmé, že F_z je o 10-30 % vyšší u přímého než při inverzním řezání. Pro lineární hranu F_y roste s nárůstem λ_s (ω) [$^\circ$], a to jak u přímého, tak i inverzního řezání. To je pravděpodobně způsobeno změnou parametrů odřezávané vrstvy, konkrétně její šířkou. Současně není rozdíl v F_y u různých typů řezání větší než 30-40 N. Ve všech případech ale dochází k nárůstu složek řezných sil s nárůstem úhlu λ

od 30° do 60°. Současně je celková odchylka F_y v daných podmínkách nepatrná: 18 % pro inverzní řezání a 12 % pro přímé řezání. Absolutní odchylka není větší než 30 N. Taková odchylka F_y je způsobena lw [mm] (efektivní délka řezné hrany, která je v záběru), který se s nárůstem λ_s mění nejvýše o 10 %, a také malou změnou průřezu řezné vrstvy s nárůstem λ_s . Grafy (c) a (d) zobrazují průběh řezných sil na posuvu f (s) [mm/ot.], se vzrůstajícím posuvem rostou složky řezných sil F_z i F_y . Nejnižších hodnot dosahuje přímé soustružení s lineární řeznou hranou. Obdobná závislost vyplývá i ze závislosti na hloubce řezu ap (t) [mm]. Velikosti řezných sil jsou velmi podobné, avšak u přímého obrábění lineární řeznou hranou je znatelné snížení složky řezné síly F_y 1,5 – 2 x nižší než u obrábění se zakřivenou hranou. Závislost sil na řezné rychlosti je zobrazena v grafech (g) a (h). Pro přímé řezání s přímým a zakřiveným ostřím se složky F_z a F_y nelineárně zvyšují v rozmezí 30-90 m/min. Při vyšších rychlostech se klesají. To může být způsobeno tvorbou nárůstků a tím vzniku nestabilního řezu. Při inverzním řezání se změny složek F_z a F_y liší od přímého řezání. Pro přímé a zakřivené ostří při $v_c = 30-90$ m/min je změna F_y prakticky lineární; při vyšších rychlostech F_y klesá nelineárně. U zakřiveného ostří se F_y zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí. U lineárního ostří F_y s rostoucí řeznou rychlostí také roste, ale klesá nad $v_c = 95$ m/min. Z výsledků tedy vyplývá, že z hlediska řezných sil je vhodnější využít VBD s lineární řeznou hranou, než využití zakřivené řezné hrany [28] [30].

V dalším článku „*Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peaklesstool turning: Experiment and modeling*“ [31] byla provedena studie akustické emise (AE) při soustružení s lineární řeznou hranou v ustáleném a kmitavém režimu s cílem odhalit odezvu akustické emise na chvění obrobku při soustružení s lineární řeznou hranou. Molekulárně dynamická (MD) simulace odezvy akustické emise na chvění byla použita ke zjištění základních charakteristik systému. Byly získány experimentální závislosti amplitudy signálu AE, střední frekvence a výkonového spektra, které byly porovnány se závislostmi získanými ze simulace molekulární dynamiky (MD). Ukázalo se, že jak experimentální, tak MD simulované spektrální charakteristiky signálu AE jsou citlivé na vibrace v režimu řezání s kmitáním. Mediánová frekvence vykázala pokles při řezání režimu s kmitáním a výkonové spektrum se posunulo do oblasti nízkých frekvencí. Tento vztah byl přisuzován rostoucí úrovni potenciální energie systému.

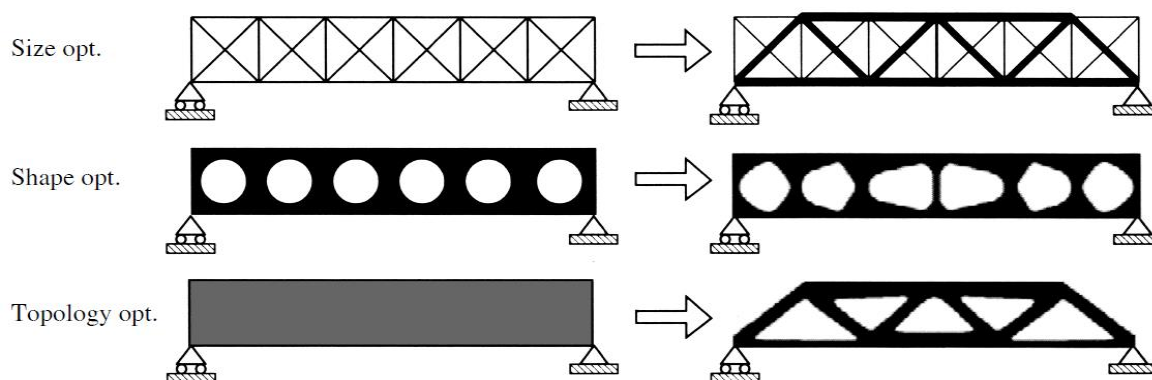
Z výše popsané problematiky je zřejmé, že využití lineární řezné hrany při obrábění žárových nástřiků, kde je potřeba dosáhnout velmi malých hloubek řezu a dobré kvality povrchu, má velký potenciál. Uvedené články popisují hlavní myšlenky, případně jsou myšlenky ověřeny pomocí jednoduchých experimentů. Ovšem žádný výzkum v sobě nepropojuje možnosti obrábění žárových nástřiků lineární řeznou hranou. Z toho důvodu vznikla na Západočeské univerzitě v Plzni pod vedením doc. Řehoře myšlenka vyvinout nástroj založený na využití lineární řezné hrany s možností orientovaného a regulovatelného chlazení pro obrábění žárových nástřiků.

4. Využití AM a TO v konstrukci nástrojů

V další části práce se věnuji řešeršní části v oblasti konstrukce nástrojů pomocí aditivní technologie, topologické optimalizace a možnosti regulace chlazení s cílem zjistit, zda se již někdo podobnému problému věnoval. Aditivní technologie a topologická optimalizace jsou při vývoji nástroje velmi důležité, neboť se jedná o speciální nástroj, kde je třeba zajistit specifické postavení VBD vzhledem k obrobku, dále je potřeba zajistit přívod procesní kapaliny na celou délku ostří a také je potřeba zajistit vysokou tuhost nástroje vzhledem k obrábění tvrdých materiálů, jako jsou žárové nástřiky. Možnost regulace chlazení je poté důležitá, jak pro případnou možnost soustružit, tak i frézovat.

4.1. Optimalizace konstrukce

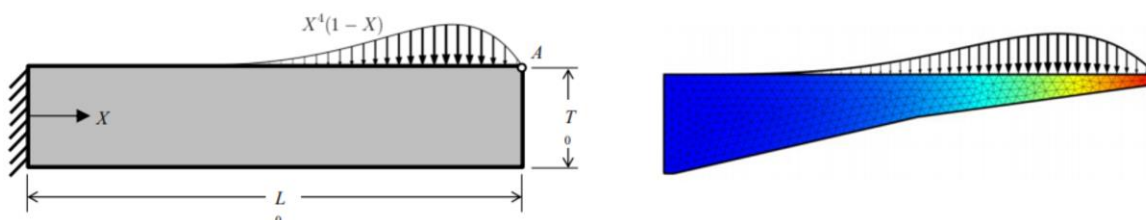
Optimalizace je myšlenka hledání lokálního minima či maxima dle daného kritéria, jako jsou rozměry součástí a vlastnosti materiálu s cílem zlepšit některé vlastnosti, přičemž se však berou v potaz určitá omezení. Na optimalizaci konstrukce lze pohlížet z několika pohledů. Základní je však rozdělení do tří kategorií – rozměrová optimalizace, optimalizace tvaru a zejména pak topologická optimalizace. Topologická optimalizace je moderní a komplexní pohled na návrh konstrukce výrobku. Po dlouhou dobu však topologická optimalizace čelila různým omezením, nejčastěji z hlediska výroby navrženého tvaru. Při topologické optimalizaci totiž často vzniká tvar součásti, který je nevyrobitelný konvenčními způsoby. Tento problém byl ovšem eliminován s příchodem aditivních kovových technologií. Vznikla tak možnost výroby velmi složitých dílů s vnitřními dutinami, různorodou strukturou a s kombinací různých materiálů. To umožňuje výrobu dílů s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi při snížení hmotnosti a zachování pevnosti a tuhosti. Jak již bylo výše zmíněno, metody optimalizace konstrukce jsou klasifikovány do tří základních kategorií. Ne vždy je však možné zařadit řešenou úlohu přesně do jedné kategorie a často tak výsledný tvar bývá kombinací těchto optimalizačních metod. Níže jsou popsány základní charakteristiky a principy jednotlivých kategorií [4] [5] [6].



Obr. 4-1 Typy optimalizační metody [4]

4.1.1. Rozměrová optimalizace

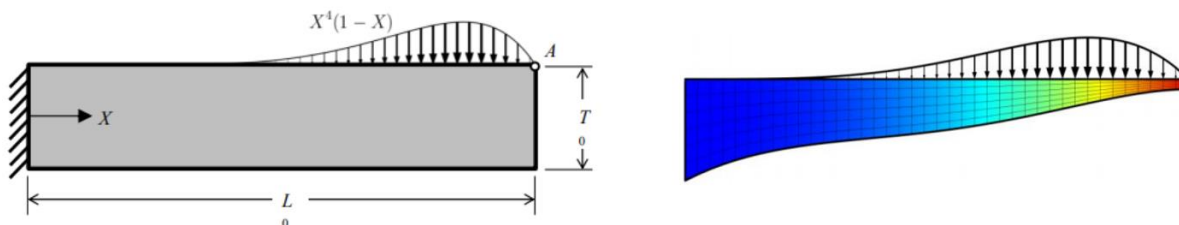
Je základní a nejjednodušší metodou optimalizace. Je vhodná zejména pro jednoduché konstrukční návrhy a pracuje s geometrií modelu. Jedná se o optimalizaci rozměrů. Je předem definováno prostředí a tvar součásti, hledá se minimální hmotnost či cena při dodržení maximálního napětí. Řeší příčné řezy v jednotlivých místech konstrukce. Hlavní myšlenkou je nejprve vložit vstupní data (hranice, tvar, upevnění, působící síly a jiné) a poté vygenerovat optimální konstrukci. Pracuje s geometriemi CAD modelů, a tím je dána i jednoduchost nastavení a práce s touto metodou. V praxi je tato metoda často používaná pro svoji rychlost a jednoduchost, kde do návrhů vstupuje méně než 10 proměnných [4] [5].



Obr. 4-2 Příklad rozměrové optimalizace [5]

4.1.2. Tvarová optimalizace

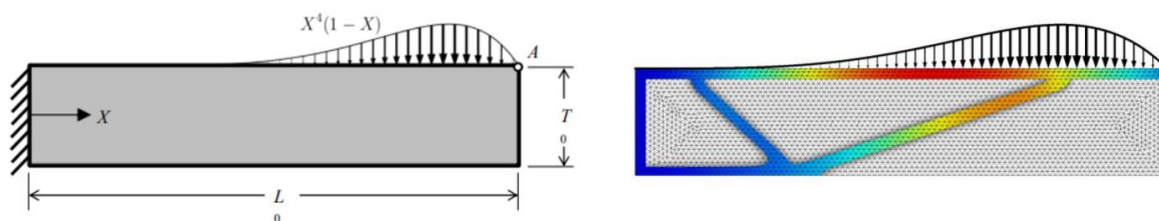
Využívá změnu předem definovaného tvaru hranic součásti nebo jejich parametrů pro dosažení co největších materiálových úspor a co nejlepšího rozložení napětí v konstrukci. Jde o složitější metodu, než je rozměrová optimalizace, a jejím cílem je odebrání přebytečného materiálu, přičemž dochází ke změně tvaru a hranic materiálu. Rozlišují se dva hlavní typy optimalizace. Prvním je lokální optimalizace, která je zaměřena především na místa s vysokým napětím. Druhým typem je globální optimalizace, kde se optimalizuje tvar celého dílu či konstrukce. Hledá se stejně jako u rozměrové optimalizace minimální hmotnost či cena při dodržení maximálního napětí. Mohou vznikat i řešení, která přispívají ke zvýšení tuhosti. Tato metoda se v praxi používá například pro odlehčování hliníkových nosníků v leteckém průmyslu. Výhodou je rychlost výpočtu a návrhu. Nevýhodou je poté nutnost určitých zkušeností konstruktéra/výpočtáře při práci s touto metodou [4] [5].



Obr. 4-3 Příklad tvarové optimalizace [5]

4.1.3. Topologická optimalizace

Představuje inovativní pohled na optimalizaci konstrukce, který je výrazně odlišný od běžného přístupu k návrhu konstrukce. Základem je snaha o nalezení optimálního tvaru při požadovaném snížení hmotnosti a zachování pevnosti a spolehlivosti součásti. Tato metoda nemění podobně jako předchozí metody geometrii nebo tvar hranic materiálu. Topologická optimalizace je založena na změně rozložení materiálu a hledání nejefektivnějšího tvaru vzhledem k pevnosti a rozložení materiálu a tím minimalizaci hmotnosti. Hlavním principem je na rozdíl od předchozích metod nejprve zadat vstupní data jako hranice, kde má být materiál vygenerován, materiál, který má být zachován, působící síly a jiné. Poté je na základě matematických a mechanických výpočtů vygenerována optimální konstrukce, která respektuje vstupní podmínky. [4] [5]



Obr. 4-4 Příklad topologické optimalizace [5]

Jak již bylo zmíněno, topologická optimalizace představuje jeden z novějších konceptů návrhu konstrukce výrobků. Hlavní myšlenkou topologické optimalizace je nalézt optimální využití materiálu při zachování tuhosti materiálu a při minimalizaci hmotnosti. Z tohoto důvodu je možné vytvořit lehké a pevné součásti s minimálním množstvím objemu materiálu, což zefektivňuje výrobu a náklady spojené s materiálem. Teoreticky se jedná o matematický přístup k optimalizaci konstrukce součásti [4] [32].

Způsob, jakým je řešen návrh a konstrukce dané součásti, je u topologické optimalizace výrazně odlišný oproti běžnému přístupu konstruktéra. V klasickém postupu nejprve konstruktér navrhne tvar součásti a následně prověřuje, zda součást splňuje požadavky, které jsou na ni kladeny, například pevnostní analýza, analýza únavy apod. Oproti tomu u návrhu pomocí topologické optimalizace lze nejprve zadat způsob, jakým bude součást zatěžována, materiálové vlastnosti a jiné okrajové podmínky, jako například hranice, kde bude materiál „generován“ či materiál, který je potřeba zachovat, jako závit, dosedací plochy apod. Poté na základě nematematických a mechanických výpočtů systém navrhne a vygeneruje tvar konstrukce s optimálním materiálovým uspořádáním, který respektuje počáteční podmínky. Topologická optimalizace má nejčastější uplatnění v automobilovém a leteckém průmyslu, kde je kladen velký důraz na co největší úsporu hmotnosti při zachování co možná největší tuhosti dílu. V posledních letech se však topologická optimalizace objevuje ve všech odvětvích průmyslu [4] [32].

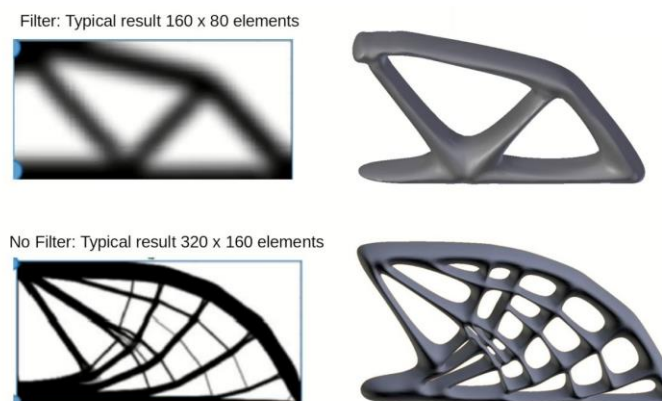
Pomocí topologické optimalizace lze dosáhnout např. [4] [32]:

- maximalizace statické tuhosti při omezeném objemu – co nejlepšího rozmístění definovaného objemu materiálu při maximalizaci statické tuhosti,

- minimalizace objemu při omezené statické tuhosti – minimálního objemu výchozího materiálu modelu vyhovujícího zadané podmínce statické tuhosti,
- maximalizace dynamické tuhosti při omezeném objemu – pro zvolené vlastní frekvence kmitání rámu stroje hledáme jejich maximum při zadaném stupni redukce objemu materiálu.

S rozvojem topologické optimalizace v posledních letech vzniklo také velké množství optimalizačních metod. Mezi nejznámější výpočetní metody, s nimiž se lze často setkat, jsou EOS (Evolutionary Structural Optimization), ASE (Anisotropic Solid or Empty element), SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization) nebo například NOM (Optimization of Method for Detecting and Characterizing) [4] [32].

Nejrozšířenější je matematická metoda SIMP. Cílem této metody je předpovídat optimální rozložení materiálu při dodržení zadaných parametrů a navrhovaného prostoru. Jde o metodu, jejímž výsledkem je mapa bodů, kterým je na základě výpočtů přidělena hustota v rozmezí 0 až 1. Výsledky optimalizace se poté liší zadanými parametry, tedy hustotou pracovních bodů a nastavením filtrů [4] [32].



Obr. 4-5 Výsledky optimalizační metody SIMP podle použitých filtrů [32]

Bionická konstrukce

S topologickou optimalizací také úzce souvisí bionická konstrukce. Bionika nebo také bionické inženýrství je soubor metod a systémů, které existují v přírodě a slouží jako inspirace při konstrukci a vývoji nových technologií. Bionika je v historii lidstva již mnoho století. Již Leonardo da Vinci se snažil sestrojít létající stroj díky studování ptáků za letu. Avšak první se o bionické konstrukci zmínil Otto Schmitt v roce 1950, když pracoval na vesmírném projektu v USA. Zde byla později bionika uznána jako vědní obor založený na principech fungování živých tvorů a jejich systémech. Bionická konstrukce je hojně využívána především v architektuře, kde si bere určité přednosti z předloh v organickém světě a využívá je ve svůj prospěch. Další uplatnění však našla bionika také v robotice a konstrukci [33] [32] [34].

Běžně se uvádějí tři stupně bionické konstrukce, na kterých je tato věda založena. Prvním je imitace z produkčních metod přírody. Druhým stupněm je imitace mechanismů, které se vyskytují v přírodě. Třetím stupněm je studie principů založených na sociálním chování a chování organismů [35].

Typy bionické konstrukce:

Sloupové konstrukční systémy: Jsou inspirovány přírodním řešením stonků rostlin a kmenů stromů, kde je velmi vysoký poměr výšky vzhledem k tloušťce kmene nebo stonku rostliny. Díky uspořádání měkké a tvrdé struktury stonku je u něj dobrá reakce na tlak a tah. Z toho důvodu je stonek schopen ohybu v určitém rozsahu a díky kořenům, které rostlinu drží v zemi, je tak rostlina stabilní i při zmiňovaném vysokém poměru výšky k tloušťce stonku. Těchto poznatků se využívá především ve stavebnictví při konstrukci výškových budov. [33] [34]

Konstrukce zaměřená na styl povrchu: Jedná se o konstrukci, kde je výsledná stěna tvořena více tenkými vrstvami naskládanými na sebe v těsném uspořádání v různé orientaci. Díky rozdílným vlastnostem jednotlivých vrstev a také výslednému tvaru součásti je možné dosáhnout velmi nízké tloušťky stěny při zachování vysoké pevnosti. Velkou výhodou této konstrukce je její nízká hmotnost a malá spotřeba materiálu. Tato konstrukce je inspirována například břidlicí, ulitu šneka, ořechem nebo vajíčkem [33] [34].

Elastické lanové konstrukce: Vycházejí z podstaty pavučin, které jsou silnější než ocelové pruty o stejném průměru a dokáží se protáhnout až o 125 % své délky. V architektuře se používají konstrukce založené na podobném principu, kde jsou pruty taženy od středu ke krajům a slouží jako nosný prvek a na nich je poté upevněn jiný prvek. Příkladem je i inspirace rybími ploutvemi a netopýřmi křídly. Nevýhodou je současná problematická až nemožná výroba vláken s podobnými vlastnostmi, jako mají pavučiny [33] [34].

Geodetické konstrukce: V přírodě se běžně vyskytují tříhrany a šestihrany. Například včelí plástve, které jsou členěné do šestiúhelníků. Z důvodu toho, že šestiúhelník je nejlepší způsob, jak zaplnit plochu, tedy nejlepší využití místa a také nejlepší rozložení působících vnějších sil. Díky tomu má konstrukce založená na tomto principu velmi vysokou tvrdost a pevnost při co nejlepším využití místa. Tyto konstrukce jsou využívány zejména ve stavitelství, ale v poslední době jsou stále více používány i v aditivní výrobě a mikro prutových soustavách [33] [34].

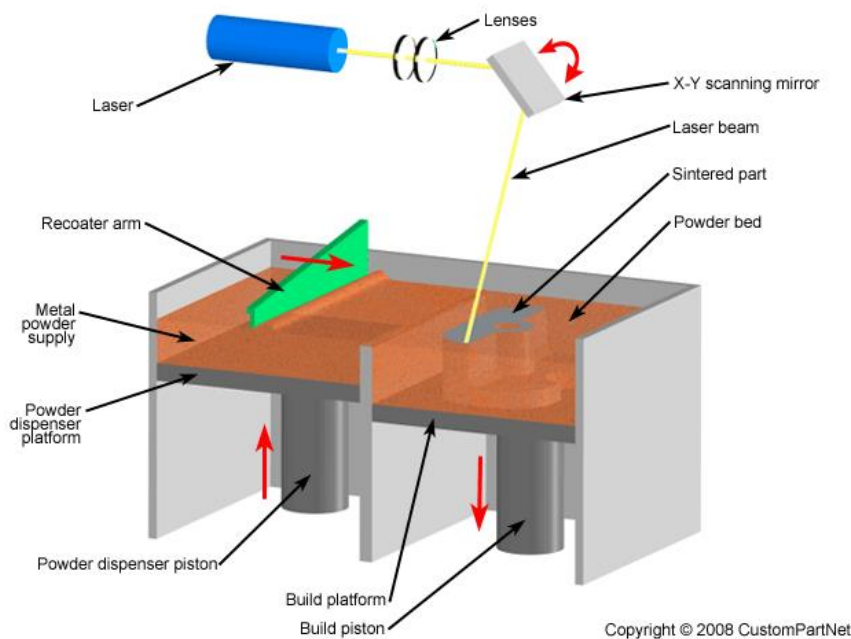


Obr. 4-6 Inspirace u bionických prvků rostlin při konstrukci v architektuře [35]

U takto navržených dílů, kde je provázaná konstrukce pomocí topologické optimalizace, bioniky a mikroprutových soustav, je velmi složitá a nákladná výroba. Z toho důvodu je často jediným možným řešením použití aditivních technologií, které mohou naplno využít potenciálu topologické optimalizace.

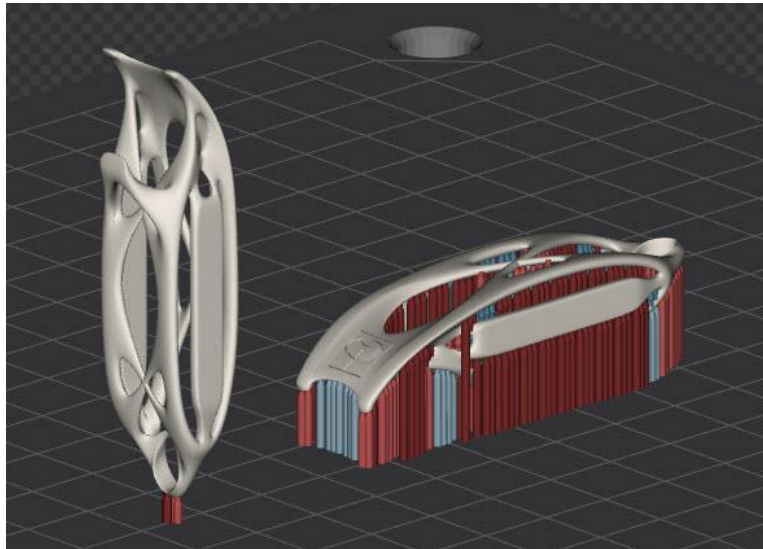
4.2. Aditivní technologie (AM)

Vývoj aditivních technologií umožňuje propojení všech výše uvedených optimalizačních metod a konstrukčních řešení. Ve strojírenství jsou typickým představitelem aditivní výroby tiskárny založené na principu tisku kovového prášku metodou SLS (Selective Laser Sintering) a SLM (Selective Laser Melting). Mezi největší výrobce strojů podporujících tyto technologie patří EOS (Electro optical Systems), která zároveň stojí za vývojem těchto metod. Princip výroby pomocí kovového 3D tisku spočívá v nanášení tenké vrstvy kovového prášku, který má nejčastěji rozměr mezi 20 μm až 100 μm . Tento prášek je nanášen na platformu pomocí nanášecího ramene a poté je spečen pomocí laserového paprsku v požadovaném tvaru průřezu výrobku. Data pro stroj jsou vygenerována z CAD modelu a rozdělena do požadovaných příčných řezů. Po spečení jedné vrstvy dojde k posunutí platformy a nanášení další vrstvy prášku. Tato vrstva je opět vystavena laserovému paprsku a dojde tak k přitavení na předchozí vrstvu. Po dokončení tisku výrobek obklopuje neexponovaný kovový prášek, který se recykluje a využije při dalším tisku. Na následujícím obrázku je uveden princip metody SLS [36] [37] [38].



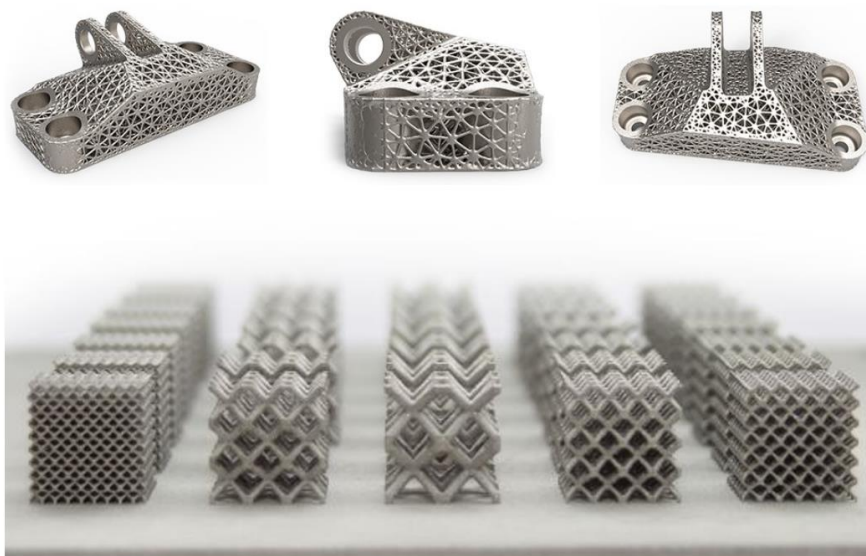
Obr. 4-7 Princip metody SLS [37]

Použití topologické optimalizace s bionickými prvky má také další podstatnou výhodu ve spojení s aditivní výrobou. Běžně je totiž nutné při složitějších konstrukcích vytvářet u 3D tisku podpory, které se po tisku musejí odstranit, což prodlužuje a zdražuje již tak nákladnou výrobu. Bionická struktura je navržena tak, aby jednotlivé vytvořené vrstvy zároveň sloužily jako podpora pro další vrstvu. To samozřejmě platí pouze při vhodném umístění součásti v prostoru tisku [39].



Obr. 4-8 Příklad eliminace podpor s využitím bionické konstrukce a vhodného polohování dílu [39]

V kombinaci aditivní výroby a topologické optimalizace je velmi využívána takzvaná mikroprutová soustava, anglicky je označována jako lattices structure. Jedná se o porézní struktury s pravidelným nebo nepravidelným buněčným uspořádáním. I v tomto případě je zde inspirace přírodou, například již zmiňovanou včelí plástev. Hlavní výhodou součástí obsahujících lattices structure je snížení jejich hmotnosti při minimálním ovlivnění pevnosti a tuhosti. Další možné použití je v místech, kde je potřeba absorbovat určitou energii, neboť velice efektivně a rovnoměrně pohlcují vnesenou energii. Nevýhodou mikroprutových struktur může být jejich obtížnější volba a rozmístění vzhledem k výsledným požadavkům na vlastnosti vyrobené součásti [4] [40].



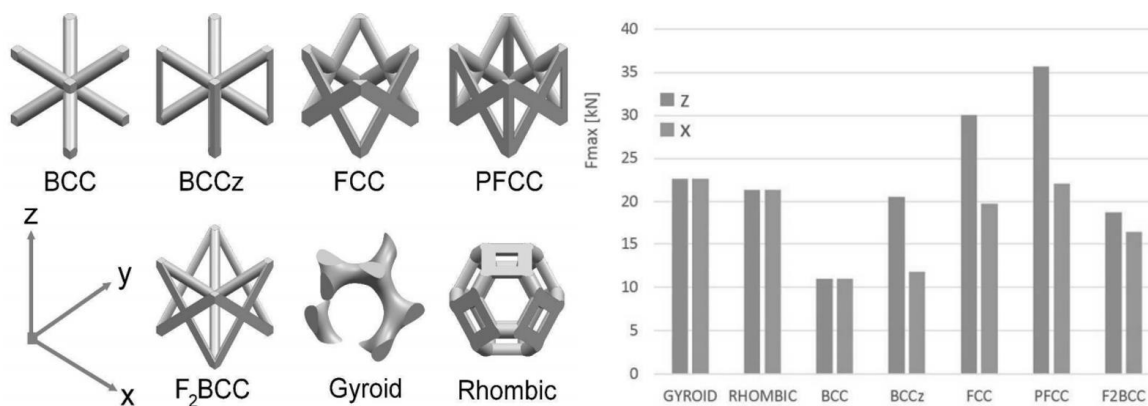
Obr. 4-9 Příklad mikroprutové soustavy [40]

4.3. Současný stav využití AM a TO v konstrukci nástrojů

Následující kapitola se zabývá současným stavem a vědeckými poznatky v oblasti vývoje a konstrukce nástrojů pro soustružení a frézování pomocí aditivních technologií a topologické optimalizace. A dále pak způsobem chlazení VBD při možném využití topologické optimalizace a aditivní výroby. V textu je dále popsán současný stav techniky v oblasti řešení přívodu a možnosti ovládní přívodu procesní kapaliny a také nástrojů zkonstruovaných pomocí topologické optimalizace a aditivních technologií.

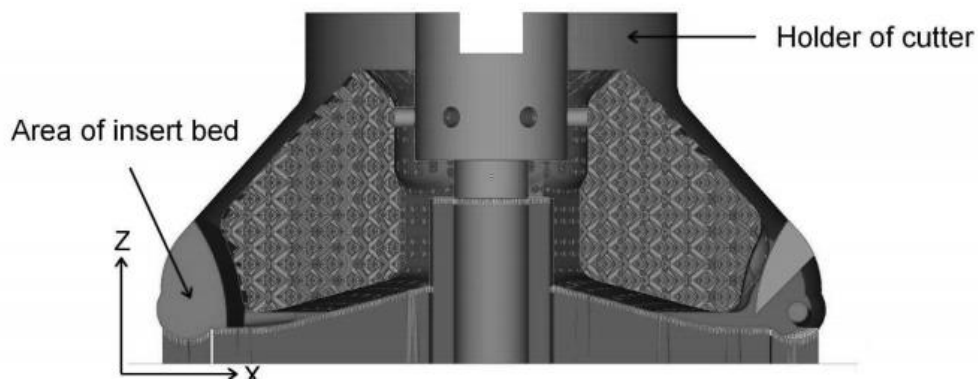
Propojení 3D tisku nástrojů a optimalizaci zmiňuje článek „*Výhody nového přístupu v navrhování frézovací hlavy s využitím 3D tisku z kovu*“ [41]. Článek se zaměřuje na možné pozitivní důsledky použití topologické optimalizace při výrobě nástroje pomocí 3D tisku pro proces obrábění. Hlavním cílem je provést průzkum za účelem získání znalostí v oblasti implementace mřížkových struktur při optimalizaci frézovacího nástroje. Touto optimalizací by bylo možné dosáhnout snížení hmotnosti, což by umožnilo zvýšit dynamiku řezného procesu a také nástroji pomoci s absorpcí vibrací, čím lze prodloužit životnost řezného břítu a zlepšit efektivitu obrábění. Avšak práce popisuje, že použitím běžně používané mřížkové struktury jsou tlumící vlastnosti velmi omezené, výrazné zlepšení tlumících vlastností nelze očekávat ani při použití jiných mikrostruktur. Mřížkové struktury tedy nejsou dobrými absorbéry vibrací, avšak mohou být dobré jako izolátory vibrací, pokud síla porézní struktury zeslabuje amplitudu kmitání [41].

Další článek s názvem „*Uniaxial Tensile Load of Lattice Structures Produced by Metal Additive Manufacturing*“ [42] se zabývá topologií a vlastnostmi mřížkových struktur vytvořených za pomoci technologie DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Vzorky mřížek pak byly vystaveny jednoosému tahovému zatížení a během těchto zkoušek byly pozorovány iniciace trhlin a jejich umístění. Data z experimentů potom popisují slabosti jednotlivých mřížek a popisují jejich maximální dovolené zatížení tahem. Výsledky prokázaly největší pevnost mřížky PFCC, avšak pouze ve směru osy Z, ve směru osy X byla pevnost o třetinu nižší. Nižší maximální pevnosti, ale stejné pevnosti ve všech směrech poté dosáhla tzv. Gyroidní a Rombická struktura. Nejnižší pevnosti poté klasická BCC mřížka. Tento článek potvrzuje, že mřížkové struktury jsou zajímavé pro využití topologické optimalizace v oblasti konstrukce nástrojů. Následující obrázky popisují mřížky použité v experimentu a graf popisující výsledky maximální dosažené síly při tahové zkoušce [42].



Obr. 4-10 Typy použitých mřížek a výsledky tahové zkoušky [42]

Článek, který navazuje na testování a vyhodnocení mikroprutových soustav, se věnuje přizpůsobení právě mřížkových soustav do těla frézy tak, aby byla redukována hmotnost nástroje při zachování jeho tuhosti. V běžném přístupu k návrhu je totiž nutné při zvýšení tuhosti zvýšit i hmotnost frézy přidáním materiálu, což vede ke snížení dynamiky, a to vyžaduje výkonnější pohon vřetena stroje. Pro optimalizaci byla vybrána mřížka BCC, jejíž topologie byla přepracována pro rotující těleso nástroje. Mřížka byla umístěna pod úhlem 38° . Tento návrh byl poté zkontrolován pomocí FEM analýz, které neodhalily žádné oblasti s narušenou soudržností nebo které by neodolaly zatížení. Následně byla fréza vytištěna a připravena k porovnání s konvenčním nástrojem. Experiment porovnání těchto dvou nástrojů potvrdil, že odlehčená fréza dosahuje obdobných hodnot při testování dynamiky přirozené frekvence, řezných sil při obrábění a opotřebení břitu. Nedošlo však k potvrzení o tlumících vlastnostech mřížkové struktury a zvýšení trvanlivosti břitu v důsledku použití těchto struktur. Obrázek níže zobrazuje rozloženou mikrostrukturou v těle nástroje [25] [26].



Obr. 4-11 Frézovací nástroj s mikrostrukturou [25]

Prvním nástrojem, který je již konvenčně nabízený, je odlehčená fréza CoroMill® 390 vyráběná s využitím aditivní technologie společností Sandvik Coromant. Při návrhu frézy byla pomocí topologické optimalizace vytvořena optimální konstrukce frézy umožňující dosažení minimální hmotnosti a kompaktnosti nástroje. Fréza je vytištěna ze slitiny titanu, což ještě více napomáhá ke snížení výsledné hmotnosti. Nižší celková hmotnost v tomto případě pomáhá minimalizovat vibrace a zvýšit bezpečnost obrábění při obrábění s dlouhým vyložení nástroje, tím také dochází ke zvýšení produktivity obrábění. Fréza se používá zejména při frézovacích operacích s dlouhým vyložení nástroje, kde je v adaptéru uložen tlumící mechanismus. Nízká hmotnost nástroje a také krátká vzdálenost mezi tlumícím mechanismem a břitem nástroje tak napomáhá ke snížení vibrací, a tím ke zvýšení výkonnosti a zlepšení bezpečnosti obráběcího procesu. Frézu lze použít pro čelní a stranové frézování hlubokých rohů, dutin a drážek a vyrábí se o průměru 40 nebo 50 mm, lze volit provedení se třemi nebo čtyřmi zuby s nerovnoměrnou zubovou roztečí a vnitřním přívodem chladicí kapaliny [43].



Obr. 4-12 Odlehčená fréza CoroMill 390 [43]

Na podobném principu je založen i nástroj společnosti LMT. Tento nástroj využívá technologie 3D tisku k vytvoření zakřivených chladicích kanálek. Tím je přivedena kapalina přesně do míst, kde je to potřeba. Podle provedených testů je díky této konstrukční změně dosaženo prodloužení životnosti VBD o 50 % při frézování titanu. Na následující otázku je prototyp nástroje s chladicími kanálky společnosti LMT [44].



Obr. 4-13 Nástroj vyvinutý s využitím 3D tisku a optimalizace chladicích kanálek [44]

Společnost KOMET díky využití aditivních technologií vyvinula šroubovací frézovací hlavičku s pájenými břity s PKD. Díky aditivní technologii bylo možné změnit uspořádání jednotlivých břitů a dosáhnout tak podstatně většího úhlu sklonu ostří. V porovnání s nástroji vyráběnými konvenční technologií se také podařilo výrazně zmenšit drážky mezi jednotlivými zuby. Díky tomu je nástroj mnohem produktivnější. Například u šroubovací hlavy o průměru 32 mm byl počet drážek a břitů zvýšen ze šesti na deset, čímž bylo dosaženo až o 50 % vyšší rychlosti posuvu. Aditivní technologie rovněž přináší možnost optimalizovat přívod kapaliny tělem frézy. To zajišťuje, že každá řezná hrana je přesně zásobována chladicí kapalinou samostatným kanálkem, zatímco vnější konstrukce těles pomáhá zajistit spolehlivý odvod třísek z čela nástroje [45].



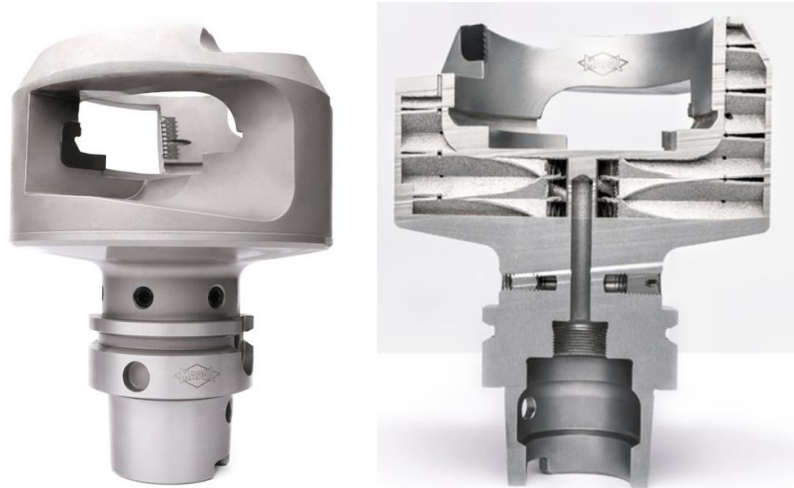
Obr. 4-14 Frézovací hlavička společnosti KOMET GROUP [45]

Aditivní technologie nabízí také možnost snížení hmotnosti součástky, protože materiál lze použít pouze tam, kde je to nezbytné pro optimální funkčnost součástky. Rovněž překonává konvenční výrobní metody z hlediska dodací lhůty u všech speciálních nebo experimentálních nástrojů, které zákazníci společnosti Komet potřebují [45].



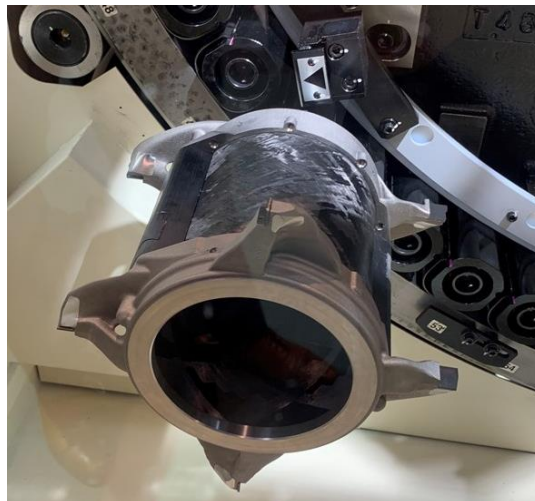
Obr. 4-15 Frézy vyrobené AM společností KOMET GROUP [45]

Příkladem využití 3D tisku při konstrukci nástroje je také společnost MAPAL. Nový nástroj „Bell“ se používá především pro vnější obrábění hadicových přípojek například u turbodmychadel. Výroba tak musí být velice přesná a splňovat vysoké požadavky na obráběnou konturu. Společnost MAPAL proto optimalizovala konvenčně vyráběný nástroj a díky využití aditivních technologií mohla být vložena speciálně navržená odlehčená struktura s tlumícími vlastnostmi a také optimalizovala konstrukce chladicích kanálků. Díky tomu je nástroj o 30 % lehčí a díky tlumícím účinkům se zvýšila jeho životnost o 40 %. Je proto možné obrábět rychleji při zachování stejné úrovně kvality. Celková doba obrábění byla snížena až o 50 %. Nástroj využívá aditivních technologií k výrobě těla nástroje rovnou připojeného k upínači HSK-63 a pájených VBD [46].



Obr. 4-16 Odlehčený nástroj „Bell“ s tlumícími vlastnostmi [46]

Specifický přístup k odlehčení nástroje má i společnost Makino. Nástroj na obrázku níže je určen k obrábění převodových skříní a skříní motoru. Vzhledem k velikosti nástroje je snaha o co největší odlehčení, zejména z důvodu rychle měnit řeznou rychlost a také rychle pohybovat nástrojem v zásobníku nástrojů. Společnost Makino využívá aditivních technologií ve spojení tělem nástroje z kompozitu z uhlíkových vláken. Tím je dosaženo velmi nízké hmotnosti při zachování vysoké pevnosti a tuhosti [44].



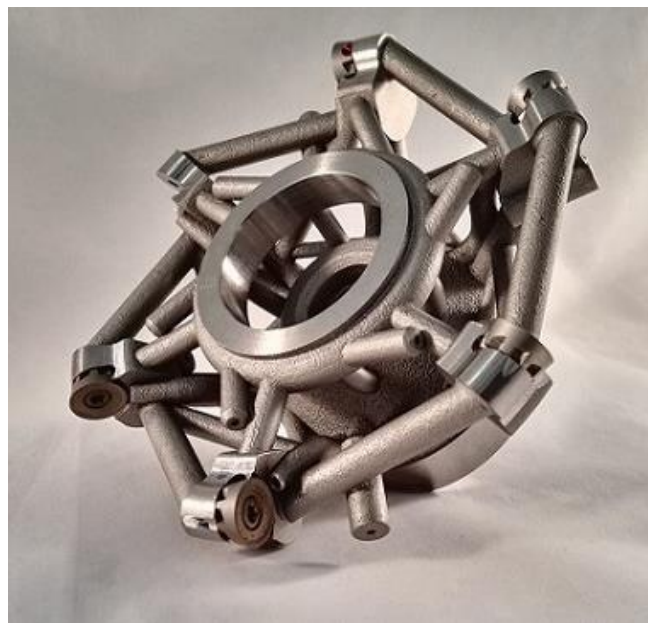
Obr. 4-17 Odlehčený nástroj s tělem z kompozitu [44]

Obdobný přístup využívá i firma Hofmeister, se kterou Západočeská univerzita úzce spolupracuje. Jejich frézovací hlava je spojením konvenčně obráběného nástroje a kompozitové výplně. Část pro lůžka VBD a upínací část je vyráběna na konvenčních strojích z důvodu snížení nákladů. Tyto dvě části pak spojuje kompozit, který zároveň tvoří tělo frézovací hlavy. Díky využití kompozitu a uhlíkových vláken je nástroj výrazně odlehčen při zachování vysoké tuhosti. Díky tomu jsou kladeny menší nároky na vřeteno a pohon stroje při rozběhu a zastavování frézy a stejně jako v předchozím případě možnost rychleji pohybovat nástrojem v zásobníku nástrojů [47].



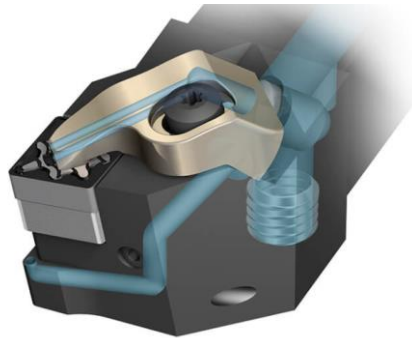
Obr. 4-18 Odlehčená frézovací hlava s tělem z kompozitu [47]

Dalším nástrojem, který je založený na principu optimalizace a 3D tisku, je fréza vyvinutá na Západočeské univerzitě. Tato fréza je založena na principu prutové konstrukce, kde jednotlivé nosiče břitových destiček a tělo nástroje jsou spojeny pomocí rozpěr a mezi ty jsou dále včleněny vzpěry. Tím je dosaženo dostatečné tuhosti nástroje při co možná největším snížení jeho hmotnosti. Tělo nástroje je také opatřeno tryskami, které směřují na čelo a hřbet vyměnitelných břitových destiček sloužících k efektivnějšímu chlazení nástroje. Celý nástroj je vytištěný z nástrojové oceli, a to z důvodu obtížné obrobitelnosti a vysokých nákladů v případě tisku z titanu. Nástroj je koncipován především pro hrubovací operace. Prutová konstrukce nástroje není vyrobitelná konvenčními způsoby výroby, a tak je použita právě aditivní výroba. Další výhodou jsou materiálové úspory, až o 60 % nižší hmotnost oproti standardním nástrojům, při zachování tuhosti a pevnosti nástroje [48] [49].



Obr. 4-19 Frézovací hlava KRAKEN [48]

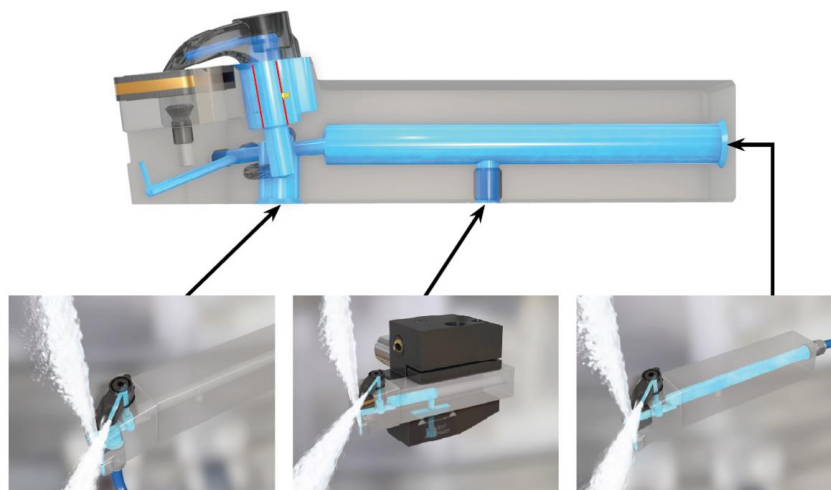
Poslední řešenou problematikou je orientované chlazení na čelo a hřbet nástroje a jeho případné ovládání a zavírání jednotlivých kanálků. Hlavním přínosem řezné kapaliny je odvod třísek z místa řezu a napomáhání jejímu lámání, chlazení a případnému mazání mezi nástrojem a obrobkem. Při správném využití řezné kapaliny se tam maximalizuje výkon obrábění, zvyšuje bezpečnost procesu, zvyšuje výkon nástroje a zároveň kvalitu obrobené součásti. V současné době se již všichni velcí výrobci nástrojů pro obrábění, jako Sandvik, Iscar, Walter a další, zaměřují na orientované chlazení čela a hřbetu nástroje, neboť je prokázáno, že toto orientované chlazení významně napomáhá ke snížení opotřebení a zvýšení životnosti nástroje a zvyšuje kvalitu obrobeného povrchu. Následující obrázky ukazují příklady využití tohoto orientovaného chlazení [50] [51] [52].



Obr. 4-20 Walter precision cooling [50]

Společnost Walter využívá inovativní technologii chlazení nazvanou Walter Turn Precision Cooling. Tato metoda umožňuje přímý přívod chladicího média přes upínací systém na čelo nástroje a pomocí vnitřních kanálků na hřbet VBD. Výsledkem je prodloužená životnost nástroje o 30 až 150 % při obrábění nerezových materiálů, slitin s vysokou teplotou a ocelí. Současně je možné dosáhnout až 100 % vyšší řezné rychlosti při zachování stejné životnosti nástroje. Tato technologie také zlepšuje lámání třísky, zejména při tlacích nad 40 bar. Výhodou je, že je použitelná na stávajících strojích s tlakem chladicího média 10 barů nebo vyšším [50].

Tuto technologii využívají i další výrobci, na následujícím obrázku je příklad soustružnického nože společnosti Iscar s možností připojit chladicí médium na třech různých místech nože, v závislosti na využívané technologii [51].



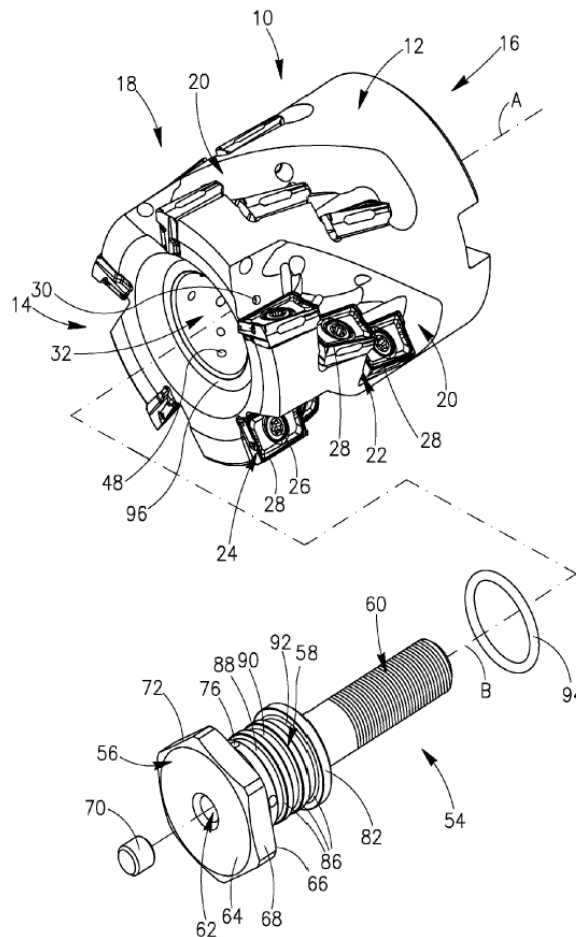
Obr. 4-21 Soustružnický nůž od společnosti ICSAR s orientovaným chlazením [51]

S orientovaným chlazením také úzce souvisí možnost vysokotlakého chlazení. Vysokotlaké chlazené (až 200 bar) zajišťuje účinnější chlazení v oblasti kontaktu VBD s obrobkem, rychle vytlačuje třísku z čela břitové destičky, čímž snižuje její opotřebení a pomáhá jejímu „rozbíjení“ menší části, čímž rovněž napomáhá k odvádění třísky z místa řezu [52].



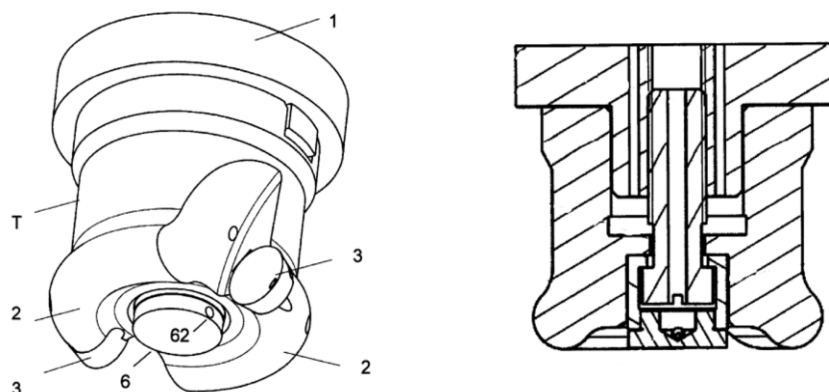
Obr. 4-22 Porovnání orientovaného vysokotlakého chlazení s konvenčním [52]

Následující patenty jsou založené na principu ovládání, otevírání a zavírání chladicích kanálků. První z popsaných patentů US8696252 je fréza s nastavitelným chladicím mechanismem, kde na obvodu nástroje jsou ve šroubovici připevněné destičky s přívodem chladicích kanálků na čela VBD. Nástroj je konstruovaný jako klasická fréza bez využití optimalizace a 3D tisku. Ve středu frézy je umístěný středový čep, který slouží jako mechanismus k otevírání a uzavírání určitých chladicích kanálků. Čep je dutý a opatřen drážkami, ve kterých je umístěn vývod chladicích kanálků. Ty poté mohou dále navazovat na kanálky v těle nástroje. Drážky na těle šroubu mohou být opatřeny těsnícím kroužkem a tím pádem je možné utěsnit (přerušit) proudění chladicí kapaliny do těla nástroje a k vyměnitelným břitovým destičkám. Čep je opatřen závitem a při každém nastavení chlazení, tím je myšleno přidání nebo přeuspořádání těsnění, je nutné čep vyšroubovat. Toto řešení je tedy celkem zdlouhavé, hlavně v situaci, kdy je častá potřeba otevírání a zavírání určitých kanálků podle druhu obráběného materiálu, způsobu obrábění a řezných podmínek. Na následujícím obrázku je zobrazen prototyp nástroje spolu s čepem řídicím přívod kapaliny [53].



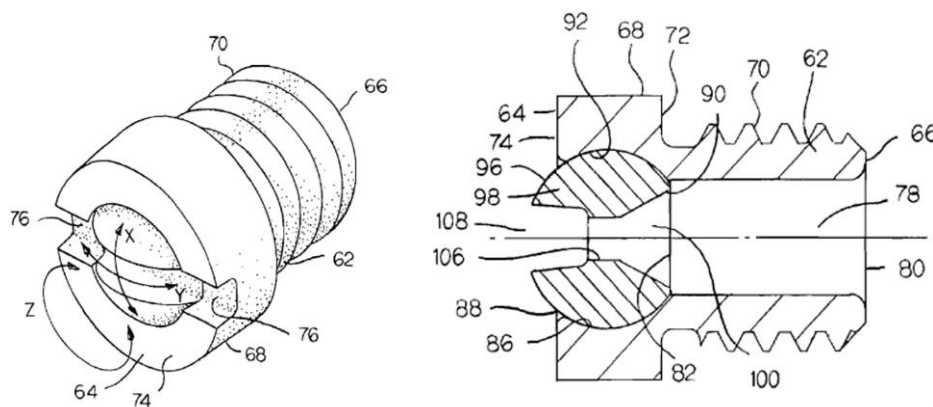
Obr. 4-23 Patent nástroje s regulovatelným chlazením [53]

Na podobném principu je založen i vynález CZ 306957. Jedná se o nástrčnou frézu, která se připevňuje k upínači pomocí dutého šroubu opatřeného systémem pro přívod chladicí kapaliny do místa řezu. Fréza tak má vnitřní přívod kapaliny skrz těleso nástroje i přes dutý šroub a tím je dosaženo zefektivnění chlazení na čele a přímo v místě řezu. Ovšem toto provedení nástroje neumožňuje oproti předchozímu řešení regulaci v podobě částečného uzavření chladicích kanáleků. Návrh nástroje i s provedením dutého zajišťovacího šroubu je znázorněn na následujícím obrázku [54].



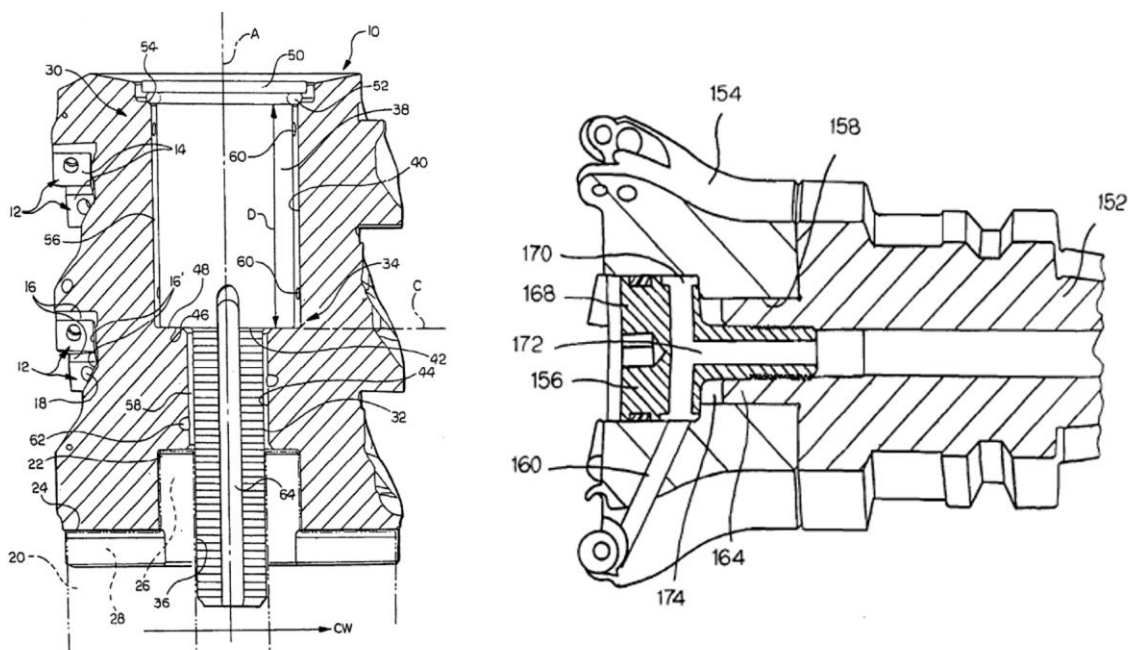
Obr. 4-24 Návrh rotačního nástroje s vnitřním chlazením [54]

Jiný pohled na ovládání chladicí kapaliny nabízí patent US9434011. Tento patent řeší „rozprašovací“ trysku, která je umístěna na vyústění chladicího kanálku směřujícího na čelo VBD. Tryska se skládá z vložky, která je našroubovaná v těle nástroje, a dále pak ze samotné nastavitelné trysky s vyústěním ve tvaru štěrbin. Výhodou takto řešené trysky je jednak nastavitelnost ve dvou osách a její rotace, tak také tvar výstupu ve formě štěrbin. Díky tomu je možné nasměrovat chladicí kapalinu přímo do místa řezu a na celou délku ostří a tím docílit lepšího chlazení a lámání třísek [55].



Obr. 4-25 Rozprašovací tryska chladicí kapaliny [55]

Na principu přívodu řezné kapaliny přes střední upínací šroub je založeno mnoho dalších patentů a vynálezů, jako například US8573098B2 nebo US7125207B2. Ovšem žádné z těchto řešení neřeší možnost regulace přívodu řezné kapaliny do místa řezu nebo možnost přívodu kapaliny pouze na čelo, pouze na hřbet či na oboje zároveň podle potřeby a způsobu obrábění [56] [57].



Obr. 4-26 Příklady využití upínacího šroubu pro rozvod řezné kapaliny [56] [57]

5. Souhrn a hodnocení poznatků

V práci se zaměřuji na problematiku obrábění žárových nástřiků a představuji různé přístupy a způsoby obrábění, které mohou být využity k dosažení optimálních výsledků. Konvenční metody obrábění se často potýkají s výzvami, jako je vysoká tvrdost a odolnost povlaků, které ztěžují broušení a snižují životnost nástrojů. V rámci práce zkoumám alternativní přístupy, které umožňují efektivní a přesné obrábění žárových nástřiků. Jedním z těchto přístupů je využití definované geometrie břitu, konkrétně lineární řezné hrany, k dosažení co největší efektivity při zachování přesnosti obrábění. Dalším přístupem je poté optimalizace řezných podmínek, chlazení a použití speciálních řezných materiálů.

V oblasti vývoje a konstrukce nástrojů pro obrábění velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů na bázi žárových nástřiků a tištěných materiálů se stále potýkáme s výzvami spojenými s jejich konvenčním obráběním. Povlaky vytvořené žárovými technologiemi mají vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení, což ztěžuje jejich broušení a zvyšuje výrobní náklady. Navíc, při obrábění žárových nástřiků vzniká velké teplo v oblasti řezu, což zkracuje životnost řezných nástrojů. Z podstaty technologie broušení není tato metoda dostatečně produktivní a výrobně efektivní metodou pro tyto povlaky. Proto se zabývám možnostmi nahrazení broušení nástrojem s definovanou geometrií břitu a optimalizací chlazení, což by vedlo ke zlepšení obrábění a prodloužení životnosti řezných nástrojů. Dále se zabývám využitím topologické optimalizace a aditivních technologií pro návrh konstrukce nástrojů s orientovaným a regulovatelným chlazením. Tímto přístupem chci dosáhnout efektivního rozložení materiálu, zvýšení tuhosti nástroje a optimalizovaného chlazení řezného břitu. Současně se snažím eliminovat nedostatky konvenčních metod obrábění, jako je malá životnost nástrojů a vysoké teplo v oblasti řezu [1] [2].

V rešeršní části jsem zkoumal možnosti konstrukce nástrojů pomocí aditivních technologií a topologické optimalizace, stejně jako možnosti regulace chlazení. Cílem bylo zjistit, zda existují již podobná řešení pro obrábění žárových nástřiků lineární řeznou hranou. Z poznatků uváděných v předchozí kapitole je zřejmé, že technologie 3D tisku spolu se spojením s topologickou optimalizací umožňuje nový a naprosto odlišný pohled na konstrukci obráběcích nástrojů. Využitím těchto technologií je možné dosáhnout zlepšení vlastností nástroje, a to zejména v oblasti řešení chlazení řezného břitu nástroje, zvyšování jeho pevnosti a tuhosti, nebo například zlepšení jeho tlumících vlastností. Velký přínos aditivní technologie je v možnosti optimalizování chladicích kanálků, čímž je možné dosáhnout požadovaných tvarů a přívodu řezné kapaliny přesně do místa řezu při požadovaném průběhu kanálků v nástroji. Eliminují se pak ztráty tvořené například kolmým navrtáním kanálků či nepřesným nasměrováním kapaliny do řezu.

Dosavadní analýza ukázala, že žádné z existujících řešení nenabízí kombinaci vlastností a technických řešení, které je vhodné použít při obrábění žárových nástřiků. Tím je myšleno navržení nástroje tak, aby byl schopen při obrábění využít celou délku řezné hrany a byl schopen soustružení a také případně frézování při osazení stejnou VBD pro obě operace. Z toho důvodu je také nutná regulace přívodu řezné kapaliny, konkrétně tedy možnost uzavření a otevření chladicích kanálků podle požadované operace a dalších parametrů obrábění. S tím souvisí i optimalizovaný přívod chladicí kapaliny na hřbet a čelo VBD v celé délce jejího

ostří, právě z důvodu využití celé délky ostří. Druhou neméně důležitou částí, je pak optimalizace konstrukce nástroje tak, aby byla zvýšena jeho pevnost a snížena náchylnost k nestabilitě řezného procesu například vlivem vibrací od vznikajících řezných sil. Toho je možné dosáhnout právě na základě topologické optimalizace, kde bude konstrukce řešena tak, aby co nejvíce eliminovala právě vliv řezných sil na vznik nestability nástroje a vibrací s tím spojených.

Praktická část práce je zapracována na základě poznatků získaných v konkrétním zaměření studia v oblasti vývoje a konstrukce nástrojů pro obrábění velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů na bázi žárových nástřiků (například NiCrBSi, Fe13Cr, Stellite 6 a další) a tištěných materiálů, jako je Inconel 718. Díky způsobu výroby povlaků, pomocí žárových technologií a jejich specifického složení z důvodu zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení, je jejich konvenční obrábění velmi obtížné. Běžný způsob obrábění takto vytvořených povlaků je broušení. Produktivita broušení je však nízká naopak výrobní náklady jsou poměrně velmi vysoké. Proto je nutné zkoumat možnosti obrobitelnosti žárových nástřiků a zvyšovat řezivost nástrojů zejména produktivnějšími přístupy a technologiemi. Při obrábění žárových nástřiků vzniká také velké teplo v oblasti řezu, které dále napomáhá k rychlejšímu opotřebování břitu nástroje. Při konvenčním způsobu obrábění pomocí soustružení a frézování se tak často využívají řezné materiály jako kubický nitrid boru (CBN) nebo polykrystalický diamant (PKD) právě z důvodu vysoké tvrdosti či tepelné odolnosti [1].

Na základě již provedených experimentů v oblasti obrábění žárových nástřiků, byl také vyhodnocen následující problém. Velké opotřebení a s tím spojená malá životnost VBD při obrábění konvenční metodou soustružením, tedy v tom případě, kdy se do místa řezu dostává špička VBD. Na základě těchto poznatků, vzhledem k vysoké teplotě v místě řezu a nízké životnosti VBD, se nabízí optimalizování řezného nástroje tak, aby byla přivedena chladicí kapalina co možná nejvíce do místa řezu a využití celé délky řezné hrany VBD (lineárního ostří) a tím je možné eliminovat výše zmíněné nedostatky. Další myšlenkou je tedy zefektivnit chlazení a využít celou délku řezné hrany destičky a tím zefektivnit obrábění žárových nástřiků a zvýšit životnost VBD. Dalším bodem je pak zvýšení tuhosti nástroje a vyvinutí takového nástroje, který by splňoval výše uvedené požadavky. Vzhledem k tomu, že návrh ideálního chlazení a umístění VBD, tak aby bylo možné využít délku celého ostří při současném zachování nebo dokonce zvýšení tuhosti nástroje, je poměrně složitý konstrukční úkol, jeví se použití topologické optimalizace s využitím aditivních technologií jako ideální způsob návrhu konstrukce. Vhodným řešením, jak dosáhnout co největší možné tuhosti při optimálním rozložení materiálu a minimální hmotnosti je rovněž využití bionické konstrukce. Z tohoto důvodu bude rovněž využito softwarové řešení pro topologickou optimalizaci. Při obrábění určitých typů materiálů je nezbytné používat chladicí či mazací médium během procesu řezání. Během řezání obecně vzniká teplo třením ploch mezi nástrojem a obráběným materiálem a také vzniká plastická deformace v místě vzniku třísky. Odvod a snížení tepla v místě řezu má pak pozitivní výsledky na trvanlivost řezného břitu a na výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Systém chlazení pak má pozitivní účinky na samotné řezání, mazání a čištění místa řezu. Médium, nejčastěji kapalinu, je možné přivádět do místa řezu klasickým externím způsobem. Druhým způsobem (interním), který je v dnešní době stále více využívaný, je přívod přímo řezným nástrojem, což zvyšuje efektivitu chlazení

a tím výkon obrábění, díky možnosti efektivnějšího a přesnějšího přívodu kapaliny do místa řezu. Médium je možné přivádět za standardního či zvýšeného tlaku, označovaného jako vysokotlaké chlazení, kde tento způsob vysokotlakového chlazení umožňuje lepší průnik kapaliny mezi třísku a čelo/hřbet nástroje, a tím napomáhá k dělení třísky a lepšímu odvodu tepla z místa řezu. V dnešní době je již běžné konstruovat nástroje s vnitřním chlazením, jako jsou například vrtáky ze slinutého karbidu, kde je možné vyrobit chladicí kanálky ve šroubovici, nebo frézy a soustružnické nože s přímými navrtanými kanálky. Nevýhodou je nemožnost přivedení kanálků do přesně požadovaných míst tak, aby se zefektivnilo chlazení. Právě tuto nevýhodu odstraňuje topologická optimalizace s využitím 3D tisku, kde je možné dosáhnout ideálního tvaru a průběhu kanálku, i jeho přesné vyústění tak, aby bylo dosaženo co nejefektivnějšího chlazení a snížení turbulentního proudění kapaliny v kanálku a ztrátám tlaku kapaliny [2].

Na základě získaných poznatků v oblasti konstrukce řezných nástrojů s využitím AM, a TO a z nich zjištěných nedostatků bude cílem praktické části práce navrhnout speciální nástroj (QCA) zejména pro obrábění žárových nástříků. Tento nástroj bude postupně optimalizován až do konečné fáze, kterou bude topologické optimalizace. S jednotlivými variantami nástroje budou prováděny dílčí experimenty tak, aby bylo možné odhalit případné nedostatky a nástroj zdokonalovat.

Celkově se práce zaměřuje na možnosti vývoje a optimalizace konstrukce nástrojů pro obrábění žárových nástříků. Výsledky této práce by mohly vést k významným zlepšením v oblasti obrábění těchto materiálů a snížení výrobních nákladů.

6. Vývoj nástroje pro obrábění žárových nástřiků

V rámci vývoje nástroje pro obrábění žárových nástřiků bude postup rozdělen na dvě hlavní fáze. V první fázi bude navržen prototyp nástroje spolu s finální variantou tohoto nástroje za pomoci konvenčního přístupu ke konstrukci. S navrženým a vyrobeným nástrojem poté bude provedena celá řada experimentů k ověření tohoto nástroje. Ve druhé fázi bude poté nástroj konstruován pomocí topologické optimalizace a při vývoji budou využity získané zkušenosti z předchozího konvenčně navrženého nástroje.

6.1. Materiál MS1

Veškeré varianty nástroje, včetně topologicky optimalizovaného, jsou z materiálu EOS MaragingSteel MS1. Jedná se o nástrojovou ocel určenou pro 3D tiskárny EOS, kterou disponuje Západočeská univerzita. Materiál MS1 chemicky odpovídá nástrojové oceli s označením 1.2709 německému označení X3NiCoMoTi 18-9-5 [49].

Chemické složení (podíl prvků v %)

| Fe | Ni | Co | Mo | Ti | Al | Cr, Cu | C | Mn, Si | P, S |
|--------|-------|---------|---------|---------|-----------|--------|------|--------|-------|
| základ | 17-19 | 8,5-9,5 | 4,5-5,2 | 0,6-0,8 | 0,05-0,15 | <0,5 | 0,03 | <0,1 | <0,01 |

Tab. 6-1 Chemické složení materiálu MS1 [49]

Tato ocel se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a díky její vhodnosti pro další tepelné zpracování může dosahovat vysoké tvrdosti a pevnosti. Vytvrzováním při teplotách 490 °C po dobu 6 hodin je možné dosáhnout tvrdosti vyšší než 50 HRC. Díky charakteru procesu tisku mají díly z tohoto materiálu určitou anizotropii, kterou lze vhodným tepelným zpracováním snížit nebo odstranit [49].

Materiál MS1 má ale oproti oceli 1.2709 rozdílné mechanické vlastnosti, se kterými je nutné počítat při výrobě, a zvláště při výpočtech, FEM analýzách, a pro potřeby topologické optimalizace. Materiál bylo nutné zahrnout do návrhu jako jednu z okrajových podmínek, a proto bylo nutné v knihovně materiálů jednotlivých programů definovat nový materiál s danými mechanickými vlastnostmi [49].

V tabulce níže jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti materiálu po vytvrzení, potřebné při návrhu nástroje. Každý z navržených a vyrobených nástrojů prošel po vytištění tepelným zpracováním v podobě žihání a následného precipitačního vytvrzení (vytvrzení stárnutím). Tak byly zajištěny co nejlepší mechanické vlastnosti [49].

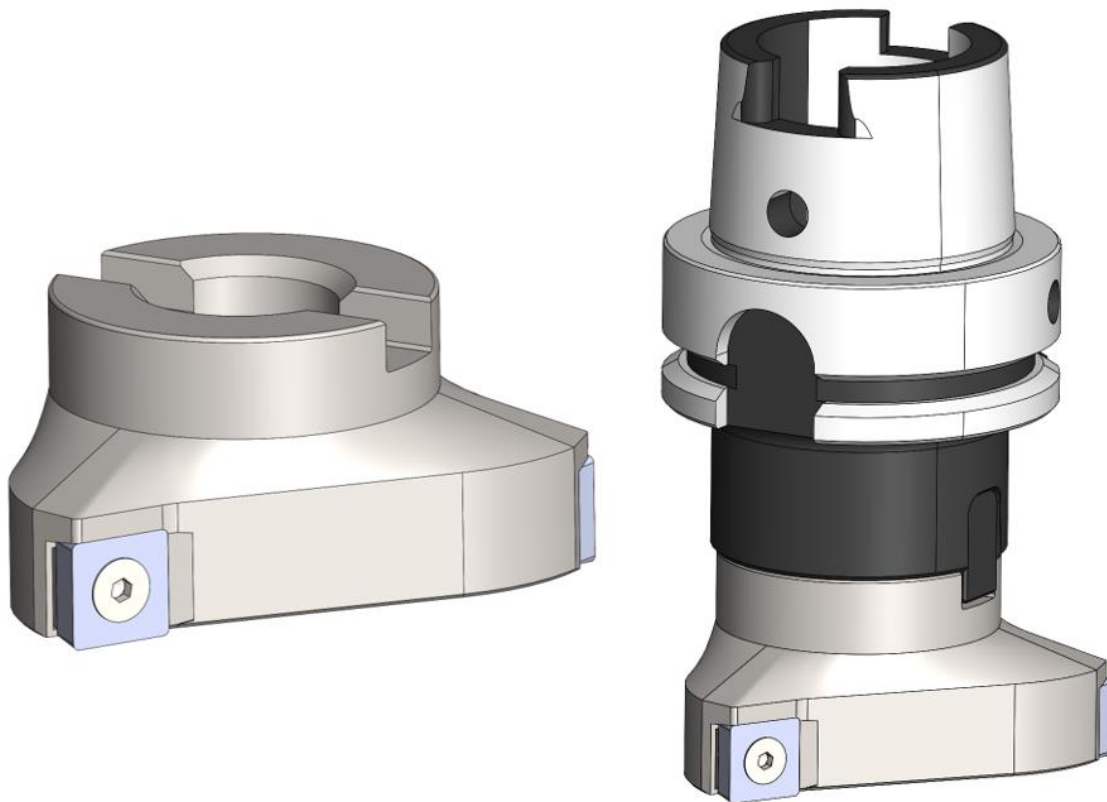
Mechanické vlastnosti

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Mez pevnosti v tahu | 2050 MPa |
| Mez kluzu | 1990 MPa |
| Prodloužení | 4 ± 2 % |
| Modul pružnosti | 180 ± 20 GPa |
| Tvrdost | 50-56 HRC |
| Houževnatost | 11 ± 4 J |
| Poissonův poměr | 0.265 |
| Hustota | 8.0–8.1 g/cm ³ |
| Součinitel tepelné roztažnosti | 1.65 x 10 ⁻⁶ 1/K |

Tab. 6-2 Mechanické vlastnosti materiálu MS1 [49]

6.2. QCA prototyp

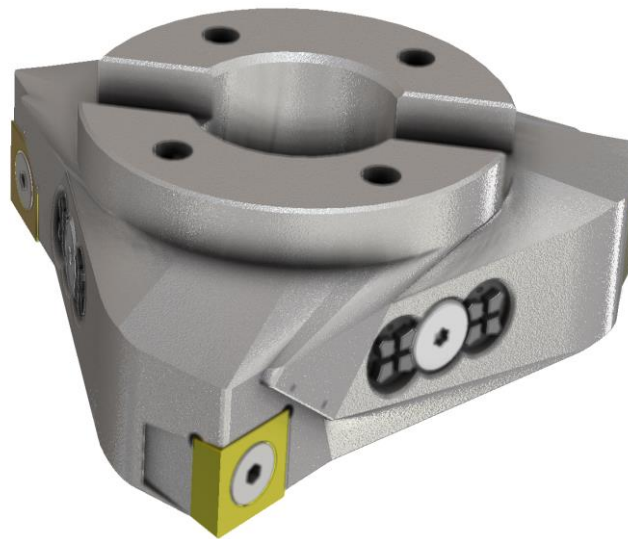
Jak již bylo zmíněno, nástroj je koncipován jak pro frézování, tak pro soustružení, z toho důvodu má specifické postavení vyměnitelných břitových destiček vzhledem k ose nástroje. Prvotní návrh vychází z rozložení břitových destiček do trojúhelníku. Toto rozložení je důležité vzhledem k možnosti nástrojem soustružit i frézovat a možnosti využití obrábění lineární řeznou hranou. Jsou zde použity čtvercové VBD, díky kterým je možné využít 4 řezné hrany, s ohledem na řezné podmínky a velikost obrobku je možné každou hranu využít až 4x, to znamená až 16 nových řezných částí na jedné VBD. Dalším benefitem této konstrukce je možnost osazení jedné VBD pro hrubování a další na dokončení. Tím se šetří čas, který by byl potřeba při výměně nástroje destičky. Nástroj po hrubování jednoduše pootočí do řezu novou destičkou. Při obrábění lineární řeznou hranou je potřeba nástroj správně nastavit do řezu. Nástroj neobrábí špičkou a je tak důležité, aby měl více prostoru kolem jedné VBD, a tím možnost většího nastavení úhlů, pod kterými nástroj vstupuje do řezu. Prototyp byl navržen na unášec pro nástrčné frézy HSK-A63 s možností vnitřního vedení procesní kapaliny. Tento prototyp byl vytištěn na 3D tiskárně z plastu tak, aby bylo možné si lépe představit samotnou konstrukci a specificky postavená lůžka VBD. Obrázek níže ukazuje samotný prototyp a nástroj v upínači.



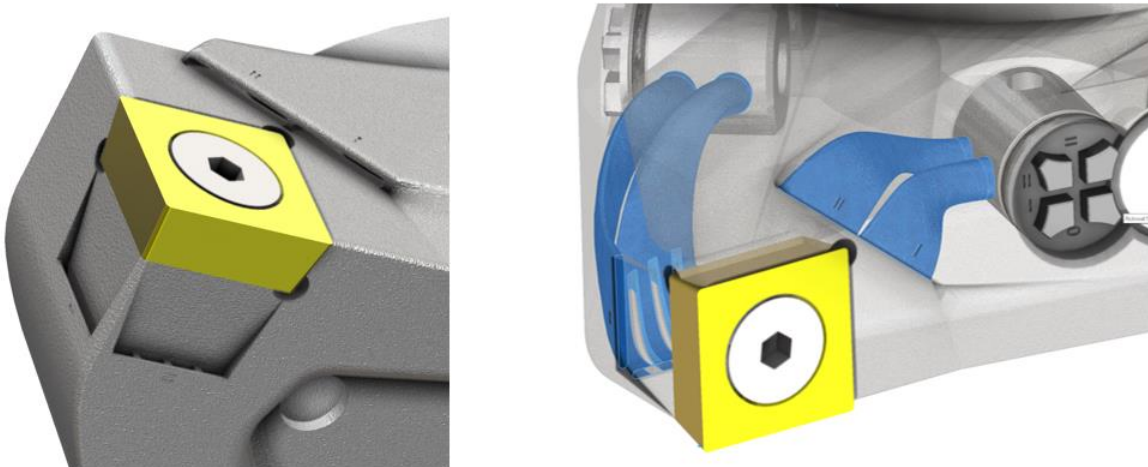
Obr. 6-1 Prototyp obráběcího nástroje

6.3.QCA 1.0

Z prototypu byl poté vytvořen obráběcí nástroj ver. 1.0. U tohoto nástroje bylo nejdůležitější vyřešit přívod procesní kapaliny jednotlivým VBD. Kapalina je přiváděna tělesem upínače do těla nástroje, odkud je kanálky rozvedena k jednotlivým VBD. Výstup kanálků je vždy směřován na čelo i hřbet VBD, a to pro hlavní i vedlejší ostří. Díky 3D tisku bylo možné navrhnout chladicí kanálky s co možná nejplynulejším průběhem tak, aby nedocházelo ke ztrátám při proudění kapaliny. Další výhodou použití aditivní technologie je změna průřezu kanálků ze vstupního kruhového na výstupní oválný, který tak pokryje celou délku ostří, což je velmi důležitý prvek v případě obrábění lineární řeznou hranou. Kanálky jsou přivedeny co nejbližší k řezné hraně z důvodu co největší efektivity chlazení.



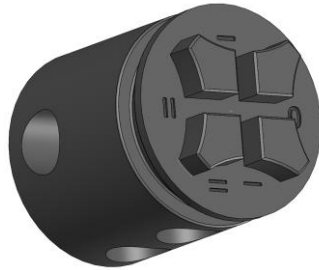
Obr. 6-2 Obráběcí nástroj QCA 1.0



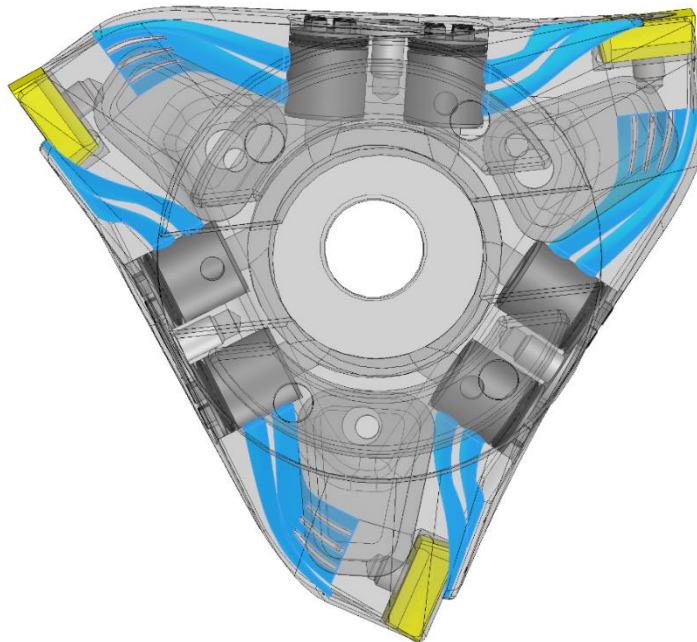
Obr. 6-3 Způsob vyvedení a výstupu chladicích kanálků

Jedním z klíčových prvků je poté možnost regulace chladicí kapaliny pomocí regulačních členů na boku nástroje. Procesní kapalina vstupuje do těla nástroje a prochází přes tyto regulátory dále k VBD. Díky těmto členům je možné chladit libovolně na čelo/hřbetu nebo obou

současně, a to nezávisle pro každou VBD zvlášť podle potřeb pro konkrétní operaci obrábění. Každý regulační člen má z toho důvodu čtyři polohy: otevřeno vše, otevřeno pouze čelo, otevřeno pouze hřbet a vše zavřeno. Díky tomu je možné například otevřít chlazení pouze na jednu VBD v případě soustružení, a tím dosáhnout vyššího tlaku kapaliny, než když je otevřeno chlazení i na destičky, které neobrábí. Z důvodu velkého množství kanálek i velkého počtu možností jejich otevření a zavření bylo nutné mít pro každou VBD dva regulační čepy. Čep byl díky tvarové čelní části pojištěn šroubem proti pootočení a zároveň utěsněn o-kroužkem v tělese nástroje.

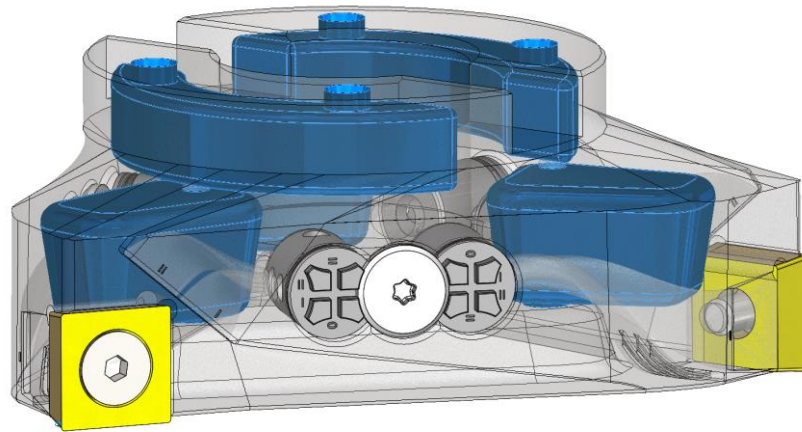


Obr. 6-4 Regulační čep procesní kapaliny



Obr. 6-5 Pohled na nástroj s vnitřním systémem vedení kanálek

Dalším přidaným prvkem díky možnostem aditivní výroby bylo odlehčení nástroje. Do prostoru pod upínací částí a za lůžkem destičky bylo vytvořeno odlehčení použitím Gyroidní struktury. Tato struktura měla kromě odlehčení sloužit rovněž jako eliminátor vibrací. Nicméně se tato myšlenka při provádění pozdějších experimentů nepotvrdila a potvrzuje to tak závěry získané při rešerši na toto téma.



Obr. 6-6 Pohled na nástroj s vnitřním odlehčením

Problémem, který bylo nutné vyřešit před konečnou aditivní výrobou, byly přídatky a případné podpory. Vzhledem k možnostem 3D tisku z kovu bylo nutné na funkční plochy (zejména lůžka VBD, upínací část a otvor pro regulační čep) přidat přídatky na obrábění. Z důvodů nemožnosti tisku jednoho z kanálků, který přivádí kapalinu na hřbet VBD, musel být tento kanálek rozdělen na čtyři menší oválné výstupy místo jednoho velkého. Tato konstrukční úprava by však neměla mít zásadní vliv na proces chlazení, jelikož nijak nezmenšuje výslednou plochu, kam dopadá procesní kapalina. Po úpravě modelu o veškeré přídatky pro obrábění byl model vyexportován ve formátu .stl a vytištěn na 3D tiskárně EOS M290. Po vytištění musel být následně během post processingu mechanicky zbaven veškerých podpor použitých při tisku a následně byl tepelně zpracován. Tepelné zpracování proběhlo podle standardního procesu doporučeného pro tento materiál, to znamená žihání a následné precipitační vytvrzení. Následující obrázek již zobrazuje vytištěný a obrobený nástroj.



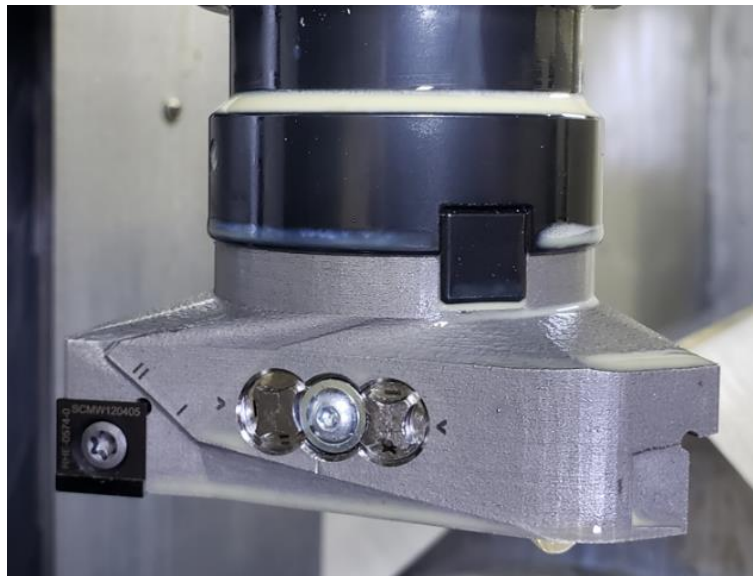
Obr. 6-7 Vytištěný a obrobený nástroj QCA 1.0

Na obrázku níže je nástroj v řezu pro zobrazení vnitřního vedení kanálek a gyroindí struktury a je vyrobený nástroj ver. 1.0.



Obr. 6-8 Vytištěný nástroj v řezu

S vyrobeným nástrojem poté byla provedena řada experimentů. Vzhledem k tomu, že v této oblasti obrábění neexistuje téměř žádný výzkum a odporné publikace (viz. rešeršní část v úvodu práce), bylo velmi obtížné nalézt podmínky obrábění, za kterých bude nástroj efektivně obrábět žárové nástříky. Proto byla provedena celá řada pre-experimentů k nalezení vhodného úhlu λ_s , rezných rychlostí, posuvu, hloubky řezu a dalších parametrů, které přímo ovlivňují kvalitu obrobeneho povrchu, životnost VBD a celkovou efektivitu procesu obrábění.



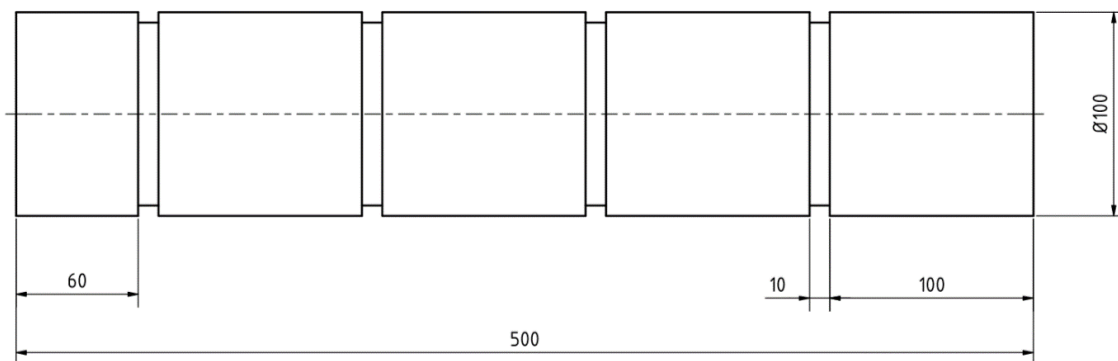
Obr. 6-9 Vyrobený nástroj při experimentu

6.3.1. Experiment soustružení

Následující kapitola popisuje experiment soustružení, kde bylo cílem najít vhodné rezné podmínky s ohledem na nejlepší drsnost povrchu Ra a nalezení vhodných VBD.

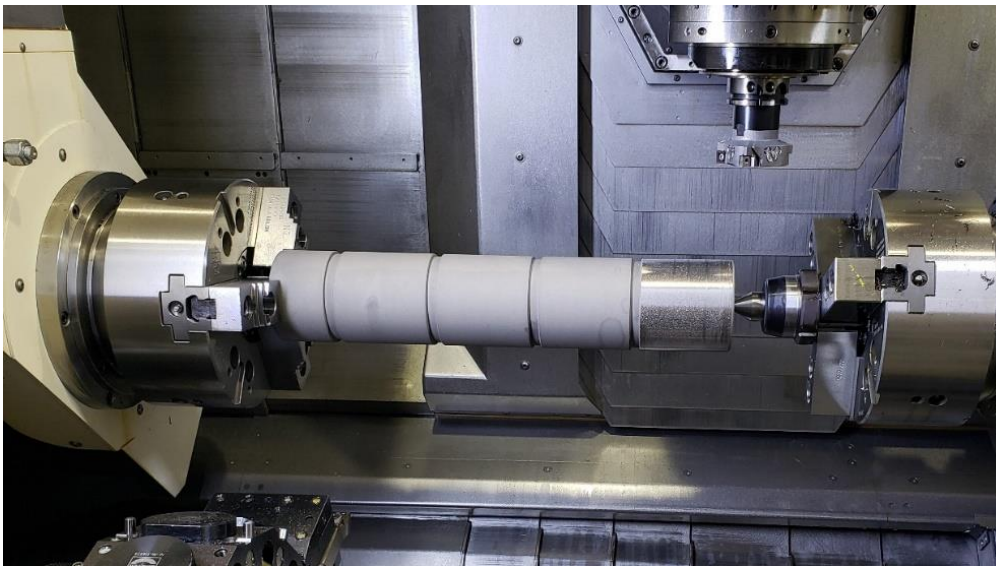
Pre-experiment

Pre-experiment probíhal stejně jako následný experiment na stroji CTX Beta 1220 TC, kterým RTI disponuje. Prvotní pre-experimenty byly prováděny na žárovém nástřiku NiCrBSi a Fe13Cr. Polotovary byly voleny s ohledem na co největší průměr a počet obráběných ploch tak, aby byl zajištěn dostatečně velký počet pokusů a opakování. Jako polotovar byla tedy navržena válcová tyč o průměru 100 mm a délce 500 mm z materiálu 12050. Tato tyč byla rozdělena zápichy tak, aby vznikly 4 samostatné plochy o délce 100 mm a jedna upínací plocha o délce 60 mm. Polotovary byly následně odeslány do firmy Plasmametal, kde byly nástřikány žárovými nástřiky metodou HVOF. Nástřík měl tloušťku 0,5 mm, a to především z důvodu možnosti většího počtu řezů na jedné ploše. Na obrázku níže je zobrazen návrh polotovaru pro nástřík NiCrBSi.



Obr. 6-10 Návrh polotovaru pro nástřík NiCrBSi

Takto nástřikované polotovary byly ve stroji upnuty ve klícidle za upínací plochu a na druhé straně podepřeny pevným hrotem.



Obr. 6-11 Upnutý polotovar ve stroji během pre-experimentu

Pro pre-experimenty byly vybrány tři typy VBD:

- Iscar – SK IC20 (*SCMW -120408*) r_n : 5 [μm]
- Bonar – CBN-B (*SCMW F-120404*) r_n : 4 [μm]
- Rotana – CVD-D (*SCMW – 120405*) r_n : 10 [μm]

VBD Iscar byla v testu jako etalonová VBD, a to zejména z ekonomických důvodů tak, aby bylo možné nalézt alespoň základní podmínky obrábění, za kterých by docházelo k obrábění žárového nástřiku bez kompletní destrukce VBD nebo vytrhávání nástřiku.

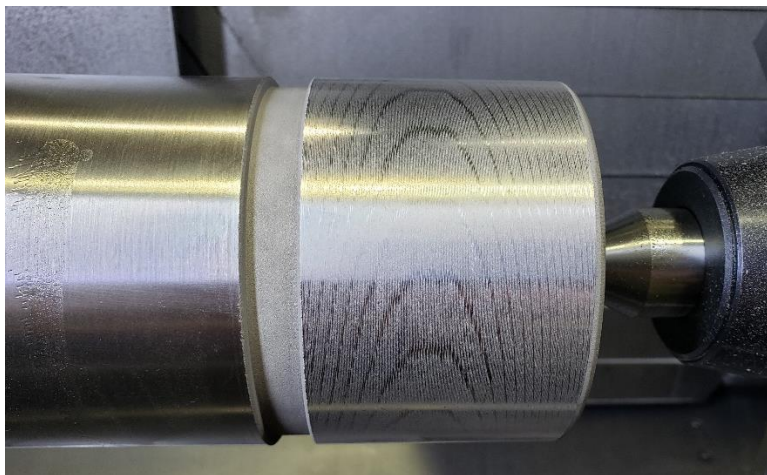
VBD Bonar CBN-B (CBN – BBW85) je „fullface“ destička s napájenou řeznou částí z CBN (kubický nitrid boru) o obsahu 85 %, celkem byly testovány 4 varianty VBD (čelo 0° bez fazetky; fazetka 0,2 mm a 5° čelo; fazetka 0,2 mm a 10° čelo; fazetka 0,2 mm a 20° čelo).

VBD Rotana je destička s napájenými břity s CVD-D (Chemical Vapour Deposition of Diamond), povlakem na bázi diamantu a rovněž byly navrženy čtyři varianty s rozdílným úhlem čela a fazetkou.

Kromě VBD byly v pre-experimentech testovány také proměnné řezné podmínky jako řezná rychlost, posuv a úhel sklonu ostří λ_s . Hloubka řezu byla vždy volena s ohledem na prováděnou operaci. Hloubka $ap=0,15$ mm pro hrubování a $ap=0,05$ mm pro dokončování. Podmínky byly vždy vztahovány ke kvalitě výsledného povrchu a k opotřebení VBD. U úhlu sklonu ostří λ_s se nejlepších výsledků dosahovalo při nastavení 70° .

S ohledem na rozsáhlost pre-experimentů nebylo provedeno celkové a statistické vyhodnocení, a byly pouze vybrány základní parametry a okrajové podmínky které byly dále testovány v následném experimentu.

Nicméně se v rámci pre-experimentů ukázalo, že vzhledem k velké délce polotovaru dochází na první ploše (nejblíže pevnému hrotu) k vibracím způsobeným malou tuhostí upnutí.

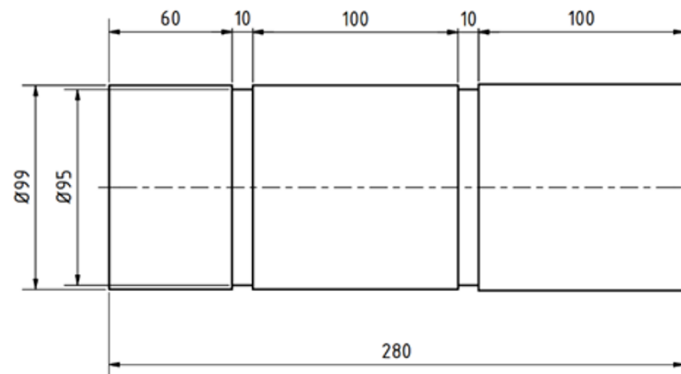


Obr. 6-12 Obrobená plocha při vzniku vibrací

Pro samotný experiment tak byly polotovary zkráceny na 280 mm a dvě obráběné plochy s jednou upínací. Tím byla zajištěna vyšší tuhost upnutí a eliminován se vliv vibrací.

Experiment

První úpravou pro experiment byl tedy nový polotovár, díky kterému již nedocházelo k ovlivnění výsledků vlivem vzniku vibrací díky malé tuhosti.



Obr. 6-13 Nově navržené polotovary pro nástřík NiCrBSi

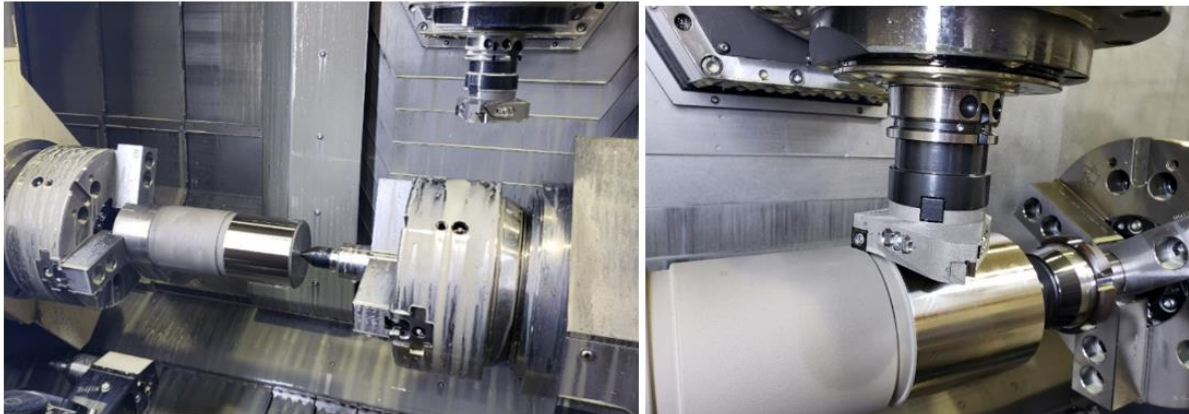
Pro experiment rovněž nebyly použity VBD od firmy Iscar, které sloužil jen pro základní nalezení podmínek a byly nahrazeny doporučenými VBD od společnosti Rotana s pájenými břity z CBN (PCBN). Již z pre-experimentů se ukázalo jako nejvhodnější použití VBD s fazetkou 0,2 mm s úhlem 20° . V případě, kdy se obrábělo hloubkou řezu $ap=0,15$ mm, je takto vyrobená fazetka v podstatě čelo nástroje, po kterém odchází tříska, jelikož hloubka řezu nepřesahuje přes rozměr fazetky a využívá se tak negativní geometrie a úhlu „čela“ 20° . Rovněž velmi důležitý faktor u výběru VBD bylo zaoblení řezné hrany r_n . Jak již bylo popsáno v úvodu, při obrábění lineární řeznou hranou nedochází k obrábění špičkou a tím pádem nemá poloměr zaoblení špičky vliv na proces obrábění, zde má mnohem důležitější vliv r_n . Při obrábění do jisté míry nahrazuje špičku VBD a je na něm také závislá výsledná drsnost povrchu a také platí pravidlo o minimální hloubce řezu, která by neměla být pod hodnotou r_n tak, jako je tomu i při klasickém soustružení a poloměru špičky r_e .

Pro experimenty byly vybrány tyto tři typy VBD:

- Bonar – CBN-B (SCMW F-120404) r_n : 4 [μm]
- Rotana – PCBN (SCMW – 120405) r_n : 12 [μm]
- Rotana – CVD-D (SCMW – 120405) r_n : 10 [μm]

Jako okrajové podmínky byly zvoleny tyto parametry:

- Řezná rychlost vc : proměnná s ohledem na typ VBD
- Posuv f : 0,035 - 0,5 [mm/ot]
- Hloubka řezu ap : 0,15 [mm]
- úhel sklonu ostří λ_s : 70°



Obr. 6-14 Nově navržený polotovár v průběhu experimentu s nástrojem nastaveným v řezu

Experimenty byly prováděny dle nastaveného plánu pro každou VBD s ohledem na její možnosti řezných podmínek. Nejvíce řezů bylo provedeno s VBD od firmy Bonar (označena jako CBD), jelikož dosahovala celkově nejlepších hodnot drsnosti obrobeneho povrchu s ohledem na trvanlivost VBD. V rámci experimentu však konkrétní opotřebení vyhodnocováno nebylo, hlavním cílem experimentu bylo nejprve naleznout vhodné podmínky v závislosti na drsnosti povrchu R_a a R_z .

Na Obr. 6-15 jsou zobrazeny třísky vzniklé při obrábění, jedná se o krátké stužkovité třísky, které jsou ale velmi tenké a křehké, a velmi snadno se lámou na elementární. Takto vzniklé třísky jednak tím, že nedochází ke kontaktu s nástrojem a obrobkem a díky tomu nedochází k dalšímu ovlivnění obrobeneho plochy, a jsou vhodné i z hlediska odpadového hospodářství.



Obr. 6-15 Třísky vzniklé při obrábění nástřiku NiCrBSi

Následující tabulka popisuje souhrnné podmínky a výsledky drsností z experimentu. U VBD typu CBN-B probíhaly experimenty i v oblasti vysokorychlostního obrábění „HSC“, kde bylo dosaženo nejlepších hodnot výsledné drsnosti povrchu.

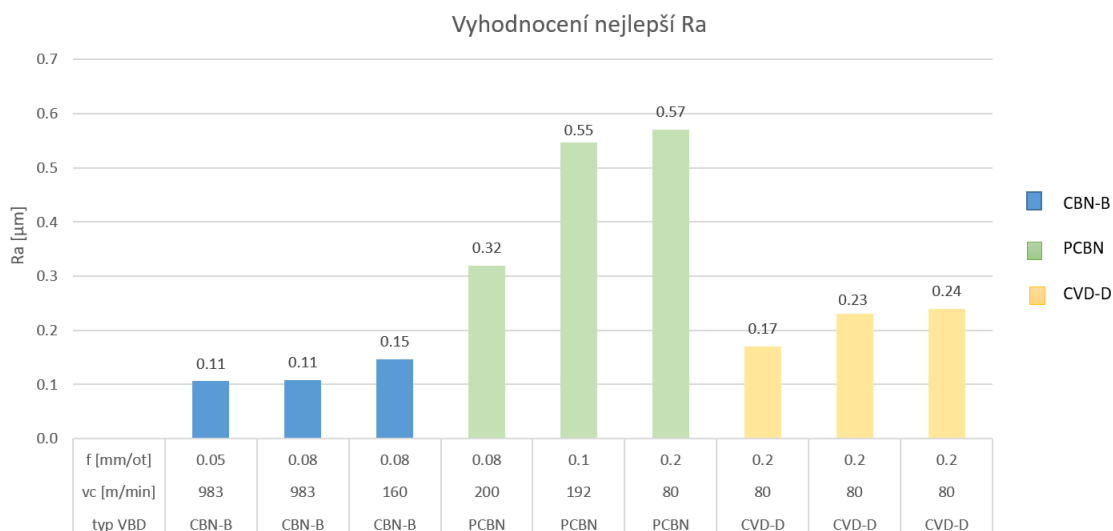
| typ VBD | vc [m/min] | f [mm/ot] | Ra [μm] | Rz [μm] | typ VBD | vc [m/min] | f [mm/ot] | Ra [μm] | Rz [μm] |
|---------|------------|-----------|---------|---------|---------|------------|-----------|---------|---------|
| CBN-B | 160 | 0.1 | 1.12 | 5.88 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.65 | 3.66 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 0.17 | 1.24 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.24 | 1.52 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 0.94 | 4.74 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.36 | 2.47 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 1.32 | 9.34 | CVD-D | 80 | 0.3 | 0.44 | 2.85 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 0.15 | 1.07 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.49 | 3.92 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 0.39 | 2.76 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.23 | 4.30 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 0.38 | 2.31 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.17 | 1.73 |
| CBN-B | 400 | 0.08 | 0.78 | 4.21 | CVD-D | 80 | 0.2 | 0.50 | 2.64 |
| CBN-B | 400 | 0.08 | 0.81 | 4.73 | CVD-D | 95 | 0.2 | 0.43 | 2.95 |
| CBN-B | 776 | 0.08 | 0.79 | 5.20 | CVD-D | 120 | 0.2 | 0.81 | 4.98 |
| CBN-B | 776 | 0.08 | 0.59 | 4.09 | CVD-D | 130 | 0.18 | 0.84 | 5.10 |
| CBN-B | 983 | 0.1 | 0.74 | 5.11 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.43 | 3.08 | typ VBD | vc [m/min] | f [mm/ot] | Ra [μm] | Rz [μm] |
| CBN-B | 983 | 0.08 | 0.41 | 2.75 | PCBN | 80 | 0.2 | 0.57 | 4.04 |
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.23 | 1.53 | PCBN | 80 | 0.35 | 1.11 | 6.61 |
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.63 | 3.34 | PCBN | 192 | 0.1 | 0.55 | 3.72 |
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.42 | 2.78 | PCBN | 200 | 0.05 | 1.81 | 9.41 |
| CBN-B | 983 | 0.065 | 0.42 | 2.78 | PCBN | 200 | 0.08 | 0.32 | 2.23 |
| CBN-B | 983 | 0.1 | 0.20 | 1.45 | PCBN | 500 | 0.3 | 1.49 | 9.53 |
| CBN-B | 983 | 0.25 | 0.47 | 4.56 | PCBN | 500 | 0.2 | 1.05 | 6.07 |
| CBN-B | 983 | 0.35 | 0.68 | 4.77 | PCBN | 800 | 0.2 | 1.77 | 8.63 |
| CBN-B | 983 | 0.5 | 1.39 | 8.76 | PCBN | 983 | 0.05 | 2.78 | 14.45 |
| CBN-B | 983 | 0.1 | 0.23 | 1.68 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.1 | 0.23 | 1.52 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.15 | 0.27 | 1.94 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.2 | 0.30 | 2.34 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.035 | 0.18 | 1.43 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.11 | 0.74 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.08 | 0.11 | 0.86 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.065 | 0.16 | 1.10 | | | | | |
| CBN-B | 983 | 0.065 | 0.39 | 3.39 | | | | | |
| CBN-B | 1122 | 0.08 | 1.36 | 6.36 | | | | | |
| CBN-B | 1122 | 0.05 | 1.51 | 7.29 | | | | | |
| CBN-B | 1122 | 0.035 | 0.35 | 2.42 | | | | | |
| CBN-B | 1122 | 0.05 | 0.94 | 4.98 | | | | | |
| CBN-B | 1179 | 0.05 | 1.21 | 6.13 | | | | | |
| CBN-B | 1179 | 0.035 | 0.51 | 3.03 | | | | | |

Tab. 6-3 Souhrnná tabulka podmínek a drsností z experimentu soustružení

Ze souhrnného experimentu byly vybrány vždy tři hodnoty řezných podmínek pro každou VBD, za kterých bylo dosaženo nejlepší drsnosti a tyto podmínky byly porovnány v grafu níže. Z výsledků je zřejmé, že nejlepších hodnot drsnosti Ra a Rz je dosaženo při použití VBD s CBN napájenou řeznou částí od firmy Bonar. Velmi nízkých hodnot drsnosti bylo dosaženo také s VBD s napájenými břity s povlakem CVD-D, avšak při mnohem nižších řezných rychlostech v kombinaci s vyšším posuvem.

| typ VBD | vc [m/min] | f [mm/ot] | Ra [μm] | Rz [μm] |
|---------|------------|-----------|---------|---------|
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.11 | 0.74 |
| CBN-B | 983 | 0.08 | 0.11 | 0.86 |
| CBN-B | 160 | 0.08 | 0.15 | 1.07 |
| PCBN | 200 | 0.08 | 0.32 | 2.23 |
| PCBN | 192 | 0.1 | 0.55 | 3.72 |
| PCBN | 80 | 0.2 | 0.57 | 4.04 |
| CVD-D | 80 | 0.2 | 0.17 | 1.73 |
| CVD-D | 80 | 0.2 | 0.23 | 4.30 |
| CVD-D | 80 | 0.2 | 0.24 | 1.52 |

Tab. 6-4 Porovnání nejlepších hodnot drsností pro jednotlivé VBD

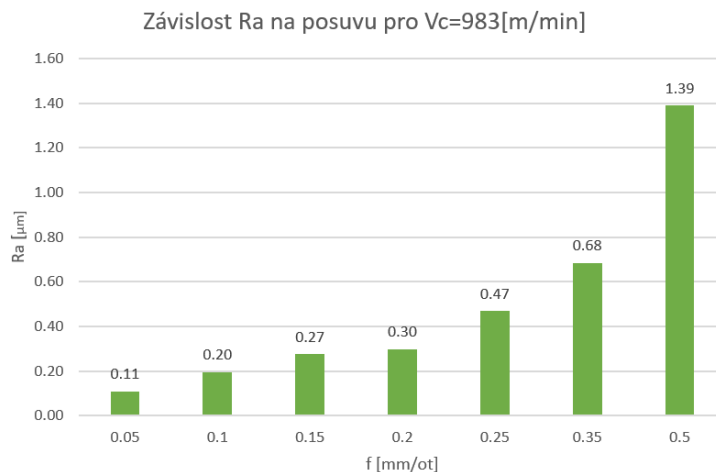


Obr. 6-16 Graf vyhodnocení nejlepší drsnosti Ra

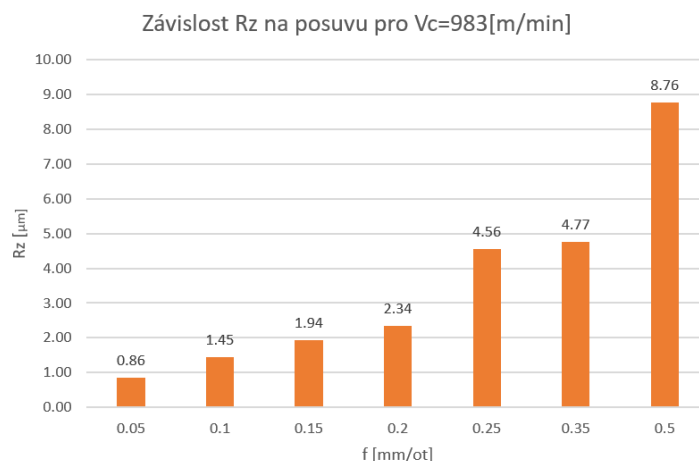
Následně byla hodnocena pouze VBD Bonar CBN-B, a to pro závislost posuvu na drsnosti pro řeznou rychlost $vc=983$ m/min. Z grafů je zřejmé, že hodnotou posuvu je možné ovlivnit výslednou drsnost obrobeneé plochy, tato závislost odpovídá i teorii obrábění u klasického třískového obrábění špičkou nástroje.

| typ VBD | vc [m/min] | f [mm/ot] | Ra [μm] | Rz [μm] |
|---------|------------|-----------|---------|---------|
| CBN-B | 983 | 0.05 | 0.11 | 0.86 |
| CBN-B | 983 | 0.1 | 0.20 | 1.45 |
| CBN-B | 983 | 0.15 | 0.27 | 1.94 |
| CBN-B | 983 | 0.2 | 0.30 | 2.34 |
| CBN-B | 983 | 0.25 | 0.47 | 4.56 |
| CBN-B | 983 | 0.35 | 0.68 | 4.77 |
| CBN-B | 983 | 0.5 | 1.39 | 8.76 |

Tab. 6-5 Hodnoty drsností Ra a Rz pro řeznou rychlost $Vc=983$ [m/min]



Obr. 6-17 Graf závislosti drsnosti Ra na posuvu pro $V_c=983[m/min]$



Obr. 6-18 Graf závislosti drsnosti Rz na posuvu pro $V_c=983[m/min]$

Z těchto experimentů vznikly závěrečné zprávy projektů, ověřené technologie a funkční vzorky k projektům zabývajícím se obráběním zejména žárových nástřiků a také publikace publikované na mezinárodní konferenci. Byly uznány dva funkční vzorky „Řezný nástroj TTSL – NiCrBSi“ [58] „Řezný nástroj TTSL – FeCr“ [59] a „Řezný nástroj pro HF obrábění“ [60]. Problematikou obrábění žárových nástřiků a těžkoobrobitelných materiálů se zabývají i výzkumné zprávy a ověřené technologie „Aplikace ta-C vrstev a progresivních technologií pro vysoko-posuvové obrábění tištěného materiálu INCONEL 718“, „Technologie HF obrábění“ [61].

Z výsledků experimentů vznikl i článek na mezinárodní konferenci věnující se optimalizaci procesu obrábění žárového nástřiku NiCrBSi „Optimization of the machining process of NiCrBSi thermal spraying“ [62].

Na všech těchto experimentech a výstupech jsem se podílel a na základě těchto poznatků vznikly i užité vzory, české patenty a jeden evropský patent, které se zaměřují na konstrukční řešení tohoto speciálního nástroje, jejichž jsem spoluautor [63] [64] [65].

Statistické vyhodnocení soustružení

Po experimentech následovalo statistické vyhodnocení experimentu pro lepší analýzu výsledků a vliv jednotlivých proměnných na výslednou kvalitu povrchu.

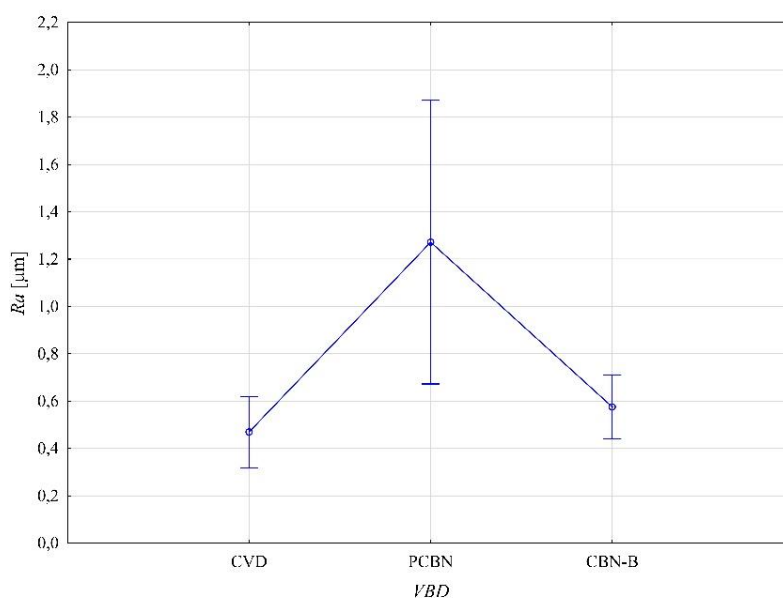
Analýza výsledků měření byla zaměřena zejména na vliv jednotlivých proměnných na výslednou kvalitu povrchu R_a , hodnota R_z je rovněž parametr drsnosti, tudíž na její hodnotu mají stejný vliv stejné parametry jako na R_a . Z toho důvodu není statistické vyhodnocení prováděno i na R_z .

V prvním kroku byla provedena základní analýza v rámci jednorozměrných proměnných (VBD, v_c , f) jako samostatných vlivů, abychom zjistili jejich individuální vliv na změnu hodnoty drsnosti povrchu R_a , a zároveň analýza rozdílů v rámci hodnoty drsnosti povrchu R_a mezi jednotlivými skupinami vybraných vstupních proměnných.

| VBD | N | Průměr | SD | SE | Variační koeficient |
|-------|----|--------|-------|-------|---------------------|
| CBN-B | 37 | 0.575 | 0.405 | 0.067 | 0.705 |
| CVD-D | 11 | 0.469 | 0.224 | 0.067 | 0.477 |
| PCBN | 9 | 1.272 | 0.779 | 0.260 | 0.613 |

Tab. 6-6 Popisná statistika proměnné VBD

Prvním definovaným vstupním faktorem je typ VBD. Základní popisná statistika zkoumané závislé veličiny R_a v závislosti na použitém typu VBD je uvedena v Tab. 6-6. Je zřejmé, že nejnižší průměrné hodnoty (bez ohledu na použitou řeznou rychlost a posuv), a to $0,469 \pm 0,131 \mu\text{m}$, bylo dosaženo při použití CVD-D, následované CBN-B s průměrnou hodnotou drsnosti R_a $0,575 \pm 0,131 \mu\text{m}$. Nejvyšší průměrné hodnoty R_a bylo dosaženo při použití PCBN, a to $1,272 \pm 0,509 \mu\text{m}$. Grafické znázornění průměrných hodnot drsnosti povrchu R_a pro různé použité VBD je uvedeno na Obr. 6-19.



Obr. 6-19 Grafické znázornění vlivu VBD na hodnotu drsnosti R_a

Samotná analýza rozptylu (Tab. 6-7) ukazuje, že typ VBD je významným faktorem na hladině významnosti $\alpha=5\%$, který ovlivňuje hodnotu drsnosti obrobeneho povrchu Ra ($p<0,001$).

| Cases | Sum of Squares | df | Mean Square | F | p |
|-----------|----------------|----|-------------|-------|---------|
| VBD | 4.033 | 2 | 2.016 | 9.654 | < 0.001 |
| Residuals | 11.278 | 54 | 0.209 | | |

Tab. 6-7 ANOVA pro typ VBD

Podíváme-li se blíže na výsledné rozdíly v průměrných hodnotách drsnosti obrobeneho povrchu Ra (Tab. 6-8) pomocí Tukeyho testu, zjistíme, že mezi průměrnými hodnotami Ra při použití CBN-B a CVD-D není na zvolené úrovni statistická významnost ($p=0,779$), což potvrzuje i nízká úroveň velikosti účinku vyjádřená Cohenovým koeficientem d (0,232). Z tabulky dále vyplývá, že statisticky významně nižších hodnot drsnosti povrchu Ra ($p<0,001$) je dosaženo při použití CBN-B, než při použití PCBN s hodnotou rozdílu $-0,697\pm 0,409\ \mu\text{m}$. Významnější rozdíl v průměrných hodnotách drsnosti obrobeneho povrchu je však pozorován mezi CVD-D a PCBN, kdy statisticky významně nižších hodnot Ra ($p<0,001$) bylo dosaženo při použití CVD-D. Samotný rozdíl středních hodnot je v absolutním vyjádření na úrovni $0,802\pm 0,495\ \mu\text{m}$.

| | | Průměrný rozdíl | SE | t | Cohenova d | p_{Tukey} |
|---------|---------|-----------------|-------|--------|------------|--------------------|
| (CBN-B) | CVD-D-D | 0.106 | 0.157 | 0.674 | 0.232 | 0.779 |
| | PCBN | -0.697 | 0.170 | -4.101 | -1.524 | < 0.001 *** |
| | CVD-D | -0.802 | 0.205 | -3.906 | -1.756 | < 0.001 *** |

** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

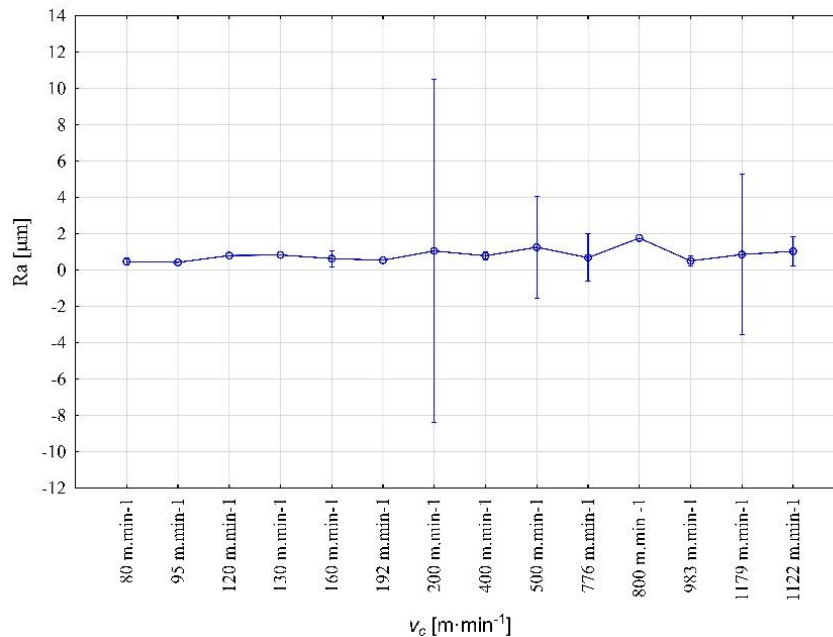
Tab. 6-8 Analýza rozdílů středních hodnot drsnosti povrchu Ra v závislosti na použité VBD

Analýzou řezné rychlosti jako hlavního účinku (bez ohledu na použitou VBD a posuv) jsme dospěli k závěru, že průměrná hodnota drsnosti obrobeneho povrchu Ra pro všechny provedené experimenty je $0,665\pm 0,139\ \mu\text{m}$. Základní popisná statistická analýza drsnosti Ra pro jednotlivé hodnoty řezné rychlosti je uvedena v Tab. 6-9 a grafické znázornění je na Obr. 6-20.

| v_c [m.min ⁻¹] | N | Průměr | SD | SE | Variační koeficient |
|------------------------------|----|--------|-------|-------|---------------------|
| 80 | 10 | 0.476 | 0.272 | 0.086 | 0.571 |
| 95 | 1 | 0.430 | | | |
| 120 | 1 | 0.810 | | | |
| 130 | 1 | 0.840 | | | |
| 160 | 7 | 0.637 | 0.479 | 0.181 | 0.752 |
| 192 | 1 | 0.547 | | | |
| 200 | 2 | 1.064 | 1.052 | 0.744 | 0.989 |
| 400 | 2 | 0.795 | 0.026 | 0.019 | 0.033 |
| 500 | 2 | 1.270 | 0.311 | 0.220 | 0.245 |
| 776 | 2 | 0.690 | 0.146 | 0.103 | 0.211 |
| 800 | 1 | 1.770 | | | |
| 983 | 21 | 0.512 | 0.595 | 0.129 | 1.162 |
| 1179 | 2 | 0.859 | 0.491 | 0.347 | 0.571 |
| 1122 | 4 | 1.039 | 0.519 | 0.259 | 0.499 |

Tab. 6-9 Popisná statistika Ra v závislé proměnné V_c

Jak je patrné z Obr. 6-20, průměrné hodnoty drsnosti Ra pro jednotlivé hodnoty řezné rychlosti se pohybují v poměrně úzkém rozmezí s maximální hodnotou 1,770 μm při řezné rychlosti 800 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a minimální hodnotou drsnosti Ra 0,430 μm při řezné rychlosti 95 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.



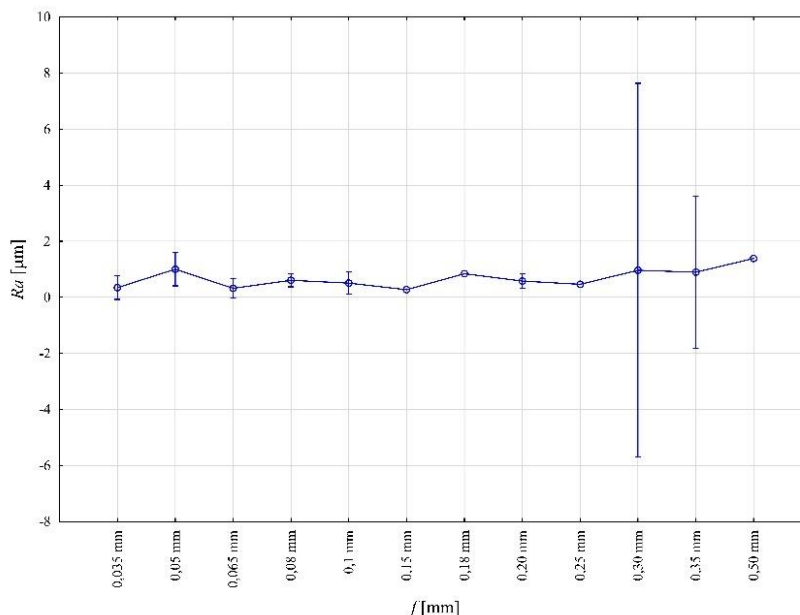
Obr. 6-20 Grafické znázornění vlivu V_c na hodnotu drsnosti R_a

Na základě dosažené hladiny významnosti ($p=0,3567$) však lze konstatovat, že řezná rychlost jako hlavní účinek není v provedeném experimentu významným faktorem ovlivňujícím změnu hodnoty drsnosti Ra.

Pro analýzu rychlosti posuvu jako hlavního účinku (bez zohlednění rozdílu VBD a použitých řezných rychlostí) uvádíme základní popisnou statistiku v Tab. 6-10 a graficky na Obr. 6-21.

| f [mm] | N | Průměr | SD | SE | Variační koeficient |
|--------|----|--------|-------|-------|---------------------|
| 0.035 | 3 | 0.346 | 0.523 | 0.069 | 0.663 |
| 0.05 | 10 | 1.005 | 0.169 | 0.097 | 0.714 |
| 0.065 | 3 | 0.322 | 0.838 | 0.265 | 0.955 |
| 0.08 | 14 | 0.608 | 0.142 | 0.082 | 0.216 |
| 0.1 | 6 | 0.509 | 0.408 | 0.109 | 0.712 |
| 0.15 | 1 | 0.274 | 0.371 | 0.151 | |
| 0.18 | 1 | 0.840 | | | |
| 0.20 | 13 | 0.582 | | | |
| 0.25 | 1 | 0.468 | 0.435 | 0.121 | 0.231 |
| 0.30 | 2 | 0.965 | | | |
| 0.35 | 2 | 0.897 | 0.742 | 0.525 | 0.449 |
| 0.50 | 1 | 1.389 | 0.302 | 0.214 | 0.817 |

Tab. 6-10 Popisná statistika R_a v závislé proměnné f



Obr. 6-21 Grafické znázornění vlivu f na hodnotu drsnosti R_a

Z analýzy rozptylu však lze na základě dosažené hladiny významnosti ($p=0,4202$) vyvodit závěr, že posuv jako hlavní účinek není významným faktorem ovlivňujícím změnu hodnoty drsnosti povrchu R_a v provedeném experimentu.

Pokud však analyzujeme vliv řezné rychlosti v závislosti na použitém VBD na změnu hodnoty drsnosti obrobeného povrchu R_a pomocí hierarchické analýzy rozptylu (Tab. 6-11), dojdeme k závěru, že jak typ VBD (hlavní efekt), tak řezná rychlost ovlivňují změnu hodnoty R_a , která je ale závislá na typu použitého VBD ($p=0,0026$).

| Efekt | SS | Stupeň volnosti | MS | F | p |
|-------------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Intercept | 20.73324 | 1 | 20.73324 | 150.2216 | 0.000000 |
| VBD | 2.72487 | 2 | 1.36244 | 9.8715 | 0.000317 |
| v_c (VBD) | 5.61929 | 13 | 0.43225 | 3.1319 | 0.002616 |
| Chyba | 5.65873 | 41 | 0.13802 | | |

Tab. 6-11 Hierarchická ANOVA pro závislost R_a na typu VBD a V_c

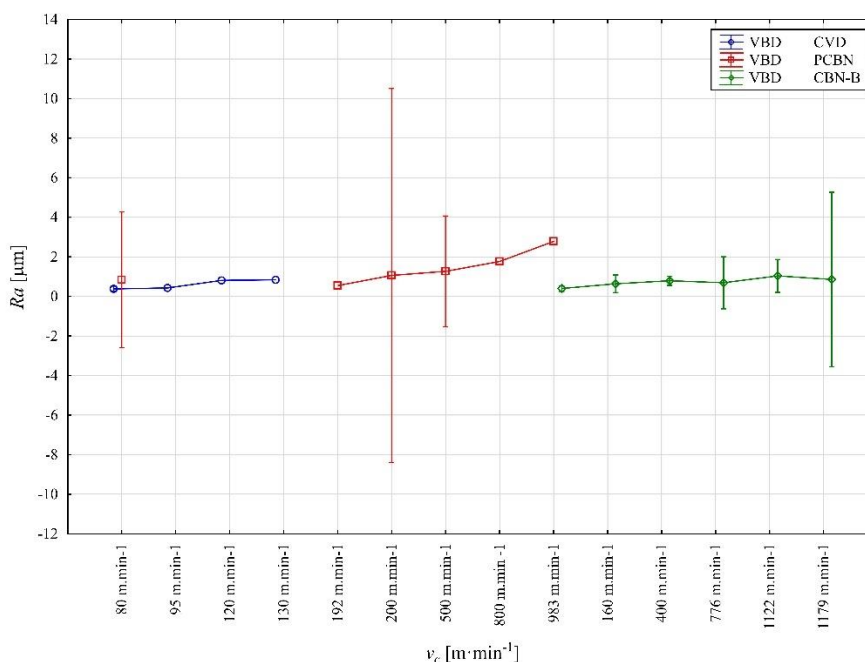
Tab. 6-11 zároveň ukazuje i další skutečnost, a to významný vliv absolutního členu (interceptu) modelu na zvolené hladině významnosti 5 %, což nás vede k závěru, že hodnotu R_a ovlivňují i další faktory, které nebyly při experimentálním ověřování uvažovány. V Tab. 6-12 uvádím základní popisnou analýzu experimentálně získaných výsledků.

| Popisná analýza (ANOVA) | | | | | | | | |
|-------------------------|----------------|----------------|----|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|
| Efekt | Úroveň faktoru | Úroveň faktoru | N | Ra průměr | Ra Std.Dev. | Ra Std.Err | Ra -95.00 % | Ra +95.00 % |
| Celkem | | | 57 | 0.664664 | 0.522879 | 0.069257 | 0.52593 | 0.80340 |
| VBD | CVD-D | | 11 | 0.469291 | 0.223815 | 0.067483 | 0.31893 | 0.61965 |
| VBD | PCBN | | 9 | 1.271646 | 0.779423 | 0.259808 | 0.67253 | 1.87076 |
| VBD | CBN-B | | 37 | 0.575104 | 0.405418 | 0.066650 | 0.43993 | 0.71028 |
| v_c (VBD) | CVD-D | 80 | 8 | 0.385275 | 0.164495 | 0.058158 | 0.24775 | 0.52280 |
| v_c (VBD) | CVD-D | 95 | 1 | 0.430000 | | | | |
| v_c (VBD) | CVD-D | 120 | 1 | 0.810000 | | | | |

| | | | | | | | | |
|-------------|-------|------|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| v_c (VBD) | CVD-D | 130 | 1 | 0.840000 | | | | |
| v_c (VBD) | PCBN | 80 | 2 | 0.840000 | 0.381838 | 0.270000 | -2.59068 | 4.27068 |
| v_c (VBD) | PCBN | 192 | 1 | 0.546600 | | | | |
| v_c (VBD) | PCBN | 200 | 2 | 1.063775 | 1.052210 | 0.744025 | -8.38996 | 10.51751 |
| v_c (VBD) | PCBN | 500 | 2 | 1.270000 | 0.311127 | 0.220000 | -1.52537 | 4.06537 |
| v_c (VBD) | PCBN | 800 | 1 | 1.770000 | | | | |
| v_c (VBD) | PCBN | 983 | 1 | 2.780667 | | | | |
| v_c (VBD) | CBN-B | 160 | 7 | 0.637905 | 0.479709 | 0.181313 | 0.19425 | 1.08156 |
| v_c (VBD) | CBN-B | 400 | 2 | 0.794833 | 0.026163 | 0.018500 | 0.55977 | 1.02990 |
| v_c (VBD) | CBN-B | 776 | 2 | 0.690167 | 0.145900 | 0.103167 | -0.62069 | 2.00102 |
| v_c (VBD) | CBN-B | 983 | 20 | 0.398425 | 0.296380 | 0.066273 | 0.25972 | 0.53713 |
| v_c (VBD) | CBN-B | 1122 | 4 | 1.039000 | 0.518679 | 0.259339 | 0.21367 | 1.86433 |
| v_c (VBD) | CBN-B | 1179 | 2 | 0.859500 | 0.490732 | 0.347000 | -3.54955 | 5.26855 |

Tab. 6-12 Popisná statistika R_a v závislosti na proměnné VBD a V_c

Základní pohled na Tab. 6-12 ukazuje, že nejnižších hodnot drsnosti obrobeneho povrchu R_a bylo dosaženo při použití CVD-D a řezné rychlosti 80 m/min s hodnotou 0,385 μm , resp. 0,398 μm při použití CBN-B s řeznou rychlostí 983 m/min s hodnotou 0,398 μm . Naopak maximální hodnoty drsnosti R_a byly získány při použití PCBN a řezné rychlosti 983 m/min s hodnotou 2,781 μm . Grafické znázornění hodnot drsnosti R_a v závislosti na změně řezné rychlosti a současně použitého VBD je uvedeno na Obr. 6-22.



Obr. 6-22 Grafické znázornění vlivu řezné rychlosti a typu VBD na hodnotu drsnosti R_a

Přestože se hodnoty drsnosti povrchu R_a pohybují v poměrně úzkém rozmezí hodnot vymezeném minimální (0,385 μm) a maximální (2,781 μm) hodnotou na základě použití Scheffeho testu rozdílů středních hodnot, je možné identifikovat základní statisticky významné rozdíl, a to mezi hodnotou R_a při použití CVD-D a řezné rychlosti 80 m/min a PCBN a řezné rychlosti 983 m/min s hodnotou rozdílu na úrovni 2,396 μm ($p=0,0113$), dále při použití CBN-B a řezné rychlosti 160 m/min a PCBN a řezné rychlosti 983 m/min s hodnotou rozdílu na úrovni 2,143 μm ($p=0,0470$). Další významný rozdíl v hodnotách R_a je pozorován při použití

CBN-B a řezné rychlosti 983 m/min a PCBN a řezné rychlosti 983 m/min s hodnotou rozdílu na úrovni 2,383 μm ($p=0,0076$).

Při analýze posuvu jako závislé proměnné na použitém typu VBD, ale zároveň jako nezávislé proměnné ovlivňující drsnost obrobeneho povrchu Ra pomocí hierarchické analýzy rozptylu (Tab. 6-13) vidíme, že jak typ VBD ($p=0,0059$), tak posuv jako vnořená proměnná ($p=0,0388$) významně ovlivňují změnu hodnoty Ra. Zároveň z tabulky vidíme, že na změnu hodnoty Ra mají vliv i další faktory, které nebyly v experimentu uvažovány nebo byly ponechány konstantní ($p=0,000$).

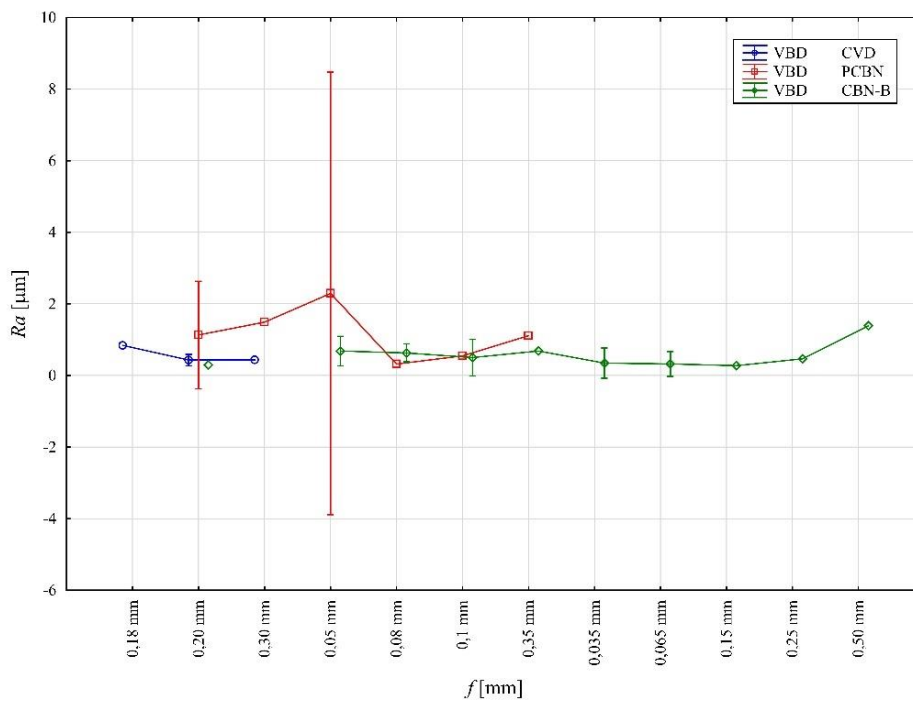
| Efekt | SS | Stupně volnosti | MS | F | p |
|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Intercept | 13.13948 | 1 | 13.13948 | 81.77728 | 0.000000 |
| VBD | 1.88802 | 2 | 0.94401 | 5.87530 | 0.005980 |
| $f(VBD)$ | 5.17241 | 16 | 0.32328 | 2.01200 | 0.038773 |
| Chyba | 6.10561 | 38 | 0.16067 | | |

Tab. 6-13 Hierarchická ANOVA pro závislost Ra na typu VBD a f

V rámci popisné statistiky (Tab. 6-14) je zřejmé, že minimální hodnoty drsnosti obrobeneho povrchu Ra je dosaženo při použití CBN-B a posuvu 0,15 mm, přičemž hodnota drsnosti Ra je 0,274 μm , a naopak maximální hodnoty Ra (2,294 μm) je dosaženo při použití PCBN a posuvu 0,05 mm. Grafické znázornění naměřených hodnot Ra pro sledovanou závislost je uvedeno na Obr. 6-23 Grafické znázornění vlivu posuvu a vlivu typu VBD na hodnotu drsnosti Ra Obr. 6-23.

| Efekt | Popisná analýza (ANOVA) | | | | | | | |
|----------|-------------------------|----------------|----|--------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| | Úroveň faktoru | Úroveň faktoru | N | Ra Průměr | Ra Std.Dev. | Ra Std.Err | Ra -95.00 % | Ra +95.00 % |
| Celkem | | | 57 | 0.664664 | 0.522879 | 0.069257 | 0.52593 | 0.803402 |
| VBD | CVD-D | | 11 | 0.469291 | 0.223815 | 0.067483 | 0.31893 | 0.619652 |
| VBD | PCBN | | 9 | 1.271646 | 0.779423 | 0.259808 | 0.67253 | 1.870764 |
| VBD | CBN-B | | 37 | 0.575104 | 0.405418 | 0.066650 | 0.43993 | 0.710277 |
| $f(VBD)$ | CVD-D | 0.18 | 1 | 0.840000 | | | | |
| $f(VBD)$ | CVD-D | 0.20 | 9 | 0.431356 | 0.209074 | 0.069691 | 0.27065 | 0.592064 |
| $f(VBD)$ | CVD-D | 0.30 | 1 | 0.440000 | | | | |
| $f(VBD)$ | PCBN | 0.05 | 2 | 2.294233 | 0.687921 | 0.486433 | -3.88649 | 8.474955 |
| $f(VBD)$ | PCBN | 0.08 | 1 | 0.319750 | | | | |
| $f(VBD)$ | PCBN | 0.10 | 1 | 0.546600 | | | | |
| $f(VBD)$ | PCBN | 0.20 | 3 | 1.130000 | 0.603987 | 0.348712 | -0.37039 | 2.630386 |
| $f(VBD)$ | PCBN | 0.30 | 1 | 1.490000 | | | | |
| $f(VBD)$ | PCBN | 0.35 | 1 | 1.110000 | | | | |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.035 | 3 | 0.345667 | 0.168783 | 0.097447 | -0.07361 | 0.764946 |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.05 | 8 | 0.682938 | 0.491987 | 0.173944 | 0.27163 | 1.094249 |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.065 | 3 | 0.321944 | 0.141616 | 0.081762 | -0.02985 | 0.673739 |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.08 | 13 | 0.630385 | 0.415890 | 0.115347 | 0.37906 | 0.881704 |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.10 | 5 | 0.501500 | 0.414145 | 0.185211 | -0.01273 | 1.015729 |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.15 | 1 | 0.274333 | | | | |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.20 | 1 | 0.296000 | | | | |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.25 | 1 | 0.467667 | | | | |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.35 | 1 | 0.683000 | | | | |
| $f(VBD)$ | CBN-B | 0.50 | 1 | 1.389000 | | | | |

Tab. 6-14 Popisná statistika Ra v závislosti na proměnné VBD a f

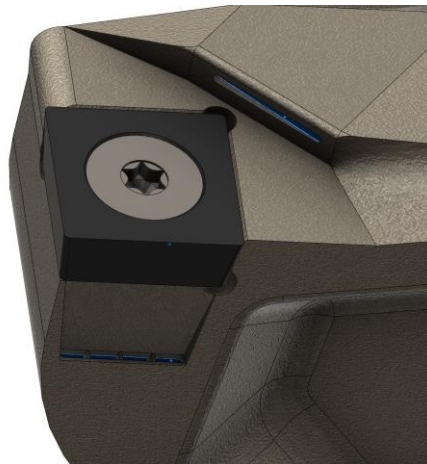


Obr. 6-23 Grafické znázornění vlivu posuvu a vlivu typu VBD na hodnotu drsnosti Ra

6.4.QCA 2.0

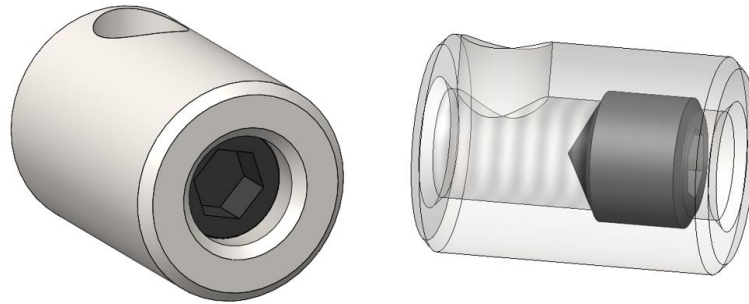
Výsledky předchozích experimentů popisují optimální podmínky a nastavení nástroje vůči obráběnému materiálu. Pro další konstrukční úpravy má vliv zejména způsob obrábění lineární řeznou hranou a s tím spojená hloubka řezu ap a úhel nastavení hlavního ostří λ_s . Při obrábění nástřiku se ukázala jako nejvhodnější hodnota $ap=0,15$ mm při hrubování a $ap=0,05$ mm pro dokončování. Při hrubování je hodnota větší z důvodu přerovnání povrchu nástřiku. Hodnota ap pro dokončení 0,05 mm, umožňuje použití nástřiku s menší tloušťkou, což snižuje náklady, a zároveň je využita menší část řezné hrany na destičce. To má za následek možnost rozdělit jednu řeznou hranu VBD na více částí, přičemž se při opotřebení může nástroj posunout na neopotřebovanou část řezné hrany. Tímto způsobem je možné využít jednu řeznou hranu až 3x, což spolu s čtvercovou VBD, kde můžeme využít 4 řezné hrany, dělá dohromady 12 dílčích řezných hran na jednu VBD. Při stříbitém nástroji to je 36 možností nových řezných hran, což velmi snižuje náklady. Na základě předešlých experimentů byly objeveny i různé problémy, které bylo potřeba vyřešit před další experimentální činností.

První věcí, kterou bylo potřeba modifikovat, bylo přehodnocení potřeby chlazení vedlejšího ostří. Při soustružení a rotačním frézování vlivem velmi malé hloubky řezu a upuštění od myšlenky obrábět bokem nástroje, není nutné chladit vedlejší ostří, jelikož se vůbec nedostane do řezu. Z toho důvodu byly zcela odstraněny kanálky směřující na toto ostří.



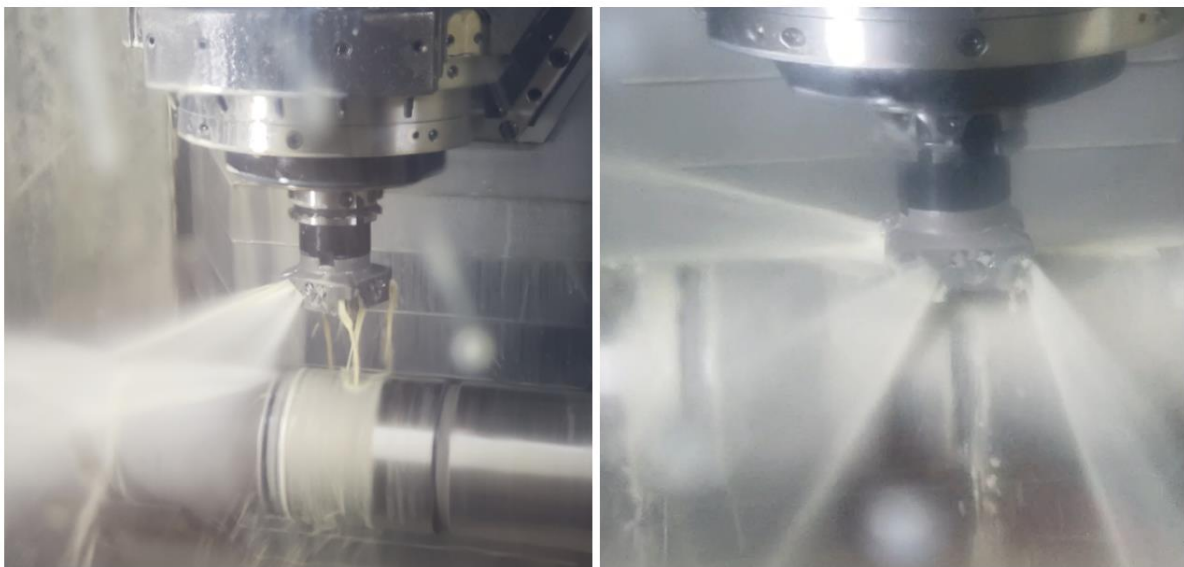
Obr. 6-24 Upravený výstup procesní kapaliny

Zároveň se výrazněji zjednodušilo ovládání kanálek pomocí regulačních čepů. Díky redukci kanálek se mohl redukovat i počet čepů tak, aby pro každý kanálek byl jeden redukční čep. Původní řešení rovněž nedokázalo plně utěsnit regulátor, a tak i při plném uzavření docházelo k úniku kapaliny kolem čepu do kanálek. Nově byl čep do tělesa nástroje nalisován a zalepen tak, aby se ještě více eliminovalo případné protékání kapaliny kolem čepu. Součástí čepu je stavěcí šroub, který uzavírá a otevírá kanálek. Tímto se zjednodušilo celé ovládání a zrychlil se čas potřebný pro přenastavení chlazení mezi soustružením a frézováním.



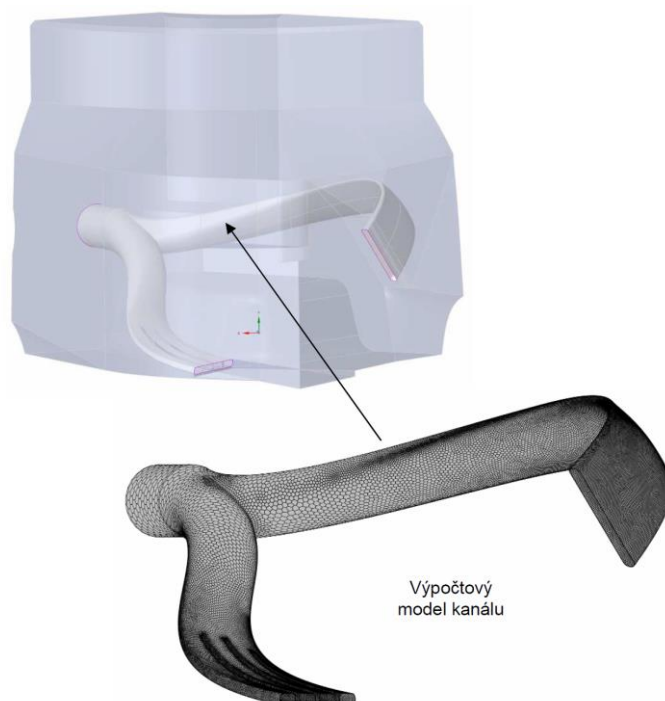
Obr. 6-25 Upravený regulační čep

Dalším pozorovaným problémem experimentů byl nerovnoměrný výstup procesní kapaliny chladicích kanálek.



Obr. 6-26 Výstup kapaliny z chladicích kanálek

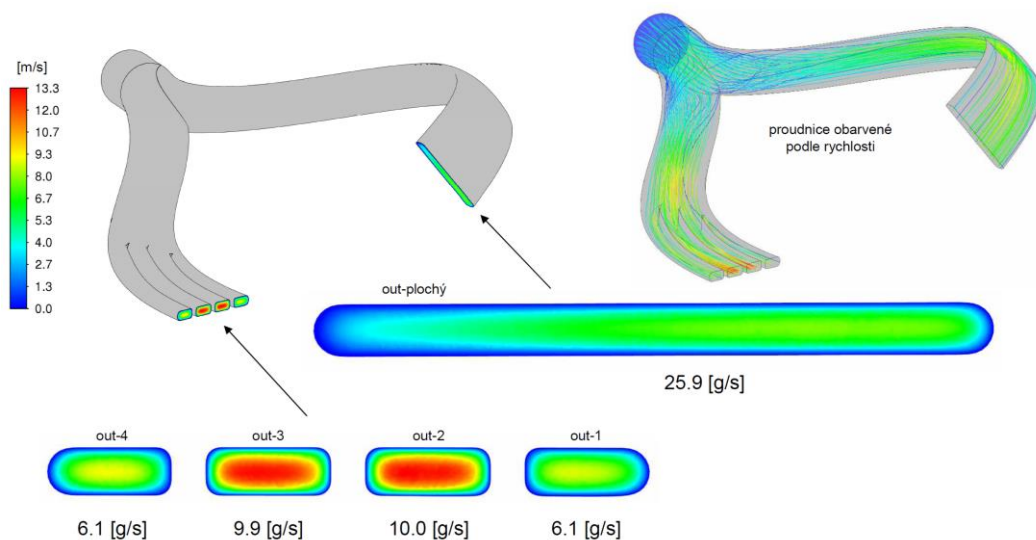
Při úpravě kanálek u nástroje var. 2.0 bylo nutné zaměřit se na optimální tvar a výstup kanálek tak, aby se eliminovaly ztráty vzniklé vířivým prouděním a také různou rychlostí na výstupu. Z toho důvodu byl tedy vytvořen zjednodušený CAD model chladicích kanálek. Tento model byl poté ve spolupráci s NTC (Nové technologie výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni) podroben analýze proudění s cílem optimalizovat hmotnostní průtok a rychlost kapaliny na výstupu z kanálku. Níže je uveden model využitý při výpočtu. Výpočtový model začíná uvnitř nástroje a končí na výstupní ploše z nástroje, tím se zjednoduší náročnost díky jednofázovému proudění v kanálku.



Obr. 6-27 Výpočtový model proudění v kanálku

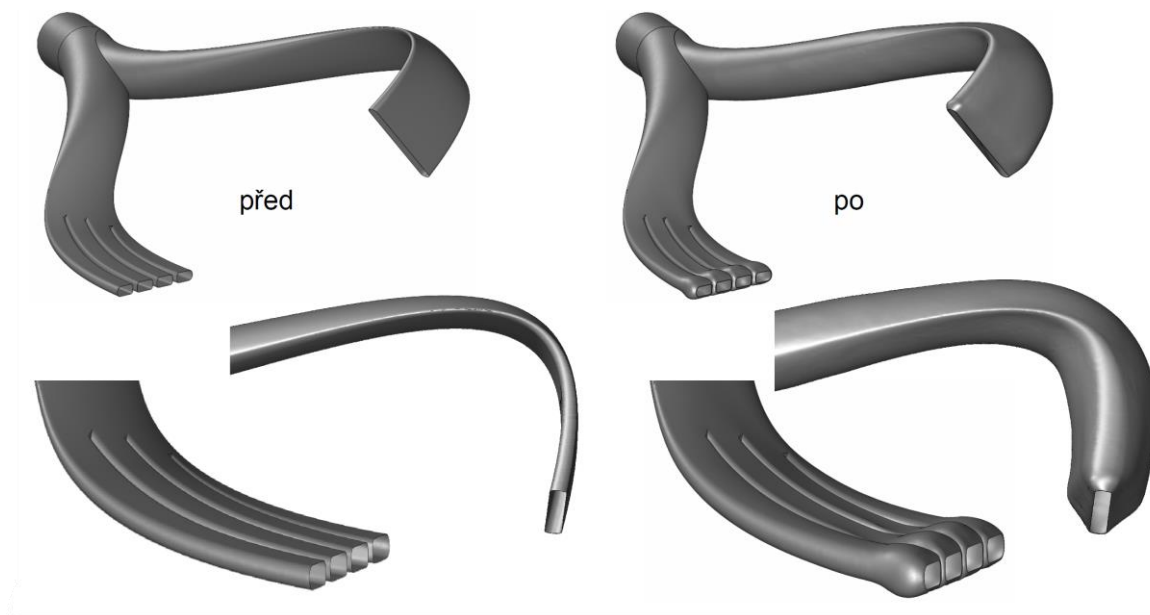
Pro model bylo nutné definovat okrajové podmínky. Na vstupu do kanálku byl definován konstantní průtok 11 l/min, což odpovídá průtoku při obrábění a experimentech. Na výstupech byl definován atmosférický tlak. Proudění bylo uvažováno jednofázové turbulentní a bez přestupu tepla. Hustota média byla 950 kg/m^3 a kinetická viskozita 55 mm^2 .

Obrázky níže popisují výsledky simulace. První obrázek popisuje výstupní rychlost původního tvaru kanálku. Výsledky simulací jsou velmi podobné reálným výsledkům získaných při obrábění. Podélný kanálek směřující na čelo má na výstupu na jedné straně téměř dvojnásobnou rychlost než na druhé, a tím i větší hmotnostní průtok. Zároveň je i na výstupu na hřbet nerovnoměrně rozložena rychlost. Proto byl navržen optimalizovaný tvar, který upravil tvar na výstupu, aby došlo k rozložení rychlosti do celé plochy výstupu.

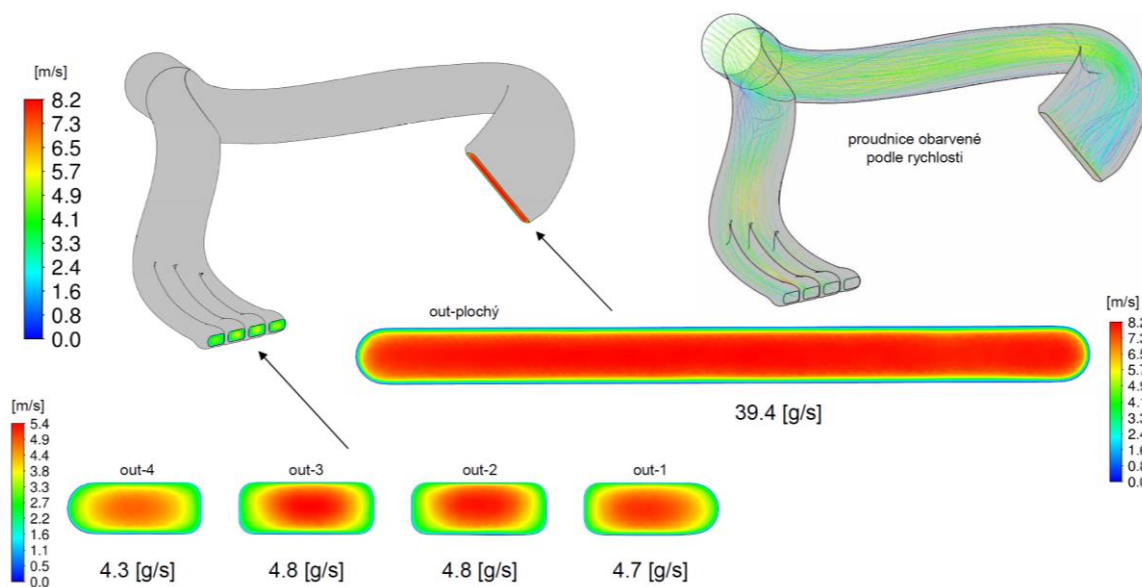


Obr. 6-28 Analýza proudění: původní kanálek

Na obrázku níže je zobrazen tvar kanálku před a po optimalizaci.

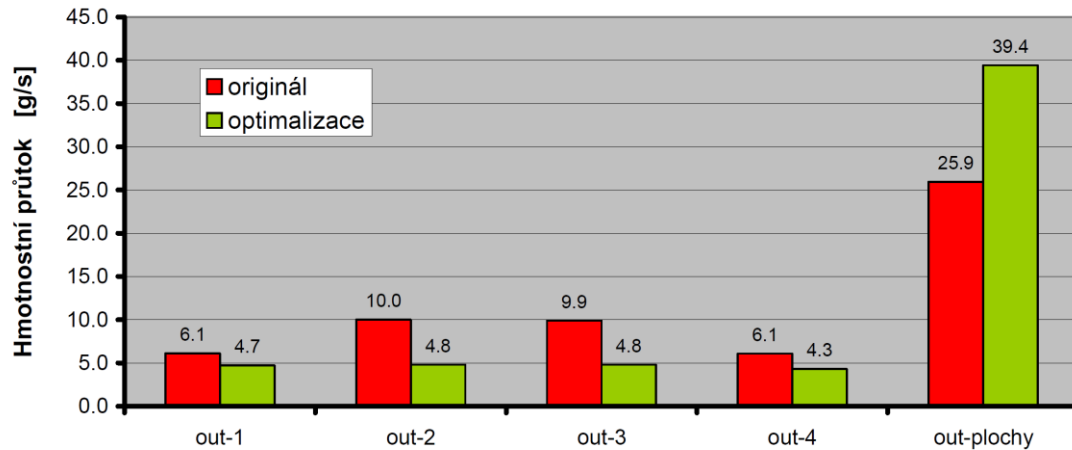


Obr. 6-29 Tvar kanálku před a po optimalizaci



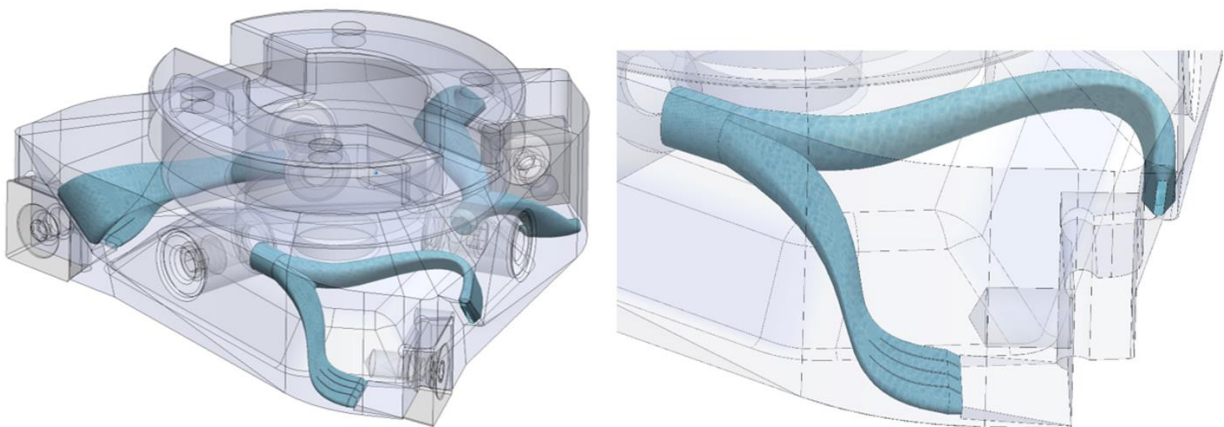
Obr. 6-30 Analýza proudění: optimalizovaný kanálek

Následující graf popisuje hmotnostní průtok pro jednotlivé výstupy, kde výstup na čelo je označen jako out-plochy a výstup na hřbet out-1 až out-4. Červená barva znázorňuje původní kanálek a žlutá optimalizovaný. Z grafu je zřejmé, že rozložení průtoku odpovídá rozložení rychlosti na výstupu. Původní kanálek měl nerovnoměrný průtok u výstupu na hřbetu, což se podařilo u optimalizovaného kanálku eliminovat. Po optimalizaci také došlo k nárůstu hmotnostního průtoku kanálku na čelo a úměrně ke snížení průtoku na hřbet. Tento rozdíl by však nemusel mít zásadní vliv. Důležitější je rozložení průtoku do celé plochy kanálků a tím i zajištění chlazení celé délky ostří.

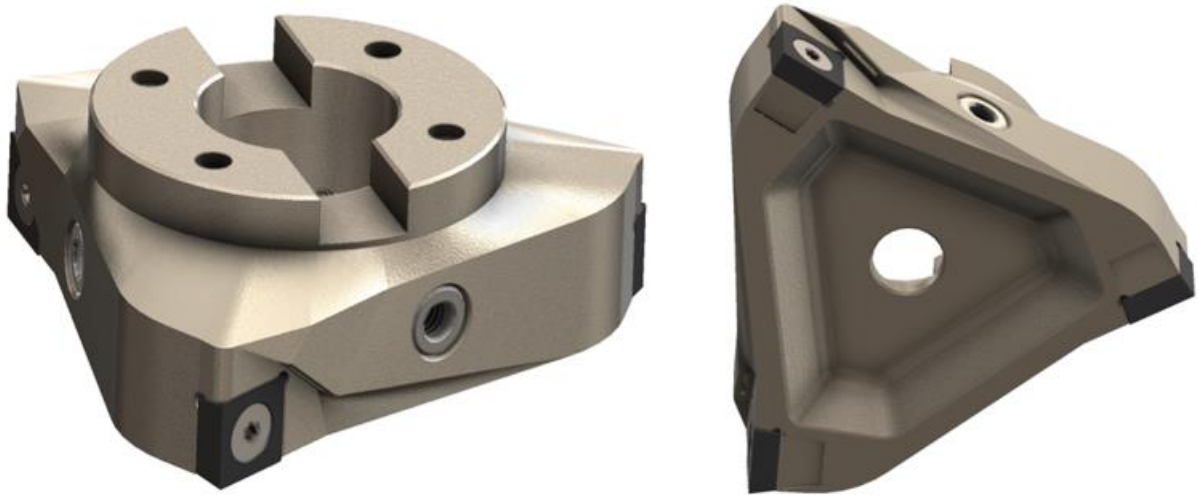


Obr. 6-31 Graf rozložení hmotnostního průtoku na výstupu kanálku

Při návrhu nástroje var. 2.0 byly také odstraněny Gyroidní struktury za lůžkem VBD. Experimenty nepotvrdily přínos v oblasti tlumení, ušetřená hmotnost byla zanedbatelná a při optimalizaci kanálků a jejich novém vedení by tato struktura neumožňovala optimální vedení.

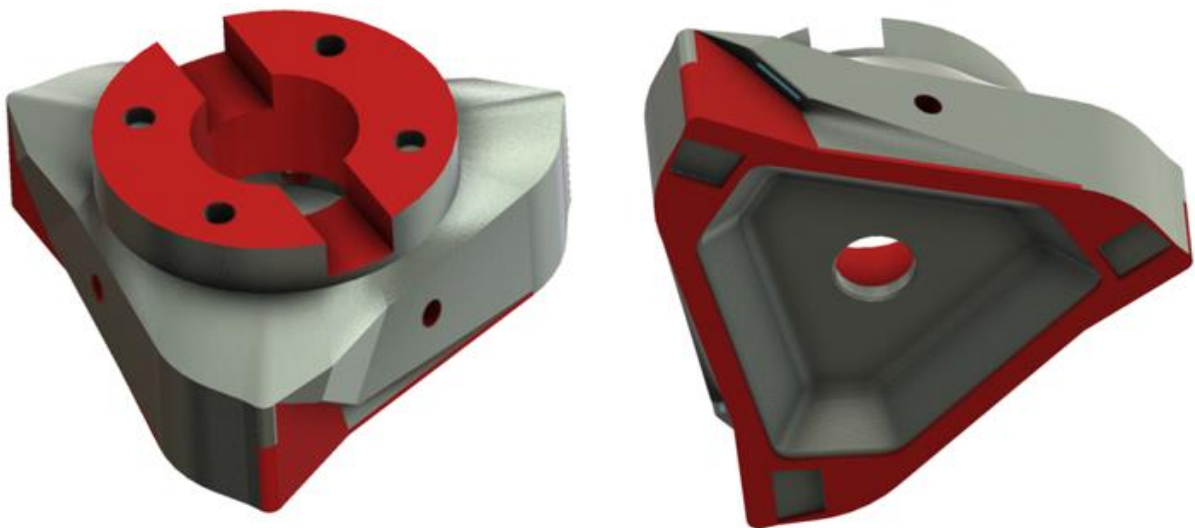


Obr. 6-32 Obráběcí nástroj po úpravách regulačního čepu a kanálků



Obr. 6-33 Obráběcí nástroj ver 2.0

Z důvodu přesných rozměrů funkčních ploch bylo nutné vytvořit přídavky pro 3D tisk, které budou následně obrobeny na požadované přesné rozměry. Jednalo se o přídavek na lůžko VBD, díry pro regulační členy a upínací část. Tyto přídavky jsou zobrazeny červenou barvou na obrázku níže.



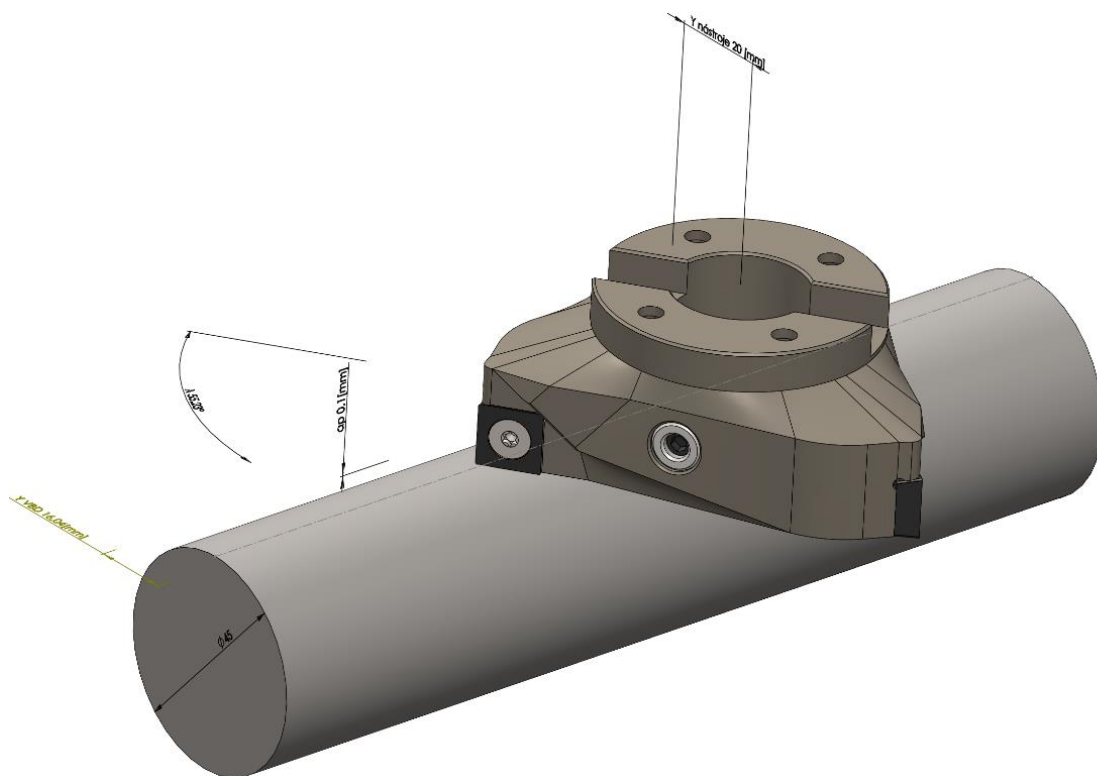
Obr. 6-34 Nástroj s přídávky pro 3D tisk

6.4.1. Experiment rotačního frézování

Experimenty byly rozděleny do 2 hlavních fází. V první fázi pre-experiment k nalezení vhodných podmínek pro frézování stříkaného a tištěného Inconelu při využití nástroje s lineární řeznou hranou a hloubkou řezu do 0.15 mm. Po nalezení optimálních podmínek a parametrů byly provedena druhá část experimentu, který již probíhal podle předem určeného plánu a výsledky z těchto experimentů jsou zaznamenány níže.

Pre-experiment

Pro pre-experiment byl vybrán tištěný Inconel z důvodu možnosti odebírat více vrstev materiálu než u tenkého nástřiku. Díky tomu jsme nebyli limitováni počtem pokusů, avšak využívali jsme vždy polotovary o podobném průměru, jako byl použit při konečných experimentech, aby byly simulovány stejné podmínky. Na Pre-experiment byl již použit optimalizovaný speciální nástroj. VBD byly nejprve využity ze SK a po nalezení základních parametrů byl nástroj osazen CBN destičkami určenými na obrábění těžkoobrobitelných materiálů na bázi žárových nástřiků (včetně stříkaného a tištěného Inconelu).



Obr. 6-35 Schématické zobrazení rotačního frézování

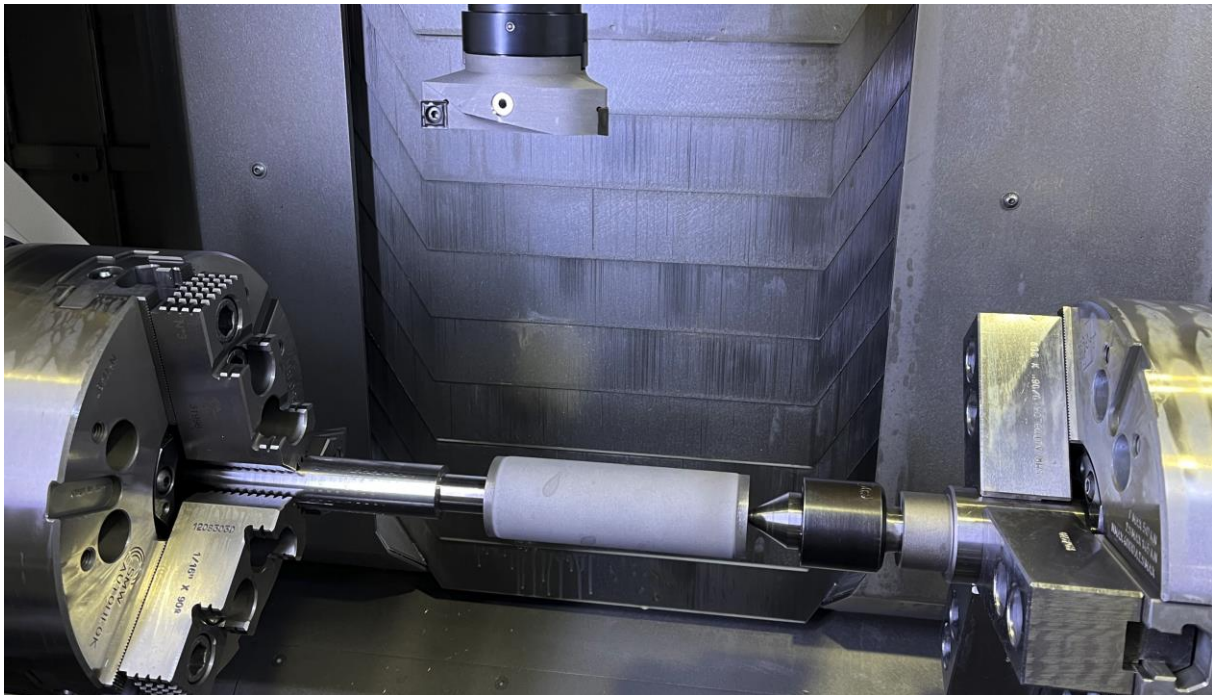
Jako proměnné byly kromě řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu zvoleny i otáčky obrobku, excentricita nástroje. V první fázi nebylo sledováno opotřebení VBD, sledoval se pouze výsledný povrch a to, za jakých podmínek je možné vytvořit souvislou válcovou plochu s odpovídajícími kvalitativními parametry.

V průběhu experimentu byla také zafixována hloubka řezu ap na 0.1 mm. Při možnosti obrábět velmi malé hloubky je možné rovněž nanášet menší vrstvy nástříků a návarů, a tím ušetřit náklady. Při ap menší než 0.1 mm však hrozí, že v důsledku nerovnoměrného nástříku může dojít k nedokonalému obrobení celé plochy, a tím ovlivnit experiment. Proto byla hodnota ap stanovena na 0.1 mm.

Excentricita nástroje byla volena v rozmezí -40 až 40 mm. V těchto rozmezích byl nástroj schopen řezu. Z výsledků kvality povrchu vyplynulo, že nejvýhodnější je excentricita 20 mm. Toto zjištění odpovídá i předešlým zkušenostem ze soustružení nástříků lineární hranou, kdy se dosahuje nejlepších výsledků při nastavení úhlu λ s 50° až 70° , což odpovídá záběrovým podmínkám při rotačním frézování s excentricitou 20 mm pro zkoumaný průměr polotovaru. Při jiném průměru bude i jiná excentricita, v závislosti na dodržení nastavení úhlu λ s 50° až 70° .

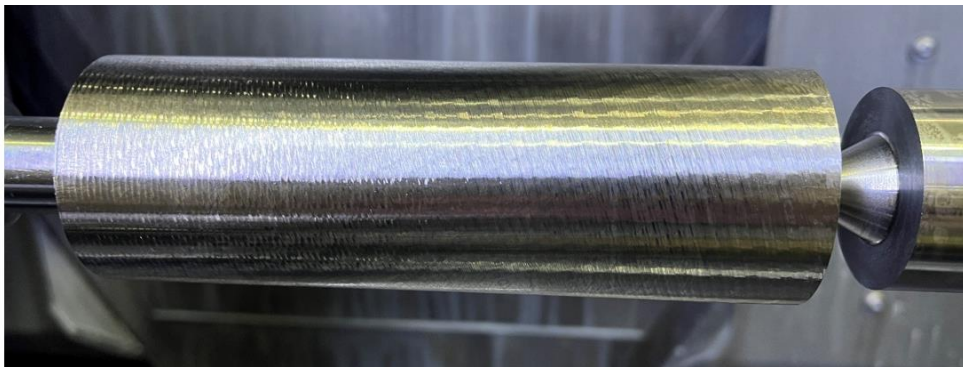
V rámci pre-experimentu bylo provedeno celkem 28 pokusů, na jejichž základě byly vytipovány podmínky, při kterých byl vytvořen nejlepší povrch.

Pro druhou fázi, tak byly vytipovány proměnné: řezná rychlost, posuv a otáčky obrobku. A jako konstantní podmínky budou zvoleny: hloubka řezu, excentricita nástroje, nesousledné frézování a chlazení řeznou kapalinou.



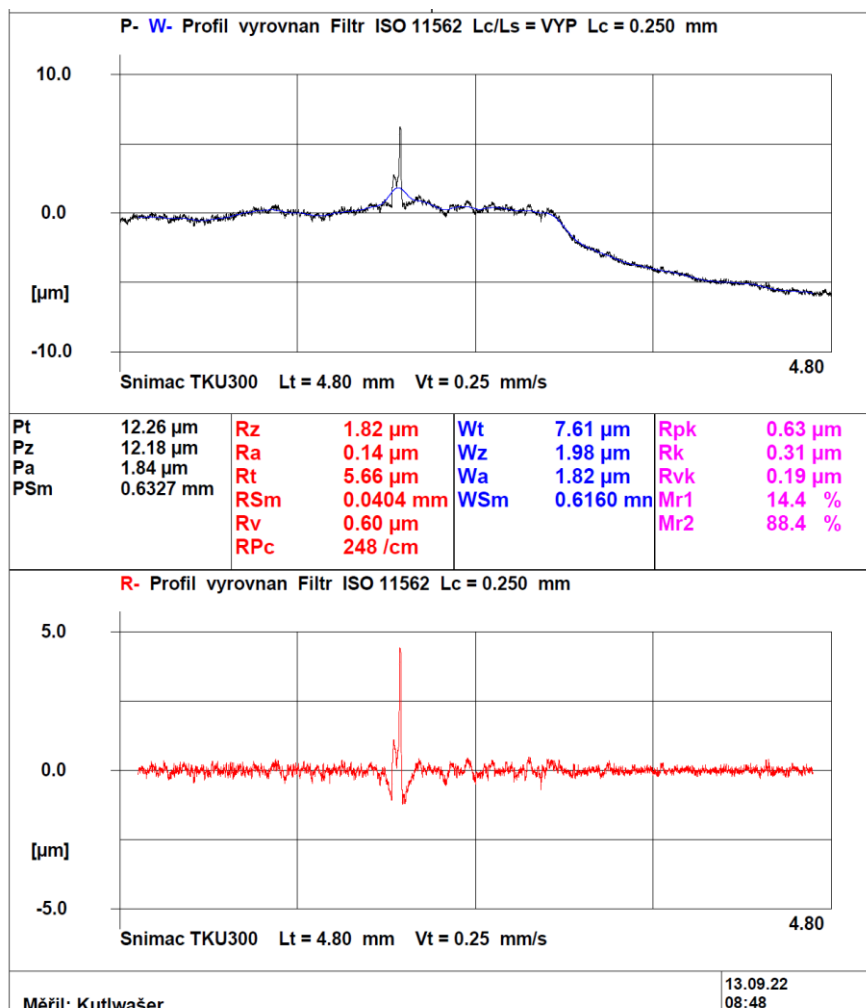
Obr. 6-36 Nástroj a obrobek upnutý v obráběcím stroji před experimentem

Obrobený povrch byl hodnocen pouze opticky a dále vyhodnocován byl pouze ten kde nedošlo k vyštípnutí VBD a povrch byl pohledově nejlepší. Na obrázku níže je jeden z hodnocených povrchů pre-experimentu.



Obr. 6-37 Obrobený povrch z pre-experimentu

Jeden z obrobených povrchů byl dále podroben měření v metrologické laboratoři, ve které se měřila drsnost, kruhovitost a válcovitost vzorku. Výsledky měření jsou uvedeny v protokolech níže.

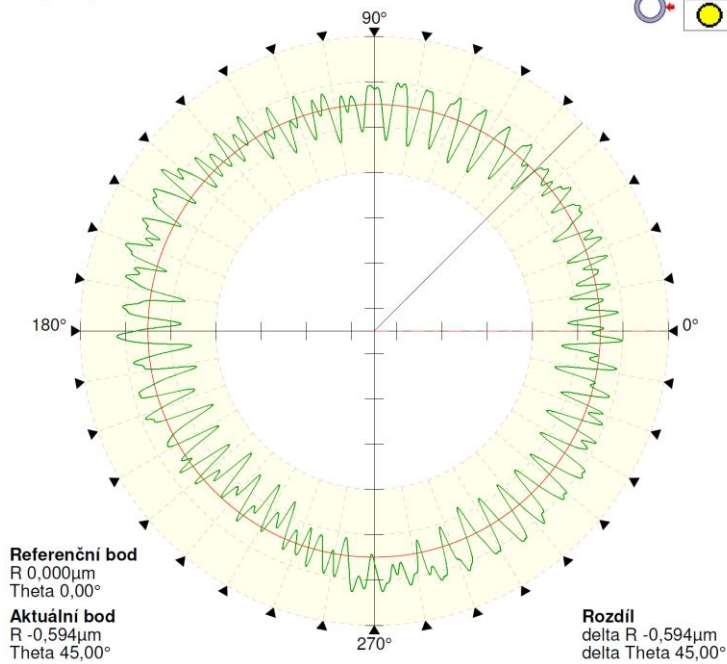


Obr. 6-38 Drsnost měřeného vzorku

5.24.1.275



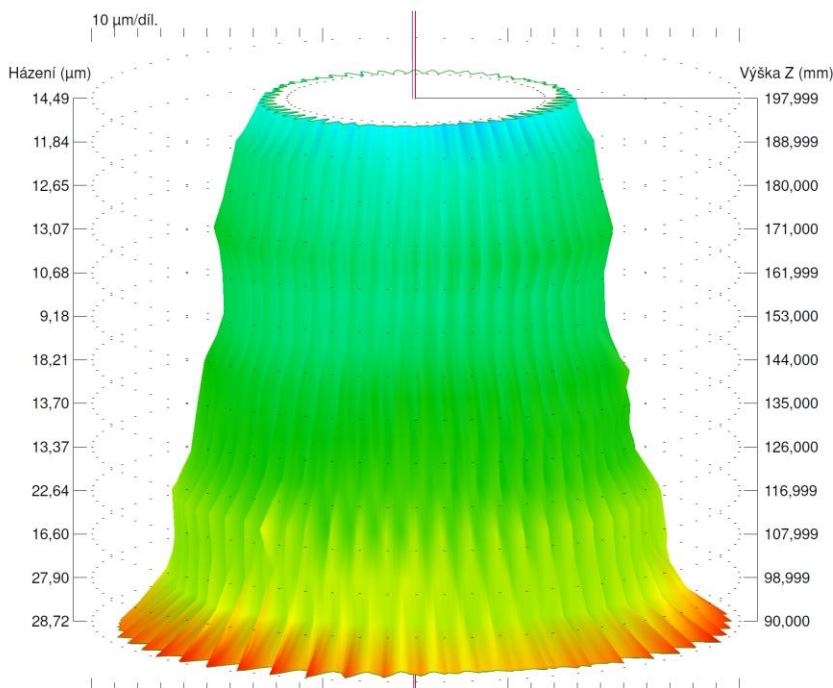
Stupnice 5µm/díl.



| Kruhovitost | | |
|-----------------------------------|-------------|------|
| Rotacní frezování QCA3-06 - 1 | | |
| RON/LS kružnice/Gauss/1 - 150 v/o | | |
| 28.7.2022 12:41:44 | | |
| Rotacní frezování QCA3-06 | | |
| 360°/Admin/585 v2 | | |
| 28.7.2022 11:40:22 | | |
| Specifikace | | |
| Typ reference | LS kružnice | |
| Typ filtru | Gauss | |
| Rozsah filtru | 1 - 150 v/o | |
| Základna | Vřeteno | |
| Parametry | | |
| RONt (kruhovitost) | 10,32 | µm |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Podmínky | | |
| Poloha Z | 135,000 | mm |
| Poloha R | 76,338 | mm |
| Poloha snímače | Vertikální | |
| Směr kontaktu | R - | |
| Kontaktní rychlost | 2,5 | mm/s |
| | | |
| | | |

Obr. 6-39 Kruhovitost měřeného vzorku

5.24.1.275



| Válcovitost | | |
|--------------------------------|-------------|----|
| Rotacní frezování QCA3-01 - 1 | | |
| CYL/LS válec/Gauss/1 - 150 v/o | | |
| 28.7.2022 11:55:14 | | |
| LUBOS - TESTY | | |
| 28.7.2022 11:46:03 | | |
| Specifikace | | |
| Typ reference | LS válec | |
| Typ filtru | Gauss | |
| Rozsah filtru | 1 - 150 v/o | |
| Základna | Vřeteno | |
| Počet řezů | 13 | |
| Parametry | | |
| CYLt (válcovitost) | 84,22 | µm |
| | | |
| | | |
| Celkové házení | 83,14 | µm |
| Coax ISO | 6,82 | µm |
| | | |
| Uhel kužele | -0,0652 | ° |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| Podmínky | | |
| Poloha snímače | Vertikální | |
| Směr kontaktu | R - | |
| | | |

Obr. 6-40 Válcovitost měřeného vzorku

Experiment

Po provedení pre-experimentu byly vytipovány řezné podmínky, které byly využity pro plán finálního experimentu. V tomto experimentu se již testoval tištěný Inconel 718 metodou DMLS a stříkaný Inconel 718 metodou HVOF. Pro experiment byly vybrány dva typy VBD, a to SK s označením SMCT 432 - RM3 a CBN s označením BBW85 0,2x20°. Pro experiment bylo připraveno od každého materiálu 12 vzorků s výchozím průměrem 50 mm. Do těchto vzorků byly vyhotoveny středící důlky a díra pro unášecí kolík tak, aby bylo možné polotovary upnout mezi hroty.

Pro experimenty byly vybrány tyto tři typy VBD:

- Iscar – SK 432-RM3 (*SCMW-120408*) $r_n: 45 [\mu\text{m}]$
- Bonar – CBN-BBW85 (*SCMW F-120404*) $r_n: 15 [\mu\text{m}]$

Obráběný materiál:

- Inconel 718 DMLS
- Inconel 718 HVOF

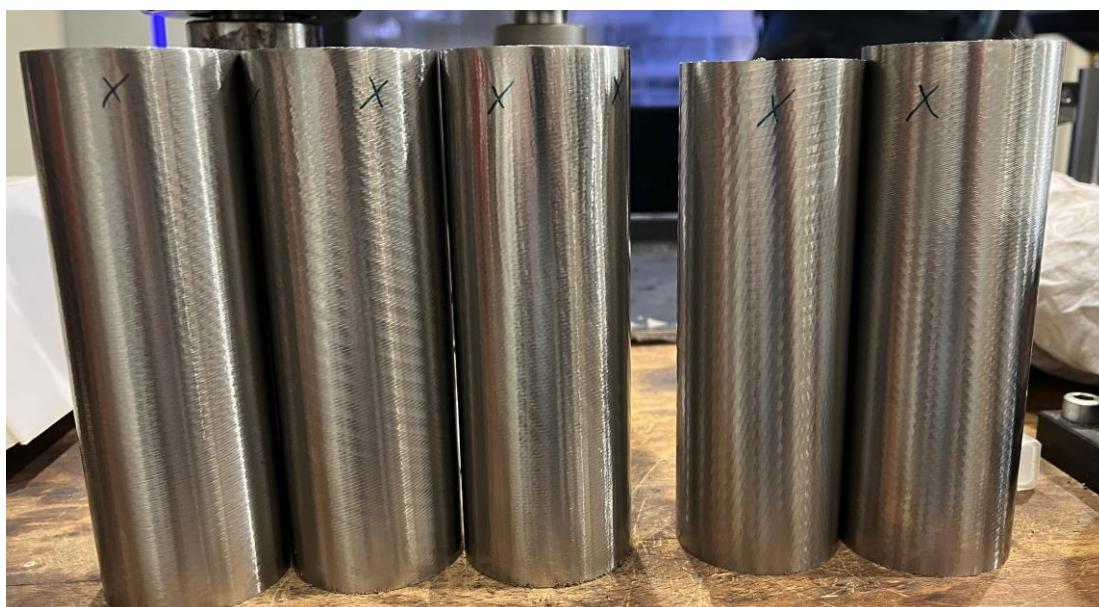
Jako řezné podmínky byly zvoleny tyto parametry:

- Řezná rychlost vc : proměnná s ohledem na typ VBD
- Posuv F : 6–15 [mm/min]
- Otáčky obrobku n_o : 400–800 [ot/min]
- Hloubka řezu ap : 0,1 [mm]
- Excentricita: 20 [mm]
- Nesousledné frézování
- Chlazení řeznou kapalinou

Skutečná řezná rychlost je tedy poté součet řezné rychlosti nástroje a řezné rychlosti od otáček obrobku. Reálně byly tedy proměnné kromě materiálu a druhu VBD ještě skutečná řezná rychlost a minutový posuv. Při experimentu byl vždy měřen rozměr před a po obrábění ve třech rovinách a následně byl povrch vyfocen a změřen pomocí ručního drsnoměru. Po experimentu byly vzorky zabaleny a přepraveny k měření do laboratoře metrologie, kde probíhalo měření na drsnoměru a kruhoměru.



Obr. 6-41 Vzorky HVOF před obráběním



Obr. 6-42 Vzorky DMLS po obráběni

V následující tabulce jsou uvedeny řezné podmínky a geometrie použitých VBD pro testovaný materiál DMLS a HVOF. Řezné podmínky byly stanoveny tak, aby bylo možné spolu porovnat vybrané VBD a na dvou odlišných typech materiálů.

| Vzorek | VBD | | Geometrie VBD | | | | ŘEZNÉ PODMÍNKY | | | | | | | | |
|---------|----------------------|---------------------|---------------|-------|-------|-------|----------------|--------------|-------|-------|------|------|---------------|----------|---------|
| | TYP | krab.-VBD- hrana | zaoble | čelo | hřbet | břít | Vc | n | F | f/z | ap | ex. | lambda | ot. obr. | Vc skut |
| | | | rn [μm] | γ [°] | α [°] | β [°] | [m/min] | [ot/ min] | [min] | [mm] | [mm] | [mm] | λs [°] | m/min | [m/min] |
| 1_DMILS | SMCT 432-RM3 | 1-(4,5,6)-4 | 45 | 0 | 83 | 7 | 120 | 382 | 15 | 0.013 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 800 | 242 |
| 2_DMILS | SMCT 432-RM3 | 1-(7,8,9)-1 | 45 | 0 | 83 | 7 | 120 | 382 | 15 | 0.013 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 500 | 196 |
| 3_DMILS | SMCT 432-RM3 | 1-(7,8,9)-3 | 45 | 0 | 83 | 7 | 70 | 223 | 6 | 0.009 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 400 | 132 |
| 4_DMILS | CBN BBW85 0,2x20° | 1-(4,5,6)-1 | 15 | -20 | 103 | 7 | 200 | 637 | 15 | 0.008 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 500 | 276 |
| 5_DMILS | CBN BBW85 0,2x20° | 1-(4,5,6)-2 | 15 | -20 | 103 | 7 | 200 | 637 | 15 | 0.008 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 800 | 324 |

Tab. 6-15 Tabulka řezných podmínek a typu VBD pro materiál DMILS

| | TYP | krab.-VBD- | rn [μm] | γ [°] | α [°] | β [°] | Vc | n | F | f/z | ap | ex. | λs [°] | ot. obr. | Vc skut |
|---------|------------------------------|----------------|---------|-------|-------|-------|-----|-----|----|-------|-----|-----|---------------|----------|---------|
| 11_HVOF | SMCT 432-RM3 | 2-(1,2,3)-1 | 45 | 0 | 83 | 7 | 120 | 382 | 15 | 0.013 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 800 | 233 |
| 12_HVOF | SMCT 432-RM3 | 2-(1,2,3)-2 | 45 | 0 | 83 | 7 | 120 | 382 | 15 | 0.013 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 500 | 191 |
| 13_HVOF | SMCT 432-RM3 | 2-(1,2,3)-3 | 45 | 0 | 83 | 7 | 70 | 223 | 6 | 0.009 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 400 | 126 |
| 14_HVOF | CBN BBW85 0,2x20° (staré) | 1st.-(1,2,3)-1 | 15 | -20 | 103 | 7 | 160 | 509 | 8 | 0.005 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 400 | 216 |
| 15_HVOF | CBN BBW85 0,2x20° | 1-(4,5,6)-4 | 15 | -20 | 103 | 7 | 200 | 637 | 15 | 0.008 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 800 | 313 |
| 16_HVOF | CBN BBW85 0,2x20° (staré) | 1st.-(1,2,3)-2 | 15 | -20 | 103 | 7 | 200 | 637 | 15 | 0.008 | 0.1 | -20 | 10-5 70-50 | 500 | 277 |

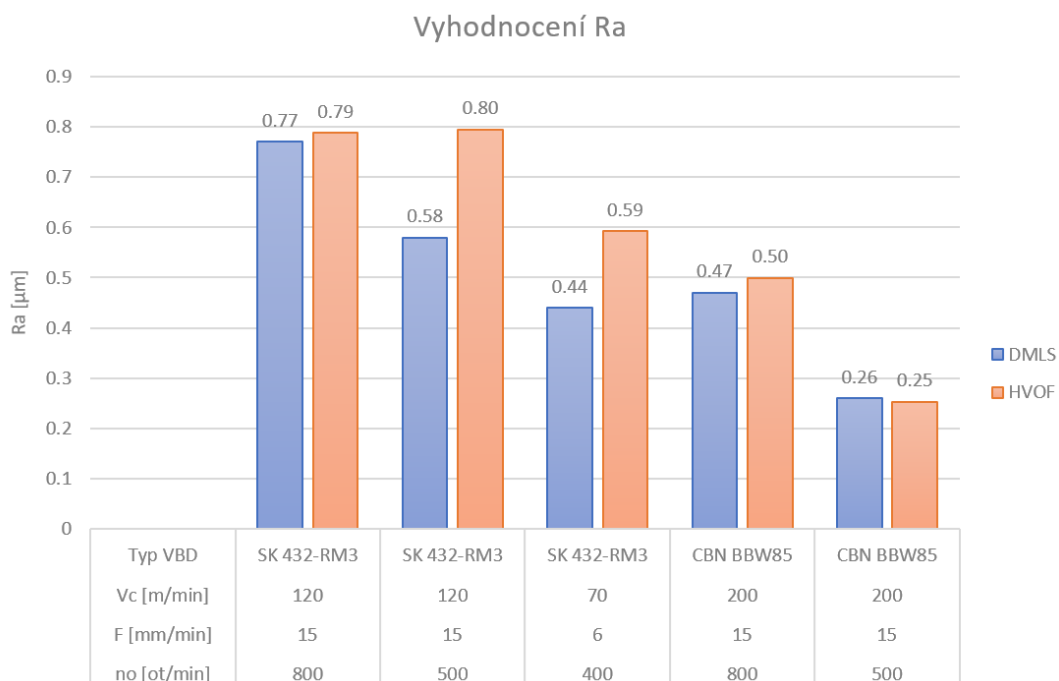
Tab. 6-16 Tabulka řezných podmínek a typu VBD pro materiál HVOF

Celkem bylo provedeno 24 řezů z nichž bylo vybráno celkem 11 vzorků, které byly podrobeny komplexnímu měření v laboratoři metrologie. Vzorky byly vybrány tak, aby byly zastoupeny obě technologie výroby vzorků – jak technologie žárového nástřiku HVOF, tak i metoda 3D tisku DMLS. Rovněž byly vybrány ty vzorky, u nichž bylo dosaženo nejlepších hodnot drsnosti z ručního dílenského drsnoměru. Vybrané vzorky byly vždy obráběny za stejných podmínek u stejných VBD a lišila se pouze příprava materiálu. Opatření nebylo do závěrečného vyhodnocení zahrnuto, jelikož se jednalo zejména o porovnání jednotlivých materiálů mezi sebou a na každý řez byla použita nová řezná hrana.

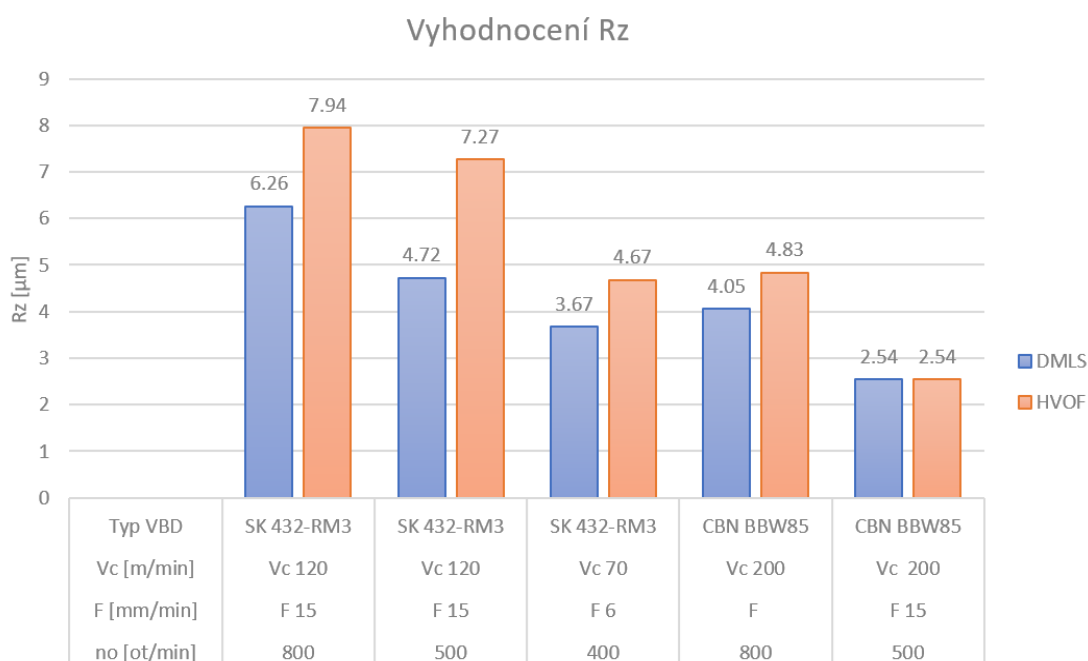
| Vzorek | VBD | ŘEZNÉ PODMÍNKY | | | | | | MĚŘENÍ PŘED OBRÁBĚNÍM | | | | | | | | MĚŘENÍ PO OBRÁBĚNÍ | | | | |
|---------|---------------------------|----------------|------------|---------|----------|---------|------------------|-----------------------|-------|--------------|-------|-------------|---------------------------|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|-------------|----------------|---------|
| | | TYP | Vc [m/min] | F [min] | f/z [mm] | ap [mm] | ot. obr. [m/min] | Vc skut. [m/min] | náměr | DRSNOST [µm] | | | GEOMETRICKÁ PŘESNOST [µm] | | DRSNOST [µm] | | GEOMETRICKÁ PŘESNOST [µm] | | | |
| | | | | | | | | | | Ra | Rz | Kruhovitost | Válvovitost | celkové házení | Ra | Rz | Kruhovitost | Válvovitost | celkové házení | Přímost |
| 1_DMLS | SMCT 432-RM3 | 120 | 15 | 0.013 | 0.1 | 800 | 242 | 1 | 7.23 | 53.44 | 85.41 | 129.10 | 145.74 | 0.73 | 5.71 | 16.38 | 54.53 | 58.16 | | |
| | | | | | | | | 2 | 4.08 | 24.72 | 92.39 | | 0.77 | 6.49 | 15.48 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 8.51 | 58.76 | 86.72 | | 0.88 | 7.18 | 13.54 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 4.60 | 41.69 | 83.28 | | 0.69 | 5.66 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.11 | 44.65 | 88.17 | | 0.77 | 6.26 | 15.13 | | | | | |
| 2_DMLS | SMCT 432-RM3 | 120 | 15 | 0.013 | 0.1 | 500 | 196 | 1 | 7.23 | 53.44 | 85.41 | 129.10 | 145.74 | 0.25 | 1.92 | 33.66 | 50.6 | 52.94 | 14.07 | |
| | | | | | | | | 2 | 4.08 | 24.72 | 92.39 | | 0.38 | 3.71 | 34.04 | | | 35.63 | | |
| | | | | | | | | 3 | 8.51 | 58.76 | 86.72 | | 0.77 | 6.69 | 50.07 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 4.60 | 41.69 | 83.28 | | 0.92 | 6.57 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.11 | 44.65 | 88.17 | | 0.58 | 4.72 | 39.26 | | | | | |
| 3_DMLS | SMCT 432-RM3 | 70 | 6 | 0.009 | 0.1 | 400 | 132 | 1 | 7.23 | 53.44 | 85.41 | 129.10 | 145.74 | 0.44 | 3.65 | 12.56 | 22.28 | 27.71 | 15.66 | |
| | | | | | | | | 2 | 4.08 | 24.72 | 92.39 | | 0.46 | 4.14 | 11.19 | | | 16.03 | | |
| | | | | | | | | 3 | 8.51 | 58.76 | 86.72 | | 0.45 | 3.38 | 15.02 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 4.60 | 41.69 | 83.28 | | 0.41 | 3.52 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.11 | 44.65 | 88.17 | | 0.44 | 3.67 | 12.92 | | | | | |
| 4_DMLS | CBN BBW85 0,2x20° | 200 | 15 | 0.008 | 0.1 | 500 | 276 | 1 | 7.23 | 53.44 | 85.41 | 129.10 | 145.74 | 0.61 | 5.82 | 8.92 | 26.66 | 27.49 | 14.3 | |
| | | | | | | | | 2 | 4.08 | 24.72 | 92.39 | | 0.14 | 1.52 | 9.15 | | | 13.35 | | |
| | | | | | | | | 3 | 8.51 | 58.76 | 86.72 | | 0.13 | 1.16 | 11.41 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 4.60 | 41.69 | 83.28 | | 0.16 | 1.65 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.11 | 44.65 | 88.17 | | 0.26 | 2.54 | 9.83 | | | | | |
| 5_DMLS | CBN BBW85 0,2x20° | 200 | 15 | 0.008 | 0.1 | 800 | 324 | 1 | 7.23 | 53.44 | 85.41 | 129.10 | 145.74 | 0.63 | 5.94 | 15.49 | 61.46 | 61.99 | 16.39 | |
| | | | | | | | | 2 | 4.08 | 24.72 | 92.39 | | 0.30 | 2.65 | 19.96 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 8.51 | 58.76 | 86.72 | | 0.27 | 2.47 | 36.51 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 4.60 | 41.69 | 83.28 | | 0.66 | 5.13 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.11 | 44.65 | 88.17 | | 0.47 | 4.05 | 23.99 | | | | | |
| 11_HVOF | SMCT 432-RM3 | 120 | 15 | 0.013 | 0.1 | 800 | 233 | 1 | 6.61 | 36.15 | 43.41 | 99.71 | 102.99 | 0.79 | 8.24 | 20.56 | 39.71 | 54.45 | 20.71 | |
| | | | | | | | | 2 | 6.27 | 39.14 | 51.17 | | 0.80 | 7.45 | 18.15 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 6.38 | 37.89 | 42.26 | | 0.83 | 7.68 | 26.61 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 5.99 | 34.64 | 41.38 | | 0.73 | 8.39 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.31 | 36.96 | 45.61 | | 0.79 | 7.94 | 21.77 | | | | | |
| 12_HVOF | SMCT 432-RM3 | 120 | 15 | 0.013 | 0.1 | 500 | 191 | 1 | 6.50 | 44.29 | 39.16 | 94.11 | 94.31 | 0.79 | 6.63 | 19.80 | 22.92 | 24.13 | 19.46 | |
| | | | | | | | | 2 | 6.88 | 50.08 | 37.32 | | 0.76 | 7.71 | 20.23 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 7.31 | 47.78 | 35.04 | | 0.77 | 6.42 | 18.87 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 6.89 | 51.00 | 41.78 | | 0.86 | 8.30 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.90 | 48.29 | 37.17 | | 0.80 | 7.27 | 19.63 | | | | | |
| 13_HVOF | SMCT 432-RM3 | 70 | 6 | 0.009 | 0.1 | 400 | 126 | 1 | 5.68 | 30.76 | 45.33 | 83.67 | 86.96 | 0.74 | 5.64 | 12.02 | 16.68 | 27.6 | 14.05 | |
| | | | | | | | | 2 | 6.53 | 37.51 | 42.66 | | 0.55 | 4.76 | 11.60 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 6.35 | 36.38 | 42.42 | | 0.51 | 4.00 | 12.80 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 6.46 | 38.96 | 50.18 | | 0.57 | 4.29 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.26 | 35.90 | 43.47 | | 0.59 | 4.67 | 12.14 | | | | | |
| 15_HVOF | CBN BBW85 0,2x20° | 200 | 15 | 0.008 | 0.1 | 800 | 313 | 1 | 6.10 | 35.18 | 47.68 | 77.38 | 81.28 | 0.41 | 4.54 | 24.31 | 46.26 | 51.46 | 26.47 | |
| | | | | | | | | 2 | 6.11 | 35.63 | 38.93 | | 0.53 | 4.97 | 15.94 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 5.90 | 35.22 | 40.71 | | 0.61 | 5.82 | 14.28 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 6.82 | 39.64 | 37.73 | | 0.45 | 3.98 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.23 | 36.42 | 42.44 | | 0.50 | 4.83 | 18.18 | | | | | |
| 16_HVOF | CBN BBW85 0,2x20° (staré) | 200 | 15 | 0.008 | 0.1 | 500 | 277 | 1 | 5.67 | 34.05 | 45.26 | 88.19 | 88.19 | 0.22 | 2.66 | 15.43 | 19.76 | 24.01 | 13.42 | |
| | | | | | | | | 2 | 6.10 | 34.40 | 44.60 | | 0.24 | 2.21 | 14.78 | | | | | |
| | | | | | | | | 3 | 6.33 | 34.89 | 40.08 | | 0.25 | 2.41 | 11.78 | | | | | |
| | | | | | | | | 4 | 6.26 | 36.30 | 41.53 | | 0.30 | 2.88 | | | | | | |
| | | | | | | | | suma | 6.09 | 34.91 | 43.31 | | 0.25 | 2.54 | 14.00 | | | | | |

Tab. 6-17 Souhrnná tabulka experimentu rotačního frézování

Jedním z hlavních zkoumaných faktorů byla hodnota drsnosti. V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty drsnosti Ra a Rz pro materiál DMLS a HVOF. Ve sloupci jsou spolu vždy porovnány stejné řezné podmínky a stejné VBD, liší se tedy pouze obráběný materiál. Z grafů je patrné, že nižších hodnot drsnosti je dosaženo při obrábění materiálu Inconel 718 zhotoveného metodou DMLS. Zároveň je nižších hodnot Ra i Rz dosaženo při využití břitových destiček z CBN, kdy je možné dosáhnout nižší drsnosti při větších řezných rychlostech a stejných ostatních podmínkách, než u SK.

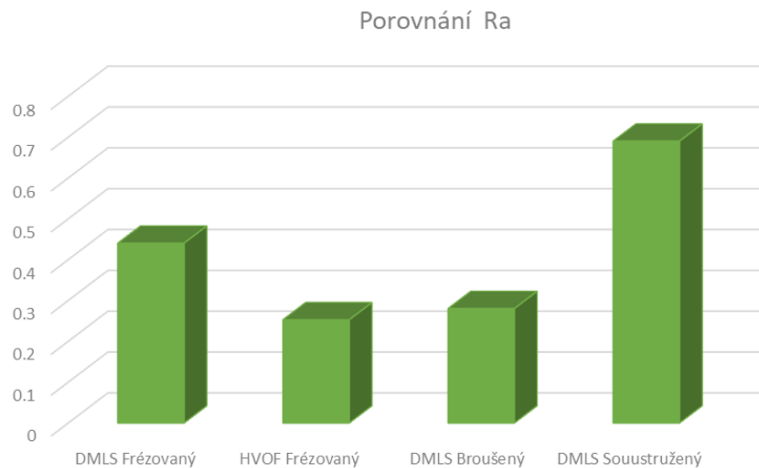


Obr. 6-43 Graf drsnosti Ra po obrábění

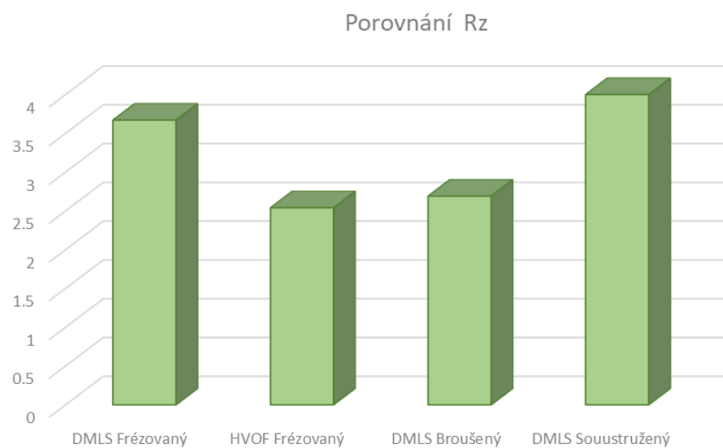


Obr. 6-44 Graf drsnosti Rz po obrábění

V grafu níže jsou vybrány technologie soustružení a broušení a porovnány s technologií rotačního frézování. Z experimentů vyplývá, že technologií rotačního frézování je možné dosáhnout stejných hodnot drsnosti Ra a Rz, jako v případě soustružení a broušení. Je však třeba zmínit, že hodnoty kruhovitosti a válcovitosti po frézování již nedosahují tak nízkých hodnot jako při broušení a soustružení. Avšak i přes tyto výsledky je možné experimenty považovat za úspěšné a je možné nasadit technologii rotačního frézování v případech, kde není kladen důraz na přísné tolerance kruhovitosti a válcovitosti.



Obr. 6-45 Graf drsnosti Ra pro jednotlivé technologie



Obr. 6-46 Graf drsností Rz pro jednotlivé technologie

Statistické vyhodnocení rotačního frézování

Experiment hodnotil vliv obrobeneho materiálu (x_1) a použité VBD (x_2) na základní charakteristiky obrobeneho povrchu:

- drsnost R_a (y_1)
- drsnost R_z (y_2)
- zaoblení (y_3)
- válcovitost (y_4)
- přímost (y_5)
- celkové házení (y_6)

Samotný experiment byl proveden jako faktorový experiment s nominálními nezávislými proměnnými podle tabulky níže

| Proměnná | Úroveň 1 | Úroveň 2 |
|-----------------------------|-----------|--------------|
| Obráběný materiál (x_1) | DMLS | HVOF |
| Typ VBD (x_2) | CBN BBW85 | SMCT 432-RM3 |

Tab. 6-18 Základní plán experimentu

Vzhledem k typu stupnice použité pro vstupní proměnné (nominální) a typu stupnice použité pro měřenou odezvu $y_1 \dots y_6$ (intervalová proměnná) byla jako základní statistická metoda pro ověření výzkumné hypotézy H_1 : Existuje významný vliv obrobeneho materiálu a použitého VBD na základní charakteristiky obrobeneho povrchu ($y_1 \dots y_6$) na zvolené hladině významnosti $\alpha = 5\%$, použita Fisherova analýza rozptylu (ANOVA) s následným Fisherovým vzájemným porovnáním použitých skupin.

Analýza rozptylu pro zkoumaný parametr y představuje základní statistickou analýzu vhodnosti použitého obecného modelu (1). Analýza rozptylu na jedné straně analyzuje, zda je variabilita způsobená náhodnými chybami výrazně menší než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem. Druhý statistický pohled na ANOVA vyplývá z její základní podstaty, kdy testujeme nulovou statistickou hypotézu, která říká, že žádný z efektů použitých v modelu (obráběný materiál, typ VBD) nemá vliv na významnou změnu zkoumané proměnné (y). Při statistické analýze výsledků experimentu byla použita faktorová analýza rozptylu, při níž byl zvažován vliv hlavních účinků nezávislých proměnných a jejich vzájemné interakce. Základní obecná tabulka ANOVA je uvedena v Tab. 6-19.

$$\hat{y} = b_0 \cdot x_0 + \sum_{j=1}^N b_j \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^N b_{uj} \cdot x_u \cdot x_j \quad (6.1)$$

| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio | Prob > F |
|----------|---------------------------|----------------------|---|---|----------|
| Model | $DF_{\text{Model}}=a-1$ | S_{Model} | $MS_{\text{Model}}= S_{\text{Model}}/ DF_{\text{Model}}$ | $F= MS_{\text{Model}}/ MS_{\text{Error}}$ | p_M |
| Error | $DF_{\text{Error}}=N-a$ | S_{Error} | $MS_{\text{Error}}= S_{\text{Error}}/ DF_{\text{Error}}$ | | |
| C. Total | $DF_{\text{C.Total}}=N-1$ | $S_{\text{C.Total}}$ | $MS_{\text{C.Total}}= S_{\text{C.Total}} / DF_{\text{C.Total}}$ | | |

Tab. 6-19 Všeobecná tabulka ANOVA

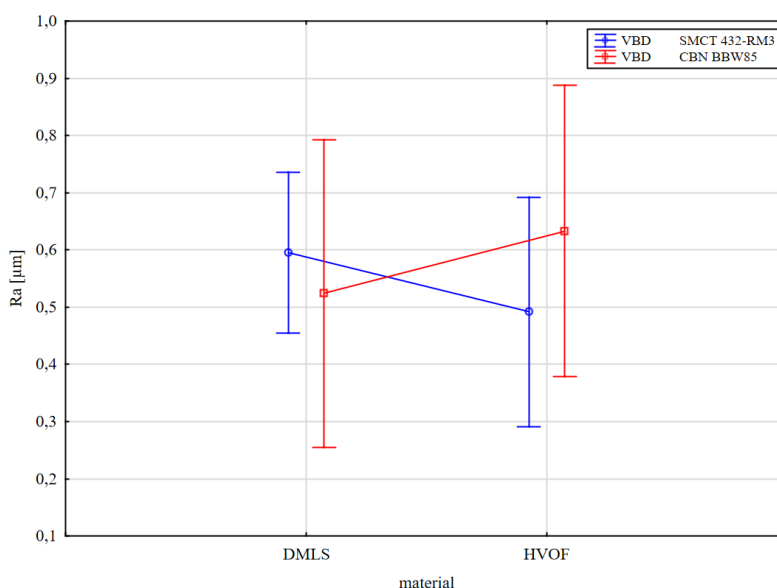
Drsnost obrobeného povrchu Ra

Na základě výše uvedeného budeme analyzovat obecný model (1) pro všechny zkoumané závislé proměnné (y_i). Pro první zkoumanou odezvu a drsnost povrchu Ra je základní tabulka Fisherovy analýzy rozptylu uvedena v Tab. 6-20.

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------|----|---------|--------------|---------|----------|---------|---------|
| material | 1 | 0,00020 | 0,00 % | 0,00009 | 0,000091 | 0,00 | 0,976 |
| VBD | 1 | 0,02329 | 0,55 % | 0,01276 | 0,012757 | 0,12 | 0,727 |
| material*VBD | 1 | 0,12136 | 2,84 % | 0,12136 | 0,121363 | 1,18 | 0,284 |
| Error | 40 | 4,12252 | 96,61 % | 4,12252 | 0,103063 | | |
| Total | 43 | 4,26737 | 100,00 % | | | | |

Tab. 6-20 ANOVA pro drsnost obrobeného povrchu Ra

Z tabulky vyplývá, že žádná ze základních vstupních proměnných reprezentovaných typem obráběného materiálu, typem použité VBD ani jejich interakcí nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy Ra (y_1). Grafické znázornění naměřených hodnot je uvedeno na Obr. 6-47.



Obr. 6-47 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy Ra

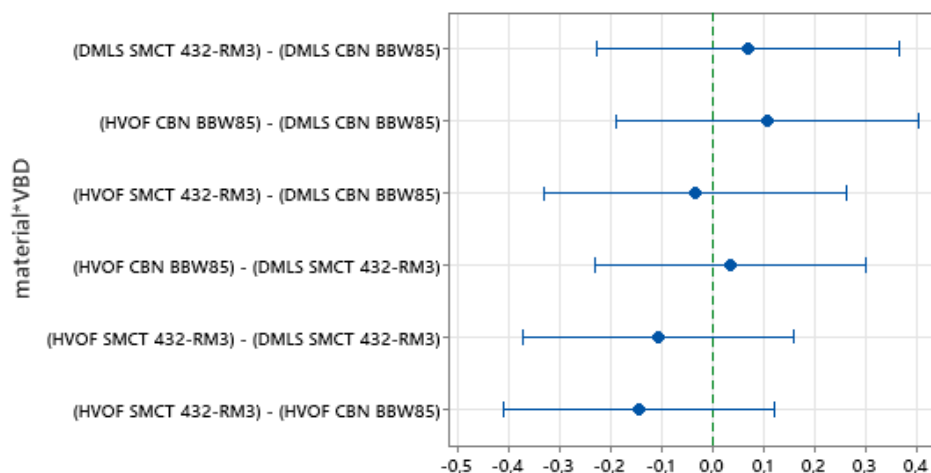
Vzhledem k dosaženým hodnotám významnosti (Tab. 6-20) použijeme pro analýzu rozdílů jednotlivých skupin (obráběný materiál, typ VBD) pouze poslední proměnnou modelu (1), a to jejich vzájemnou interakci. Základní charakteristiky rozdílů středních hodnot zkoumané odezvy Ra v rámci použitých vstupních proměnných jsou uvedeny v Tab. 6-21 a na Obr. 6-48.

| Difference of material*VBD Levels | Difference of Means | SE of Difference | Individual 95% CI | T-Value | P-Value |
|--|---------------------|------------------|-------------------|---------|---------|
| (DMLS SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | 0,072 | 0,147 | (-0,224; 0,368) | 0,49 | 0,625 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS CBN BBW85) | 0,11 | 0,147 | (-0,187; 0,406) | 0,75 | 0,459 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | -0,032 | 0,147 | (-0,328; 0,264) | -0,22 | 0,83 |

| | | | | | |
|---|--------|-------|-----------------|-------|-------|
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS SMCT 432-RM3) | 0,038 | 0,131 | (-0,227; 0,302) | 0,29 | 0,776 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -0,104 | 0,131 | (-0,369; 0,161) | -0,79 | 0,433 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (HVOF CBN BBW85) | -0,141 | 0,131 | (-0,406; 0,124) | -1,08 | 0,288 |

Tab. 6-21 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou odezvu Ra

Podle získaných hodnot významnosti lze konstatovat, že hypotéza H1 musí být zamítnuta, a tedy ani typ obráběného materiálu, ani typ použitého VBD nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy Ra.



Obr. 6-48 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy Ra

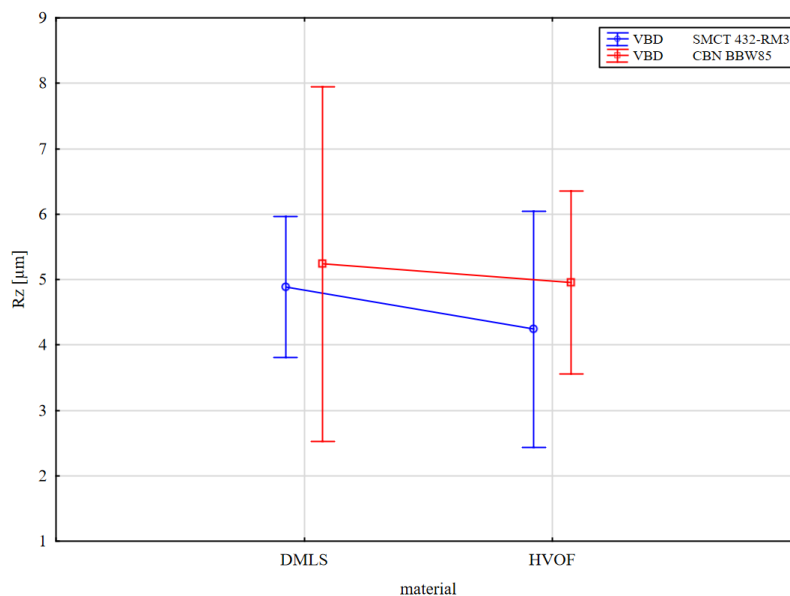
Drsnost obráběného povrchu Rz

Stejně jako v předchozím případě, i pro analýzu druhé zkoumané drsnosti Rz uvádíme tabulku ANOVA (Tab. 6-22) jako základní nástroj pro analýzu experimentálně získaných výsledků.

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------|----|---------|--------------|---------|--------|---------|---------|
| material | 1 | 2,016 | 0,80% | 2,308 | 2,3085 | 0,37 | 0,545 |
| VBD | 1 | 3,287 | 1,30% | 3,018 | 3,0175 | 0,49 | 0,489 |
| material*VBD | 1 | 0,338 | 0,13% | 0,338 | 0,3384 | 0,05 | 0,816 |
| Error | 40 | 247,172 | 97,77% | 247,172 | 6,1793 | | |
| Total | 43 | 252,813 | 100,00% | | | | |

Tab. 6-22 ANOVA pro drsnost obroběného povrchu Rz

Z tabulky vyplývá, že žádná ze základních vstupních proměnných reprezentovaných typem obráběného materiálu, typem použité VBD ani jejich vzájemnou interakcí nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy Rz (y_2). Grafické znázornění naměřených hodnot je uvedeno na obrázku níže. Z tabulky je dále patrné, že druh obráběného materiálu má vliv na změnu hodnoty drsnosti povrchu Rz na úrovni 0,80 %, typ použitého VBD 1,30 % a jejich vzájemná interakce z hlediska modelu (1) pouze 0,13 %.



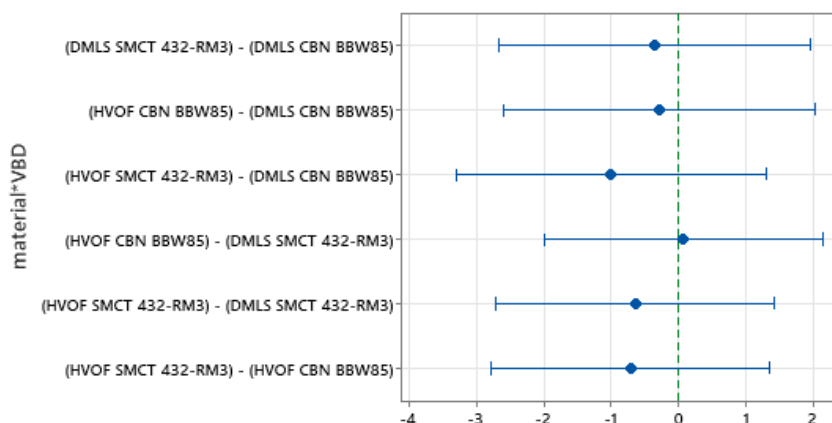
Obr. 6-49 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy Rz

Vzhledem k dosaženým hodnotám významnosti použijeme pro analýzu rozdílů jednotlivých skupin (obráběný materiál, typ VBD) pouze poslední proměnnou modelu (1), a to jejich vzájemnou interakci. Základní charakteristiky rozdílů středních hodnot zkoumané odezvy Rz v rámci použitých vstupních veličin jsou uvedeny v Tab. 6-23 a na Obr. 6-49.

| Difference of material*VBD Levels | Difference of Means | SE of Difference | Individual 95% | T-Value | P-Value |
|---|---------------------|------------------|----------------|---------|---------|
| (DMLS SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | -0,35 | 1,13 | (-2,65; 1,94) | -0,31 | 0,757 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS CBN BBW85) | -0,29 | 1,13 | (-2,58; 2,01) | -0,25 | 0,802 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | -1,00 | 1,13 | (-3,29; 1,30) | -0,88 | 0,385 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS SMCT 432-RM3) | 0,07 | 1,01 | (-1,98; 2,12) | 0,07 | 0,948 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -0,64 | 1,01 | (-2,69; 1,41) | -0,63 | 0,530 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (HVOF CBN BBW85) | -0,71 | 1,01 | (-2,76; 1,34) | -0,7 | 0,488 |

Tab. 6-23 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou odezvu Rz

Podle získaných hodnot významnosti lze konstatovat, že hypotéza H1 musí být zamítnuta, a tedy ani typ obráběného materiálu, ani typ použité VBD nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy Rz.



Obr. 6-50 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy Rz

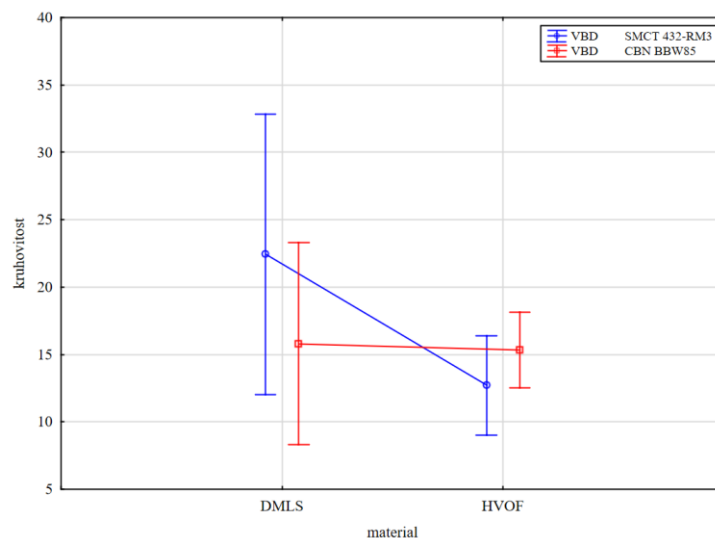
Kruhovitost

Jako základní nástroj pro analýzu experimentálně získaných výsledků pro kruhovost uvádíme tabulku ANOVA (Tab. 6-24), kde sledujeme vliv členů modelu (1) na změnu hodnoty zkoumané odezvy y_3 :

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------|----|---------|--------------|---------|--------|---------|---------|
| material | 1 | 285,22 | 11,22 % | 212,85 | 212,85 | 3,09 | 0,089 |
| VBD | 1 | 15,81 | 0,62 % | 33,00 | 33,00 | 0,48 | 0,494 |
| material*VBD | 1 | 175,34 | 6,89 % | 175,34 | 175,34 | 2,55 | 0,121 |
| Error | 30 | 2066,78 | 81,27 % | 2066,78 | 68,89 | | |
| Total | 33 | 2543,15 | 100,00 % | | | | |

Tab. 6-24 ANOVA pro kruhovost

Z výsledků vyplývá, že žádná ze základních vstupních proměnných reprezentovaných typem obrobeného materiálu, typem použité VBD ani jejich interakcí nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty studované odezvy kruhovost (y_3). Grafické znázornění naměřených hodnot je uvedeno na obrázku níže. Dále je patrné, že typ obrobeného materiálu má vliv na změnu hodnoty kruhovosti na úrovni 11,22 %, použitý typ VBD 0,62 % a jejich vzájemná interakce z hlediska modelu (1) 6,89 %.



Obr. 6-51 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy kruhovosti

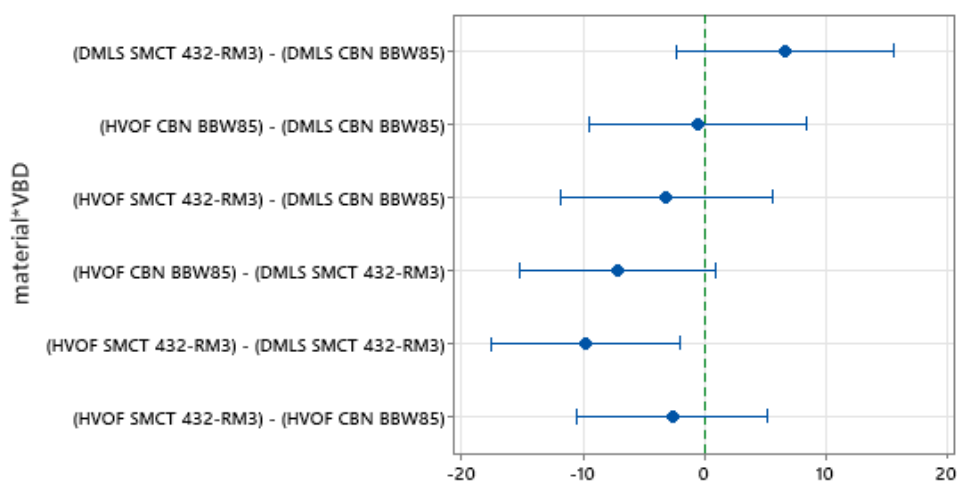
Vzhledem k dosaženým hodnotám významnosti použijeme pro analýzu rozdílů jednotlivých skupin (obráběný materiál, typ VBD) pouze poslední proměnnou modelu (1), a to jejich vzájemnou interakci. Základní charakteristiky rozdílů středních hodnot zkoumané kruhové odezvy v rámci použitých vstupních proměnných jsou uvedeny v Tab. 6-25 a na Obr. 6-52.

| Difference of material*VBD Levels | Difference of Means | SE of Difference | Individual 95% CI | T-Value | P-Value |
|---|---------------------|------------------|-------------------|---------|---------|
| (DMLS SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | 6,64 | 4,37 | (-2,30; 15,57) | 1,52 | 0,14 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS CBN BBW85) | -0,47 | 4,37 | (-9,41; 8,46) | -0,11 | 0,915 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | -3,09 | 4,29 | (-11,85; 5,66) | -0,72 | 0,476 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -7,11 | 3,91 | (-15,10; 0,88) | -1,82 | 0,079 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -9,73 | 3,81 | (-17,52; -1,94) | -2,55 | 0,016* |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (HVOF CBN BBW85) | -2,62 | 3,81 | (-10,41; 5,17) | -0,69 | 0,497 |

* - Význam na hladině významnosti $\alpha = 5\%$

Tab. 6-25 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou kruhovitosť

Podle získaných hodnot významnosti lze konstatovat, že hypotézu H1 nelze zamítnout. Přestože žádná z analyzovaných vstupních proměnných (typ použité VBD obráběného materiálu) nemá významný vliv na změnu hodnoty zaoblení, a to ani jako hlavní nezávislý vliv, ani jako interakce, na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ pozorujeme statisticky významný rozdíl ($p = 0,016$) mezi obráběným materiálem HVOF a DLMS při použití VBD: SMTC 432-RM3. Z hodnoty dosaženého rozdílu je dále patrné, že při použití VBD: SMTC 432-RM3 s intervaly spolehlivosti získáme hodnotu kruhovitosti o 9,73 μm nižší pro obráběný materiál HVOF než pro DLMS. Současně při obrábění HVOF pomocí SMTC 432-RM3 zjistíme minimální hodnotu zaoblení 12,708 μm s kompozitní shodou 0,876631.



Obr. 6-52 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy kruhovitosti

Válcovitost

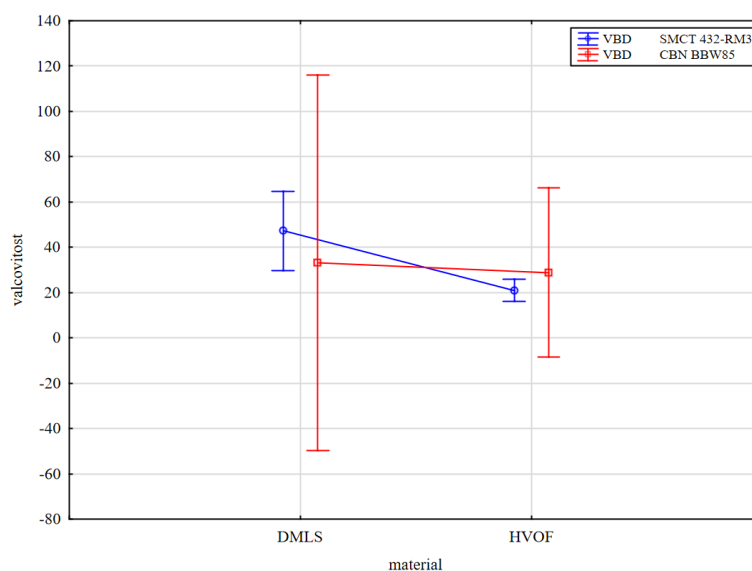
Jako základní nástroj pro analýzu experimentálně získaných výsledků pro válcovitost uvádíme tabulku ANOVA (Tab. 6-26), kde sledujeme vliv členů modelu (1) na změnu hodnoty zkoumané odezvy y_4 :

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------|----|---------|--------------|---------|--------|---------|---------|
| material | 1 | 1391,76 | 43,67 % | 758,63 | 758,63 | 5,99 | 0,032* |
| VBD | 1 | 8,51 | 0,27 % | 31,03 | 31,03 | 0,25 | 0,630 |
| material*VBD | 1 | 393,56 | 12,35 % | 393,56 | 393,56 | 3,11 | 0,106 |
| Error | 11 | 1393,14 | 43,71 % | 1393,14 | 126,65 | | |
| Total | 14 | 3186,97 | 100,00 % | | | | |

* - Význam na hladině významnosti $\alpha = 5\%$

Tab. 6-26 ANOVA pro válcovitost

Z výsledků vyplývá, že na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ má obráběný materiál významný vliv ($p = 0,032$) s 43,67% vlivem na změnu hodnoty zkoumané odezvy válcovitosti. Z toho vyplývá, že typ použitého VBD a interakce mezi obrobeným materiálem a typem VBD již nemají významný vliv na změnu válcovitosti. Na základě výše uvedeného je třeba přijmout stanovenou výzkumnou hypotézu o válcovitosti. Grafické znázornění okrajových průměrů válcovitosti pro nezávislé proměnné je uvedeno na obrázku níže.



Obr. 6-53 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy válcovitosti

Vzhledem k dosaženým hodnotám významnosti použijeme pro analýzu rozdílů jednotlivých skupin (obráběný materiál, typ VBD) pouze poslední proměnnou modelu (1), a to jejich vzájemnou interakci. Základní charakteristiky rozdílů středních hodnot zkoumané odezvy válcovitosti v rámci použitých vstupních proměnných jsou uvedeny v Tab. 6-27 a na Obr. 6-54.

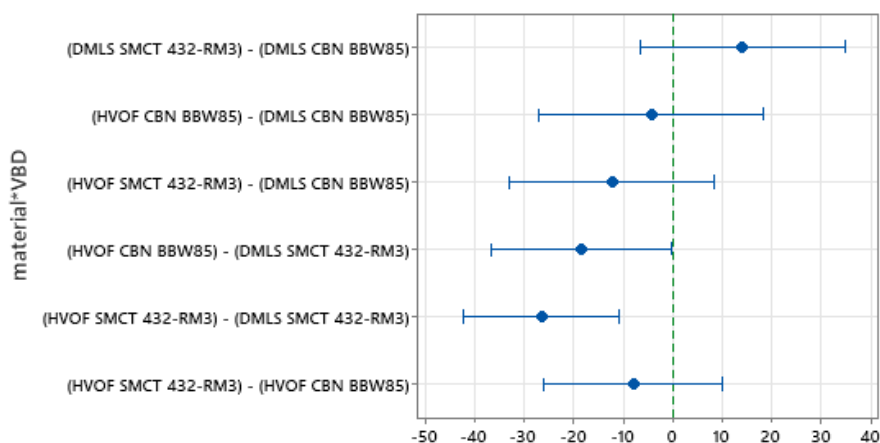
| Difference of material*VBD Levels | Difference of Means | SE of Difference | Individual 95% CI | T-Value | P-Value |
|--|---------------------|------------------|-------------------|---------|---------|
| (DMLS SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | 14,11 | 9,42 | (-6,61; 34,83) | 1,5 | 0,162 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS CBN BBW85) | -4,3 | 10,3 | (-26,9; 18,3) | -0,42 | 0,685 |

| | | | | | |
|---|--------|------|------------------|-------|--------|
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | -12,2 | 9,42 | (-32,92; 8,52) | -1,3 | 0,222 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -18,39 | 8,22 | (-36,48; -0,30) | -2,24 | 0,047* |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -26,31 | 7,12 | (-41,98; -10,64) | -3,7 | 0,004* |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (HVOF CBN BBW85) | -7,92 | 8,22 | (-26,01; 10,17) | -0,96 | 0,356 |

* - Význam na hladině významnosti $\alpha = 5\%$

Tab. 6-27 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou válcovitost

Výsledky ukazují, že na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ pozorujeme statisticky významný rozdíl ($p = 0,047$) mezi HVOF a DLMS obráběným materiálem při použití VBD: CBN BBW85 a VBD: SMCT 432-RM3. Z hodnoty získaného rozdílu je dále patrné, že při obrábění HVOF pomocí VBD: CBN BBW85 získáme hodnotu válcovitosti o 18,39 μm nižší než při obrábění DLMS pomocí VBD: SMCT 432-RM3, a to s ohledem na intervaly spolehlivosti. Druhý významný rozdíl je pozorován při obrábění materiálu HVOF a DLMS pomocí VBD: SMCT 432-RM3. Z výsledků je patrné, že při obrábění HVOF je hodnota válcovitosti o 26,31 μm nižší než při obrábění DLMS s použitím stejného typu VBD (SMCT 432-RM3). Současně při obrábění HVOF pomocí SMTC 432-RM3 zjistíme minimální hodnotu zaoblení 20,984 μm s kompozitní shodou 0,886288.



Obr. 6-54 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy válcovitosti

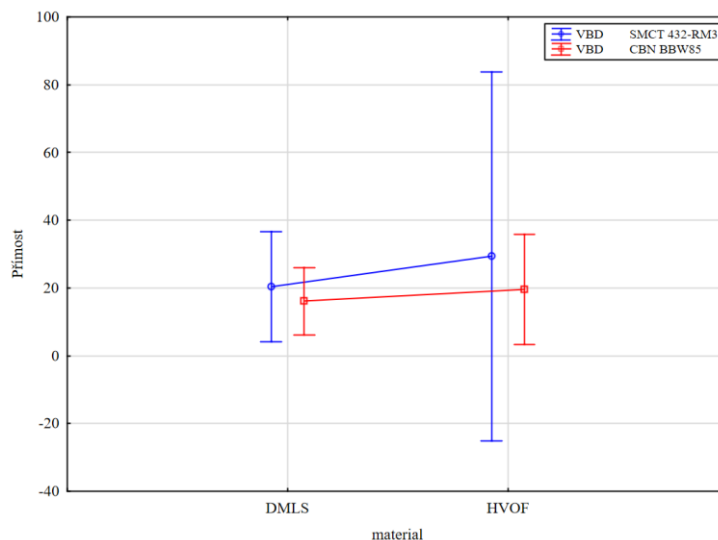
Přímost

Jako základní nástroj pro analýzu experimentálně získaných výsledků z hlediska přímočarosti uvádíme tabulku ANOVA (Tab. 6-28), kde sledujeme vliv členů modelu (1) na změnu hodnoty zkoumané odpovědi y_5 :

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------|----|---------|--------------|---------|--------|---------|---------|
| material | 1 | 114,86 | 6,84 % | 125,58 | 125,58 | 0,81 | 0,391 |
| VBD | 1 | 146,66 | 8,74 % | 153,92 | 153,92 | 0,99 | 0,345 |
| material*VBD | 1 | 23,47 | 1,40 % | 23,47 | 23,47 | 0,15 | 0,706 |
| Error | 9 | 1393,12 | 83,02 % | 1393,12 | 154,79 | | |
| Total | 12 | 1678,11 | 100,00 % | | | | |

Tab. 6-28 ANOVA pro přímost

Z výsledků vyplývá, že žádná ze základních vstupních proměnných reprezentovaných typem obráběného materiálu, typem použité VBD ani jejich interakcí nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy přímosti (y_5). Grafické znázornění naměřených hodnot je uvedeno na obrázku níže. Dále je patrné, že druh obráběného materiálu má vliv na změnu hodnoty přímosti na úrovni 6,84 %, použitý druh VBD 8,74 % a jejich vzájemná interakce z hlediska modelu (1) 1,40 %.



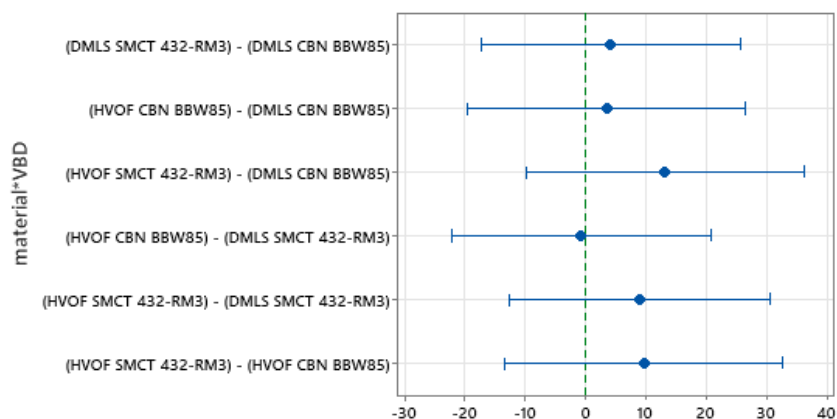
Obr. 6-55 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy přímosti

Podle získaných hodnot významnosti lze konstatovat, že hypotézu H1 pro přímočarost je třeba zamítnout, a tedy ani typ obráběného materiálu, ani typ použitého VBD nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy.

| Difference of material*VBD Levels | Difference of Means | SE of Difference | Individual 95% CI | T-Value | P-Value |
|---|---------------------|------------------|-------------------|---------|---------|
| (DMLS SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | 4,23 | 9,5 | (-17,27; 25,72) | 0,44 | 0,667 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS CBN BBW85) | 3,6 | 10,2 | (-19,4; 26,5) | 0,35 | 0,734 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | 13,2 | 10,2 | (-9,8; 36,2) | 1,3 | 0,226 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -0,67 | 9,5 | (-22,17; 20,83) | -0,07 | 0,945 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS SMCT 432-RM3) | 8,97 | 9,5 | (-12,52; 30,47) | 0,94 | 0,37 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (HVOF CBN BBW85) | 9,6 | 10,2 | (-13,3; 32,6) | 0,95 | 0,367 |

Tab. 6-29 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocenou přímost

Podle získaných hodnot významnosti (Tab. 6-29) lze konstatovat, že hypotézu H1 pro přímočarost je třeba zamítnout, a tedy ani typ obráběného materiálu, ani typ použité VBD nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy.



Obr. 6-56 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy přímosti

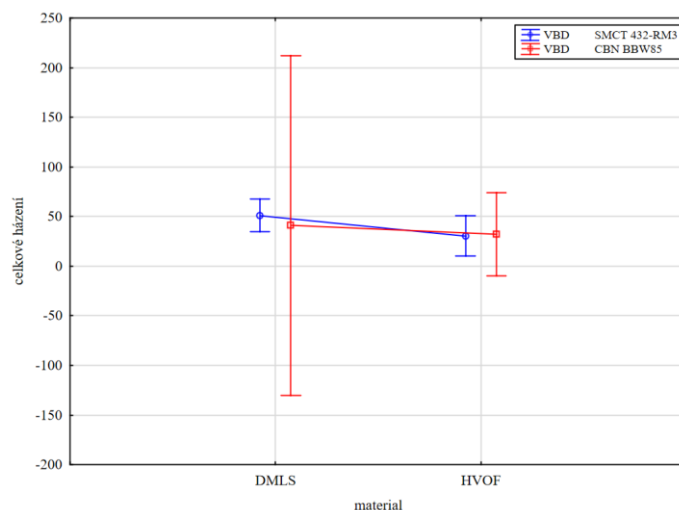
Celkové házení

Podle získaných hodnot významnosti (Tab. 6-30) lze konstatovat, že hypotézu H1 pro přímocí je třeba zamítnout, a tedy ani typ obráběného materiálu, ani typ použité VBD nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odezvy y_6 .

| Source | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|--------------|----|---------|--------------|---------|--------|---------|---------|
| material | 1 | 919,05 | 32,45 % | 633,43 | 633,43 | 3,23 | 0,106 |
| VBD | 1 | 48,73 | 1,72 % | 52,16 | 52,16 | 0,27 | 0,618 |
| material*VBD | 1 | 99,64 | 3,52 % | 99,64 | 99,64 | 0,51 | 0,494 |
| Error | 9 | 1764,93 | 62,31 % | 1764,93 | 196,10 | | |
| Total | 12 | 2832,35 | 100,00 % | | | | |

Tab. 6-30 ANOVA pro celkové házení

Z výsledků vyplývá, že žádná ze základních vstupních proměnných reprezentovaných typem obráběného materiálu, typem použité VBD ani jejich interakcí nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odpovědi celkového házení (y_6). Grafické znázornění naměřených hodnot je uvedeno na obrázku níže. Dále je patrné, že druh obroběného materiálu má vliv na změnu hodnoty celkového házení na úrovni 32,45 %, druh použité VBD 1,72 % a jejich vzájemná interakce z hlediska modelu (1) 3,52 %.



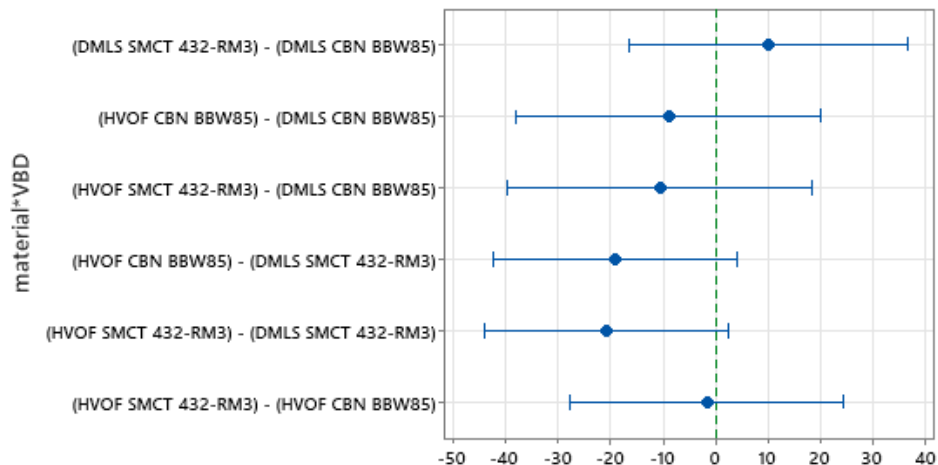
Obr. 6-57 Graf mezních průměrů hodnocené odezvy celkového házení

Vzhledem k dosaženým hodnotám významnosti použijeme pro analýzu rozdílů jednotlivých skupin (obráběný materiál, typ VBD) pouze poslední proměnnou modelu (1), a to jejich vzájemnou interakci. Základní charakteristiky rozdílů středních hodnot zkoumaných celkových odezvy na házení v rámci použitých vstupních proměnných jsou uvedeny v Tab. 6-31 a na Obr. 6-58.

| Difference of material*VBD Levels | Difference of Means | SE of Difference | Individual 95% CI | T-Value | P-Value |
|---|---------------------|------------------|-------------------|---------|---------|
| (DMLS SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | 10,1 | 11,7 | (-16,4; 36,6) | 0,86 | 0,413 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS CBN BBW85) | -8,9 | 12,8 | (-37,8; 20,0) | -0,69 | 0,505 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS CBN BBW85) | -10,5 | 12,8 | (-39,4; 18,4) | -0,82 | 0,433 |
| (HVOF CBN BBW85) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -18,9 | 10,2 | (-42,1; 4,2) | -1,85 | 0,097 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (DMLS SMCT 432-RM3) | -20,5 | 10,2 | (-43,7; 2,6) | -2,01 | 0,075 |
| (HVOF SMCT 432-RM3) - (HVOF CBN BBW85) | -1,6 | 11,4 | (-27,5; 24,3) | -0,14 | 0,891 |

Tab. 6-31 Vzájemné porovnání středních hodnot podle Fishera pro hodnocené celkové házení

Podle získaných hodnot významnosti (tab. 14) lze konstatovat, že stanovenou hypotézu H1 pro celkové házení je třeba zamítnout, a tedy ani typ obráběného materiálu, ani typ použité VBD nemá na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ významný vliv na změnu hodnoty zkoumané odpovědi.



Obr. 6-58 Grafické srovnání rozdílů zkoumané odezvy celkového házení

6.5.QCA TO prototyp

Dalším krokem byl vývoj speciálního obráběcího nástroje za pomoci topologické optimalizace. Tento nástroj je založen na doposud získaných znalostech z obrábění žárových nástřiků lineární řeznou hranou, znalostech získaných při konstrukci předchozích variant nástroje a možnostech topologické optimalizace.

Hlavní myšlenkou pro topologickou optimalizaci bylo především možnost rovnoměrného rozložení napětí v materiálu a tím zajistit optimální tuhost nástroje. Dalším bodem byla poté možnost soustředit výsledné řezné síly do osy nástroje a dále do osy vřetene stroje a eliminovat tak případný vznik vibrací.

Pro vývoje nástroje byly zvažovány následující softwary podporující topologickou optimalizaci: Altair Optistruct/inspire, COMSOL Multiphysics a Solidworks Simulation a Siemens NX frustum.

Software COMSOL Multiphysics je určen k řešení úloh pomocí metody konečných prvků, do které je možné zahrnout více fyzikálních procesů. Jedná se tedy o komplexní řešení, kdy jsou řešeny multifyzikální úlohy. Díky tomu lze dosáhnout výrazně vyšší věrohodnosti získaných výsledků. Program obsahuje potřebné funkce k vytvoření a analýze modelu počínaje od definování geometrie, zadání okrajových podmínek, vytvoření sítě, nastavení řešičů až po vizualizaci výsledků. Program rovněž umožňuje definování vlastních matematických rovnic a provázání s výpočty a simulacemi MATLAB. Možnosti simulace jde dále rozvinout aplikováním fyzikálních, rozšiřujících a propojujících modulů [66]. Tento program je velice komplexní a teoreticky by měl dosahovat nejpřesnějších výstupů. Pro potřeby optimalizace nástroje, který je řešen zejména z hlediska rozložení napětí a tuhosti, je tento program zbytečně komplexní a složitý na řešení požadovaných úloh. Proto jsem se s tímto programem v rámci studia v krátkosti seznámil a pro konkrétní optimalizace již nebyl použit.

Společnost Altair nabízí komplexní řešení v podobě Altair HyperWorks, které nabízí řešení pro modelování, analýzu, optimalizaci, vizualizaci a automatizaci procesů v oblastech mechaniky, životnosti a multifyzikálních procesů. Díky široké škále řešičů je HyperWorks vhodný k multifyzikálním analýzám a vícekritériálním optimalizačním konstrukčním řešení. Díky tomu je HyperWorks podobně komplexní software jako COMSOL Multiphysics, avšak pro potřeby topologické optimalizace také poměrně složitý. Společnost Altair proto nabízí ještě software speciálně navržený pro optimalizaci a zejména pak topologickou optimalizaci konstrukce a to: Altair Inspire a Altair OptiStruct. Inspire je velmi jednoduchý a snadno použitelný software pro topologickou optimalizaci obhajující několik kritérií optimalizace včetně optimalizačních cílů, omezení napětí a posunutí, zrychlení, gravitace a teplotního zatížení. Díky tomu je vhodný na počátku cyklu vývoje produktu a urychluje jeho vytváření optimalizací dílů. Díky jednoduchosti prostředí je rovněž možné naučit se se softwarem během několika málo hodin. Pokročilejší řešení poté nabízí OptiStruct, který byl uvedený na trh již v roce 1994 a patřil mezi první simulační technologie integrující optimalizaci a analýzu konstrukce. OptiStruct také nabízí mnoho dalších nastavení jako strukturální optimalizace a širokou škálu základních výrobních omezení pro tradiční procesy, kompozity a aditivní výrobu [67].

Dalším zvažovaným programem byl Siemens NX frustum. Tento software podporující topologickou optimalizaci nabízí nejkompexnější možnosti nastavení a výpočtu topologie. Rovněž tento software využívá laboratoř prototypingu (VIP) Regionálního technologického institutu fakulty strojní Západočeské univerzity pro modelování výpočty a simulace. Velkou výhodou a zároveň i nevýhodou je jeho velikost a komplexnost, díky velkému množství možností nastavení optimalizace je velice obtížné zvolit správné nastavení topologie a její okrajové podmínky a je nutná větší znalost jednotlivých funkcí systému. Díky tomu je ale možné pracovat s návrhem a následnou topologií velice detailně a dosáhnout požadovaného cíle. Předností tohoto programu je, že dokáže uvažovat s následující aditivní výrobou vypočteného dílu a je možné mezi okrajové podmínky zahrnout například možnost smyslu tisku nástroje s ohledem na podpory v dané ose tisku a samonosnou konstrukci při tisku. Tím je možné eliminovat problémy spojené s následným 3D tiskem.

Od roku 2018 je topologická optimalizace součástí i Solidworks Simulation. I díky tomu se i Solidworks stal rovněž komplexním řešením mezi simulačními softwary. Díky tomu, že veškeré předchozí návrhy konstrukce nástroje byly navrženy v prostředí Solidworks, je ideálním řešením pokračovat v topologické optimalizaci dále v programu Solidworks Simulation [68]. Díky tomu je možné výslednou geometrii okamžitě upravovat v rámci programu a dále ji použít v návrzích či ji exportovat jako solid body. Z tohoto ohledu se jeví jako nejvýhodnější využití právě Solidworks Simulation, kdy odpadá zdlouhavé exportování a nahrávání dílu do jiného programu a při sebemenší změně geometrie potřeba vše opakovat. V případě využití jednoho programu se při změně geometrie pouze přepočte síť prvků a může být zahájen nový výpočet.

Na základě výše uvedených poznatků byl tedy jako první software pro výpočet topologické optimalizace zvolen Solidworks Simulation, přičemž základní výpočty a návrhy byly rovněž provedeny v programu Altair Inspire. Nejprve tedy byl vytvořen prototyp nástroje QCA pomocí topologické optimalizace.

Jak již bylo popsáno v kapitole o optimalizaci konstrukce, topologie pracuje s rozložením materiálu v rámci zadaného objemu s ohledem na okrajové podmínky. Tedy s ohledem na určité zatížení, použitý materiál, či s ohledem na technologii výroby, v tomto případě využití aditivní technologie metodou DMLS.

Použitý materiál je shodný jako u předešlých variant nástroje – nástrojová ocel MS1. V rámci topologie je volba materiálu jedním z hlavních předpokladů úspěšného výsledku. Žádný z programů ze zmiňovaných programů však nemá v knihovnách materiálů ocel MS1 definovanou. Z toho důvodu bylo nutné nejprve definovat nový materiál s požadovanými vlastnostmi. K tomu posloužil materiálový list dodávaný přímo výrobcem k nástrojové oceli MS1 určené pro tiskárny EOS, kde probíhal tisk všech navržených nástrojů v této práci. Na obrázku níže je uveden příklad definování nového materiálu pro potřeby simulace.

Vlastnosti materiálu

Materiály obsažené ve výchozí knihovně nelze upravit. Musíte nejprve materiál zkopírovat do vlastní knihovny, aby jste ho mohli upravit.

Typ modelu: Uložit typ modelu v knihovně

Jednotky:

Kategorie:

Název:

Výchozí kritérium selhání:

Popis:

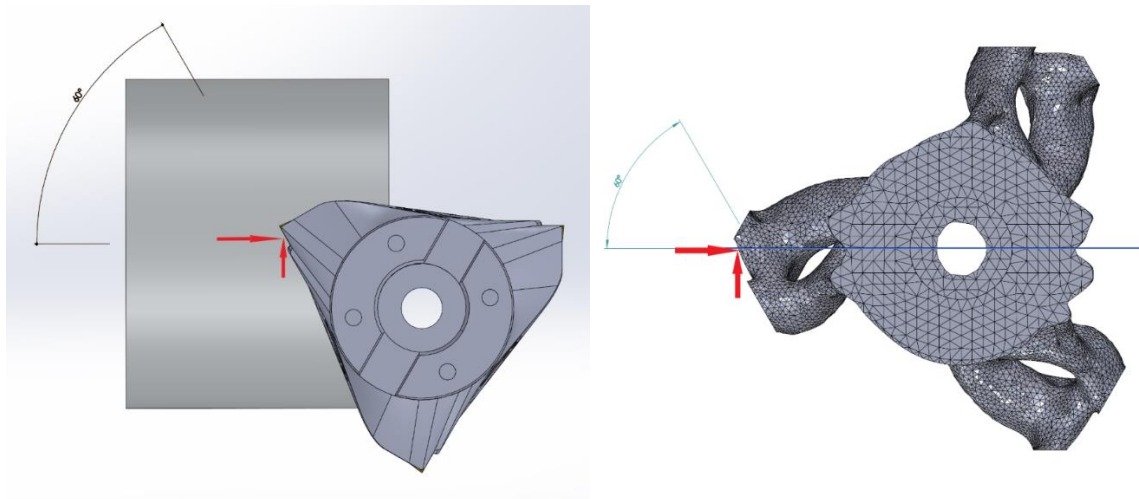
Zdroj:

Sustainability:

| Vlastnost | Hodnota | Jednotky |
|--------------------------------|------------|-------------------|
| Modul pružnosti | 1.8e+11 | N/m ² |
| Poissonův poměr | 0.265 | Neuvedeno |
| Modul pružnosti ve smyku | 8.1e+10 | N/m ² |
| Hustota | 8027 | kg/m ³ |
| Pevnost v tahu | 2050000000 | N/m ² |
| Pevnost v tlaku | | N/m ² |
| Mez kluzu | 1990000000 | N/m ² |
| Součinitel tepelné roztažnosti | 1.65e-05 | /K |
| Součinitel tepelné vodivosti | 20 | W/(m·K) |
| Měrné teplo | 450 | J/(kg·K) |
| Poměr tlumení materiálu | | Neuvedeno |

Obr. 6-59 Vlastnosti materiálu MS1 založeného v programu Solidworks

Díky tomu, že pro potřeby topologické optimalizace bylo nutné kompletně předělat model nástroje, mohly být do návrhu zapracovány aktuální myšlenky a nedostatky, které vzešly z dosavadního testování dvou předešlých variant nástrojů. Jedním z hlavních zjištění byl optimální úhel λ s. Bylo zjištěno, že optimální úhel λ s se pohybuje mezi 50° - 70°, s ohledem na posuv nástroje. Při návrhu nového modelu byl tedy definován nový úhel uložení VBD vzhledem k ose nástroje a to 60°, tento úhel je střední hodnotou ideálního rozmezí a hlavní přínos spočívá v rozložení sil při využití 3břitého nebo 6břitého nástroje. Výslednice sil působících na VBD se lépe rozkládá do těla nástroje, přičemž síla vznikající od posuvu nástroje směřuje přímo do osy nástroje, jak je vidět na obrázcích níže. Horní obrázek popisuje stávající stav a spodní ukazuje návrh 3břitého nástroje s úhlem uložení VBD vůči ose 60°.

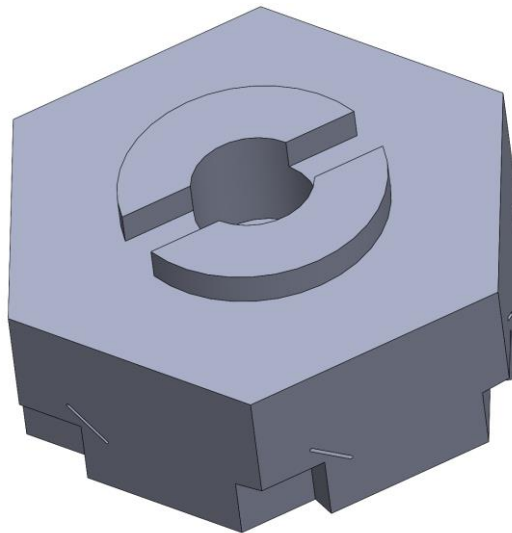


Obr. 6-60 Porovnání zatížení VBD v řezu u QCA 2.0 a prototypu QCA TO

Vzhledem k novému návrhu nástroje bylo možné změnit kromě polohy VBD i rozměr upínacího průměru pro upínací trn HSK – A63. Z původních rozměrů pro upínací trn o průměru 27 mm byl rozměr zmenšen na upínací průměr 22 mm. Díky tomu vznikl v nástroji větší prostor pro chladicí kanálky a ovládací členy. Spolu s myšlenkou využít nastavení VBD vůči ose nástroje pod 60° bylo možné nástroj navrhnout se 6 břity. Díky tomu je možné zdvojnásobit jeho efektivitu při soustružení a využít vyšších posuvů při frézování. Při využití VBD typu S, které mají 4 řezné hrany, a v závislosti na hloubce řezu ap a úhlu břitu λs je možné na jedné řezné hraně využít až 3 řezné části. Při osazení 6 VBD je tedy k dispozici 72 nových řezných hran bez nutnosti výměny VBD za nové a 18 řezných hran bez nutnosti jakkoli zasahovat do nástroje a otáčet VBD. To je možné díky pouhému pootočení nástroje na novou VBD v kombinaci s posunem v ose Y ve stoji.

Jak již bylo zmíněno, prototyp nástroje byl optimalizován přímo v prostředí Solidworks Simulation. Pro prvotní výpočty a tvorbu prototypu byl tento postup ideální, jelikož nebylo po každé úpravě základního modelu nutné model exportovat do jiného softwaru. V rámci topologie bylo nutné postupně popsat a nastavit všechny okrajové podmínky tak, aby byla výsledná optimalizace úspěšná.

Prvním krokem bylo vytvořit nový model včetně návrhového prostoru (design space), ve kterém následně probíhá topologická optimalizace. Tento prostor určuje maximální přípustnou velikost výsledné součásti. Topologická studie zohledňuje síly, zatížení a uchycení modelu v rámci tohoto prostoru a hledá nové optimální rozložení materiálu s ohledem na požadované mechanické vlastnosti a výrobní požadavky. Níže je zobrazen návrhový prostor pro výpočet prototypu nástroje.

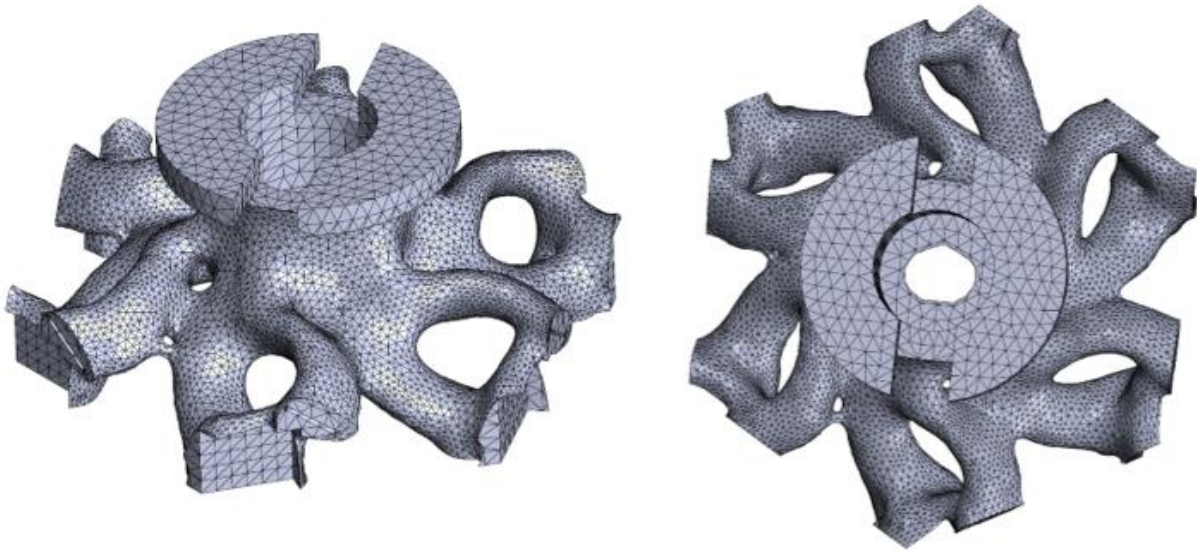


Obr. 6-61 Desing space prototypu nástroje QCA TO

Po zvolení materiálu a stanovení návrhového prostoru je důležitým krokem výběr cíle optimalizace. Solidworks Simulation nabízí tři základní cíle a omezení: nejlepší poměr tuhosti a hmotnosti, minimalizovat hmotu a minimalizovat maximální posunutí. Jelikož je nástroj dynamicky namáhaná součást, byl jako cíl výpočtu zvolen: nejlepší poměr tuhosti a hmotnosti. V dalším kroku byly stanoveny omezení a zachovalé oblasti týkající se modelu. Jako omezení byla zvolena cílová hmotnost větší než 500 g, jelikož nižší hmotnost již pro obráběcí nástroj nemá žádný zásadní význam a výrazně by se zhoršila výsledná tuhost nástroje. Za zachovalé oblasti byly vybrány všechny funkční plochy a plochy kanálků. To znamená upínací plochy, plochy, kde dosedá VBD, upínací plocha pro šroub upínače a kompletní systém chladicích kanálků, přičemž byl využit tvar kanálků z nástroje QCA 2.0. Těmto plochám byla rovněž nastavena určitá tloušťka, která musí být zachována, nejčastěji 2-4 mm. Pro výpočet bylo pro nástroj uvažován dokonale pevné upnutí s upínačem, tak že upínací plochy byly nastavené jako dokonalé pevné spojení. Toto spojení bylo využito zejména pro zjednodušení náročnosti výpočtu.

Pro samotný výpočet bylo důležitým faktorem zjistit řezné síly vznikající při obrábění a získat podklady pro simulace. Při zjišťování sil jsem vycházel z již provedených experimentů na diplomové práci na Západočeské univerzitě, kterých jsem se osobně zúčastnil, a to diplomové práce Ing. Malého s názvem „*Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků I*“ [69] a diplomové práce Ing. Pekárka „*Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků II* „ [70]. V obou pracích byly provedeny experimenty, u kterých se měřily mimo jiné i řezné síly při obrábění žárového nástřiku NiCrBSi při obrábění lineární řeznou hranou. Výsledky a závěry z těchto prací v oblasti měření řezných sil odpovídají a ukazují trend velmi malých hodnot řezných sil při tomto způsobu obrábění. Hodnoty jednotlivých sil nedosahují ani 400 N, to je způsobeno především velmi malou hloubkou řezu do 0,2 mm. Při simulacích byla zatěžovací síla na nástroj zvolena 2000 N, což je 5x více než maximální naměřená síla při obrábění. Takto vysoká řezná síla je volena jako bezpečnostní faktor. Nástroj byl silou zatěžován na jednotlivá lůžka VBD vždy kolmo na dosedací plochu. Poslední možností práce s okrajovými podmínkami bylo řízení výroby. V rámci této možnosti byla nastavena symetrie nástroje vzhledem k ose Z a nastavení minimální tloušťky.

Na následujících obrázcích je již prototyp topologicky optimalizovaného nástroje QCA.



Obr. 6-62 Prototyp QCA TO

V rámci vývoje prototypu nástroje byly topologicky optimalizovány dvě varianty: varianta se 3 břity a varianta s 6 břity. Na obrázku Obr. 6-63 jsou zobrazeny obě varianty po vytisknutí na 3D tiskárně z plastu. Nakonec však bylo od 3břitého nástroje upuštěno a vývoj pokračoval pouze u 6břitého, jenž nabízí možnosti větší efektivity při obrábění.

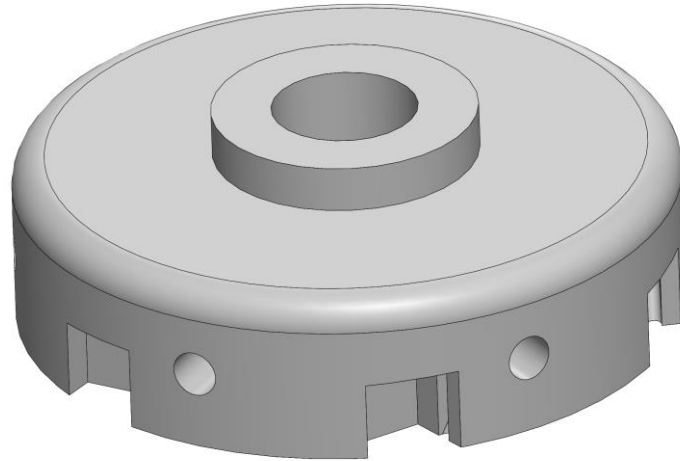


Obr. 6-63 Vytisknutý prototyp ve verzi 3břitého i 6břitého nástroje

Nakonec se ale Solidworks Simulation ukázal jako nedostatečný, neboť neumožňuje pokročilejší funkce ve výpočtu, jako například omezení generování materiálu pod úhlem 45° s ohledem na tisknutelnost finálního modelu, nebo určení směru osy, ve které bude nástroj tisknut. Rovněž neumožňuje Solidworks nastavovat podíl finálního rozložení materiálu mezi jednu velkou masu materiálu nebo materiál rozložit do více prutů a ramen při zachování rozložení napětí. S ohledem na tyto nedostatky byly další fáze návrhu řešeny ve spolupráci s laboratoří virtuálního prototypingu (VIP).

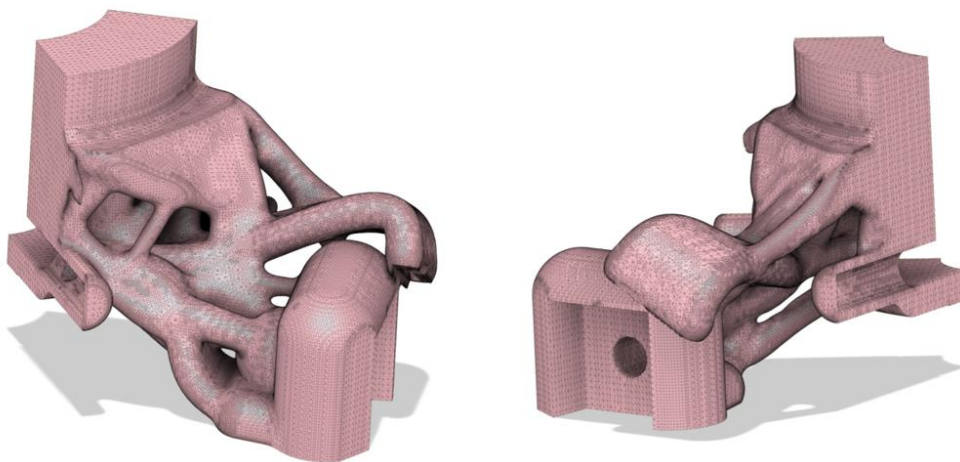
6.6.QCA TO 1.0

Při návrhu nástroje ve spolupráci s laboratoří VIP došlo k úpravě návrhového prostoru (desing space) modelu s cílem co nejvíce zjednodušit model tak, aby výsledné zasíťování modelu (Mesh) obsahovalo co nejméně rádiusů ostrých hran a sražení. Se všemi těmito prvky roste náročnost výsledné sítě a tím i náročnost výpočtu.

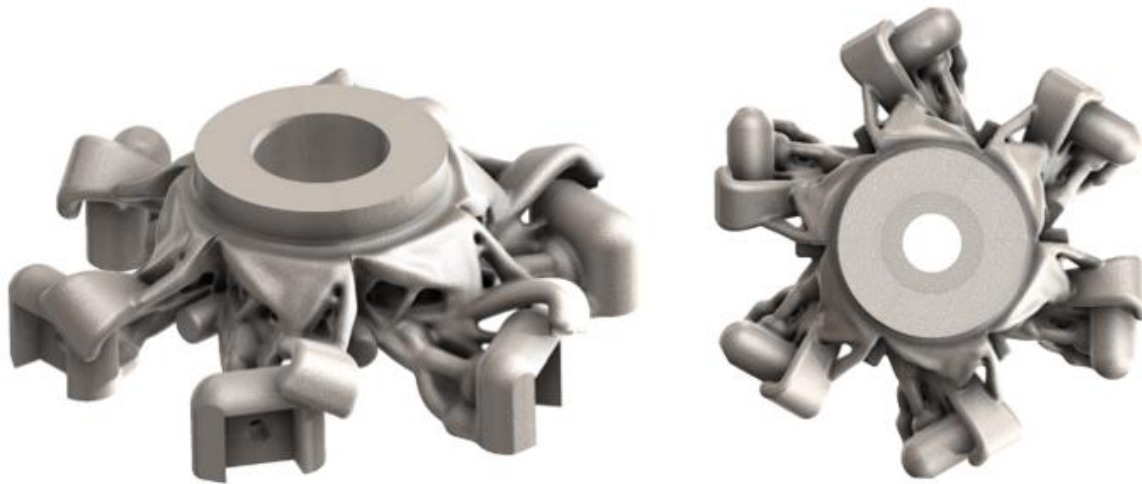


Obr. 6-64 Desing space pro výpočet nástroje QCA TO 1.0

Vzhledem k tomu, že se jedná o rotačně symetrický nástroj se šesti břity, byl pro zjednodušení výpočtu model rozdělen na jednotlivé segmenty. Tento segment byl poté počítán samostatně, ale s ohledem na ostatní segmenty a nástroje jako celku. Po výpočtu byl segment následně rozkopírován do výsledného optimalizovaného nástroje. Pro zjednodušení byla dále odstraněna drážka pro unášecí kameny upínače, díky tomu mohl být nástroj dokonale symetrický.

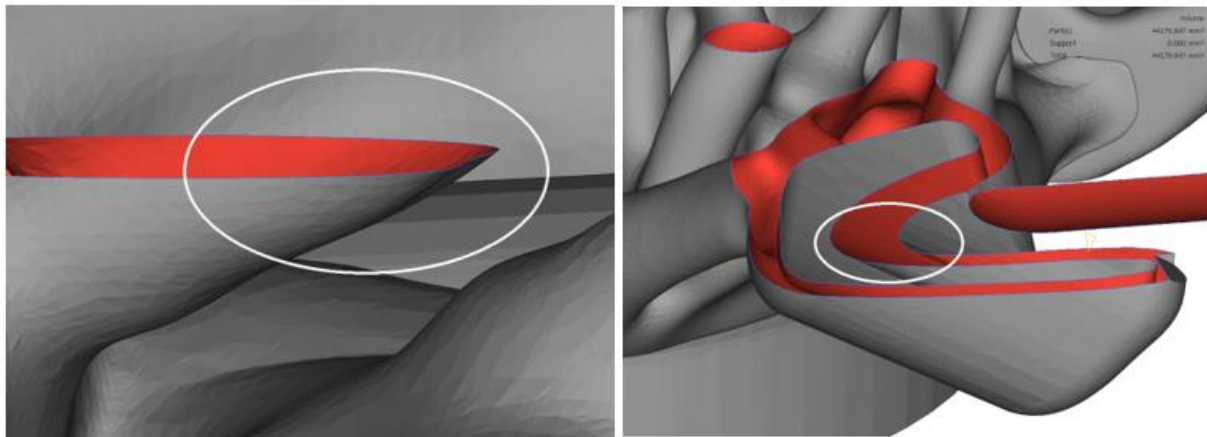


Obr. 6-65 Segment nástroje po TO

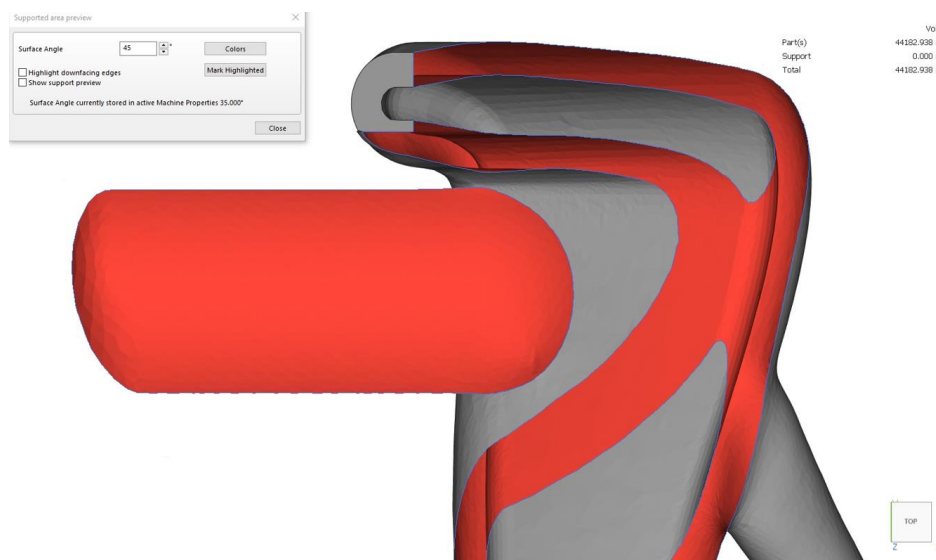


Obr. 6-66 Topologicky optimalizovaný nástroj QCA TO 1.0

Výsledek topologické optimalizace byl následně analyzován a diskutován s laboratoří aditivní výroby s ohledem na tisknutelnost navrženého nástroje. Jelikož se jednalo o úplně nový nástroj, byla rovněž zvolena jiná pozice při tisku včetně podpor a přídavek pro následné obrobení funkčních ploch. Na základě toho se rovněž vyskytly nové problémy, které při tisku předchozích variant nástroje nebyly podstatné. Nebo problémy vznikly až u optimalizovaného nástroje. Problémy spojené s tisknutelností optimalizovaného nástroje nebylo možné objevit dříve než po samotné optimalizaci a kontrole modelu ve spolupráci s laboratoří aditivní výroby. Níže jsou zobrazeny 3 nejvíce problematická místa s ohledem na 3D tisk. U problémového místa 1 „roste“ materiál pod menším úhlem než 45° a s ohledem na okolní materiál není možné využít podpory. Možností by bylo vytvořit pevné podpory, které nepůjdou odstranit a v nástroji by zůstaly. Jelikož se jedná o místo, které nemá žádný vliv na funkci nástroje, tak by bylo možné tam podpory zanechat. Druhý problém se již týká chladicího kanálku, jelikož se optimalizovaný nástroj tiskne otočený o 180° oproti předchozím variantám (při tisku lůžky dolů by hrozilo vzhledem k menšímu množství materiálu okolo a vzhledem k postupnému chladnutí při a po tisku by mohlo dojít ke „zkroucení“ nástroje – z toho důvodu jsou lůžka tisknuta až jako poslední a tím se eliminuje tepelná dilatace při tisku). Otočené kanálky při tisku však svým tvarem způsobují problém, kdy při tisku kanálků jeden z kanálků roste vždy přímo proti recoateru (mechanismus, který nanáší prášek při tisku). Zároveň je kanálek v místě růstu plochý a hrozilo by zborcení kanálku díky tomu, že kanálek není samonosný. Třetím problémem je poté lůžko pro VBD nad kanálkem. Jelikož lůžko roste při tisku přímo na kanálkem, není možné u něho udělat podpory tak, aby se neovlivnily či přímo neucpaly chladicí kanálky. Rovněž by případné podpory poté nešly odstranit.



Obr. 6-67 Problematické místo 1 a 2 s ohledem na 3D tisk



Obr. 6-68 Problematické místo 3 s ohledem na 3D tisk

Dalším zásadním problémem bylo sestavení výsledného modelu ze šesti jednotlivých segmentů. Díky tomu vznikly v nástroji dvojité stěny procházející vnitřkem nástroje jako pozůstatek spojení dvou sousedních stěn jednotlivých segmentů. Díky těmto stěnám nebylo možné nástroj vytisknout tak, aby nenarušovaly průběh tisku a jeho celistvost. Odstranění těchto stěn by bylo však velmi náročné a následná úprava modelu by narušila výsledky z topologické optimalizace.

Z důvodů možných problémů při 3D tisku bylo rozhodnuto o vytvoření nového aktualizovaného modelu a provedení nové topologické optimalizace.

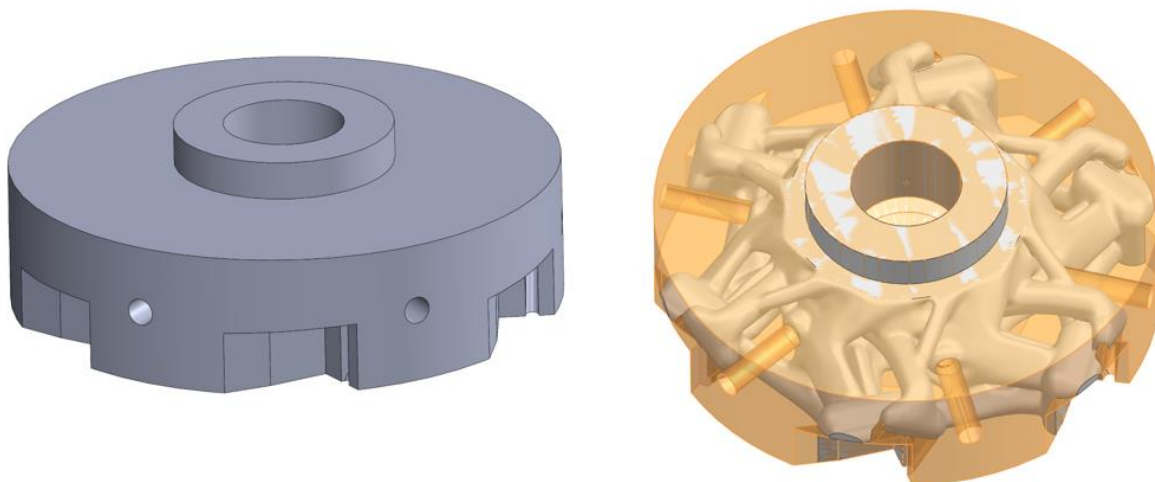
6.7.QCA TO 2.0

Zásadní při modelování nové varianty nástroje bylo změnit tvar a průběh chladicích kanálků, zejména toho směřujícího na čelo VBD tak, aby byl průběh kanálku ve tvaru „slzy“ s ohledem na směr tisku. Díky tomu je kanálek při tisku samonosný a nehrozí jeho zborcení. Samotný výstup kanálku zůstal zachován tak, aby bylo zajištěno co nejlepší proudění a rovnoměrný výstup kapaliny z kanálku. Na Obr. 6-69 je zobrazen upravený kanálek s kapkovitým průřezem kanálku směřujícího na čelo VBD.



Obr. 6-69 Upravený chladicí kanálek

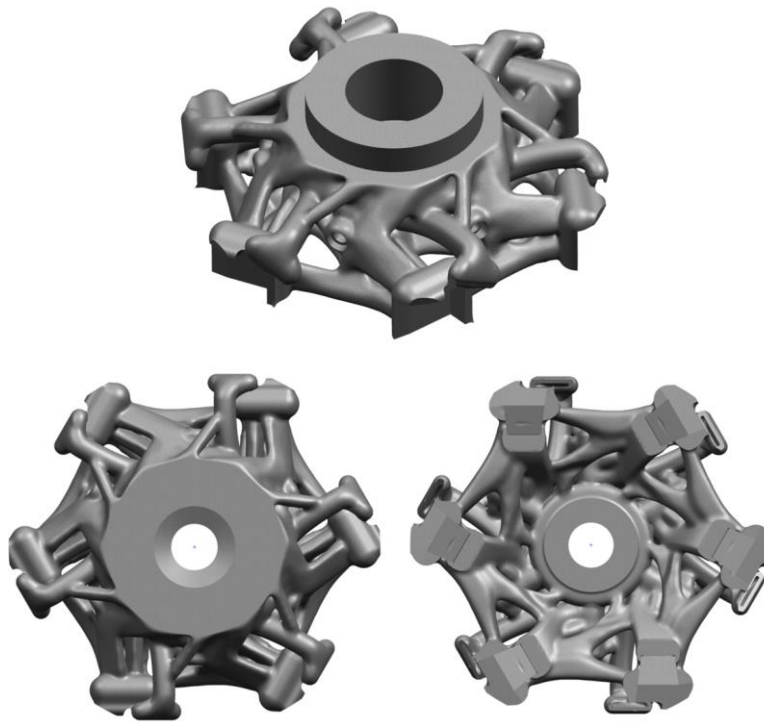
Kromě tvaru kanálku byl ještě návrhový prostor upraven v oblasti lůžka VBD. Z původního uzavřeného lůžka byla odstraněna jedna stěna, a to z důvodu následného snazšího obrábění na požadovaný rozměr a také pro možnost obrábět s VBD i s přilehlým ostrím a snadnějšího ustavení VBD.



Obr. 6-70 Desing space pro výpočet nástroje QCA TO 2.0 s výsledkem TO

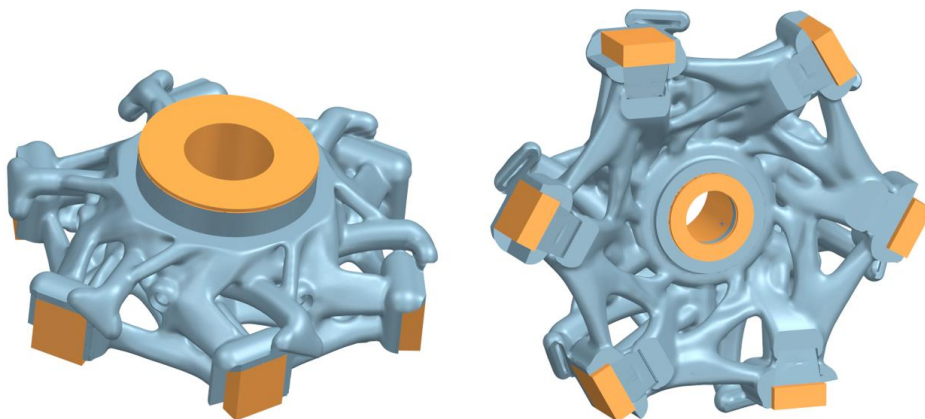
U samotné topologické optimalizace bylo zásadní změnou nastavení omezení výroby, kdy byla určena osa a směr tisku a také zvolena možnost optimalizovat nástroj s možností tvoření konstrukce pomocí samopodporování do úhlu 45° . Díky tomu při tisku odpadne nutnost složitého a mnohdy nemožného podporování nástroje. Především díky této možnosti nastavení optimalizace bylo upuštěno od předchozího optimalizování v programu Solidworks Simulation

a byl využit program Siemens NX frustum. Díky využití tohoto programu bylo možné lépe kontrolovat a nastavovat okrajové podmínky spojené s procesem 3D tisku. Následující obrázky zobrazují výsledky topologické optimalizace.



Obr. 6-71 Topologicky optimalizovaný nástroj QCA TO 2.0

Po topologické optimalizaci bylo nutné nástroj upravit pro 3D tisk včetně přidavků na obrábění tak, jako předchozí vyrobené varianty QCA1.0 a QCA2.0. Byly přidány přidavky na lůžka VBD, které rovněž slouží k ustavení nástroje do přípravku při obrábění. Dále byly přidány přidavky na upínací průměr a dosedací čelní plochu včetně místa, kde budou vyfrézovány drážky pro kameny na frézovacím trnu. A poslední přídavek na obrábění je poté plocha, na kterou dosedá upínací šroub, který upíná nástroj do upínače. Přidávky jsou znázorněny oranžovou barvou na následujícím obrázku. Takto upravený model byl vyexportován ve formátu stl a vtištěn na k 3D tiskárně.



Obr. 6-72 QCA TO 2.0 upravený pro 3D tisk

Obr. 6-73 ukazuje nástroj na tiskové platformě včetně podpor po vytištění. Veškeré podpory byly mechanicky odstraněny při postprocessingu.



Obr. 6-73 QCA TO 2.0 po vytištění s podporami

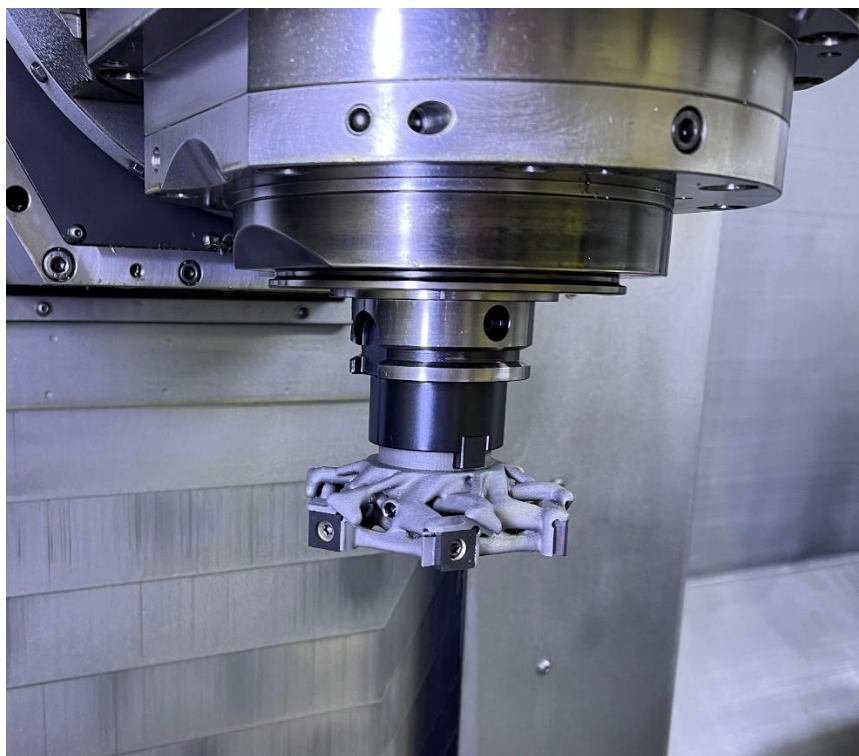


Obr. 6-74 Vytištěný nástroj QCA TO 2.0

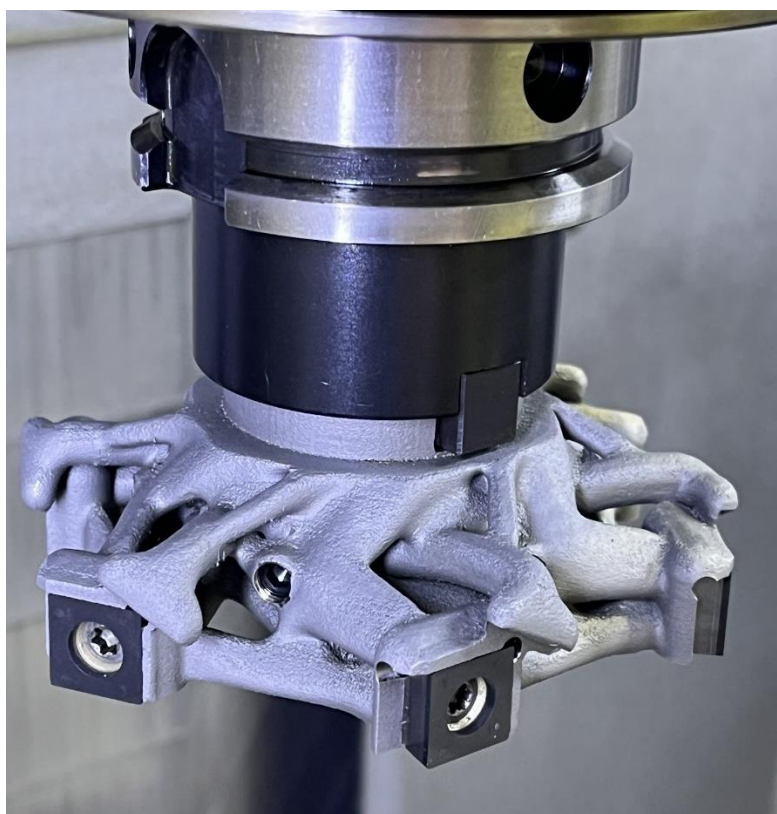
Vyrobený nástroj byl do této fáze pouze obroben a připraven na experimenty. Avšak je v plánu s nástrojem provést celou řadu testů a ověřit jeho funkčnost i v reálných podmínkách, a ne pouze pomocí FEM analýz, jak je popsáno v následující kapitole.



Obr. 6-75 Obrobený a osazený nástroj QCA TO 2.0



Obr. 6-76 QCA TO 2.0 upnutý ve stroji



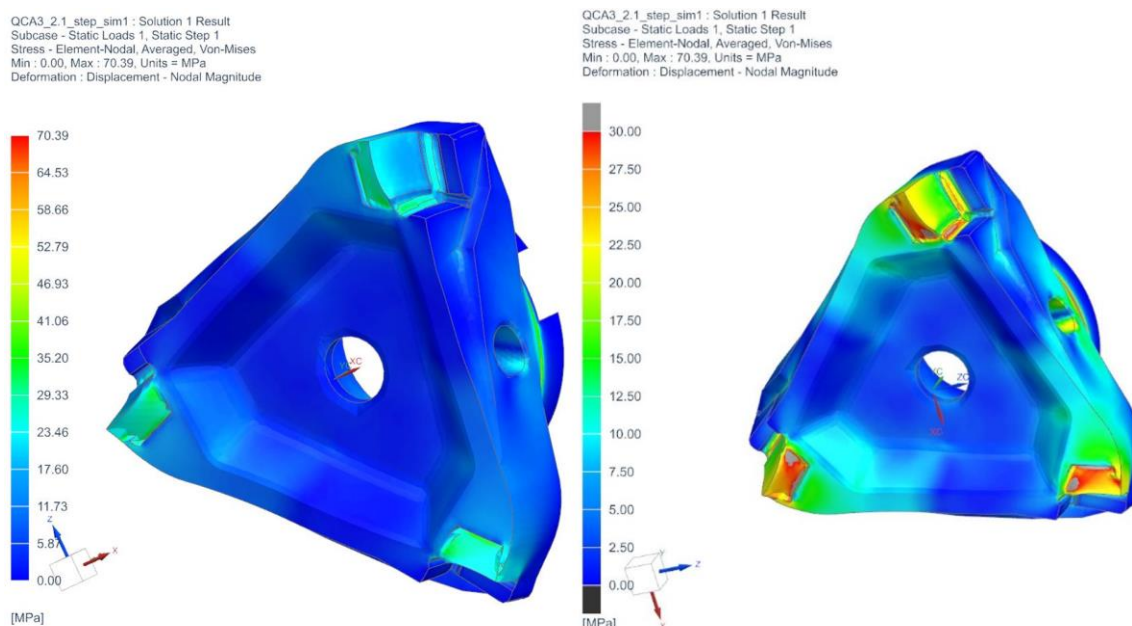
Obr. 6-77 Detailní pohled na nástroj

6.8. Ověření a FEM analýzy

V rámci ověření byla provedena FEM analýza ke zjištění maximálního napětí a deformace. Analýza byla provedena u QCA 2.0 a QCA TO 2.0 a výsledky porovnány. Hlavním cílem bylo ověřit rozložení napětí u QCA TO 2.0 a dokázat, že napětí je rovnoměrně rozloženo v nástroji a nedochází ke koncentraci napětí. A navržený nástroj odolá zatížení vznikající od řezných sil působících při obrábění. Výpočty a simulace byly prováděny, stejně jako topologická optimalizace, v programu Siemens NX. Nástroj byl zatížen výslednou silou 2000 N na každé lůžko VBD. Tato síla několikanásobně převyšuje síly zjištěné při předchozích experimentech s obráběním lineární řeznou hranou, kde řezná síla dosahovala rozmezí 300-400 N. Nízká řezná síla je způsobena zejména způsobem obrábění, kde dochází k odebrání velmi malé tloušťky. Zatěžující síla je tedy 5x větší než síly reálně působící na nástroj, tím je zajištěna dostatečná bezpečnost při výpočtu nástroje. Pro výpočet bylo pro nástroj uvažováno dokonale pevné upnutí s upínačem tak, že upínací plochy byly nastavené jako dokonalé pevné spojení. Toto spojení bylo využito zejména pro zjednodušení náročnosti výpočtu. Ze simulace vzešly dvě hlavní řešení: rozložení napětí a deformace nástroje.

6.8.1. Napětí

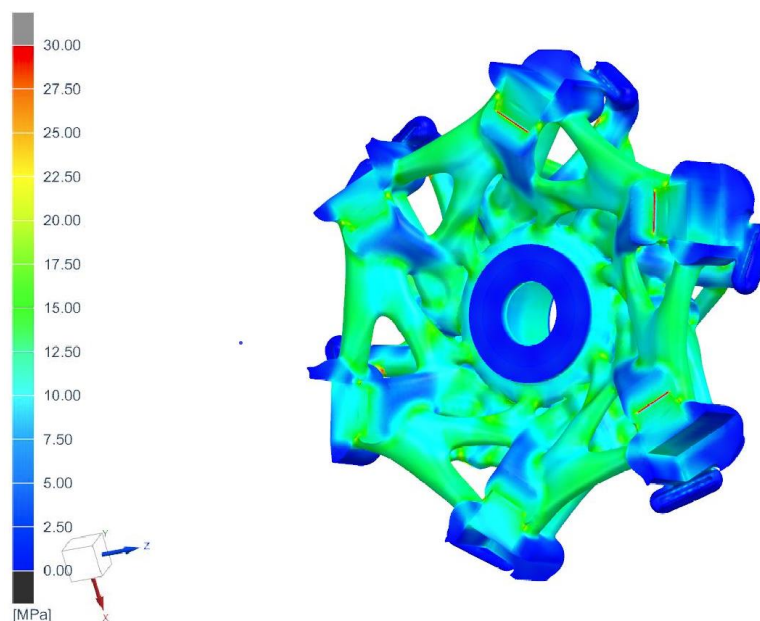
Na obrázku Obr. 6-78 je zobrazeno napětí v nástroji QCA 2.0. Z obrázku vlevo je patrné maximální dosažené napětí 70 MPa, toto napětí se soustřeďuje hlavně v oblasti lůžek VBD. Ve zbylé části nástroje již je napětí téměř nulové.



Obr. 6-78 FEM analýza QCA 2.0 - rozložení napětí

Na Obr. 6-79 je rozložení napětí topologicky optimalizovaného nástroje QCA TO 2.0, u tohoto nástroje již dosahuje hodnota maximálního napětí pouze poloviční velikost 30 MPa. To je způsobeno zejména vhodným natočením VBD vůči ose nástroje, kdy řezné síly a tlak, který díky nim vzniká na dosedací plochu lůžka, směřuje více do osy nástroje. Dalším důležitým vlivem byla omezující podmínka při topologické optimalizaci, kde byly nastaveny upínací plochy, za které je nástroj upínán a které mají zůstat zachovány. A samotný vliv

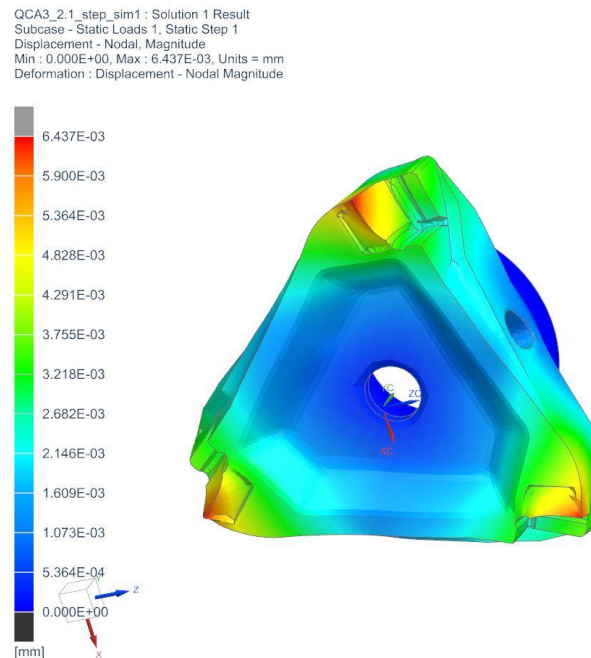
samopodporování při výpočtu nástroje s ohledem na 3D tisk. Díky těmto okrajovým podmínkám je topologicky optimalizovaný nástroj schopný přenášet zaměřující síly přímo do osy nástroje a z něho poté přímo do upínače a vřetene stroje rovnoběžně s osou vřetene a dochází tak k minimálnímu ovlivnění od pasivních, posuvových a řezných sil, jelikož veškeré síly jsou soustředěny pomocí struktury těla nástroje do jeho osy. Tuto myšlenku potvrzuje i výsledek FEM analýzy QCA TO 2.0, ze které je zřejmé, že napětí je rovnoměrně rozloženo po celém těle nástroje a nejmenší hodnoty napětí jsou v upínací části v oblasti lůžek VBD, což je přesný opak než u neoptimalizované varianty QCA 2.0. Pro lepší porovnání výsledků je u Obr. 6-78 v pravé části zobrazen a omezen rozsah napětí 0-30 MPa tak, aby rozsah odpovídal maximálnímu napětí u optimalizovaného nástroje. V porovnání těchto dvou výsledků je pak jasně patrný rozdíl u koncentrace napětí v oblasti lůžka VBD u původního nástroje, kde síly působí mimo střed a osu optimalizovaného nástroje.



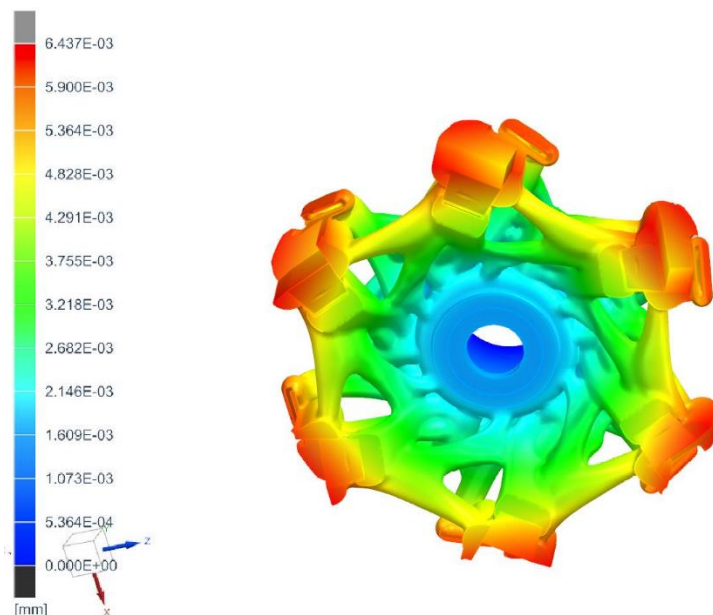
Obr. 6-79 FEM analýza QCA TO 2.0 - rozložení napětí

6.8.2. Deformace

U hodnot deformace již nedochází k zásadním rozdílům z hlediska absolutní hodnoty deformace (max 0,006 mm). Je zřejmé, že u nástroje QCA 2.0 je deformováno nejvíce lůžko na krajním bodě nástroje a může tak docházet k deformaci upnuté VBD při obrábění a tím k možnému vzniku napjatosti v upnutí, což může mít za následek prasknutí VBD. Oproti tomu u optimalizovaného nástroje jsou lůžka deformována po celé délce rovnoměrně a deformace se rovnoměrně zmenšuje směrem ke středu nástroje. Díky tomu není na VBD vytvářen takový napěťový stav, aby došlo k jejímu prasknutí pouze vlivem přepětí od deformace.



Obr. 6-80 FEM analýza QCA 2.0 - deformace

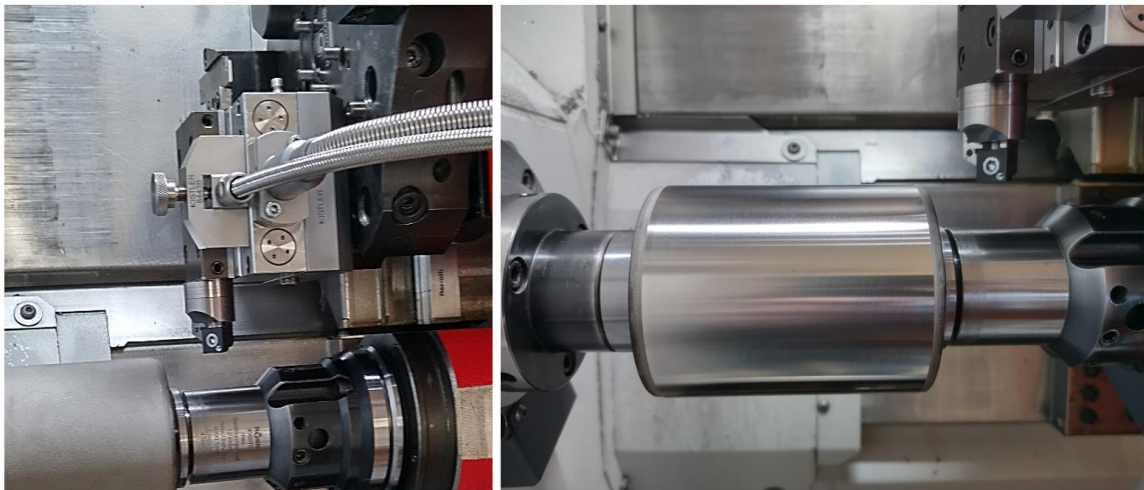


Obr. 6-81 FEM analýza QCA TO 2.0 - deformace

7. Implementace technologie obrábění lineární řeznou hranou

Na základě myšlenky obrábění žárových nástřiků lineární řeznou hranou a znalostí získaných při konstrukci speciálního nástroje pro využití soustružení a frézování žárových nástřiků vznikl na Západočeské univerzitě nástroj, který byl využit v rámci experimentů, ať už pro diplomové práce Ing. Malého, Ing. Pekárka a Ing. Mezuliánika, nebo do výzkumných zpráv projektů, které se touto problematikou zabývaly v rámci širšího výzkumného týmu RTI pod vedením doc. Řehoře. Většiny těchto experimentů jsem se osobně zúčastnil a pomáhal s vyhodnocením nebo byl konzultantem u diplomových prací.

Základní myšlenky, které vzešly z dosavadního vývoje, byly zachovány i pro tento nástroj. Jedná se především o využití čtvercové VBD a možnosti využití celé délky řezné hrany, specifické chlazení na čelo a hřbet nástroje a možnost nastavení úhlu sklonu ostří λ_s . Nástroj je však koncipován jako jednobřítý k využití výhradně na soustruhu. Z toho důvodu má upínací část o kvadrátu 12x12 mm tak, aby bylo možné ho upnout soustruhu EMCO Maxxturn 25. Na tomto soustruhu byly prováděny veškeré experimenty s tímto nástrojem, protože je možné na něm při obrábění měřit řezné síly, vibrace a akustickou emisi. To bylo důležité vzhledem k vyhodnocení experimentů a bližšímu pochopení samotného procesu obrábění lineární řeznou hranou.



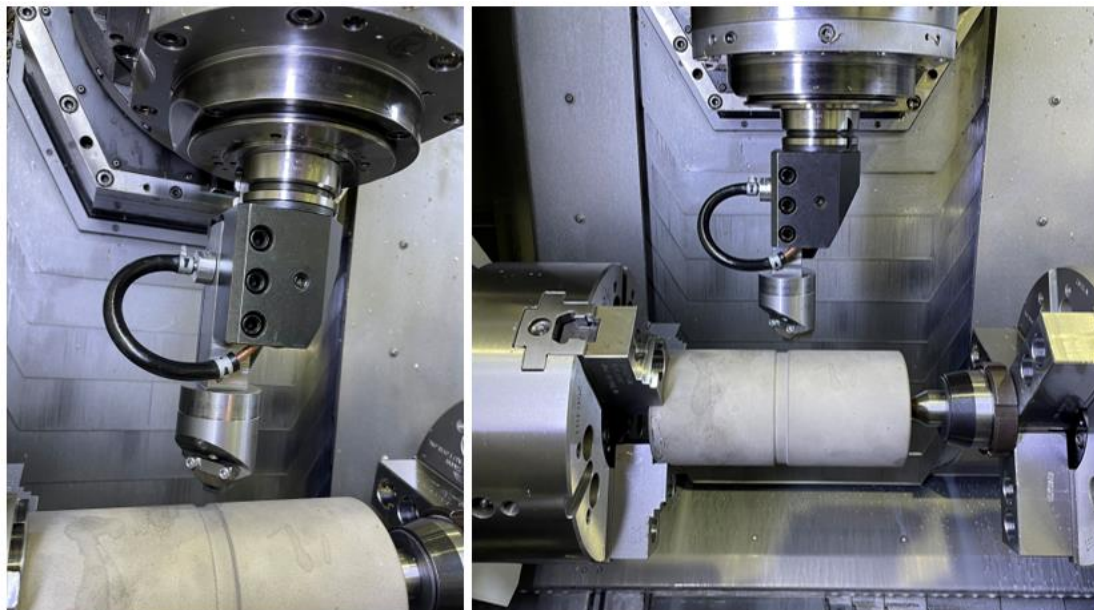
Obr. 7-1 Využití modifikovaného nástroje pro experimenty na RTI

Výstupy z těchto experimentů popisují více zmíněné diplomové práce „*Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků I*“ [69], „*Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků II*“ [70], „*Vliv technologie HVOF žárového stříkání NiCrBSi na jeho obrobitelnost*“ [71].

Další implementace technologie obrábění lineární řeznou hranou byla úspěšně aplikována společností Plasmametal. Hlavním omezením byla možnost nástroj využít na konvenčním soustruhu, jelikož firma Plasmametal standardně využívá tyto stroje pro obrábění velkých dílů, jako například při renovaci hřídelů pro vlakové podvozky. Z tohoto důvodu byl modifikován předchozí nástroj a uzpůsoben konkrétním požadavkům ze strany společnosti. Tento nástroj

obsahuje veškeré prvky a myšlenky jako předchozí nástroj. Pouze je uzpůsoben pro nasazení na větších strojích.

Nástroj pro implementaci byl nejprve testován na RTI ZČU a posléze byl nasazen při testech ve firmě Plasmametal.

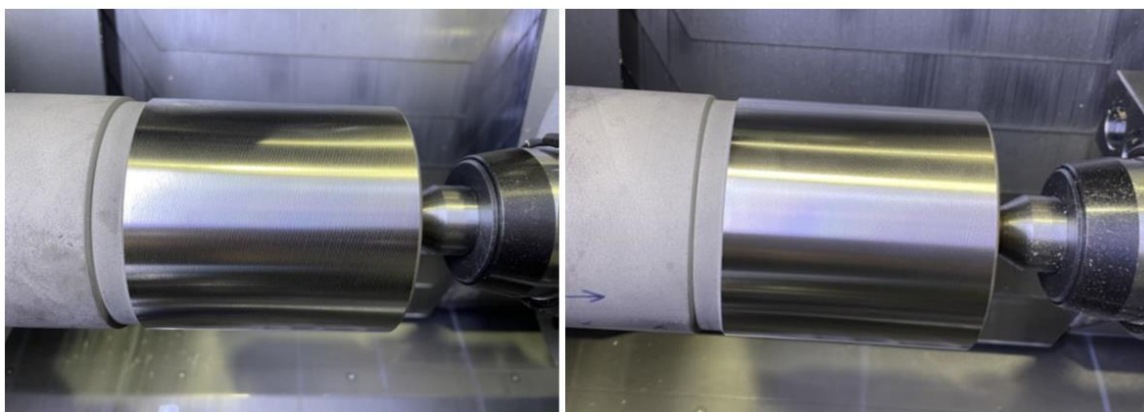


Obr. 7-2 Testování implementace speciálního nástroje na RTI ZČU

Pro testování byly zvoleny parametry a podmínky takové, které odpovídají možnostem a vybavení firmy Plasmametal, kde měl být následně nástroj rovněž testován. V rámci testování bylo testováno více břitových destiček a podmínek. Pro názornost zde uvádím pouze hrubovací a dokončovací řez s VBD od firmy Bonar, CBN s fazetkou 0,2mm a úhlem 20°. Úhel sklonu ostří byl nastaven na 50°. Testy byly provedeny na stejných polotovarech jako testy soustružení s nástrojem QCA 2.0.

| | Vc [m/min] | f [mm/ot] | ap [mm] |
|--------------------------|------------|-----------|---------|
| Podmínky pro hrubování | 200 | 0,4 | 0,1 |
| Podmínky pro dokončování | 160 | 0,2 | 0,05 |

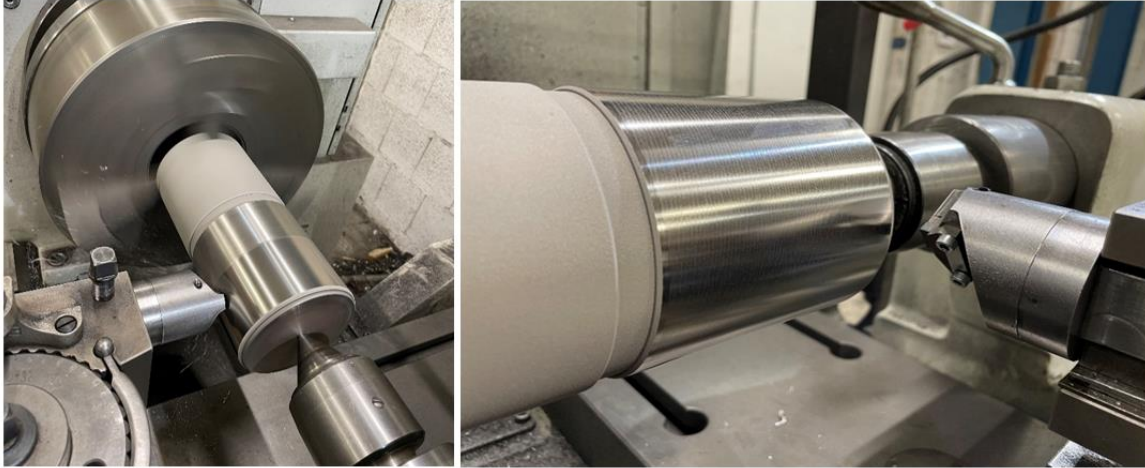
Tab. 7-1 Řezné podmínky pro testování implementace nástroje



Obr. 7-3 Výsledný povrch po hrubování (vlevo) a po dokončení (vpravo)

Hodnoty drsností získaných po obrábění dosahovaly průměrných hodnot u hrubování $Ra=0,24 \mu\text{m}$; $Rz=3,2 \mu\text{m}$ a u dokončení $Ra=0,21 \mu\text{m}$; $Rz=1,5 \mu\text{m}$. Výsledná hodnota válcovitosti nepřesáhla $0,01 \text{ mm}$.

Nový nástroj tak ověřil funkčnost této technologie a mohlo se přejít k implementaci ve firmě Plasmametal. Ta proběhla za stejných řezných podmínek a na stejném rozměru polotovaru jako na univerzitě.



Obr. 7-4 Průběh implementace speciálního nástroje ve firmě Plasmametal

Vzorky byly následně převezeny zpět na univerzitu a změřeny v metrologické laboratoři. Hodnoty drsností získaných po obrábění dosahovaly průměrných hodnot u hrubování $Ra=0,4 \mu\text{m}$; $Rz=2,7 \mu\text{m}$ a u dokončení $Ra=0,22 \mu\text{m}$; $Rz=1,4 \mu\text{m}$. Kruhovitost dosahovala průměrných hodnot $3 \mu\text{m}$ a válcovitost $10 \mu\text{m}$.

V rámci experimentů bylo ověřeno, že tato technologie je vhodná i pro využití na konvenčních soustružích, a i s omezenými možnostmi řezných podmínek je možné dosáhnout velmi kvalitního povrchu.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že technologie obrábění s lineární řeznou hranou má obrovský potenciál a lze ji aplikovat a implementovat na různé typy obráběcích strojů dle potřeby.

8. Diskuse výsledků

V rámci praktické části práce byl vyvinut speciální nástroj na obrábění žárových nástříků s využitím lineární řezné hrany. Základní myšlenky využité při vývoji tohoto nástroje byly získány, jak v průběhu studia, tak díky řešeršní části v teoretické části a závěrům z ní získaných. Prvotním návrhem byl prototyp nástroje, který sloužil k ověření základních myšlenek spojených s konstrukcí aplikací lineární řezné hrany na vícebřítý nástroj. Na základě tohoto prototypu poté vznikl reálný nástroj QCA 1.0. S tímto nástrojem byla provedena celá řada experimentů, z nichž vzešlo několik výzkumných zpráv pro řešené projekty a článků na mezinárodní konferenci. Výstupem z tohoto nástroje byly rovněž dva užité vzory, dva české patenty a jeden evropský patent, založené na myšlence specifického postavení VBD tak, aby bylo umožněno obrábění lineární řeznou hranou a možnosti regulovat orientované chlazení na celou délku řezné hrany. Z výsledků v rámci experimentů byly rovněž získány optimální řezné podmínky a konkrétní VBD pro aplikaci technologie obrábění lineární řeznou hranou žárových nástříků (zejména pro nástřík NiCrBSi) s ohledem na požadované geometrické a rozměrové tolerance. V rámci experimentů byly ale zjištěny i některé nedostatky. Tyto nedostatky byly odstraněny u varianty nástroje QCA 2.0. Jednalo se především o optimalizaci tvaru a výstupu chladicích kanálků a regulaci chlazení a dále o úpravy spojené s 3D tiskem a výrobou. U tohoto nástroje pak byly experimenty a ověření zaměřeny především na technologii rotačního frézování. Po dílčích pre-experimentech byly v rámci experimentů nalezeny podmínky pro obrábění žárového nástříku Inconel 718 a pro lepší pochopení technologie byly tyto experimenty provedeny rovněž na 3D tištěném Inconelu 718. Výsledky z těchto experimentů dokazují, že navržený nástroj a technologie nejsou vhodné jen pro obrábění nástříků, ale fungují i při obrábění tištěných materiálů a mají potenciál fungovat stejně i u konvenčních materiálů, kde je potřeba odebrat velmi malé hloubky řezu do 0,15 mm. Výsledky z experimentů dosahují u obrobeného velmi nízkých hodnot drsnosti Ra a Rz. Geometrické tolerance kruhovitosti a válcovitosti jsou sice u technologie rotačního frézování vyšší, než u technologie soustružení nebo výchozí technologie broušení, avšak v řadě aplikací nemusejí být tyto tolerance hlavními hlídanými parametry výroby, a tak je i tato technologie velmi perspektivní a v řadě případů vhodná.

Po návrhu a konstrukci nástrojů vyvinutých konvenčním přístupem konstrukce byl navržen prototyp nástroje pomocí topologické optimalizace. Díky topologické optimalizaci mohl být nástroj vyvinut s cílem dosažení optimální tuhosti při požadovaném zatížení nástroje a rozložení napětí rovnoměrně po celém těle nástroje, bez slabých míst v podobě vysoké koncentrace napětí. Z výsledků a závěrů z doté doby provedených testů a experimentů bylo rovněž navrženo nové rozložení VBD pod úhlem 60° vůči ose nástroje. Díky tomu vznikla možnost navrhnout nástroj s více břity, čímž se ještě zvýšila jeho možná efektivita a díky postavení VBD vůči ose i tuhost nástroje, jelikož řezné síly působí více do osy nástroje. Dalším důležitým přínosem TO je možnost definovat okrajové podmínky tak, aby výsledné síly byly soustředěny zejména do osy nástroje a následně přes upínač do osy vřetene stroje, a tím se eliminoval vliv vibrací. Na základě prvotního prototypu TO nástroje vznikla první varianta QCA TO 1.0. U této varianty byly však zjištěny nedostatky s ohledem na výrobu pomocí aditivní technologie. Následovaly úpravy s cílem umožnit vytištění nástroje s co nejmenším množstvím podpor a využít možnosti optimalizace se samonosnou konstrukcí

s ohledem na 3D tisk. Důležitým parametrem byla rovněž úprava průběhu chladicího kanálku vzhledem k jinému rozložení materiálu u optimalizovaného nástroje než u původních variant. Výsledná úprava však nemá vliv na tvar výstupu kanálků a jsou tak zachovány výstupní parametry řezné kapaliny. V rámci optimalizace bylo přistoupeno i k porovnání varianty QCA 2.0 s optimalizovaným nástrojem QCA TO 2.0 pomocí FEM analýzy. FEM analýza potvrdila rovnoměrné napětí u optimalizovaného nástroje a ukázala více než dvojnásobné maximální napětí u konvenčně konstruovaného nástroje. U konvenčně konstruovaného nástroje bylo navíc toto napětí soustředěno do oblasti lůžka nástroje, které je jedno z hlavních funkčních částí nástroje. Na základě provedených FEM analýz byly rovněž potvrzeny obě výzkumné hypotézy stanovené v rámci cílů práce. Výsledky tak jen potvrdily myšlenky a přínos topologické optimalizace při vývoji tohoto speciálního nástroje.

Na základě myšlenek a znalostí získaných při vývoji a konstrukci těchto speciálních řezných nástrojů vznikly na Západočeské univerzitě rovněž modifikované nástroje pro konkrétní aplikace soustružení. Tyto nástroje využívají hlavní myšlenky z výše navržených nástrojů a aplikují je také na problematiku obrábění žárových nástřiků s využitím lineární řezné hrany. V kapitole Implementace technologie obrábění lineární řeznou hranou je pak názorně popsáno a zobrazeno, jak tyto nástroje fungují a umožňují tuto technologii aplikovat na různé stroje a nástroj s ohledem na různé potřeby a omezení. Výstupem této práce tak není pouze vyvinutý speciální nástroje pro možnost soustružit a frézovat žárové nástřiky lineární řeznou hranou a efektivně tak nahradit broušení. Ale jedním z dalších přínosů je i ověření, že tato technologie a její myšlenka má obrovský potenciál a lze ji aplikovat a implementovat na celou řadu obráběcích strojů a obrábět žárové nástřiky a těžkoobrobitelné materiály mnohem efektivněji.

9. Závěr

V práci jsem se zaměřil na problematiku obrábění žárových nástřiků, které jsou široce využívanými ochrannými povlaky s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Konvenční metody obrábění se často potýkají s výzvami spojenými s tvrdostí a odolností těchto povlaků, což zvyšuje nároky na nástroje a snižuje jejich životnost. V rámci této práce jsem hledal alternativní přístupy a metody, které by umožnily efektivní a přesné obrábění žárových nástřiků. Navrženým přístupem je využití nástroje s definovanou geometrií břitu, konkrétně lineární řezné hrany. Tato metoda prokazatelně přinesla zlepšení v produktivitě a přesnosti obrábění žárových nástřiků, s tím je spojena i optimalizace řezných podmínek, chlazení a využití speciálních řezných materiálů. Tyto faktory přispívají k lepším výsledkům při obrábění a prodlužují životnost nástrojů.

V rámci teoretické části byl hlavní výzkum zaměřen na problematiku obrábění žárových nástřiků a možnosti obrábění lineární řeznou hranou. Dalším krokem poté bylo využití aditivních technologií a topologické optimalizace při návrhu konstrukce nástrojů k dosažení efektivního rozložení materiálu, zvýšení tuhosti nástroje a optimalizovaného chlazení řezného břitu. Myšlenkou této problematiky bylo eliminovat nedostatky konvenčních metod obrábění a přinést významné zlepšení v oblasti obrábění žárových nástřiků. V rešeršní části jsem se dále zabýval stávajícím řešením v oblasti vývoje a konstrukce nástrojů pro obrábění žárových nástřiků pomocí lineární řezné hrany. Ze závěrů této části vyplývá, že aktuální nabízená řešení nástrojů nedokážou poskytnout optimální kombinaci vlastností a technických řešení pro tyto specifické materiály. Existuje však velký potenciál pro vývoj nových technologií a metod, které by mohly přinést významná zlepšení v oblasti obrábění těchto materiálů.

Z poznatků získaných v teoretické části práce vzešly závěry, které byly využity při následném vývoji nástroje pro obrábění s lineární řeznou hranou. Nástroj byl nejprve vyvíjen konvenční metodou konstrukce v několika variantách, přičemž byl postupně optimalizován na základě výsledků a závěrů z dílčích experimentů. Následoval vývoj topologicky optimalizovaného nástroje, který byl také vyvinut ve více variantách, zejména kvůli problémům, které by mohly nastat při výrobě nástroje. Zhotovené nástroje poté byly kromě již zmíněných experimentů také ověřeny pomocí FEM analýzy. Ta jen potvrdila myšlenku o rovnoměrném rozložení napětí u topologicky optimalizovaného nástroje oproti původně navrženému nástroji.

Na základě myšlenky využití lineární řezné hrany pro obrábění žárových nástřiků a ze znalostí získaných při vývoji speciálního nástroje vznikly dílčí implementace této technologie. Tyto implementace jen potvrdily funkčnost této technologie a její možnosti nasazené v širokém spektru aplikací. V rámci práce rovněž vznikly výstupy do projektů, závěrečné zprávy a články, kterých jsem spoluautorem. Na základě návrhu konstrukce vznikly také dva užité vzory, dva české patenty a jeden evropský patent, u kterých jsem rovněž spoluautorem.

Celkově lze konstatovat, že vývoj a optimalizace konstrukce nástrojů pro obrábění žárových nástřiků představuje významnou výzkumnou oblast. Výsledky této práce vedou k efektivnějšímu a přesnějšímu obrábění žárových nástřiků, snížení výrobních nákladů a prodloužení životnosti nástrojů. Další výzkum a experimentální ověření navržených přístupů a metod by mohly přinést další poznatky a přispět k rozvoji této oblasti.

10. Použitá literatura

- [1] ZATLOUKAL, T. *Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] HUMÁR, A. *Technologie obrábění - 1. část*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [3] HOUDKOVÁ, Š., PALA, Z., SMAZALOVÁ, E., VOSTŘÁK, M. a ČESÁNEK, Z. Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2017, **318**, 129-141. ISSN 0257-8972. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.012](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.012)
- [4] ZHANG, W. *Topology Optimization in Engineering Structure Design*. 2016. ISBN 9781785482243.
- [5] KOŽÍŠEK, M. a LORENC M. *Minikurz optimalizace* [online]. In: . [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www2.humusoft.cz/www/papers/comsol2018/optimalizace-v-cm.pdf>
- [6] MAREŠ, T. *Základy konstrukční optimalizace*. Praha: Vlastním nákladem, 2006. ISBN 80-239-6508-5.
- [7] PRANTNEROVÁ, M. *Hodnocení vztahu mikrostruktury a vlastností žárových nástřiků*. Plzeň, 2014. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] ZAHÁLKA, F. *Studium vlastností vybraných HP/HVOF povlaků*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] ČESÁNEK, Z. *Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí*. Plzeň, 2015. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [10] GLANC, A. *Studium žárově stříkaných povlaků pro otěruvzdorné aplikace*. Plzeň, 2021. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] MONKOVA, K., MONKA P., CESANEK, J., MATEJKA, J. a DUCHEK, J. Surface roughness evaluation after machining wear resistant hard coats. *MATEC Web of Conferences*. 2017, **137**, 03008. Dostupné z: [doi:10.1051/mateconf/201713703008](https://doi.org/10.1051/mateconf/201713703008)
- [12] ZATLOUKAL, T., M. GOMBAR, J. FULEMOVA, J. REHOR a M. POVOLNY. Optimization of the thermal spraying process depending on the surface roughness. In: *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. 2019, , s. 1026-1033. Dostupné z: [doi:10.2507/30th.daaam.proceedings.143](https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.143)

- [13] VALÍČEK, J., J. ŘEHOŘ, M. HARNIČÁROVÁ, M. GOMBÁR, M. KUŠNEROVÁ, J. FULEMOVÁ a A. VAGASKÁ. Investigation of surface roughness and predictive modelling of machining Stellite 6. *Materials*. 2019, **12**(16). Dostupné z: doi:10.3390/ma12162551
- [14] VALÍČEK, J., M. HARNIČÁROVÁ, J. ŘEHOŘ et al. Prediction of cutting parameters of HVOF-Sprayed Stellite 6. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020, **10**(7). Dostupné z: doi:10.3390/app10072524
- [15] ŘEHOŘ, J., M. GOMBÁR, M. HARNIČÁROVÁ, M. KUŠNEROVÁ, Š. HOUDKOVÁ-ŠIMŮNKOVÁ, J. VALÍČEK, J. FULEMOVÁ a A. VAGASKÁ. Investigation of machining of Stellite 6 alloy deposited on steel substrate. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, **121**(1-2), 889-901. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-022-09380-0
- [16] VALÍČEK, J., M. HARNIČÁROVÁ, J. ŘEHOŘ et al. Thermodynamics and mechanics of thermal spraying of steel on 10060 substrate with niCrBSi alloy after milling. *Materials*. 2020, **13**(23), 1-21. Dostupné z: doi:10.3390/ma13235344
- [17] VALÍČEK, J., M. HARNIČÁROVÁ, J. ŘEHOŘ et al. Milling of complex surfaces of EN 10060 steel after HVOF sprayed NiCrBSi coatings. *Coatings*. 2020, **10**(8). Dostupné z: doi:10.3390/COATINGS10080744
- [18] VASILKO, K. *Teória a prax trieskového obrábania*. Košice: Fakulta výrobných technológií v Košiciach, 2009. ISBN 9788055301523.
- [19] ZHANG, P., LIU, Z., DU, J., SU, G., ZHANG, J. a XU, CH. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: A review: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, **53**, 123-143. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.013
- [20] Sandvik.coromant.com. In: *Sandvik.coromant.com* [online]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/default.aspx
- [21] MONKA, P., MONKOVA, K., BALARA, M., HLOCH, S., REHOR, J., ANDREJ, A. 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*. 2016, **85**(9), 2325-2343. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8065-3
- [22] VASILKO, K. Highly Productive Tools For Turning And Milling. *Technological Engineering*. 2015, **12**. Dostupné z: doi:10.1515/teen-2015-0009
- [23] VASILKO, K. Integrated tool for high-feed turning. *Manufacturing Technology*. 2019, **19**(5), 880-885. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/367.2019/a/1213-2489/MT/19/5/880
- [24] MONKA, P. *Machining with Linear Cutting Edge*. In: . Vienna: Springer Vienna, 1996, s. 777-784. ISBN 978-3-7091-2678-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7091-2678-3_94

- [25] FILIPPOV, A. V. Cut-layer cross section in oblique turning. *Russian Engineering Research*. 2014, **34**(11), 718-721. ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X14110070
- [26] FILIPPOV, A. V. Cut-layer cross section in oblique turning by a single-edge tool with a curved front surface. *Russian Engineering Research*. 2015, **35**(5), 381-384. ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X15050123
- [27] FILIPPOV, A. V. Cut-layer cross section in oblique turning by a single-edge tool with a curved rear surface. *Russian Engineering Research*. 2015, **35**(5), 385-388. ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X15050135
- [28] FILIPPOV, A., E. FILIPPOVA a P. CHAZOV. Cutting-force components in turning by tools with no cutting tip. *Russian Engineering Research*. 2016, **36**(12), 1040-1043. ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X16120066
- [29] KOROVIN, G, A FILIPPOV, A PROSKOKOV a V GORBATENKO. Cutting Edge Geometry Effect on Plastic Deformation of Titanium Alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2016, **125**, 012012. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899x/125/1/012012
- [30] FILIPPOVA, E a A FILIPPOV. Experimental estimation of chip shrinkage under cup-tip cutting with straight and radius cutters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2015, **91**, 012061. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899x/91/1/012061
- [31] FILIPPOV, A.V., A.Y. NIKONOV, V.E. RUBTSOV, A.I. DMITRIEV a S.Yu. TARASOV. Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: Experiment and modeling: Experiment and modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, **246**, 224-234. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030
- [32] LIU, J. a MA, Y. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Software*. 2016, **100**, 161-175. ISSN 0965-9978. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.07.017
- [33] MEHDI, S., MEHDI, K., ALIREZA, J., TEIMOURI, J. a FATEMEH, A. Bionic Architecture, Forms and Constructions. *Research Journal of Recent Sciences*. An international peer reviewed journal, 2014, (3), 93-98. ISSN E-ISSN : 2277 - 2502.
- [34] NOWAK, A. a ROKICKI, W. Bionic forms in search of structural models in architecture. *MATEC Web of Conferences*. 2018, **174**, 03020. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/201817403020
- [35] MEGAHEH, N. A. Towards a bionic architecture in the context of sustainability. *Port-Said Engineering Research Journal*. Port Said University, Faculty of Engineering, 2012, **16**(2), 181-189. ISSN 1110-6603.

- [36] STEPANOV, A., PULI, H., ISLAM, M., SALMINEN, A. a NYRHILÄ, O. Comparison of Theoretical and Practical Studies of Energy Input in Laser Additive Manufacturing (LAM) Using Stainless Steel. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*. 2014, **28**. ISSN 0898-1507.
- [37] Direct Metal Sintering. In: *Www.custompartnet.com* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- [38] HAO, L., RAYMONT, D., YAN, CH., HUSSEIN, A. a YOUNG, P. Design and additive manufacturing of cellular lattice structures. In: *The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP)*. Taylor & Francis Group, Leiria. 2011, s. 249-254.
- [39] 3D tisk kovů. In: *Www.konstrukter.cz* [online]. 2017 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [40] Mikroprutová soustava. In: *Www.renishaw.cz* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://tech-labs.com/sites/default/files/H-5800-3134-01-A%20-20Brochure%20AM%20400_screen.pdf
- [41] HANZL, P. a ZETKOVÁ, I. Benefits of a New Approach to Designing Milling Cutter Using Metal Additive Manufacturing. *Manufacturing Technology*. 2019, **19**, 385-390. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/301.2019/a/1213-2489/MT/19/3/385
- [42] HANZL, P., ZETKOVÁ, I. a DAŇA, M. Uniaxial Tensile Load of Lattice Structures Produced by Metal Additive Manufacturing. *Manufacturing Technology*. 2019, **19**, 228-231. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/274.2019/a/1213-2489/MT/19/2/228
- [43] Odlehčená fréza CoroMill® 390. In: *Www.sandvik.coromant.com* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: www.sandvik.coromant.com
- [44] *Manufacturing tomorrow* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2018/05/komet-group-innovates-cutting-tools-using-metal-3d-printing-technology/11599>
- [45] KOMET® GROUP cutting tool. In: *Www.manufacturingtomorrow.com* [online]. [cit. 2022-04-20].
- [46] *Mapal* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.mapal.com/es/noticias/prensa/with-additive-manufacturing-to-more-productivity/>
- [47] *VBD nástroje: HOFMEISTER s.r.o.* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.hofmeister.cz/onas/fotogalerie/VBD-nastroje/>
- [48] *Frézovací hlava KRAKEN* [online]. In: . [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: www.rti.zcu.cz

- [49] ZETEK, M. a SCHORNIK, V. *Milling cutter with braces*. US11219955B2 Patent. Uděleno 2022.
- [50] *Walter Turn precision cooling* [online]. In: . [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.walter-tools.com/en-gb/tools/standard-tools/turning-tools/turning/iso-turning/walter-turn-precision-cooling>
- [51] *How to apply coolant and cutting fluid in turning* [online]. In: . [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general-turning/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning>
- [52] *ISCAR JET CUT* [online]. In: . [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/products.aspx/countryid/1/productid/72>
- [53] BONNARANG, Frederic a Christian GUERARDELLE. *Iscar Ltd: Rotary cutting tool having an adjustable cooling mechanism*. US8696252B2.
- [54] ZETEK, M. a SCHORNÍK, V. *Rotační nástroj s vnitřním chlazením*. CZ306957B6 Patent. Uděleno 2017.
- [55] MORRISON, M., VERELLEN, J. a LONG, T. *Kennametal Inc: Coolant spray nozzle and cutter with coolant spray nozzle*. US9434011B2.
- [56] HOFFER, B., FROTA DE SOUZA, F., LONG, T., GAMBLE, K. a WAGGLE, J. *Kennametal Inc: Cutting tool including a locking screw and adapter with coolant delivery*. US8573098B2.
- [57] CRAIG, K., LONG, T. a FORTA DE SOUZA, F. *Kennametal Inc: Tool holder with integral coolant channel and locking screw therefor*. US7125207B2.
- [58] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., POVOLNÝ, M. a FULEMOVÁ, J. *Řezný nástroj TTSL - NiCrBSi: Funkční vzorek*. Plzeň, 2020.
- [59] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J. a FILIPENSKÝ, J. *Řezný nástroj TTSL - FeCr: Funkční vzorek*. Plzeň, 2020.
- [60] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, Z., KROFT, L., FULEMOVÁ, J. a POVOLNÝ, M. *Řezný nástroj pro HF obrábění: Funkční vzorek*. Plzeň, 2020.
- [61] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O., VYSKOČIL, J., BLAŽEK, J. a MAREŠ, P.. *Technologie HF obrábění: Ověřená technologie*. Plzeň, 2020.
- [62] 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.

- [63] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J.. *Obráběcí nástroj*. EP21466003 Patent. Přihlášeno 2021.
- [64] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. CZ34647U1 Patent. Uděleno 2021.
- [65] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, F.. *Obráběcí nástroj*. CZ34647U1 Patent. Uděleno 2021.
- [66] *COMSOL Multiphysics®* [online]. In: . [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [67] *Altair* [online]. In: . [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.altair.com/topology-optimization>
- [68] *Solidworks simulation* [online]. In: . [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation>
- [69] MALÝ, T. *Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků I*. Plzeň, 2022. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [70] PEKÁREK, O. *Progresivní technologie obrábění žárových nástřiků II*. Plzeň, 2022. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [71] MEZILUÁNIK, J. *Vliv technologie HVOF žárového stříkání NiCrBSi na jeho obrobiteľnosť*. Plzeň, 2023. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

Seznam publikovaných prací

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

Seznam vlastních prací nevztahujících se k tématu disertace:

- [1] 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
- [2] 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
- [3] POVOLNÝ, M., KROFT, L. a ČERVENÝ, J. *Optimization of aluminum optical table production*. In Proceedings of the 32nd International DAAAM Virtual Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Vienna: DAAAM International, 2021. s. 631-639. ISBN: 978-3-902734-33-4 , ISSN: 1726-9679

- [4] POVOLNÝ, M., KROFT, L. a SÝKORA, J. *Vibration measurement during milling by acoustic emission*. In Proceedings of the 33rd International DAAAM Virtual Symposium. Vienna: DAAAM International Vienna, 2022. s. 319-325. ISBN: 978-3-902734-36-5 , ISSN: 1726-9679

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.

Užitné vzory:

- [1] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. Praha, 2020.
- [2] ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T. a FULEMOVÁ, J. *Obráběcí nástroj*. Praha, 2020.

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.
- [2] SKLENIČKA, J., KROFT, L. a POVOLNÝ, M. *Vývoj a konstrukce membránové stříkací pumpy*. E-CORECO s.r.o., 2021.
- [3] KROFT, L., POVOLNÝ, M., FILIPENSKÝ, J., VYSKOČIL, J., HRADIL, D. a SKOTNICOVÁ, K. *Výzkumná zpráva PSS*. Západočeská univerzita v Plzni, 2022.

Ověřené technologie:

- [1] POVOLNÝ, M., HRONEK, O., HNÁTÍK, J., ŘEHOŘ, J., FULEMOVÁ, J. a HRONEK, O. *Technologie pro dokončování kulových ploch*. 2018.
- [2] POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J., KOUŘIL, K. a VANĚK, V. *Technologie honování*. 2020.
- [3] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O., VYSKOČIL, J., BLAŽEK, J. a MAREŠ, P. *Technologie HF obrábění*. 2020.
- [4] KROFT, L., ZATLOUKAL, T., SÝKORA, J. a POVOLNÝ, M. *Technologie obrábění tenkých niklových dílů*. 2021.
- [5] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O. a FILIPENSKÝ, J. *Technologie rotačního frézování Inconel 718 – HVOF*. 2022.
- [6] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M., ZATLOUKAL, T., MARŠÁLEK, O., VYSKOČIL, J., BLAŽEK, J. a MAREŠ, P. *Technologie rotačního frézování Inconel 718 – DMLS*. 2022.

Funkční vzorky:

- [1] HRONEK, O., POVOLNÝ, M. a KROFT, L. *Přípravek pro zabíhání kulových ploch*. 2018.
- [2] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J. a FILIPENSKÝ, J. *Řezný nástroj TTSL – NiCrBSi*. 2020.
- [3] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J. a FILIPENSKÝ, J. *Řezný nástroj TTSL – FeCr*. 2020.
- [4] ŘEHOŘ, J., ZATLOUKAL, T., KROFT, L., FULEMOVÁ, J. a POVOLNÝ, M. *Řezný nástroj pro HF obrábění*. 2020.
- [5] KROFT, L., ŘEHOŘ, J., POVOLNÝ, M. a ZATLOUKAL, T. *Řezný nástroj pro rotační frézování*. 2022.
- [6] POVOLNÝ, M., FULEMOVÁ, J., KOUŘIL, K. a VANĚK, V. *Honovací nástroj*. 2020.