

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv technologie obrábění na tvarové a kvalitativní parametry obrobené
plochy žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si

Autor: **Bc. Marek BABÁK**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Miroslav GOMBAR PhD.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jméno a příjmení: | Bc. Marek BABÁK |
| Osobní číslo: | S17N0026K |
| Studijní program: | N2301 Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie – technologie obrábění |
| Téma práce: | Vliv technologie obrábění na tvarové a kvalitativní parametry ob- robené plochy žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si |
| Zadávací katedra: | Katedra technologie obrábění |

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu v oblasti obrábění žárových nástřiků
3. Teoretická východiska řešené problematiky
4. Experimentální část
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- Aykut Ş, Gölcü M, Semiz S, Ergür HS. Jul 2007. Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of satellite 6 using an artificial neural network. J. Mater. Process. Technol., Vol. 190, No. 1-3, p. 199-203.
- Agarwal SC, Ocken H. Nov 1990. The microstructure and galling wear of a laser-melted cobalt-base hardfacing alloy. Wear, Vol. 140, No. 2, p. 223-233. Aykut Ş, Bagci E, Kentli A, Yazicioglu O. Jan. 2007. Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. Mater. Des., Vol. 28, No. 6, p. 1880-1888.
- Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Jun. 2012. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 57, p. 83-101.
- Monroy K, Delgado J, Ciurana J. 2013. Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process. Procedia Eng., Vol. 63, p. 361-369.
- Marek I, Novák P, Mlynár J, Vojtěch D, Kubatík TF, Málek J. 2015. Powder metallurgy preparation of Co-based alloys for biomedical applications. Acta Phys. Pol. A, Vol. 128, No. 4, p. 597-601.
- López de Lacalle LN, Gutiérrez A, Lamikiz A, Fernandes MH, Sánchez JA. (2001) Turning of thick thermal spray coatings. Journal of Thermal Spray Technology, No.10, vol.2, p. 249-254.

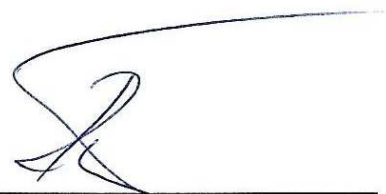
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Gombár, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jaroslava Fulemová, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Miroslavu Gombárovi, PhD., paní konzultantce Ing. Jaroslavě Fulemové, PhD. a celému týmu SGS za jejich odborné a užitečné rady, které mi během vypracování diplomové práce poskytovali. Chtěl bych také poděkovat své rodině a blízkým za jejich podporu během mého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | | | |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| AUTOR | Příjmení Babák | Jméno Marek | |
| STUDIJNÍ OBOR | B2301 – Strojírenská technologie – technologie obrábění | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Gombár, PhD. | Jméno Miroslav | |
| PRACOVIŠTĚ | ZČU – FST – KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Vliv technologie obrábění na tvarové a kvalitativní parametry obrobené plochy žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si | | |

| | | | | | |
|---------|---------|---------|-----|---------------|------|
| FAKULTA | Strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZDÁNÍ | 2020 |
|---------|---------|---------|-----|---------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|--------|----|--------------|----|---------------|----|
| CELKEM | 81 | TEXTOVÁ ČÁST | 71 | GRAFICKÁ ČÁST | 10 |
|--------|----|--------------|----|---------------|----|

| | |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY | Diplomová práce se zabývá obrobiteľnosťou žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si na tvarově složité ploše pomocí frézování. V úvodu je v práci rešeršná část a část teoretická. Následuje část praktická s popisem potřebného vybavení pro realizaci experimentu a vlastní vyhodnocení experimentu. Vyhodnocujeme opotřebenění VBD, drsnost povrchu a výsledný rozměr dílu. Na závěr je provedeno technicko-ekonomické hodnocení. |
| KLÍČOVÁ SLOVA | žárový nástřik, frézování, drsnost povrchu, vyhodnocení, obrábění, opotřebenění, VBD, řezná rychlost, posuv na zub, šířka řezu, hloubka řezu, Cr-Ni-B-Si, konstant Z, strategie 3D frézování |

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

| | | | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| AUTHOR | Surname Babák | Name Marek | |
| FIELD OF STUDY | B2301 – Manufacturing proces – Technology of metal cutting | | |
| SUPERVISOR | Surname (Including Titles) Doc. Ing. Gombár, PhD. | Name Miroslav | |
| INSTITUTION | ZČU – FST – KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Influence of machining technology on shape and qualitative parameters of machined surface of Cr-Ni-B-Si | | |

| | | | | | |
|---------|------------------------|------------|-----|--------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KTO | SUBMITTED IN | 2020 |
|---------|------------------------|------------|-----|--------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|---------|----|-----------|----|----------------|----|
| TOTALLY | 81 | TEXT PART | 71 | GRAPHICAL PART | 10 |
|---------|----|-----------|----|----------------|----|

| | |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The diploma thesis deals with the machinability of Cr-Ni-B-Si thermal spraying on a complex surface by milling. In the introduction there is a research part and a theoretical part. The following is a practical part with a description of the necessary equipment for the implementation of the experiment and the actual evaluation of the experiment. We evaluate VBD wear, surface roughness and the resulting part size. At the end, the technical and economic evaluation is performed. |
| KEY WORDS | thermal spraying, milling, surface roughness, evaluation, machining, wear, VBD, cutting speed, feed per tooth, cutting width, cutting depth, Cr-Ni-B-Si, constant Z, 3D milling strategy |

Obsah

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Úvod | 14 |
| 1.1 | Cíle diplomové práce | 15 |
| 2 | Analýzy současného stavu v oblasti obrábění žárových nástřiků..... | 16 |
| 3 | Teoretická východiska řešení problematiky | 18 |
| 3.1 | Žárové nástřiky | 18 |
| 3.1.1 | Aplikace žárových nástřiků na materiál..... | 18 |
| 3.1.2 | Procesní parametry žárových nástřiků | 18 |
| 3.2 | Rozdělení žárových nástřiků | 19 |
| 3.2.1 | Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF) | 19 |
| 3.2.2 | Další metody nanášení žárových nástřiků..... | 20 |
| 3.3 | Frézování | 22 |
| 3.3.1 | Tvarové frézování | 23 |
| 3.3.2 | Strategie 3D frézování konstant Z | 24 |
| 3.3.3 | Další dokončovací strategie 3D frézování | 25 |
| 3.4 | Jakost povrchu | 26 |
| 3.4.1 | Drsnost povrchu Ra..... | 26 |
| 3.4.2 | Drsnost povrchu Rz..... | 26 |
| 3.4.3 | Nosný podíl | 27 |
| 4 | Praktická část | 28 |
| 4.1 | Plán experimentu | 28 |
| 4.2 | Podmínky experimentu..... | 30 |
| 4.3 | Stroj | 30 |
| 4.4 | Nástroj | 31 |
| 4.5 | Obrobek | 33 |
| 4.6 | Přípravek..... | 37 |
| 4.7 | Technologie obrábění | 37 |
| 4.8 | Řezné podmínky | 38 |
| 5 | Experiment..... | 39 |
| 5.1 | Průběh experimentu | 39 |
| 5.2 | Opotřebenění na destičkách po obrábění..... | 39 |
| 5.3 | Vyhodnocení preexperimentu..... | 41 |
| 5.4 | Faktorový plán experimentu..... | 42 |
| 5.5 | Měření a vyhodnocení rozměru kulové plochy po obrobení..... | 43 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 5.6 | Měření a vyhodnocení drsnosti povrchu kulové plochy po obrobení | 46 |
| 5.6.1 | Vyhodnocení drsnosti povrchu Ra kulové plochy po obrobení..... | 47 |
| 5.6.2 | Vyhodnocení drsnosti povrchu Rz kulové plochy po obrobení..... | 48 |
| 5.6.3 | Vyhodnocení nosného podílu jednotlivých vzorků | 49 |
| 5.7 | Měření a vyhodnocení opotřebení VBD LX11 | 52 |
| 5.8 | Porovnání opotřebení, rozměru a drsnosti vlivem parametrů..... | 56 |
| 6 | Technicko-ekonomické zhodnocení | 63 |
| 6.1 | Výpočet jednotkových strojních časů obrábění..... | 63 |
| 6.2 | Porovnání nákladů | 63 |
| 7 | Závěr | 66 |
| 8 | Seznam použité literatury | 68 |
| 9 | Seznam příloh | 71 |

Seznam obrázků

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1 - Princip vytváření žárových nástřiků [1] | 18 |
| Obrázek 2 - Schéma metody HVOF [1] | 20 |
| Obrázek 3 - Schéma metody nástřiku za studena [4] | 21 |
| Obrázek 4 - Schéma metody nástřiku elektrickým obloukem [1] | 21 |
| Obrázek 5 - Schéma metody plazmového nástřiku [1] | 21 |
| Obrázek 6 - Schéma metody nástřiku plamenem [1] | 21 |
| Obrázek 7 - Schéma detonačního nástřiku [5] | 21 |
| Obrázek 8 - Graf porovnání metod žárových nástřiků v závislosti na teplotě a rychlosti částic [10] | 21 |
| Obrázek 9 - Možnosti frézování dle frézovaných ploch [21] | 22 |
| Obrázek 10 - Nesousledné a sousledné frézování [21] | 23 |
| Obrázek 11 - Tvarové frézování [23] | 24 |
| Obrázek 12 - Strategie obrábění konstant Z, příklad rozpočtení drah [27] | 25 |
| Obrázek 13 - Struktura povrchu na obrobku [17] | 26 |
| Obrázek 14 - Vyhodnocení střední aritmetické úchytky posuzovaného profilu – Ra [17] | 26 |
| Obrázek 15 - Vyhodnocení maximální výšky posuzovaného profilu (průměrná) - Rz [17] | 27 |
| Obrázek 16 - Veličiny nosného podílu [18] | 27 |
| Obrázek 17 - Išikawův diagram | 28 |
| Obrázek 18 - Plán experimentu | 29 |
| Obrázek 19 - Obráběcí centrum DMU 40 eVo linear | 31 |
| Obrázek 20 – Výměnná břitová destička RNGN 120400 LX11 | 32 |
| Obrázek 21 - Dvoubřitá fréza s břitovou destičkou LX11 | 32 |
| Obrázek 22 - Upnuté sklíčidlo s nosičem VBD a VBD LX11 | 33 |
| Obrázek 23 - Obrobek | 34 |
| Obrázek 24 - Řez obrobku leptaný pod světelným mikroskopem 100x zvětšený | 34 |
| Obrázek 25 - Řez žárovým nástřikem 10 000x zvětšený | 35 |
| Obrázek 26 - Metalurgický rozbor "Spectrum 74" | 36 |
| Obrázek 27 - Metalurgický rozbor "Spectrum 75" | 36 |
| Obrázek 28 - Metalurgický rozbor "Line Sum Spectrum" | 36 |
| Obrázek 29 - Přípravek pro obrábění kulové plochy upnutý ve sklíčidle | 37 |
| Obrázek 30 - Strategie obrábění vzorku | 38 |
| Obrázek 31 - Znázornění řezné šířky VBD | 38 |
| Obrázek 32 – Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - vylámaný břit destičky | 39 |
| Obrázek 33 – Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - vylomený břit destičky | 40 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 34 - Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - obroušený hřbet břitové destičky | 40 |
| Obrázek 35 - Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - vrub na břitu destičky a obroušení hřbetu | 40 |
| Obrázek 36 - Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - minimální opotřebení | 41 |
| Obrázek 37 – Výsledky měření rozměru po obrobení na stroji Zeiss | 44 |
| Obrázek 38 - Výsledky měření drsnosti povrchu po obrobení na stroji Alicona | 46 |
| Obrázek 39 - Znázornění nosného podílu vzorku pomocí Abbottovi křivky | 49 |
| Obrázek 40 - Opotřebení na čele VBD s odměřenou hodnotou opotřebení..... | 52 |
| Obrázek 41 - Opotřebení na hřbetu VBD s odměřenou hodnotou opotřebení..... | 53 |

Seznam grafů

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 1 - Vliv šířky řezu a_e a posuvu f_z na rozměr vzorku při konstantní v_c (500 m/min)..... | 45 |
| Graf 2 - Vliv šířky řezu a_e a posuvu f_z na drsnost povrchu R_a vzorku při konstantní v_c (500 m/min)..... | 47 |
| Graf 3 - Vliv šířky řezu a_e a posuvu f_z na drsnost povrchu R_z vzorku při konstantní v_c (500 m/min)..... | 48 |
| Graf 4 - Vliv šířky řezu na materiálový podíl nad a pod profilem jádra vzorku při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,2 mm)..... | 50 |
| Graf 5 - Vliv šířky řezu na materiálový podíl nad a pod profilem jádra vzorku při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,25 mm)..... | 50 |
| Graf 6 - Vliv šířky řezu na materiálový podíl nad a pod profilem jádra vzorku při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,3 mm)..... | 51 |
| Graf 7 - Vliv šířky řezu a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,2 mm) . | 54 |
| Graf 8 - Vliv šířky řezu a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,25 mm) | 54 |
| Graf 9 - Vliv šířky řezu a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,3 mm) . | 55 |
| Graf 10 - Vliv parametru obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,2$ mm..... | 56 |
| Graf 11 - Vliv parametrů obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,2$ mm..... | 57 |
| Graf 12 - Vliv parametru obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,25$ mm..... | 58 |
| Graf 13 - Vliv parametrů obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,25$ mm..... | 59 |
| Graf 14 - Vliv parametru obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,3$ mm..... | 60 |
| Graf 15 - Vliv parametrů obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,3$ mm..... | 61 |
| Graf 16 - Porovnání technologií obrábění z hlediska jednotkového strojního času..... | 64 |

Seznam tabulek

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 - Další metody žárových nástřiků [1], [4], [5], [8], [9] | 20 |
| Tabulka 2 - Dokončovací strategie 3D frézování [27] | 25 |
| Tabulka 3 - Podmínky experimentu | 30 |
| Tabulka 4 - parametry stroje DMU 40 eVo linear [26]..... | 31 |
| Tabulka 5 - Chemické složení ČSN 16343 dle ČSN EN 10083-1 [13] | 33 |
| Tabulka 6 – Tabulkové chemické složení povlaku Cr-Ni-B-Si [12] | 34 |
| Tabulka 7 - Programový plán experimentu | 39 |
| Tabulka 8 - Kódovaný faktorový plán | 42 |
| Tabulka 9 - Proměnné faktory experimentu | 43 |
| Tabulka 10 - Faktorový plán experimentu | 43 |
| Tabulka 11 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na rozměr vzorku při konstantní v_c | 45 |
| Tabulka 12 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na drsnost povrchu R_a vzorku při konstantní v_c . | 47 |
| Tabulka 13 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na drsnost povrchu R_z vzorku při konstantní v_c . | 48 |
| Tabulka 14 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na materiálový podíl nad a pod profilem jádra při konstantní v_c | 51 |
| Tabulka 15 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c | 55 |
| Tabulka 16 - Porovnání opotřebení VBD, rozměru a drsnosti R_a při konstatní v_c , $f_z = 0,2$ mm | 57 |
| Tabulka 17 - Porovnání opotřebení VBD, rozměru a drsnosti R_a při konstatní v_c , $f_z = 0,25$ mm | 59 |
| Tabulka 18 - Porovnání opotřebení VBD, rozměru a drsnosti R_a při konstatní v_c , $f_z = 0,3$ mm | 61 |
| Tabulka 19 - Porovnání nejlepších výsledných hodnot jednotlivých f_z | 62 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|---------|------------------------------------------------------|
| ZČU | Západočeská univerzita v Plzni |
| FST | Fakulta strojní |
| KTO | Katedra teorie obrábění |
| RTI | Regionální technologický institut |
| VBD | Výměnná břitová destička |
| HVOF | High velocity oxygen fuel |
| WC | Karbid wolframu |
| HSS | High speed steel |
| 2D | 2 Dimensional |
| 3D | 3 Dimensional |
| WOS | Web of Science |
| S-N-O-P | Stroj-Nástroj-Obrobek-Přípravek |
| CAD/CAM | Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing |
| CNC | Computer Numeric Control |

| Značka | Popis | Jednotky |
|------------------|-------------------------------------------------|------------|
| v_c | Řezná rychlost | [m/min] |
| f_z | Posuv na zub | [mm] |
| a_e | Šířka řezu | [mm] |
| a_p | Hloubka řezu | [mm] |
| F_x | Řezná síla v ose x | [N] |
| F_y | Řezná síla v ose y | [N] |
| F_z | Řezná síla v ose z | [N] |
| Ra | Průměrná aritmetická úchylka povrchu | [μ m] |
| Rz | Průměrná hodnota z absolutních maxim a minim | [μ m] |
| Rq | Průměrná kvadratická úchylka povrchu | [μ m] |
| Rt | Maximální hodnota z absolutního maxima a minima | [μ m] |
| Rk | Základní hloubka profilu jádra drsnosti | [μ m] |
| Rpk | Redukovaná výška špiček | [μ m] |
| Rvk | Redukovaná hloubka rýh | [μ m] |
| l | Délka profilu | [mm] |
| Lc | LambdaC: mezní vlnová délka | [μ m] |
| Rmr ₁ | Podíl materiálu nad profilem jádra | [%] |
| Rmr ₂ | Podíl materiálu pod profilem jádra | [%] |
| R | Poloměr | [mm] |
| d | Délka | [mm] |
| h | Hloubka | [mm] |
| v | Výška | [mm] |
| t _{as} | Jednotkový strojní čas | [min] |
| L | Délka obráběné plochy | [mm] |
| ln | Délka náběhu do řezu | [mm] |
| lp | Délka přeběhu řezu | [mm] |
| i | Počet přejezdů | [-] |
| a | Šířka obráběné vrstvy | [mm] |
| f _{ot} | Posuv na otáčku | [mm/ot] |
| n _o | Otáčky obrobku | [ot/min] |
| N | Náklady | [Kč] |

1 Úvod

Dnešní doba si žádá používat ve strojírenském průmyslu materiály se stále se zvyšujícím potenciálem. Tímto potenciálem jsou myšleny lepší mechanické, chemické a tepelné vlastnosti. Abychom mohli dosáhnout těchto požadavků, je nutné základní materiál upravovat. Nejznámějšími metodami úpravy materiálu jsou tepelné a chemické zpracování, kam můžeme zařadit např. kalení, popouštění, cementování, nitridování atd. Další z možností, jak vylepšit vlastnosti materiálu, je využití žárového povlakování neboli žárových nástřiků. Tyto nástřiky jsou z velmi odolných materiálů, které nám přináší zvýšenou odolnost proti mechanickému opotřebení, chemickému opotřebení, korozi, oxidaci a dodávají strojním součástem i velmi dobrou tepelnou odolnost. Těmito vlastnostmi se žárové nástřiky staly nezastupitelnou metodou pro úpravu povrchů strojních součástí.

Žárové nástřiky se používají v mnoha odvětvích strojírenství. Ve všeobecném strojírenství jako součásti náchylné k mechanickému poškození v odvětvích čerpacích a hydraulických zařízení, papírenských a tiskařských strojů, textilních strojů, v elektrotechnickém průmyslu (elektroizolační a elektro vodivé povlaky), v chemickém průmyslu (povlaky odolné proti chemickému poškození) a jako náhrada tvrdého povlakování. V těžkém strojírenství jsou to otěruvzdorné povlaky u rovinných a rotačních součástí. V automobilovém průmyslu jako povlaky dílů spalovacího motoru pro vytvoření tepelných bariér mezi jednotlivými součástmi (hlava válce, píst, ventily) a také jako povlaky dílů odolávajících opotřebení (čepy, vačky, synchronní kroužky). V leteckém a energetickém průmyslu jako v předešlých případech tepelné bariéry mezi jednotlivými součástmi, náhrada tvrdého chromování a povlaky odolávající abrazi, navíc v energetickém průmyslu to jsou povlaky odolávající korozi, erozi a kavitaci. Ve sklářském průmyslu to jsou nástřiky pracovních ploch forem a trnů namáhaných tepelnými a abrazivními účinky. V neposlední řadě jako renovace opotřebovaných součástí v energetickém průmyslu (generátory, elektromotory), v automobilovém a leteckém průmyslu (kluzní ložiska, čepy válců, pístnice, trakční motory). [3]

1.1 Cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je objasnění vlivu řezných parametrů na kvalitu a rozměr obrobeného povrchu (frézování) žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si na tvarově složité ploše (kulové ploše) při stejné nebo lepší kvalitě v porovnání se současnou metodou broušení. Tato práce se zabývá obráběním povlaku Cr-Ni-B-Si, na požadavek nejmenované společnosti. Úkolem je zrealizovat experiment, při kterém dojde k rozšíření poznatků v oblasti obrábění žárových nástřiků a vyjasnění možností frézování žárového nástřiku na tvarové ploše.

Touto tematikou se již v minulosti zabývalo několik výzkumných pracovišť včetně Západočeské univerzity v Plzni. Informace z těchto experimentů jsou shrnuty v úvodních odstavcích této práce.

Následuje část teoretická, kde se blíže seznámíme s metodami nanášení žárových nástřiků, procesem obrábění, který byl použit v experimentu, a s jakostmi povrchu. V části o nanášení žárových nástřiků je vysvětlen samotný proces nanášení žárových nástřiků, parametry nanášení u jednotlivých metod, jejich výhody, nevýhody a blíže je představena metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem. Část obrábění se věnuje frézování obecně, tvarovému frézování a strategiemi 3D frézování. Závěr této kapitoly se věnuje jakosti povrchu, přesněji jeho drsnosti Ra, Rz a nosným podílem, tedy metodami použitými v experimentu.

V praktické části se věnujeme experimentu obrobení povlaku Cr-Ni-B-Si pomocí frézování, kdy dle plánu experimentu je řezná rychlost v_c konstantní a proměnné faktory jsou posuv f_z a šířka řezu a_e . Hloubka řezu a_p je dána zadaným výsledným rozměrem vzorku. Povlak Cr-Ni-B-Si je nanesen na kulových vzorcích od zadavatele. Následně jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty rozměru, drsnosti povrchu u obrobených vzorků a vlivu obrábění na opotřebení břitových destiček.

V posledních odstavcích této práce je vyhodnocen technicko–ekonomický přínos a závěr, ve kterém jsou shrnuty dosažené výsledky experimentu a jeho vyhodnocení.

2 Analýzy současného stavu v oblasti obrábění žárových nástřiků

Pro zjištění pokroku jiných pracovišť u řešené problematiky je nutné provést literární rešerši. Vyhledání adekvátních zdrojů proběhlo přes portál SCOPUS, WOS a v knihovně ZČU, za pomoci klíčových slov této práce, která jsou uvedena v anotačním listě této práce. Při vyhledávání zdrojů bylo zjištěno, že žádné pracoviště se přímo dané problematice nevěnuje nebo svůj výzkum zatím nepublikovali. Z tohoto důvodu budeme v rešeršní části pracovat s pracemi, které mají některá společná témata a již proběhli na pracovišti RTI ZČU či jiném pracovišti.

1. Hainol Akbar Zaman, Safian Sharif, Dong-Won Kim, Mohd Hasbullah Idris, Mohd Azlan Suhaimi, and Z. Tumurkhuyag. *Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys - A Review*. [Online] 2017. [Citace: 2019-11-11]

V tomto dokumentu, který je zápisem z diskuze na mezinárodní konferenci v Modeně v Itálii z roku 2017, byly představeny obecné vlastnosti jednotlivých žárových nástřiků na bázi kobaltu s jejich posouzením na základě obrobitelnosti při různých obráběcích podmínkách. Dále byly diskutovány budoucí trendy obrábění žárových nástřiků na bázi Co-Cr-Mo. Výsledkem této diskuze bylo potvrzení stále se zvyšujícího trendu v používání žárových nástřiků a tudíž i nutnost zkoumat jejich obrobitelnost konvenčními metodami obrábění. Zde byla potvrzena informace, že pro obrábění žárových nástřiků na bázi kobaltu je stále nejvhodnější používat karbidové nástroje, které jsou současně stále nejoblíbenější mezi vědci v oblasti obrábění, při porovnání s nástroji z HSS, keramika a CBN. Část dokumentu se věnuje i plánování experimentů pro průzkum obrobitelnosti žárových nástřiků na bázi kobaltu, potažmo i žárových nástřiků Co-Cr-Mo.

2. S. Aykut, M. Gölcü, S. Semiz, H. S. Ergür. *Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of stellite 6 using an artificial neural network*. [Online] 2007. [Citace: 2019-11-11]

V tomto experimentu byla testována predikčnost neuronových sítí při odvodu třísek čelního frézování žárového nástřiku Stellite 6. Tato studia navazuje na dřívější studie, ve kterých byla získána tréninková a testovací data pro neuronové sítě. Při experimentu byly nastaveny parametry čelního frézování, řezná rychlost v_c , posuv f a hloubka řezu a_p . Současně byly při experimentu měřeny řezné síly F_x , F_y , F_z . Řezné parametry v_c , f , a_p , byly vstupními daty neuronových sítí a řezné síly F_x , F_y , F_z výstupními. Z výsledků bylo zjištěno, že neuronové sítě pracují s chybou mezi 2 a 10 %, a proto je možné tyto sítě používat při výzkumu odvodu třísek čelního frézování žárového nástřiku Stellite 6. Dále byl testován počet neuronů pro výzkum. Z výsledků vyplývá, že nejlepších výsledků je dosaženo při použití 35 neuronů při použití CSGalgoritmu.

3. Eyup Bagci, Seref Aykut. *A study of Taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (stellite 6)*. [Online] 2005. [Citace: 2019-11-11]

Cílem této práce je objasnění možnosti využití Taguchi metody optimalizace snížení drsnosti povrchu při čelním frézování žárového nástřiku Stellite 6. Experiment byl naplánován dle metody Taguchi a bylo potvrzeno, že je metoda Taguchi je velmi vhodná pro nalezení

parametrů obrábění v_c , f , a_p na snížení drsnosti povrchu obrobené plochy při čelním frézování žárového nástřiku Stellite 6. Dále bylo zjištěno, že drsnost povrchu na 95 % ovlivňuje všechny parametry obrábění v_c , f , a_p . Při experimentu se podařilo dosáhnout drsnosti povrchu $R_a = 0,143 \mu\text{m}$. Optimální hodnoty při parametrech experimentu byly $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f = 100 \text{ mm/min}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$.

4. Zatloukal, T. *Analýza procesu obrábění tvrdých povlaků z hlediska technologických parametrů a konstrukce nástroje*, [diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, STO, 2018.

Cílem této práce bylo objasnění vlivu úhlu čela na obráběný povrch žárového nástřiku Stellit 6 při ortogonálním obrábění a dále docílení lepšího povrchu žárového nástřiku oproti metodě broušení na obrobeném povrchu. V experimentální části byly obrobeny vzorky při čtyřech různých rezných rychlostech v_c , dvou různých hloubkách řezu a_p a třech různých nastaveních úhlu čela λ . Experiment probíhal na horizontální obrázečce na pracovišti RTI. Výslednými parametry obrobeného povrchu byly parametry drsnosti R_t , R_a , R_z , R_q . Tyto výsledky byly porovnány graficky se vstupními daty. Z těchto výsledků bylo odhaleno, že se zvyšující se reznou rychlostí v_c se drsnost povrchu také zvyšuje. Ostatní parametry obrábění jsou výsledkově více nejasné. Nakonec proběhlo vyhodnocení pro jednotlivé parametry drsnosti povrchu pomocí neuronových sítí. Neuronové sítě dle plánu výsledky objasnily. U parametrů R_a a R_z je nejvýraznější vliv nastavení úhlu čela λ . Na parametr R_t má největší vliv rezná rychlost v_c a na parametr R_q má stejně velký vliv úhel čela λ a rezná rychlost v_c . Téměř ve všech případech má nejmenší vliv hloubka řezu a_p .

3 Teoretická východiska řešení problematiky

3.1 Žárové nástřiky

Žárový nástřik je způsob úpravy povrchu přídavným materiálem, který je nanášen na základní materiál dílu, čímž je vytvořen povlak. Cílem této metody je vytvoření povlaku s lepšími vlastnostmi, než byl materiál základní.

3.1.1 Aplikace žárových nástřiků na materiál

Žárový nástřik je přídavný materiál, který aplikujeme na základní materiál. Přídavný materiál je standardně ve formě prášku, drátů či speciálních tyčinek. Cílem této povrchové úpravy je vytvoření souvislého povlaku požadované tloušťky na základním materiálu. Na obrázku níže můžeme vidět zjednodušené grafické znázornění aplikace žárového povlaku. Přídavný materiál se přivádí do prostoru tavení, následně je urychlen pomocí provozního plynu, popřípadě procesem natavení a nanesen na základní materiál, kde vlivem adheze a kinetické energie spočine. Přídavný materiál po ulpění na základním materiálu tuhne a tím vzniká povlak s lamelární strukturou. Hlavním znakem žárových nástřiků je právě lamelární struktura, která je způsobena dopadem na základní materiál celých natavených nebo částečně natavených částí. Díky odlišným metodám a odlišným procesním parametrům aplikace žárových nástřiků je výsledný povlak nekonzistentní. [1], [2], [8]



Obrázek 1 - Princip vytváření žárových nástřiků [1]

3.1.2 Procesní parametry žárových nástřiků

Procesní parametry jsou pro každý způsob žárového nástřiků specifické díky odlišným teplotám aplikace a rychlosti dopadu částic. Současně dva parametry a sklon aplikace mají největší vliv na výslednou kvalitu žárového nástřiku. Se zvyšující se rychlostí přídavného materiálu se zvyšuje kinetická energie dopadu na základní materiál, což má za následek vyšší plastickou deformaci. Tento faktor nám zvyšuje přilnavost a hustotu povlaku. Vyšší rychlost také napomáhá snižovat riziko oxidace. Naopak příliš vysoká rychlost částic může zapříčinit nedostatečné natavení částic a tím vyšší poréznost a náchylnost na vznik trhlin. Jednotlivé procesní parametry dělíme do těchto skupin. [5]

- **Konstrukce zařízení:** zdroj tepelné energie, způsob přívodu přídavného materiálu, tavná teplota, typ chlazení, tvar trysky
- **Nosný plyn:** množství, rychlost, složení, teplota
- **Základní materiál:** teplota tavení, chemické složení, drsnost povrchu, tvar a velikost

- **Přídavný materiál:** forma přídavného materiálu, chemické složení, tvar, velikost, tepelně-mechanické vlastnosti, elektrický odpor a vodivost
- **Aplikační parametry:** vzdálenost od základního povrchu, doba setrvání částic v aplikační teplotě, kinetická energie natavených částic při dopadu, úhel a dráha letu dopadajících částic, velikost posuvu aplikačních zařízení, úst'ová a dopadová teplota částic
- **Aplikační prostředí:** ochranná atmosféra, velikost tlaku [5]

3.2 Rozdělení žárových nástřiků

Žárové nástřiky můžeme dělit dle způsobu jejich aplikace na základní materiál. Tyto metody se liší především v tavné teplotě, dále se metody liší v použitém přídavném materiálu a v neposlední řadě v nutnosti částice unášet plynem či nikoliv. [1]

- Nanášené bez tepelného zdroje
 - Nástřik za studena
- Nanášení za pomoci elektrické energie
 - Nástřik elektrickým obloukem
 - Plazmový nástřik
- Nanášení pomocí hoření směsi paliva a kyslíku
 - Nástřik plamenem
 - Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)
 - Detonační nástřik [1]

V experimentu byla použita metoda nanášení „Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)“, proto si tuto metodu přiblížíme. Ostatní metody jsou k nalezení v tabulce 1, kde lze najít jejich parametry nanášení, výhody a nevýhody.

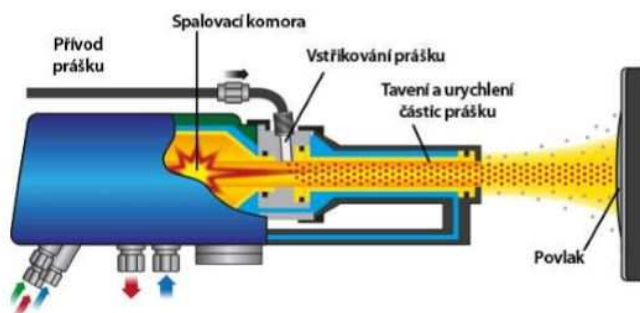
3.2.1 Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

Metoda HVOF, neboli vysokorychlostní nástřik plamenem, je nejmodernější metodou v oblasti žárových nástřiků. Oproti metodě detonačního nástřiku je v této metodě přídavný materiál nanášen kontinuálně. Do spalovací komory je nepřetržitě přiváděna směs kyslíku a paliva v určitém poměru. Palivem se v této metodě nejčastěji používá kerosin, jako další možnosti paliva jsou propylen, acetylen nebo vodík. Díky správnému poměru směsi má tavná směs teplotu v rozmezí 2800 – 5000 °C. Stejně jako u detonační metody dojde ke smísení kyslíku a paliva v komoře a následnému zažehnutí pomocí svíčky. Rozdíl oproti detonační metodě je v přívodu přídavného materiálu (prášek), kdy v této metodě je přídavný materiál unášen nosným plynem (nejčastěji dusík) do vzniklého plamene, kde dochází k jeho natavení. Následně v konvergentně divergentní trysce dochází k výraznému urychlení natavených částic až na hodnoty supersonické rychlosti (přes 1000 m/s). Abychom zajistili správné podmínky hoření, je sledován tlak uvnitř komory a celá konstrukce je chlazena vodou. [7], [8], [9]

Metoda HVOF spojuje výhody jednotlivých metod tepelného nanášení žárových nástřiků. Vlivem velmi vysoké rychlosti dochází k velmi dobrému přilnutí přídavného materiálu na materiál základní s nejvyšší možnou adhezí až 90 MPa. Díky velmi malé přítomnosti oxidů a pórovitosti můžeme při správném nastavení dosáhnout tlakového napětí v přídavném materiálu, což nám zvyšuje odolnost proti vzniku a šíření trhlin. Díky teplotě taveniny v rozmezí 2800 – 5000 °C je vhodné pro použití měkkých až středně tvrdých přídavných materiálů nejčastěji karbidů na bázi wolframu, chromu, kobaltu a niklu. Další výhodou nižší teploty tavení je zaručení nefázové přeměny v přídavném i základním materiálu a tím u přídavného materiálu

rozpadu karbidů wolframu (WC), čímž jsou zaručeny původní vlastnosti přídavného materiálu (hlavně tvrdost). [7], [8], [9]

Nevýhodou této metody je složitá konstrukce, která navíc musí být neustále kontrolována v součinnosti s vyšším hlukem, který přesahuje 100 dB. Další nevýhodou je nevýhodnost použití této metody u povlaků na keramické bázi, kde díky nutnosti vysoké teploty tavení přídavného materiálu nedochází u metody HVOF k úplnému natavení částic, čímž vzniká vyšší pórovitost, menší adheze a horší rozptěření na základním materiálu. [7], [8], [9]

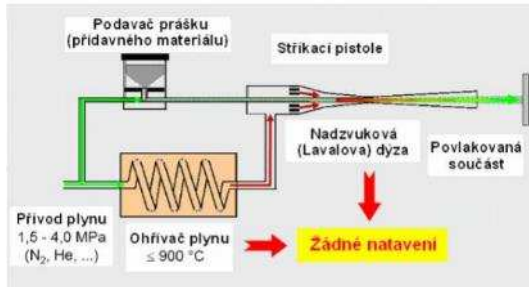


Obrázek 2 - Schéma metody HVOF [1]

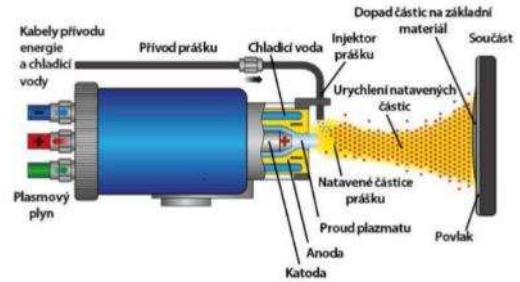
3.2.2 Další metody nanášení žárových nástřiků

| Metoda nanášení | Aplikační parametry | Aplikační plyn | Výhody | Nevýhody |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nástřik za studena | max. 900 °C 900 – 1 200 m/s | hélium, dusík | Nejnižší teplotní ovlivnění materiálů. Úspora času chladnutí. | Velká spotřeba aplikačního plynu. Pouze na měkké kovy, jinak je nutné pojivo (měď, hliník a jejich slitiny) |
| Nástřik elektrickým obloukem | 3 600 – 4 000 °C 100 – 150 m/s | stlačený vzduch | Nízké pořizovací náklady. Nižší teplotní ovlivnění díky aplikačnímu plynu. | Vodivost aplikovaného materiálu. Horší jakost povrchu. Dodržení stability elektrického oblouku. |
| Plazmový nástřik | až 20 000 °C 100 – 150 m/s | plazmový plyn | Nanášení materiálů s vysokou tavicí teplotou. Vysoká čistota povlaku s 0 % oxidů. | Shoření legujících prvků. Náročnost na pracoviště. Mnoho vstupních faktorů ovlivňujících výsledků. |
| Nástřik plamenem | 2 700 – 3 200 °C 50 – 100 m/s | acetylen, propan, propylen, vodík | Nízké pořizovací náklady. Jednoduchost metody. | Stáří metody. Velká pórovitost a malá přilnavost nástřiku. |
| Detonační nástřik | 4 000 – 6 000 °C 1 000 m/s | acetylen a kyslík | Nízké pořizovací náklady. Velmi dobrá přilnavost až 82 MPa. Jednoduchost metody. | Nemá kontinuální průběh. |

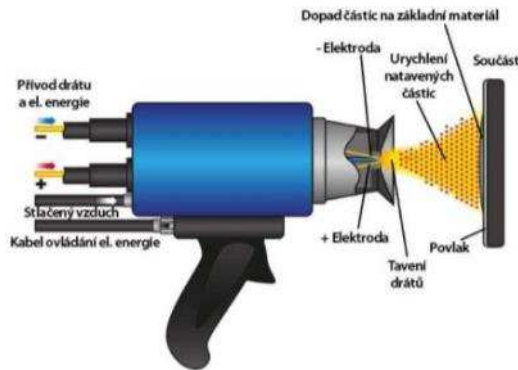
Tabulka 1 - Další metody žárových nástřiků [1], [4], [5], [8], [9]



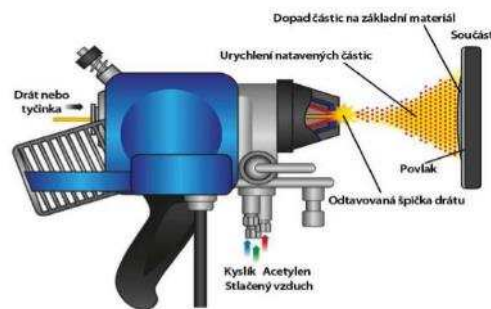
Obrázek 3 - Schéma metody nástřiku za studena [4]



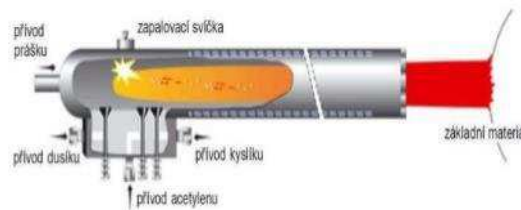
Obrázek 5 - Schéma metody plazmového nástřiku [1]



Obrázek 4 - Schéma metody nástřiku elektrickým obloukem [1]

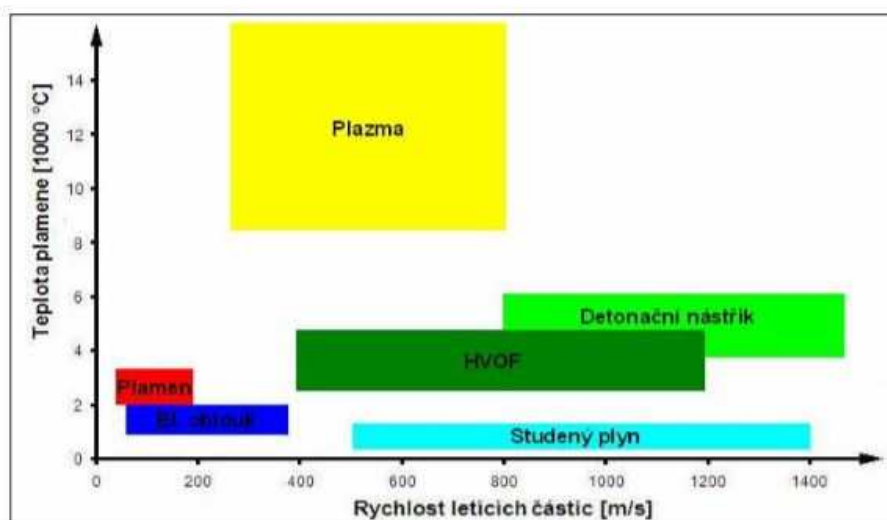


Obrázek 6 - Schéma metody nástřiku plamenem [1]



Obrázek 7 - Schéma detonačního nástřiku [5]

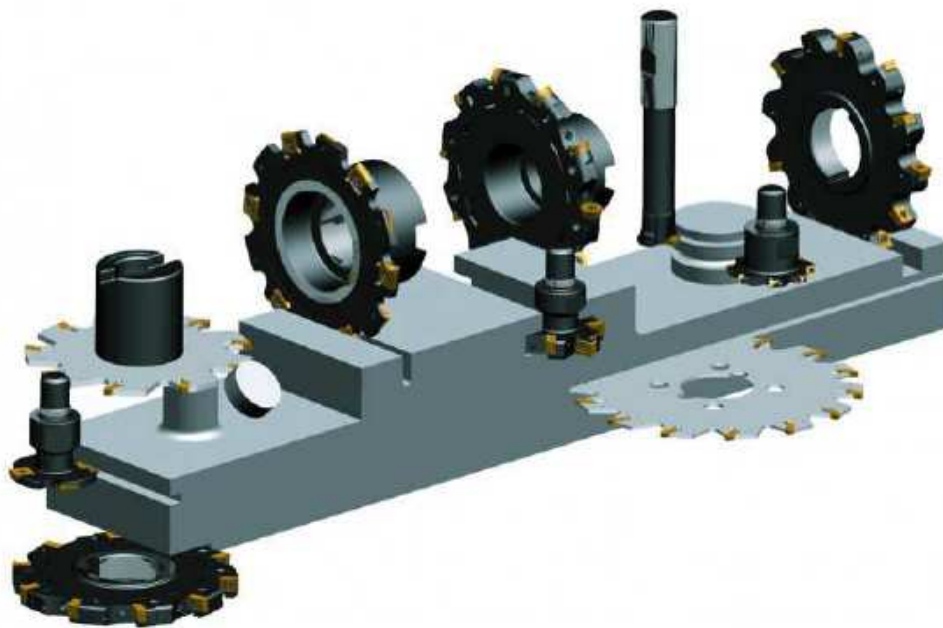
Pro názornost je zde uveden graf porovnání metod žárových nástřiků v závislosti na teplotě a rychlosti částic.



Obrázek 8 - Graf porovnání metod žárových nástřiků v závislosti na teplotě a rychlosti částic [10]

3.3 Frézování

Frézování se řadí mezi třískové neboli konvenční metody obrábění. Materiál obrobku je odebírán obvykle vícebřitým nástrojem tzv. frézou. Frézování se vyznačuje rotačním pohybem nástroje při přímočarém pohybu obrobku. Při rotačním či planetovém frézování může rotační pohyb konat i obrobek. Moderní frézovací stroje mají možnost plynulé změny parametrů posuvů realizovatelné ve všech osách tzv. tvarové frézování. Řezný proces není konzistentní, ale přerušovaný díky odřezávání krátkých třísek proměnlivých šířek jednotlivými zuby. Frézování ovlivňuje mnoho faktorů, kterými jsou tuhost soustavy S-N-O-P, přesnost stroje, nástroje a jejich trvanlivost, frézovací podmínky a zvolená strategie frézování. Aby bylo dosaženo požadované přesnosti a kvality, je nutné předem rozmyslet průběh celého obrábění. [21], [22]

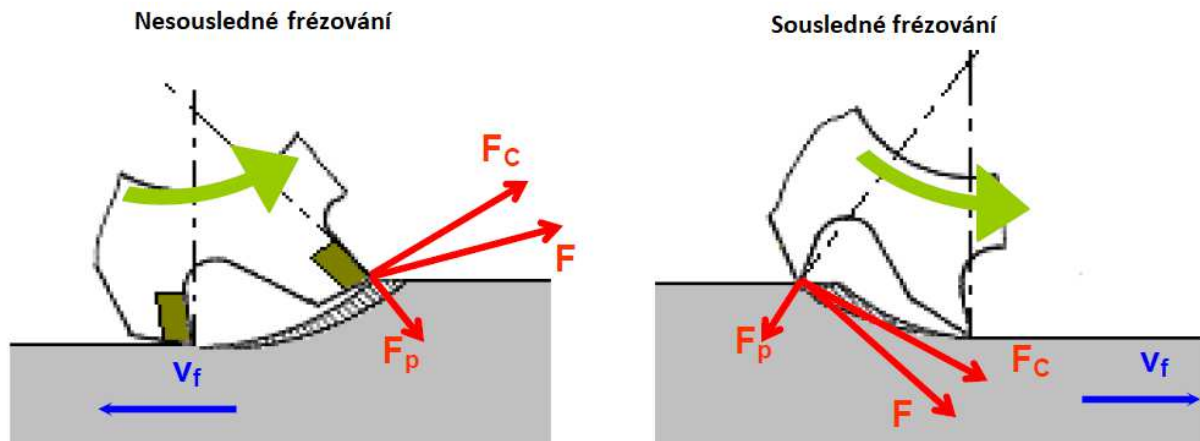


Obrázek 9 - Možnosti frézování dle frézovaných ploch [21]

Výhodami frézování jsou vysoká produktivita a úběr materiálu obrobku, vysoká přesnost a kvalita obrobenej plochy, vhodný tvar třísky. [21], [22]

Nevýhodou je náročná údržba nástrojů na seřizování a ostření, vyšší náklady na nástroje a stroj. [21], [22]

Podle směru otáčení frézy a posuvu obrobku dělíme frézování na nesousledné a sousledné. Při nesousledném obrábění je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Díky tomuto sjednocení pohybů se mění tloušťka třísky od nuly do maxima. Zatímco u sousledného obrábění je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku, čímž se mění tloušťka třísky od maxima do nuly. [21], [22]



Obrázek 10 - Nesousledné a sousledné frézování [21]

Výhodou nesousledného frézování je menší opotřebenění stroje díky plynulému náběhu do řezu a záběr zubu nezávisí na hloubce řezu. [21], [22]

Nevýhodou nesousledného frézování je zvýšené otupování bříty a vyšší drsnost obrobeného povrchu. [21], [22]

Výhodou sousledného frézování je kvalitnější drsnost obrobeného povrchu oproti nesouslednému. [21], [22]

Nevýhodou sousledného frézování jsou vyšší nároky na upnutí a silový ráz na zub ve směru posuvu. [21], [22]

3.3.1 Tvarové frézování

Tvarové frézování se používá pro víceosé frézování dvourozměrných a třírozměrných konvexních či konkávních tvarů. Jedná se o často používanou frézovací operaci v moderním obrábění díky použití sofistikovaných CAD/CAM systémů. Právě díky využití CAD/CAM systémů je možné na moderních CNC strojích provádět vedlejší posuvový pohyb po obecných tvarových křivkách ve všech souřadných osách stroje. Díky tomu se dají zhotovit všemožné tvary a plochy dle požadavků zákazníka. Současně při použití některých strategií vedení nástroje CAD/CAM systémů je používáno současně sousledného a nesousledného frézování, čímž se výrazně snižují časy přejezdu nástrojů a tím dochází ke zproduktivnění frézování. Zároveň při takovéto strategii vedení nástroje dochází k měnícím se dynamickým účinkům a zatížení nástroje, na které je potřeba brát ohled. [23]



Obrázek 11 - Tvarové frézování [23]

Obráběcí proces tvarového frézování se standardně dělí na tři typy operací: hrubování, polodokončování a dokončování.

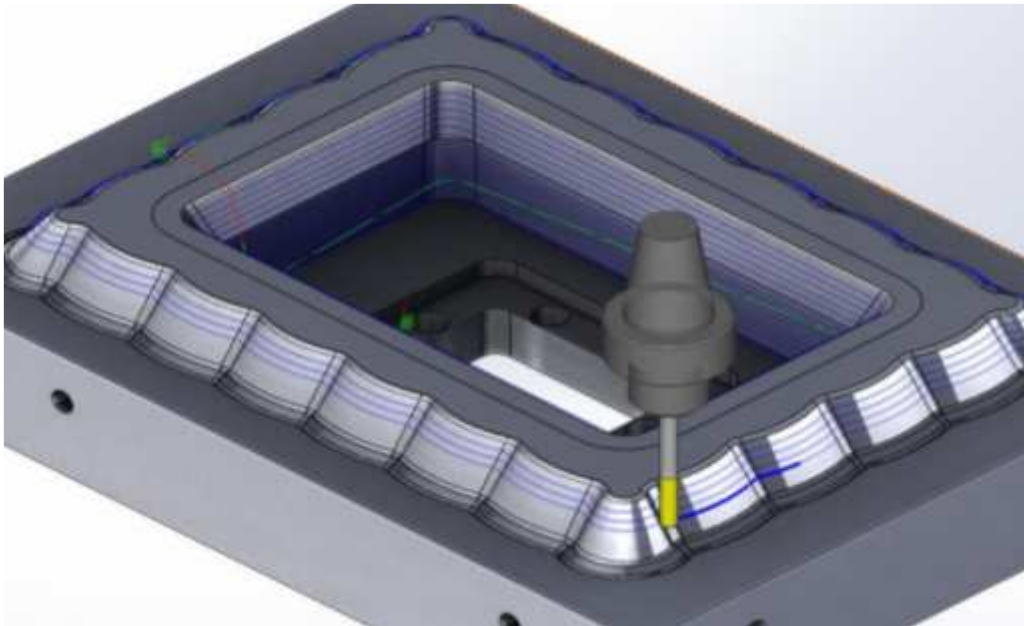
Účelem hrubování je odebrání co největšího množství materiálu v co nejkratším čase. Ve vyšších odběrech obráběného materiálu nám pomáhá i to, že není nutné dodržení požadavku na kvalitu obráběného povrchu z důvodu dalších dokončovacích operací. Z tohoto důvodu je při hrubování nutná vysoká stabilita řezu. Volíme převážně nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami v podobě čelních válcových fréz a s ohledem na frézovanou plochu co největších rozměrů. Právě díky rozměrům frézované plochy je občas nutné zařadit více hrubovacích operací pro snížení výrobního času. [25], [28]

Pro polodokončovací operace volíme převážně toroidní a kulové frézy. Účelem polodokončovací operace je vytvoření konstantní vrstvy obráběného materiálu, abychom měli konstantní řezné podmínky pro operaci dokončovací. Následkem konstantních řezných podmínek je nižší otláčení nástroje a s tím spojená lepší kvalita obrobeneho povrchu. Stejně jako u operace hrubovací je nutné zařadit více polodokončovacích operací z důvodu velkého množství odebíraného materiálu v rozích či obrobění obtížně dosažitelných míst. Dalším důvodem je zvýšení produktivity frézování. [28]

Dokončovací operace je finální operace frézování, při které dochází k odběru materiálu při malých hloubkách řezu a nízkých posuvových rychlostech tak, aby byly splněny kvalitativní a rozměrové parametry obrobku. Pro dokončovací operaci se používají nejčastěji kulové frézy a je snaha celou dokončovací operaci provést jedním nástrojem, aby se zamezilo vzniku stop při nájezdech a výjezdech jednotlivých nástrojů. Z těchto důvodů je tato operace časově nejvíce náročná. Pro dokončovací operaci se nejčastěji používá strategie konstant Z. Z důvodu malé hloubky řezu byla v tomto experimentu použita pouze dokončovací operace a současně již zmíněna strategie konstant Z. [28]

3.3.2 Strategie 3D frézování konstant Z

Konstant Z je nepoužívanější dokončovací operací z důvodu velkého uplatnění obrábění strmých ploch a mnoha možností optimalizace. Při této operaci je možné vynechat rovné plochy, které byly obrobena již dříve, stanovit limitní úhly a tím operaci rozdělit na více sekvencí či kombinovat s jinou strategií (např. řádkováním). Při konstant Z jsou jednotlivé dráhy generovány v rovnoběžných řezech osy Z dle nastavení programátora. [24], [27]



Obrázek 12 - Strategie obrábění konstant Z, příklad rozpočtení drah [27]

3.3.3 Další dokončovací strategie 3D frézování

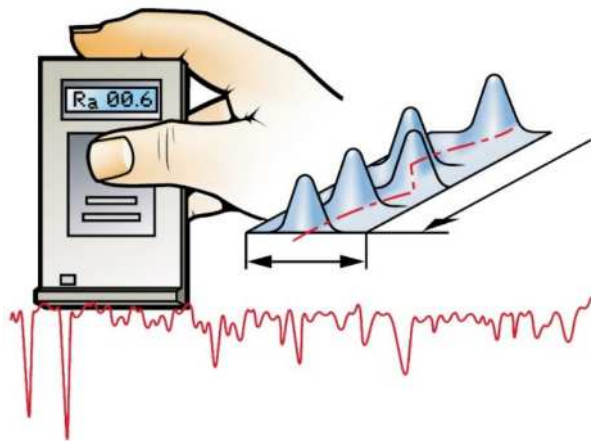
Dalšími možnostmi dokončovacích strategií 3D frézování je řádkování, spirála, konstantní krok, mezikřivkové a další.

| Strategie | Výhody |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Řádkování | Využívá se převážně pro snižování hran po hrubování a pro dokočování plochých tvarů. |
| Spirála | Vhodný pro dokončování mělkých kruhových tvarů. Výhodou je i nepřerušovaný kontakt s obráběnou plochou. |
| Konstantní krok | Na rozdíl od konstantní Z je u této operace neměnná rozteč mezi jednotlivými dráhami. Díky tomuto se využívá pro snížení časové náročnosti frézování. |
| Mezikřivkové | Tato strategie je výhodná pro dokončování proměnlivých podélných tvarů, z důvodu neustálého dopočítávání dráhy dle ukončení dráhy předchozí a ohrazení křivek. |

Tabulka 2 - Dokončovací strategie 3D frézování [27]

3.4 Jakost povrchu

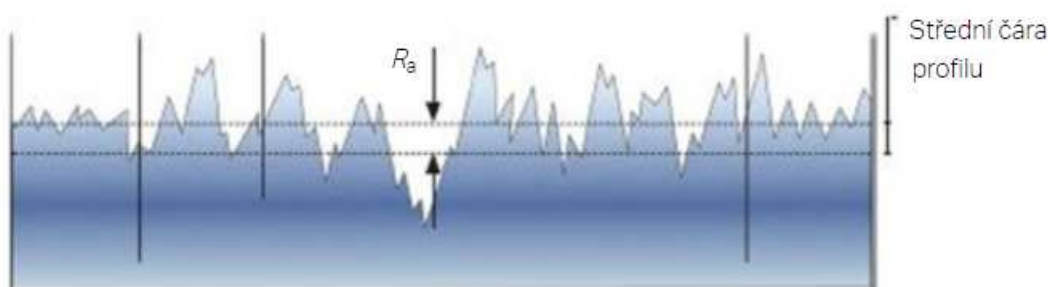
Jakost povrchu je široká množina parametrů. V této práci se budeme zabývat drsností povrchu, přesněji parametry R_a , R_z a nosným podílem. Drsnost povrchu je nepravidelná nerovnoměrnost tvaru povrchu, kterou je možné statisticky vyhodnotit a popsat. Jak bude popsáno níže, každá z charakteristik má své výhody i nevýhody, a proto při experimentu budeme pracovat se všemi hodnotami současně. [17], [19], [20]



Obrázek 13 - Struktura povrchu na obrobku [17]

3.4.1 Drsnost povrchu R_a

Jedná se o střední aritmetickou úchylku posuzovaného povrchu. Tato střední hodnota všech odchylek od střední čáry je posuzována po přímce, a jelikož se jedná o průměrnou hodnotu z absolutních hodnot všech souřadnic osy Z, není patrné, zda povrch nevykazuje velké špičky či rýhy. V praxi to znamená, že dva povrchy se stejnou hodnotou R_a mohou mít naprosto odlišný povrch, což může u některých součástí vést ke snížení funkčnosti. [17], [19], [20]

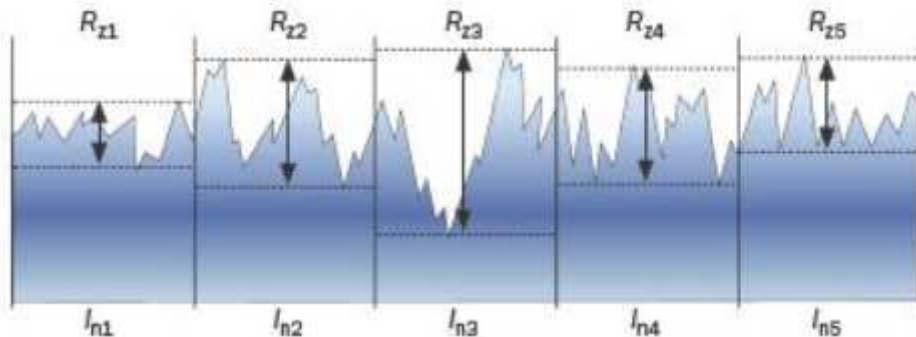


Obrázek 14 - Vyhodnocení střední aritmetické úchylky posuzovaného profilu – R_a [17]

3.4.2 Drsnost povrchu R_z

Jedná se o průměrnou hodnotu při rozdělení měřeného úseku na stejně dlouhé části, kde na každé části je vyhodnocen rozdíl největší výšky výstupku a největší hloubky prohlubně.

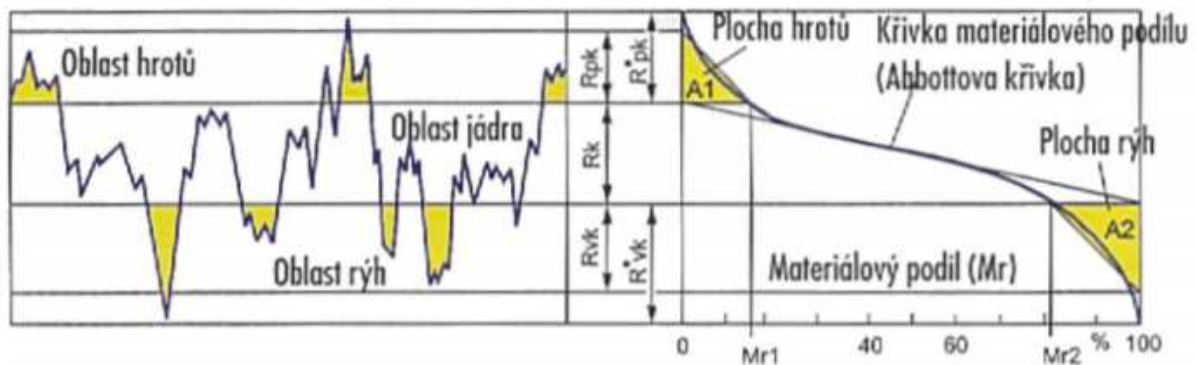
Standardně se měřený úsek rozděluje na pět částí, ale u moderních přístrojů se tento počet může lišit. Stejně jako hodnota R_a se i hodnota R_z vyhodnocuje na přímce. Největší úchylna hodnot R_z se označuje R_{zmax} . nebo také R_{max} . [17], [19], [20]



Obrázek 15 - Vyhodnocení maximální výšky posuzovaného profilu (průměrná) - R_z [17]

3.4.3 Nosný podíl

Nosný podíl je na rozdíl od předešlých charakteristik vyhodnocován v procentech. Nosný podíl je znázorněn pomocí AbbotFirestoneovi křivky. Abbotova křivka je důležitým ukazatelem pro klasifikaci povrchu a vyhodnocujeme s její pomocí hodnoty R_{mr1} a R_{mr2} . Hodnoty R_{mr1} a R_{mr2} jsou odchylky od jádra povrchu a určují nám plošné procento špiček nad jádrem povrchu a rýh pod jádrem povrchu na měřené délce. V praxi můžeme díky těmto hodnotám posoudit stupeň povrchových vad. [17], [18], [20]



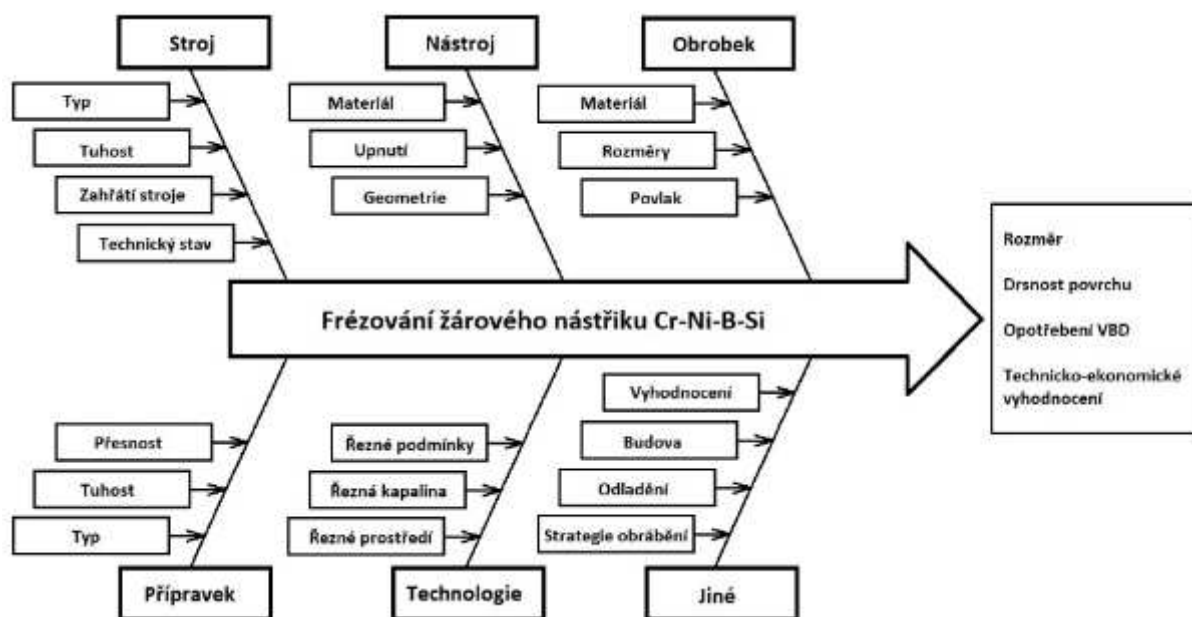
Obrázek 16 - Veličiny nosného podílu [18]

4 Praktická část

Cílem této diplomové práce je prověření možnosti obrábění (frézování) žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si na tvarově složité ploše (kulové ploše) při stejné nebo lepší kvalitě v porovnání se současnou metodou broušení. Tato práce se zabývá obráběním povlaku Cr-Ni-B-Si, na požadavek jedné nejmenované společnosti. Úkolem je zrealizovat experiment, při kterém dojde k rozšíření poznatků v oblasti obrábění žárových nástřiků a vyjasnění možností frézování žárového nástřiku na tvarové ploše. Výsledky této práce je možné použít jako podklad pro případné zpracování dalších prací v oblasti této problematiky.

4.1 Plán experimentu

Experiment se řídí plánem experimentu, pro který je nutné znát faktory do procesu vstupující a ovlivňující výsledky. Pro sjednocení těchto vstupů je vhodné využít Išikawův diagram neboli diagram příčin a následků. Išikawův diagram připomíná svým tvarem kostru ryby, kde hlavou jsou v našem případě výsledky práce a na hlavních kostech vedoucích od páteře zaznamenáme kategorie, ve kterých se mohou nacházet ovlivňující faktory. Na vedlejších kostech, které jsou na hlavní kosti napojené, pak zapisujeme konkrétní faktory. V našem případě bude na hlavních kostech soustava S-N-O-P, technologie a jiné. Je potřeba zapsat co největší počet ovlivňujících faktorů, aby byly výsledky co nejpřesnější. Faktory je dále nutné rozdělit na faktory ovlivnitelné a neovlivnitelné. Neovlivnitelné faktory označíme jako konstanty. Ovlivnitelné jsou pro nás v tomto experimentu proměnné f_z a a_e , které dle faktorového plánu měníme. Pro tento experiment byla zvolena konstantní rezná rychlost.



Obrázek 17 - Išikawův diagram

Při experimentu bude obrobena 16 vzorků kulových ploch, kde každý vzorek bude obroben novou reznou hranou. Pouze vzorek č. 16 bude obroben stejnou reznou hranou jako vzorek č. 15. Důvod této změny je prověření možnosti použití rezného břitu více než jednou. Experiment je dále rozdělen na úvodní část, obrobení šesti vzorků pro ověření správného nastavení konstantní i proměnné složky rezných podmínek. Při pozitivním výsledku bude obrobena

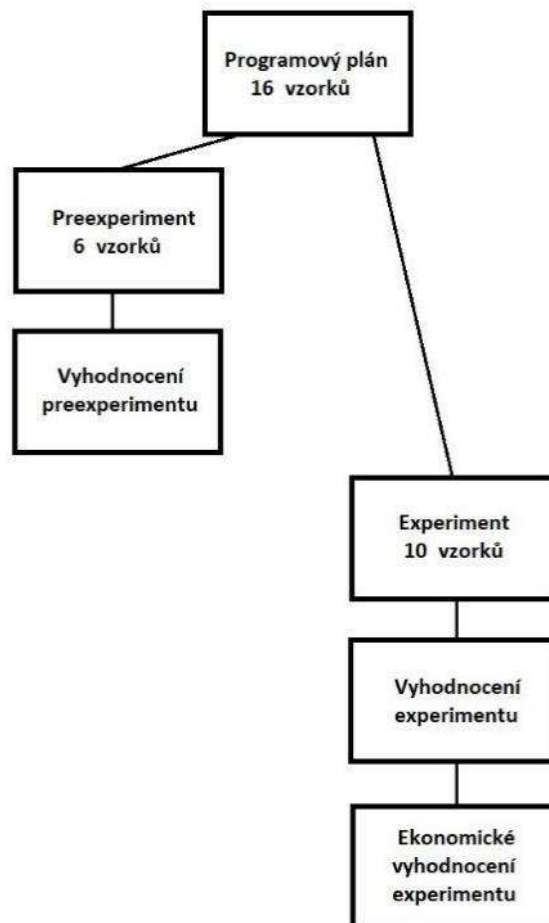
dalších 8 vzorků dle faktorového plánu experimentu. Nakonec budou obrobena poslední 2 vzorky pro zjištění dopadu na řeznou hranu. Pro úplné obsazení faktorové plánu budou použity jeden vzorek z úvodní části experimentu a jeden vzorek z konečné části experimentu. Pro experiment budou použity 3 páry výměnných břitových destiček, každá rozdělena na 5 řezných hran, jak bylo zmíněno výše.

Vzorky budou před vlastním obráběním vizuálně zkontrolovány, zda jejich žárový nástřik nevykazuje známky poškození. Následně budou vzorky označeny pro jejich správné vyhodnocení. Stejně tak budou označeny řezné břity.

Pro správné výsledky experimentu je nutné, aby proběhl celý obráběcí program na vzorku bez přerušení.

Pro snížení chyby lidským faktorem bude výměna vzorků a břitových hran provedena proškoleným zkušeným pracovníkem RTI.

Po vlastním experimentu budeme vyhodnocovat tři faktory, rozměr výsledného vzorku, kvalitu obrobene vrstvy (drsnost, nosný podíl) a vliv řezných podmínek na řeznou hranu obráběcích destiček. Tyto faktory budeme vyhodnocovat nejenom separátně, ale také křížově, abychom určili nejlepší možnou kombinaci řezných podmínek.



Obrázek 18 - Plán experimentu

4.2 Podmínky experimentu

| | |
|-------------------------|----------------------------------------|
| Stroj | Obráběcí centrum DMU 40 eVo Linear |
| Nástroj | Dvoubřitá fréza s výměnnými destičkami |
| Destička | RNGN 120400 LX11 |
| Přípravek | Rozpínací trn |
| Obrobek | Kulová plocha |
| Materiál obrobku | Ocel ČSN 16343 |
| Žárový nástřik | Cr-Ni-B-Si |
| Rezná rychlost v_c | 700; 450; 400; 500 m/min |
| Hloubka řezu a_p | 0,25 mm |
| Šířka řezu a_e | 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 mm |
| Posuv f_z | 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 mm |
| Počet vzorků | 16 |
| Počet VBD | 6 |
| Počet řezných hran VBD | 30 |
| Stroj - měření rozměru | CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator |
| Stroj - měření drsnosti | Alicona IFM G4 |

Tabulka 3 - Podmínky experimentu

4.3 Stroj

V halových laboratořích najdeme několik obráběcích center. Pro tento experiment byl zvolen stroj DMU 40 eVo linear, tedy 5 osé obráběcí centrum. Zvolen byl z důvodu možnosti plynulých změn řezných podmínek a také z důvodu obrábění v 5 osách. Plynulé změny řezných podmínek jsou zaručeny díky lineárním pohonům obráběcího centra. Obrábění v 5 osách zabezpečuje pohon vřeteníku a současně obráběcí hlavy, díky čemuž je stroj vhodný na obrábění kulových ploch. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry stroje a na obrázku 19 vzhled stroje.



Obrázek 19 - Obráběcí centrum DMU 40 eVo linear

| Parametry stroje | |
|------------------------------|------------------------------|
| max. pracovní pojezd v ose x | 400 mm |
| max. pracovní pojezd v ose y | 400 mm |
| max. pracovní pojezd v ose z | 375 mm |
| max. zatížení stolu | 250 kg |
| průměr stolu | 480 mm |
| pracovní prostor v ose x; y | 550 mm |
| pracovní prostor v ose z | 400 mm |
| rozsah naklonění stolu | -5° až + 110° |
| rozsah otočení stolu | 360° |
| max. otáčky stolu | 1 200 ot/min |
| max. otáčky vřetene | 20 000 ot/min |
| výkon pohonu | 25 kW (AC) |
| točivý moment | 87 Nm |
| kapacita zásobníku nástrojů | 30 |
| rozměry stroje (d; h; v) | 2 050 mm; 2815 mm; 2530mm |

Tabulka 4 - parametry stroje DMU 40 eVo linear [26]

4.4 Nástroj

Pro tento experiment byla zvolena dvoubřitá frézka s výměnnými břitovými destičkami. Dle předchozích experimentů byly zvoleny výměnné břitové destičky RNGN 120400 LX11 od firmy Tungaloy pro obrábění tvrdých materiálů, fotografie výměnných břitových destiček je na obrázku 20. Dle kódu můžeme určit, že se jedná o kruhovou destičku s 0° úhlem břitu, třídy přesnosti G bez díry a utvařeče třísky. Destičky mají doporučené hodnoty řezných podmínek $f = 0,05-0,3 \text{ mm/ot}$ a $v_c = 50-150 \text{ m/min}$. Výměnná břitová destička byla rozdělena na pět výsečí pro obrábění pěti vzorků, aby nebyla narušena konzistentnost destičky.



Obrázek 20 – Výměnná břitová destička RNGN 120400 LX11

Nosič břitových destiček je typizovaný nástroj z katalogu Sandvik Coromant. Destička je uchycena do frézy upínacím systémem C (viz obrázek 21).



Obrázek 21 - Dvoubřítá fréza s břitovou destičkou LX11

Nosič břitových destiček byl upnutý do upínacích sklíčidel s rozpínatelnými pouzdry. Celý nástroj můžeme vidět na obrázku 22.



Obrázek 22 - Upnuté sklíčidlo s nosičem VBD a VBD LX11

4.5 Obrobek

Obrobkem (obr. 23), jak již bylo zmíněno výše, je kulová plocha o rozměru $R = 24,75$ mm s žárovým nástřikem Cr-Ni-B-Si o tloušťce 0,5 mm. Rozměr kulové plochy s žárovým nástřikem je $R = 25,25$ mm. Výsledný rozměr po obrobení je $R = 25$ mm. Na přání zadavatele není možné uvést v této práci výkres vzorku. Hloubka řezu je určena výsledným rozměrem vzorku, $a_p = 0,25$ mm. Základní materiál kulové plochy je ocel ČSN 16 343 (34CrNiMo6), obsah prvků je v tabulce 5. Ocel ČSN 16343 je obtížně svařitelná, žárupevná, vhodná pro kloubové hřídele, kompresorová a turbínová kola a unašeče trakčních motorů. [11]

| | C | Mn | Si max. | P max. | S max. | Cr | Mo | Ni |
|---|-----------|---------|---------|--------|--------|---------|-----------|---------|
| % | 0,30-0,38 | 0,5-0,8 | 0,4 | 0,035 | 0,035 | 1,3-1,7 | 1,15-1,30 | 1,3-1,7 |

Tabulka 5 - Chemické složení ČSN 16343 dle ČSN EN 10083-1 [13]



Obrázek 23 - Obrobek

Nástřík Cr-Ni-B-Si probíhal pomocí metody HVOF, o které jste se mohli dočíst více v teoretické části práce. Tento nástřík má chemické složení, viz tabulka 6. Nástřík má vynikající odolnost proti opotřebení a korozi v různých provozních médiích. Vrstvy nástříku jsou odolné abrazivnímu opotřebení, erozi a kavitaci. Tvrdost vrstvy je 60 HRC. [12]

| | C | Cr | Ni | Si | Fe | B |
|---|------|-----|------|-----|-----|-----|
| % | 0,25 | 7,5 | rest | 3,5 | 2,5 | 1,7 |

Tabulka 6 – Tabulkové chemické složení povlaku Cr-Ni-B-Si [12]

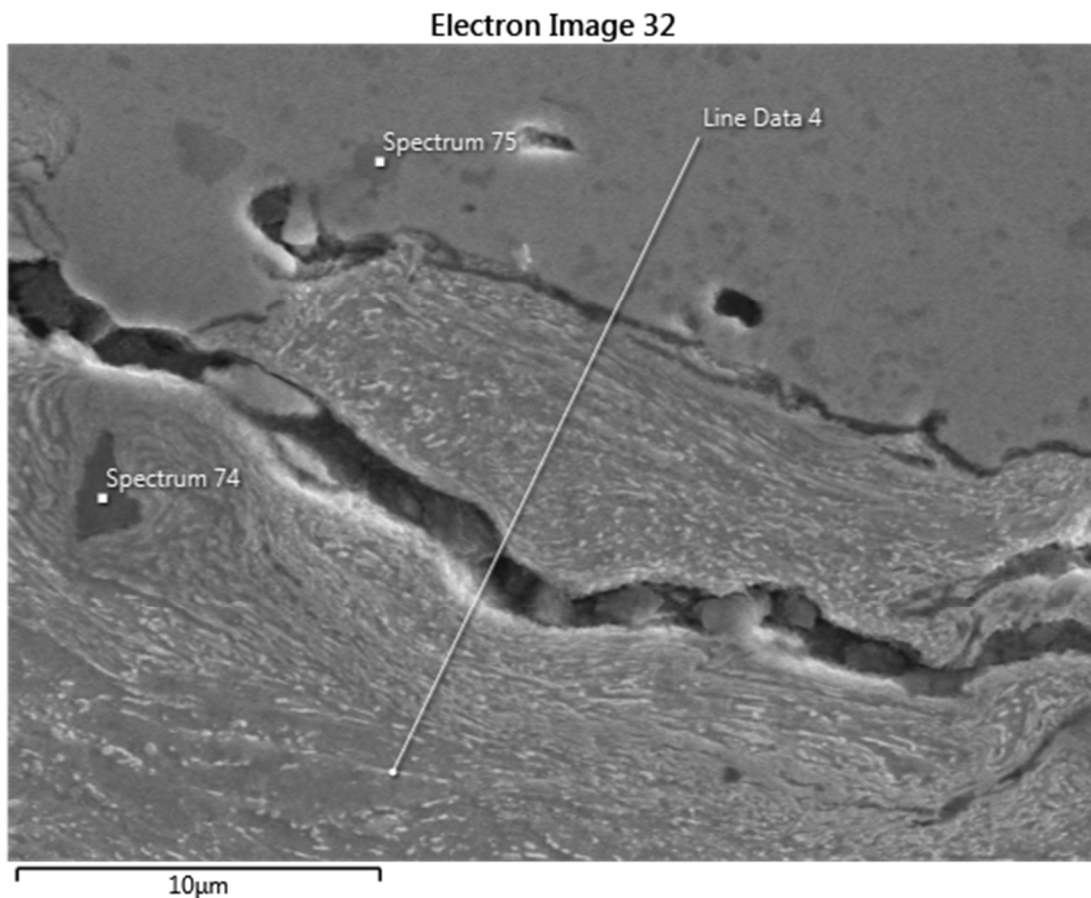
Rozbor povlaku byl proveden na katedře materiálového inženýrství strojní fakulty ZČU.



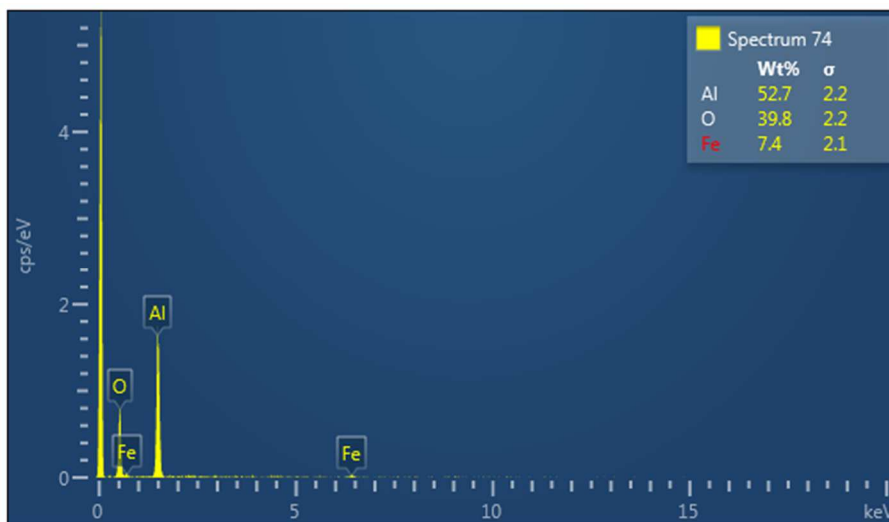
Obrázek 24 - Řez obrobku leptaný pod světelným mikroskopem 100x zvětšený

Na obrázku 24 můžeme vidět leptaný řez jedním obrobkem 100x zvětšený pod světelným mikroskopem. Na vrstvě můžeme pozorovat její konzistentnost, napojení na základní materiál obrobku i absenci pórů. Můžeme tedy říci, že vrstva žárového nástřiku byla provedena správně a její špatné provedení nebude ovlivňovat experiment.

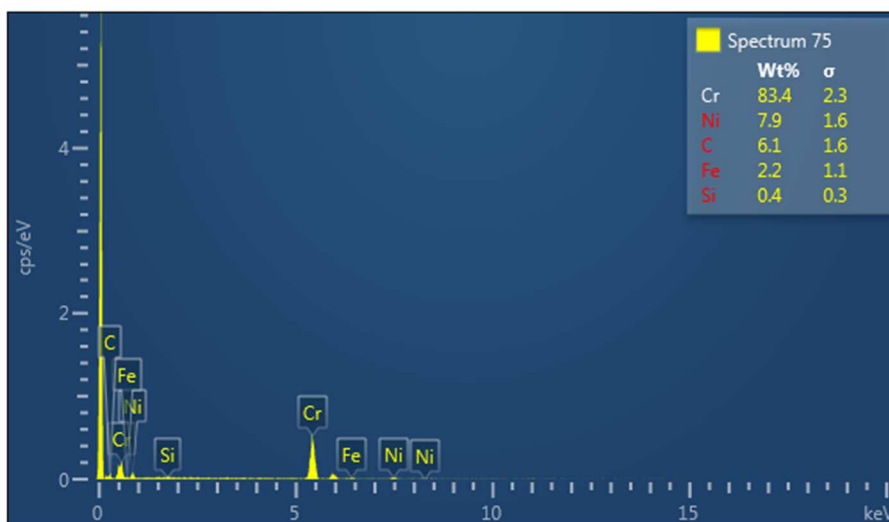
Obrázek 25 nám zobrazuje 10 000x zvětšený řez nastříkanou vrstvou s metalurgickým rozbohem jednotlivých částí (obr. 26, 27, 28). Díky velkému zvětšení můžeme pozorovat vysoké procentuální množství jednotlivých prvků žárového nástřiku. Pokud bychom pracovali s průměrnou hodnotou těchto množství, dostali bychom přibližně tabulkové hodnoty.



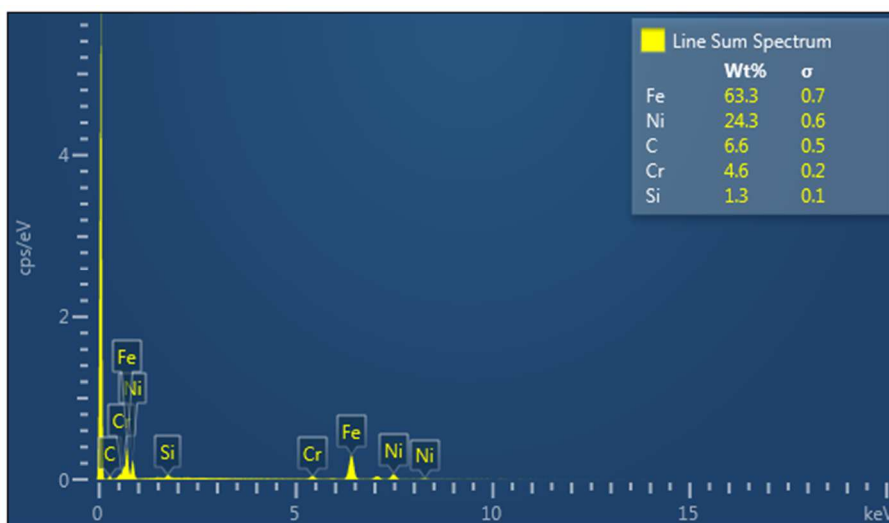
Obrázek 25 - Řez žárovým nástřikem 10 000x zvětšený



Obrázek 26 - Metalurgický rozbor "Spectrum 74"



Obrázek 27 - Metalurgický rozbor "Spectrum 75"



Obrázek 28 - Metalurgický rozbor "Line Sum Spectrum"

4.6 Přípravek

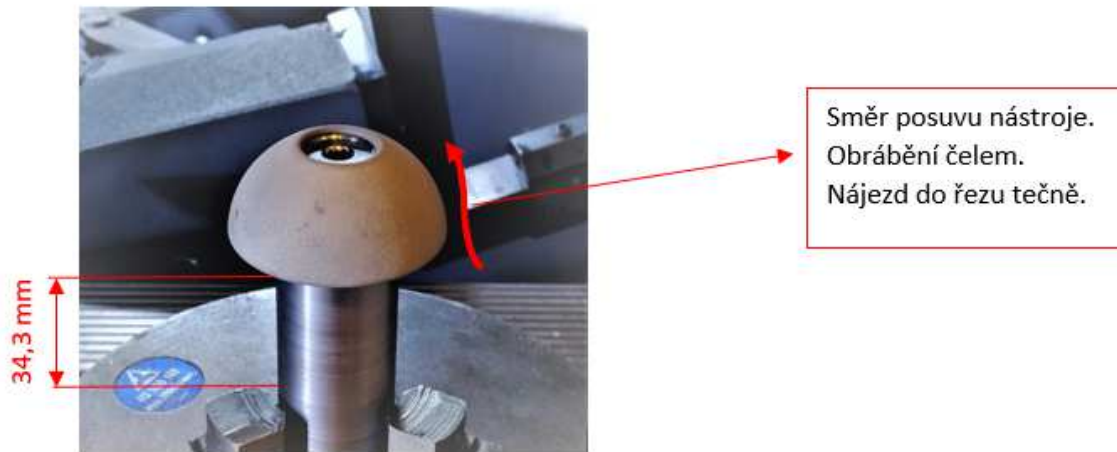
Pro tento experiment bylo nutné vyrobit přípravek (obr. 29), aby bylo možné kulovou plochu bezpečně obrábět. Přípravkem je speciálně obrobená tyč. Horní část přípravku je rozpěrný trn se závitem. Rozpínání trnu se docílí pomocí šroubu utahovaného dovnitř tyče. Tímto způsobem upínání je docíleno velké stykové plochy a bezpečného upnutí.



Obrázek 29 - Přípravek pro obrábění kulové plochy upnutý ve sklíčidle

4.7 Technologie obrábění

Dle zkušeností z obrábění materiálů byl zvolen obráběcí program „konstant Z“. Tento program má strategii obrábění po spirále s finálním průměrem koule 50 mm. Obráběno bylo čelem nástroje s tečným nájezdem do řezu (viz obrázek 30). Vyložení upnutého obrobku bylo nastaveno na 34,3 mm (vzdálenost od čelisti po spodní hranu koule).



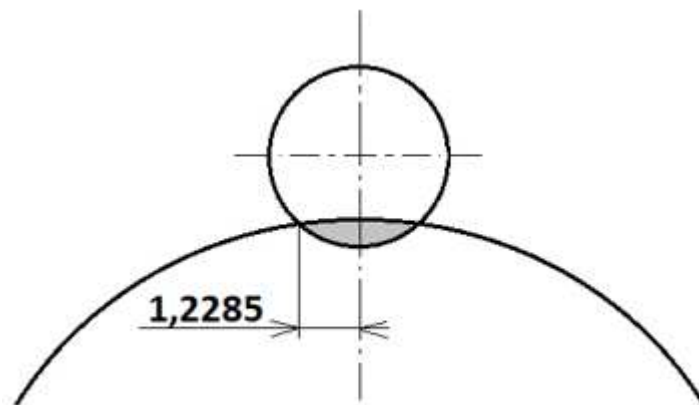
Obrázek 30 - Strategie obrábění vzorku

Jak bylo napsáno výše, řezná rychlost byla konstantní. Pro její správné nastavení při obrábění je nutné znát reálný průměr obráběcího nástroje.

Výpočet reálného průměru nástroje:

- průměr nástroje $\text{Ø}32 \text{ mm}$
- průměr VBD $\text{Ø}12,7 \text{ mm}$
- řezná šířka VBD $1,2285 \text{ mm}$ (viz obr. 27)

$$32 - 12,7 + (2 * 1,2285) = 21,76 \text{ mm}$$



Obrázek 31 - Znázornění řezné šířky VBD

4.8 Řezné podmínky

Řezná rychlost byla v tomto experimentu konstantní, tedy neovlivnitelný faktor $v_c = 500 \text{ m/min}$. Ovlivnitelnými faktory jsou v tomto experimentu šířka řezu a_e a posuv f_z . Tyto faktory budeme měnit dle programového plánu, který se dělí na preexperiment a experiment dle faktorového plánu.

5 Experiment

5.1 Průběh experimentu

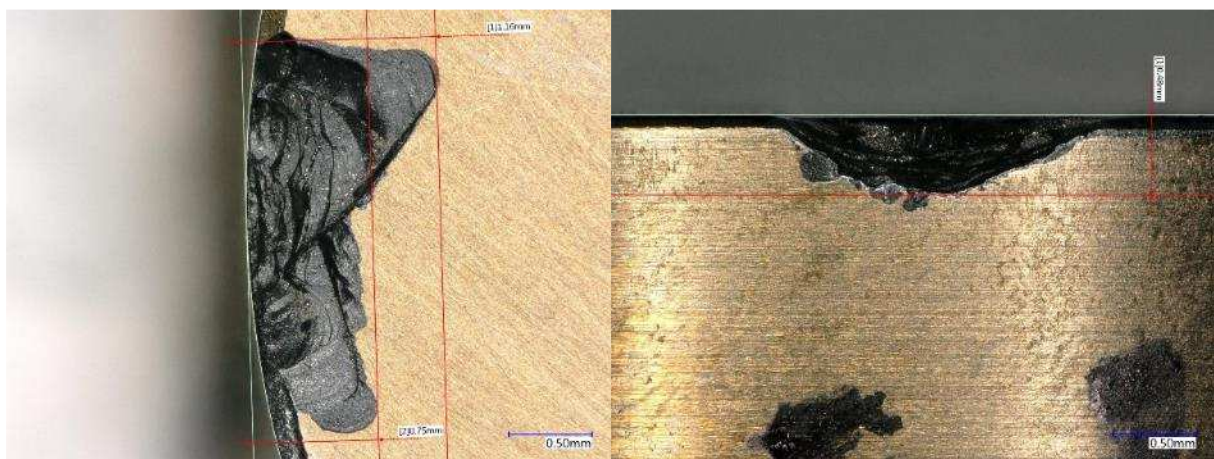
V této podkapitole si popíšeme blíže programový plán experimentu (tab. 7). U jednotlivých programů neuvažovaných ve faktorovém plánu bude uveden jejich výsledek na řezný břit ve vazbě na obráběcí faktory v_c , f_z , a_e .

| prog. | v_c [m/min] | n [ot/min] | a_e [mm] | f_z [mm] | v_f [mm/min] | opotřebení břit. | důvod |
|-------|---------------|--------------|------------|------------|----------------|---------------------|-------|
| 1 | 700 | 10 245 | 0,15 | 0,15 | 3 074 | vylámaný | ad. 1 |
| 2 | 450 | 6 582 | 0,15 | 0,15 | 1 975 | vrub | ad. 2 |
| 3 | 500 | 7 313 | 0,15 | 0,15 | 2 194 | vylomený | ad. 3 |
| 4 | 400 | 5 815 | 0,15 | 0,15 | 1 755 | min. opotř. | ad. 4 |
| 5 | 500 | 7 313 | 0,2 | 0,2 | 1 755 | faktorový plán | |
| 6 | 500 | 7 313 | 0,1 | 0,1 | 1 463 | obroušení | ad. 5 |
| 7 | 500 | 7 313 | 0,25 | 0,25 | 3 657 | faktorový plán | |
| 8 | 500 | 7 313 | 0,3 | 0,3 | 4 388 | faktorový plán | |
| 9 | 500 | 7 313 | 0,25 | 0,2 | 2 925 | faktorový plán | |
| 10 | 500 | 7 313 | 0,3 | 0,2 | 2 925 | faktorový plán | |
| 11 | 500 | 7 313 | 0,2 | 0,25 | 3 657 | faktorový plán | |
| 12 | 500 | 7 313 | 0,3 | 0,25 | 3 657 | faktorový plán | |
| 13 | 500 | 7 313 | 0,2 | 0,3 | 4 388 | faktorový plán | |
| 14 | 500 | 7 313 | 0,25 | 0,3 | 4 388 | faktorový plán | |
| 15 | 500 | 7 313 | 0,25 | 0,25 | 3 657 | faktorový plán | |
| 16 | 500 | 7 313 | 0,25 | 0,25 | 3 657 | vylámaný | ad. 6 |

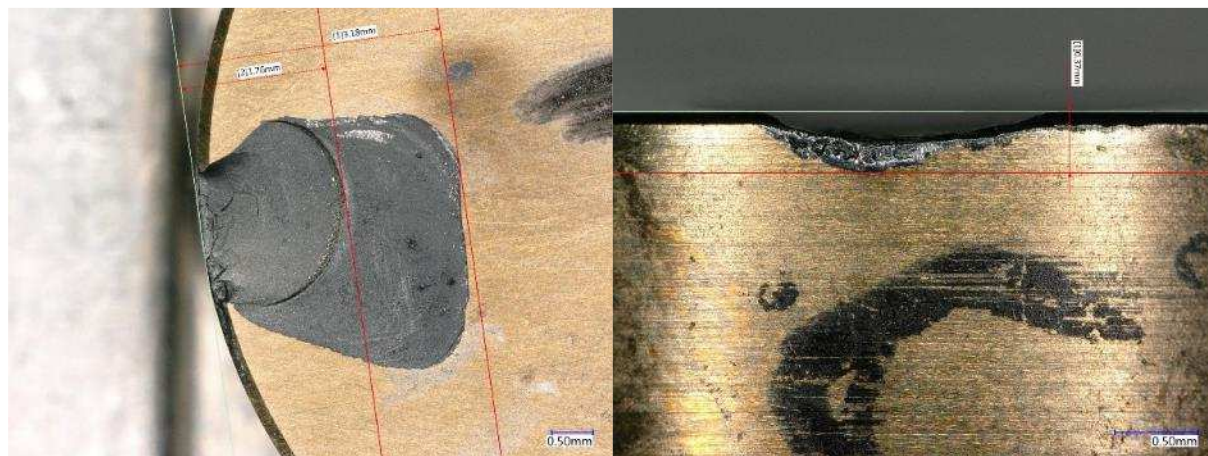
Tabulka 7 - Programový plán experimentu

Prvotně si na fotografiích obráběcích destiček použitých při experimentu představíme možná opotřebení destiček po obrábění.

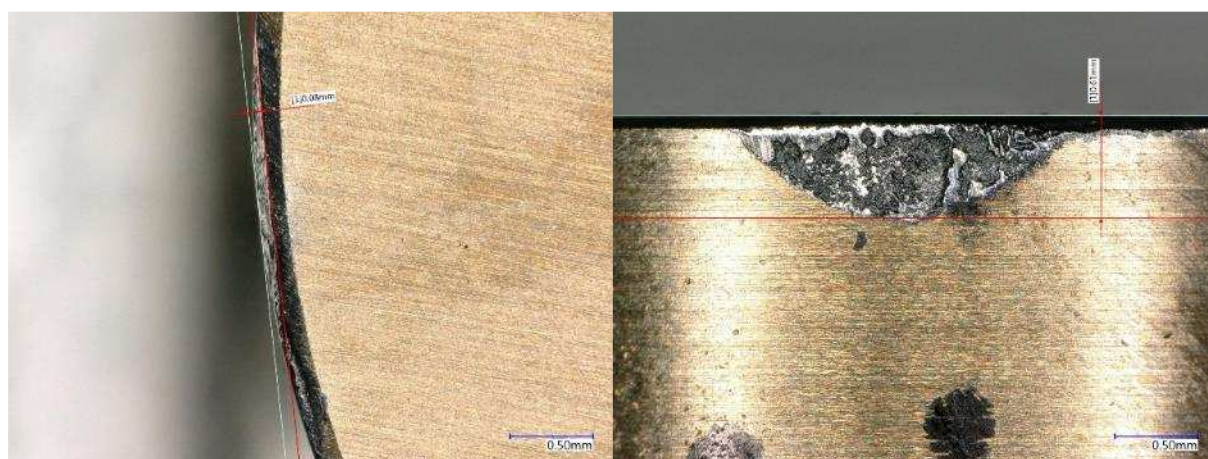
5.2 Opotřebení na destičkách po obrábění



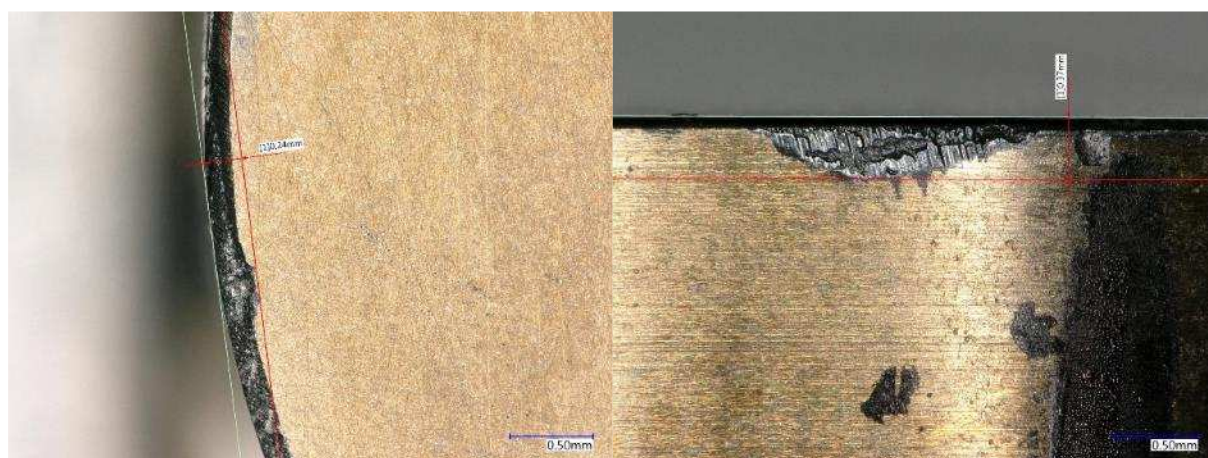
Obrázek 32 – Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - vylámaný břit destičky



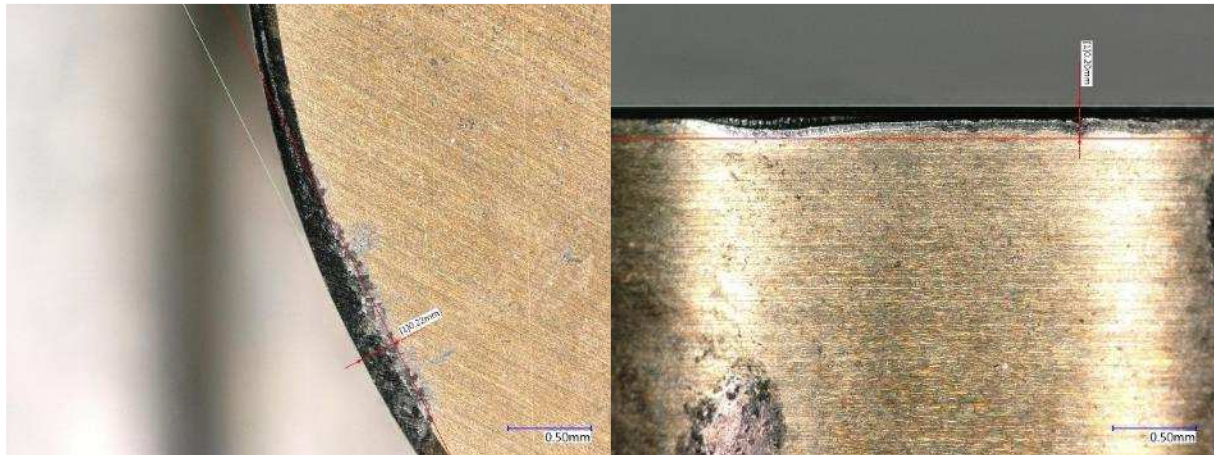
Obrázek 33 – Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - vylomný břit destičky



Obrázek 34 - Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - obroušený hřbet břitové destičky



Obrázek 35 - Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - vrub na břitu destičky a obroušení hřbetu



Obrázek 36 - Čelo a hřbet obráběcí destičky LX11 - minimální opotřebení

5.3 Vyhodnocení preexperimentu

ad. 1 (program 1)

Při obrábění došlo k vylámaní řezného břitu (obr. 32) vlivem vysoké řezné rychlosti i při nižších parametrech posuvu a šířky řezu. Díky tomuto výsledku můžeme říct, že kladná odchylka od teoreticky vypočtené řezné rychlosti má výrazný vliv na životnost řezného břitu. Zvýšení řezné rychlosti (v tomto případě o 200 m/min (40%)) způsobí nevratné poškození řezného břitu za hranicí možného použití řezného břitu pro další vzorky. Povrch dílu byl mírně oskákáný, bohužel u těchto dílů nebyla měřena kvalita povrchu. Přesto, když porovnáme 6 vzorků mimo faktorový plán, výsledný povrch tohoto vzorku patřil do lepší poloviny. Tyto parametry vyhodnocujeme jako nevhodné.

ad. 2 (program 2)

Po obrobení byl na VBD patrný vrub (obr. 35) a současně byl povrch vzorku oskákáný. V tomto případě by se mohlo zdát, že poškození břitu je způsobené nízkou obráběcí rychlostí. Když se ale podíváme do tabulky na vzorek č. 4, tak při stejných parametrech šířky řezu a posuvu a při nižší rychlosti obrábění je břitová destička minimálně opotřebená. Ohledně kvality obrobeného povrchu byl povrch v obou případech oskákáný. Můžeme tedy říct, že snížení parametrů pod teoreticky vypočtenou hodnotu nám negativně ovlivní povrch obrobku. Vrub na destičce může být dán horší kvalitou břitu, ale pro toto ověření by bylo potřeba provést více pokusů při stejných parametrech. Tyto parametry vyhodnocujeme jako nevhodné.

ad. 3 (program 3)

Při obrábění došlo k vylomení řezného břitu. Při tomto pokusu byla použita řezná rychlost jako u dílů ve faktorovém plánu, sníženy byly parametry šířky řezu a posuvu. Přesto se parametry nejvíce podobají parametrům teoreticky vypočteným. Poškození destičky č. 1 bylo přesto výrazné, došlo k vylomení velké části břitu a čela břitové destičky (obr. 33). Naopak destička č. 2 vykazovala po obrobení minimální opotřebení (obr. 36). Povrch obrobené kulové plochy byl nejlepší z realizovaných pokusů mimo faktorový plán. Díky těmto poznatkům by se vylomení velké části břitu dalo vyložit jako vada materiálu břitové destičky.

ad. 4 (program 4)

Jak již bylo zmíněno u vzorku č. 2, po obrobení byly na povrchu vzorku viditelné vytrhané kousky nástříku. Při tomto programu byla použita nejnižší řezná rychlost a současně nižší hodnoty šířky řezu oproti hodnotám teoreticky vypočteným. Jako u vzorku č. 2 můžeme říci, že snížení parametrů obrábění negativně ovlivní výsledný povrch obrobku. Opotřebením břitových destiček bylo v tomto případě minimální (obr. 36), což je pozitivní informace, ale z důvodu poškození na povrchu obrobku, tyto parametry vyhodnocujeme jako nevhodné.

ad. 5 (program 6)

Tento pokus probíhal při použití teoreticky vypočtené řezné rychlosti, ale výrazně nižších parametrech šířky řezu a posuvu oproti hodnotám vypočteným. Díky nižším hodnotám posuvu se nám snížila i posuvová rychlost. Nejnižší posuvová rychlost se podepsala na hřbetu destičky, kdy byl hřbet po obrábění silně obroušen (obr. 34). Obroušené byly obě břitové destičky. Výsledný povrch obrobku patřil do lepší poloviny dle vizuálního posouzení. Díky výraznému poškození břitových destiček vyhodnocujeme tyto parametry jako nevhodné.

ad. 6 (program 16)

Při obrábění posledního vzorku byly použity břity stejné jako u vzorku č. 15. I když byly použity parametry obrábění z faktorového plánu, tedy parametry teoreticky vypočtené a teoreticky vhodné, tak byly oba břity výrazně vylámané, více než na obr. 32. Tento stav byl způsoben dvojnásobnou délkou řezné dráhy. Povrch obrobku byl po obrobení a vizuálním posouzení nejhorší, ale při stavu destiček po obrobení se nebylo čemu divit. Díky tomuto vzorku můžeme říci, že i při použití teoreticky vhodných parametrů pro obrábění, není prozatím možné obrobřit jednou sadou břitů více vzorků.

5.4 Faktorový plán experimentu

Nyní dojde k vyhodnocení dat uvažovaných ve faktorovém plánu. Faktorový plán nám zaručí prověření všech kombinací proměnných faktorů f_z a a_e .

| Číslo vzorku | Proměnné faktory | | Obráběcí program (pokús) |
|--------------|------------------|-------|--------------------------|
| | f_z | a_e | |
| 1. | + 1 | + 1 | 8. |
| 2. | + 1 | - 1 | 13. |
| 3. | - 1 | + 1 | 10. |
| 4. | - 1 | - 1 | 5. |
| 5. | 0 | 0 | 7. |
| 6. | 0 | 0 | 15. |
| 7. | + 1 | 0 | 14. |
| 8. | 0 | + 1 | 12. |
| 9. | 0 | - 1 | 11. |
| 10. | - 1 | 0 | 9. |

Tabulka 8 - Kódovaný faktorový plán

| | - 1 | 0 | + 1 |
|------------|-----|------|-----|
| f_z [mm] | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| a_e [mm] | 0,2 | 0,25 | 0,3 |

Tabulka 9 - Proměnné faktory experimentu

Doplněním proměnných faktorů experimentu z tabulky 9 do kódovaného faktorového plánu (tabulka 8) vznikne tabulka faktorového plánu (tabulka 10).

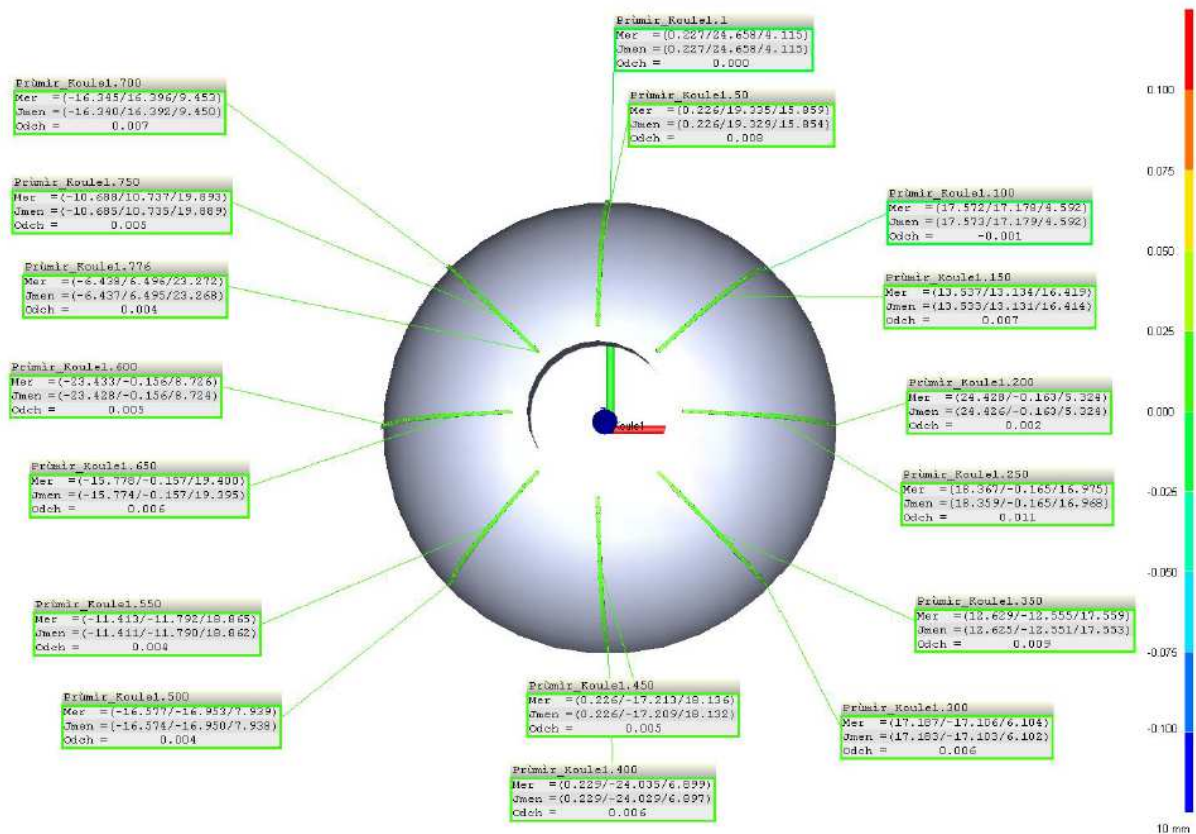
| Číslo vzorku | Proměnné faktory | | Obráběcí program (pokus) |
|--------------|------------------|------------|--------------------------|
| | f_z [mm] | a_e [mm] | |
| 1. | 0,3 | 0,3 | 8. |
| 2. | 0,3 | 0,2 | 13. |
| 3. | 0,2 | 0,3 | 10. |
| 4. | 0,2 | 0,2 | 5. |
| 5. | 0,25 | 0,25 | 7. |
| 6. | 0,25 | 0,25 | 15. |
| 7. | 0,3 | 0,25 | 14. |
| 8. | 0,25 | 0,3 | 12. |
| 9. | 0,25 | 0,2 | 11. |
| 10. | 0,2 | 0,25 | 9. |

Tabulka 10 - Faktorový plán experimentu

5.5 Měření a vyhodnocení rozměru kulové plochy po obrobení

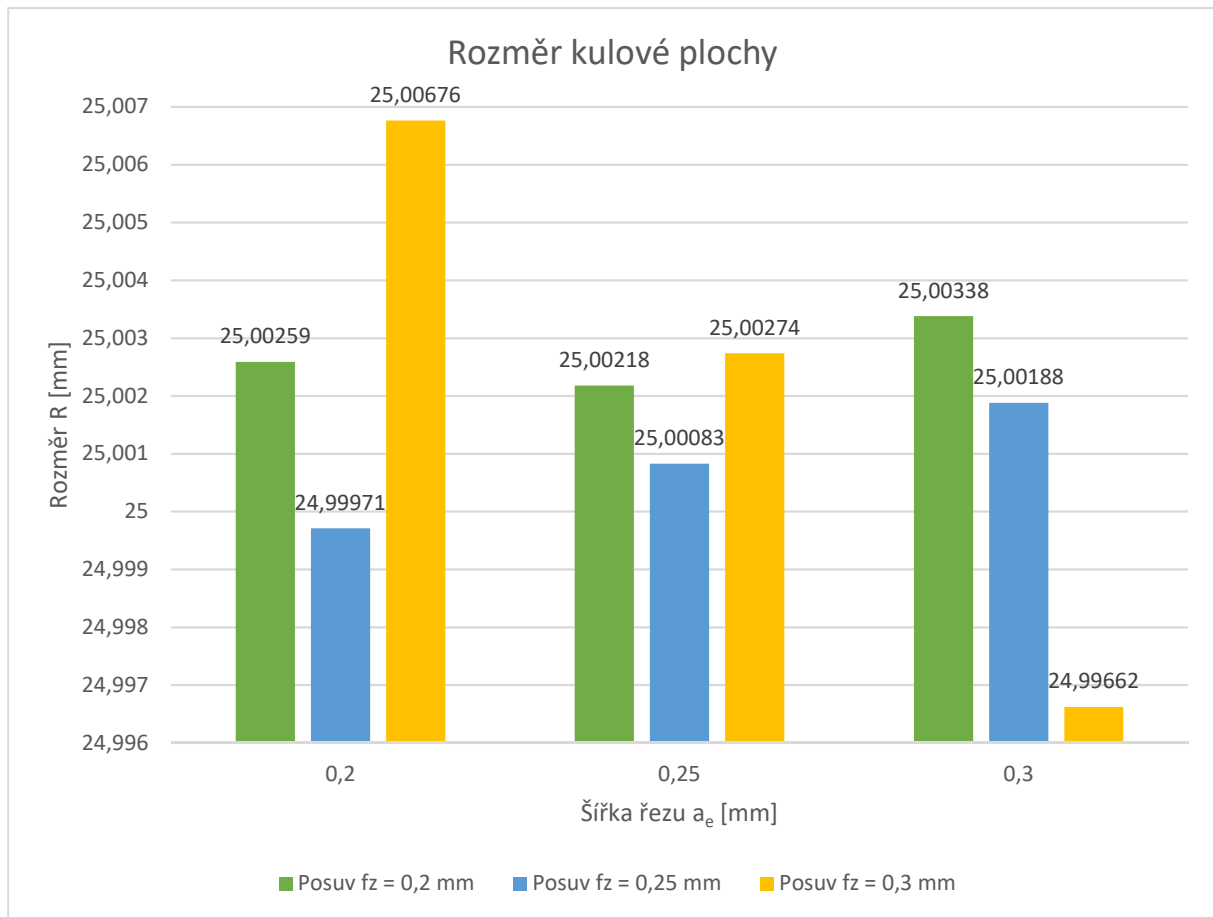
Měření probíhalo v halové laboratoři dílenské metrologie na pracovišti RTI. Pro měření byl použit měřicí přístroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. „PRISMO firmy ZEISS je na celém světě synonymem pro vysokorychlostní skenování a maximální přesnost ve výrobním prostředí. ZEISS PRISMO ultra s maximální dovolenou chybou při měření délky pouze $0,5+L/500$ mikrometru je ideální pro splnění nejvyšších požadavků na přesnost.“ [14]

Kulová plocha byla rozdělena na 8 stejných výsečí pomocí přímek. Na samotných přímkách probíhalo měření rozměru kulové plochy. Zapisovaný rozměr byl každý 50. bod na přímkách. Výsledná hodnota je aritmetický průměr těchto hodnot. Pro upřesnění je přiložen obrázek 37. [15]



Obrázek 37 – Výsledky měření rozměru po obrobení na stroji Zeiss

V příloze práce je k nalezení kompletní protokol pro pokus č. 10 (Příloha č. 1, 2, 3, 4). Z dat takto získaných bylo vytvořeno grafické a tabulkové znázornění. Důvodem pro grafické a současně tabulkové znázornění je dublovaná hodnota pro $f_z = a_e = 0,25$ mm. V grafické podobě (graf 1) je použito aritmetického průměru pro její vyjádření, zatímco v tabulce (tab. 11) jsou hodnoty obě. Zdvojení jedné z hodnot nám může pomoci při ověření správnosti výsledků a vyloučení náhodného jevu při měření i při samotném obrobení. V grafu i tabulce je konstantní složkou řezných podmínek v_c , proměnou složkou řezných podmínek je a_e, f_z .



Graf 1 - Vliv šířky řezu a_e a posuvu f_z na rozměr vzorku při konstantní v_c (500 m/min)

Shrnutí těchto dat můžeme vidět v tabulce 11.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Rozměr vzorku [mm] | Odchylka R = 25 mm [mm] |
|--------------|------------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| 5 | 500 | 0,2 | 0,2 | 25,00259 | 0,00259 |
| 9 | 500 | 0,2 | 0,25 | 25,00218 | 0,00218 |
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 25,00338 | 0,00338 |
| 11 | 500 | 0,25 | 0,2 | 24,99971 | - 0,00029 |
| 7 | 500 | 0,25 | 0,25 | 24,99609 | - 0,00391 |
| 15 | 500 | 0,25 | 0,25 | 25,00556 | 0,00556 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 25,00188 | 0,00188 |
| 13 | 500 | 0,3 | 0,2 | 25,00676 | 0,00676 |
| 14 | 500 | 0,3 | 0,25 | 25,00274 | 0,00274 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 24,99662 | - 0,00338 |

Tabulka 11 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na rozměr vzorku při konstantní v_c

Shrnutí výsledků posouzení vlivu na rozměr při proměnných parametrech f_z a a_e , nám ukazuje, že nejlepších výsledků dosahujeme při obrábění s $f_z = 0,25$ mm a $a_e = 0,2$ mm. Nejhorší

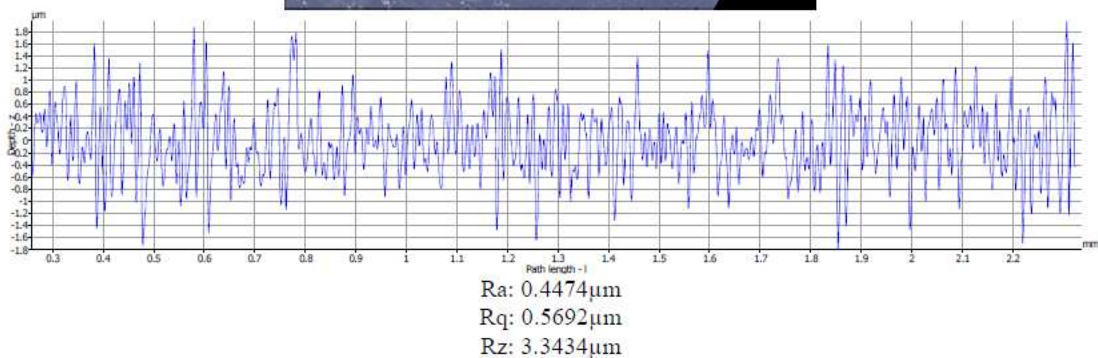
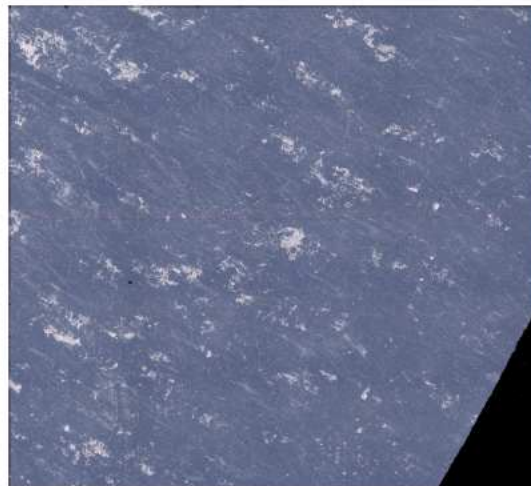
výsledek je při $f_z = 0,3$ mm a $a_e = 0,2$ mm. Díky tomu můžeme říci, že na změnu v rozměru vzorku má větší podíl posuv f_z . Při pohledu na pokus 7 a 15, kdy byly použity stejné parametry obrábění, můžeme říci, že výsledky jsou závislé i na hloubce řezu, jelikož nepravidelné množství žárového nástřiku dle naměřených výsledků změnilo rozměr koule o téměř 0,01 mm, což je při odchylkách naměřených výrazný rozdíl.

5.6 Měření a vyhodnocení drsnosti povrchu kulové plochy po obrobení

Měření probíhalo v halové laboratoři experimentálního obrábění na pracovišti RTI. Pro měření byl použit měřicí přístroj Alicona IFM G4. „Přístroj IFM G4 umožňuje zachytit topografii povrchu včetně její skutečné barevné informace. Hlavní předností přístroje je integrované měření tvaru a drsnosti jak ve 2D, tak i ve 3D, čímž je skloubena funkcionalita několika podobných měřicích zařízení. Výstupem z měření jsou přehledné a názorné protokoly.“ [16] Kompletní data měření rovinné drsnosti pro pokus č. 10 najdete v příloze (Příloha č. 5, 6, 7). Výsledná data z tohoto měření jsou pro parametry R_a , R_z , R_q a nosný podíl. Pro upřesnění formátu dat ze stroje Alicona je přiložen obrázek 38. V našem vyhodnocení budeme pracovat s daty drsnosti R_a , R_z a nosného podílu.

Měřicí protokol Profile Measurement

5_vzorek_FR

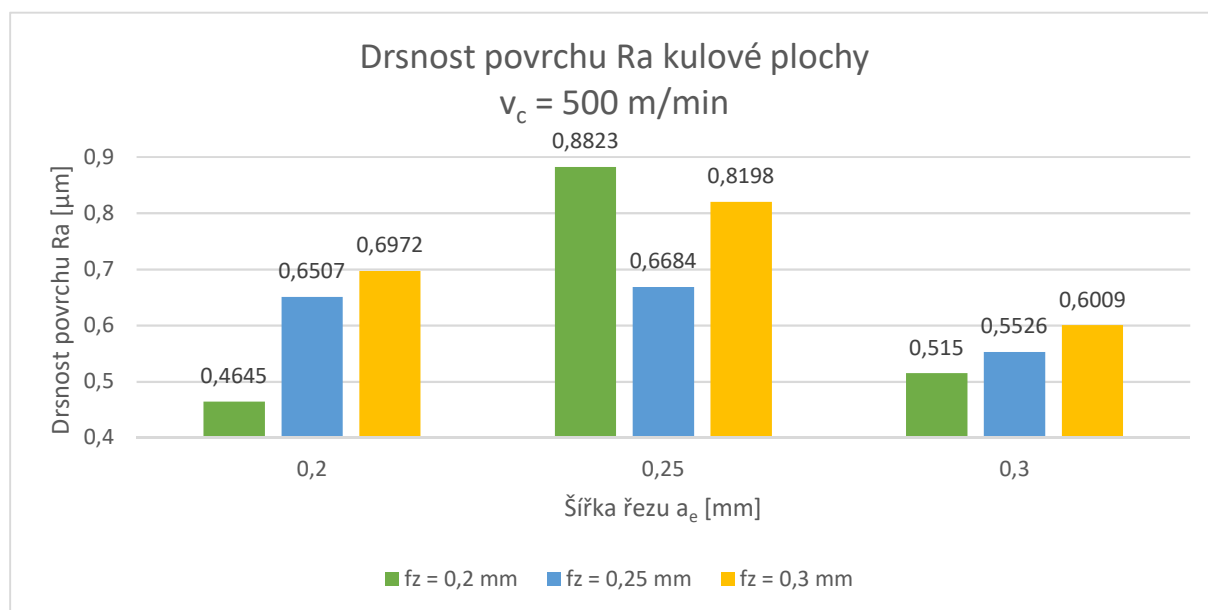


Filter: high pass - roughness profile
Lc:= 250.0000µm

Obrázek 38 - Výsledky měření drsnosti povrchu po obrobení na stroji Alicona

Při měření byly provedeny dva řezy materiálem. Výsledná hodnota je aritmetický průměr těchto hodnot. Z aritmetických průměrů pro jednotlivé součásti bylo vytvořeno grafické (graf 2, 3) a tabulkové (tab. 12, 13) znázornění. Důvodem pro grafické a současně tabulkové znázornění je dublovaná hodnota pro $f_z = a_e = 0,25$ mm. V grafické podobě je použito aritmetického průměru pro její vyjádření, zatímco v tabulce jsou hodnoty obě. Zdvojení jedné z hodnot nám může pomoci pro ověření správnosti výsledků a vyloučení náhodného jevu při měření i při samotném obrábění. V grafu i tabulce je konstantní složkou řezných podmínek v_c , proměnou složkou řezných podmínek je a_e , f_z .

5.6.1 Vyhodnocení drsnosti povrchu Ra kulové plochy po obrobení



Graf 2 - Vliv šířky řezu a_e a posuvu f_z na drsnost povrchu Ra vzorku při konstantní v_c (500 m/min)

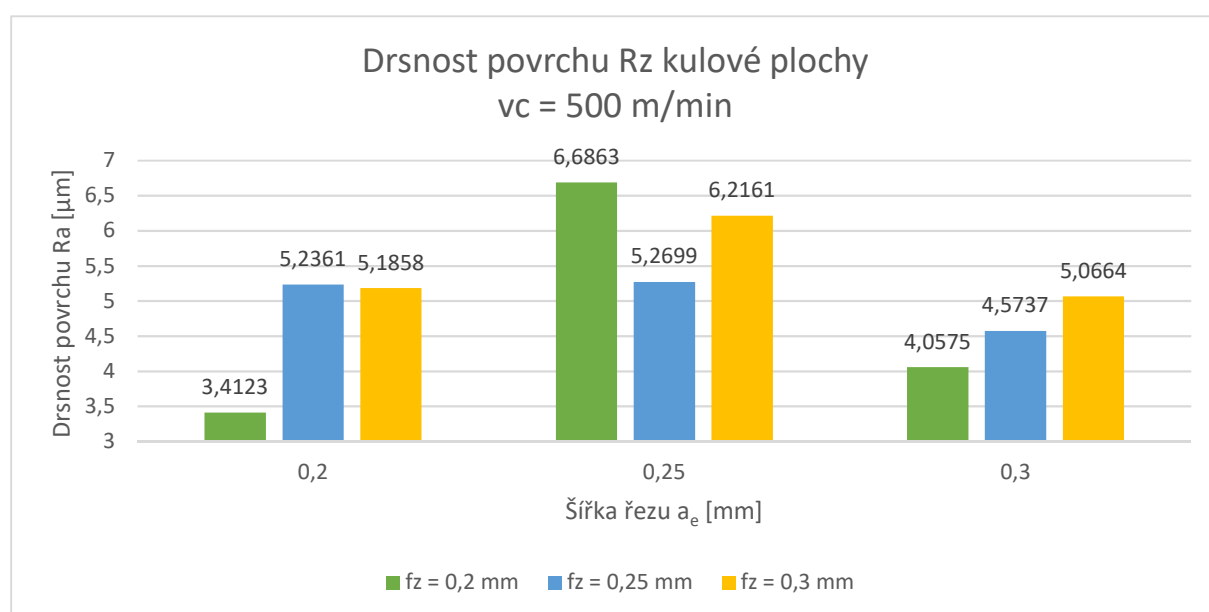
Shrnutí těchto dat můžeme vidět v tabulce 12.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Ra [µm] |
|--------------|------------------|---------------|---------------|------------|
| 5 | 500 | 0,2 | 0,2 | 0,4645 |
| 9 | 500 | 0,2 | 0,25 | 0,8823 |
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 0,5150 |
| 11 | 500 | 0,25 | 0,2 | 0,6507 |
| 7 | 500 | 0,25 | 0,25 | 0,6669 |
| 15 | 500 | 0,25 | 0,25 | 0,6699 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 0,5526 |
| 13 | 500 | 0,3 | 0,2 | 0,6972 |
| 14 | 500 | 0,3 | 0,25 | 0,8198 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 0,6009 |

Tabulka 12 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na drsnost povrchu Ra vzorku při konstantní v_c

Z výsledků můžeme vyčíst, že při posuzování pouze drsnosti Ra je získán nejlepší výsledek u parametrů, posuv $f_z = 0,2$ mm a šířka řezu $a_e = 0,2$ mm. Nejhorší výsledek je u parametrů posuv $f_z = 0,2$ mm a $a_e = 0,25$ mm. Bohužel není z výsledků patrná žádná lineární závislost změny šířky řezu na posuvu a naopak. Jediné, čeho si můžeme všimnout je podobný výsledek drsnosti povrchu Ra u nastaveného posuvu $f_z = 0,25$ mm, při měnící se šířce řezu a_e . Tento ukazatel by nám mohl napovědět, že větší vliv na drsnost povrchu má posuv f_z , ale díky nelineárním výsledkům u posuvů $f_z = 0,2$ mm a $f_z = 0,3$ mm, bychom pro potvrzení tohoto tvrzení potřebovali více pokusů. Když se podíváme na vzorky č. 7 a 15, u kterých jsou nastavené totožné parametry, tak jsou jejich výsledky také téměř totožné. Totožné výsledky při nastavení stejných parametrů v různém čase experimentu hodnotíme velmi kladně, protože nám zaručují možnou opakovatelnost při sériové výrobě.

5.6.2 Vyhodnocení drsnosti povrchu Rz kulové plochy po obrobení



Graf 3 - Vliv šířky řezu a_e a posuvu f_z na drsnost povrchu Rz vzorku při konstantní v_c (500 m/min)

Shrnutí těchto dat můžeme vidět v tabulce 13.

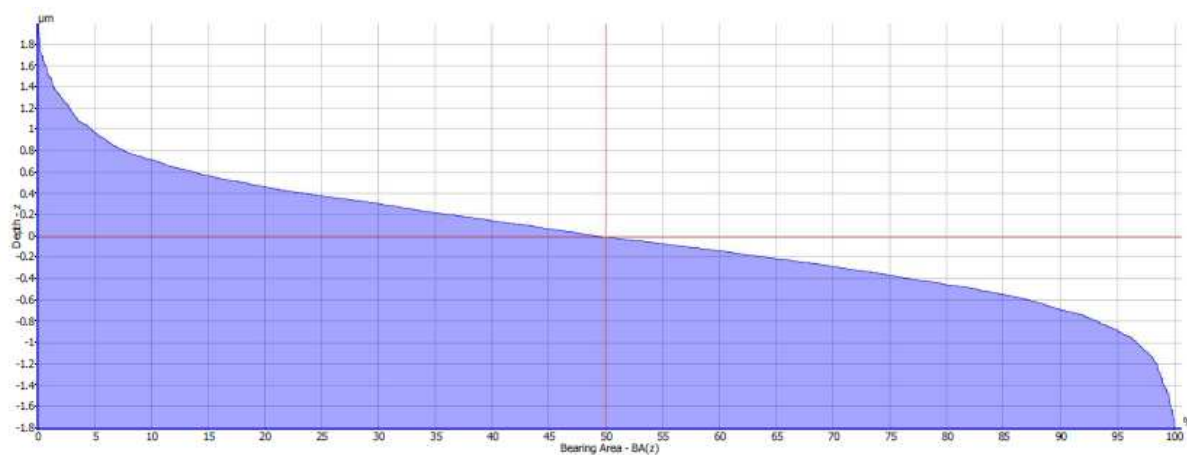
| Číslo pokusu | v_c [mm] | f_z [mm] | a_e [mm] | Rz [μ m] |
|--------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| 5 | 500 | 0,2 | 0,2 | 3,4123 |
| 9 | 500 | 0,2 | 0,25 | 6,6863 |
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 4,0575 |
| 11 | 500 | 0,25 | 0,2 | 5,2361 |
| 7 | 500 | 0,25 | 0,25 | 5,2912 |
| 15 | 500 | 0,25 | 0,25 | 5,2487 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 4,5737 |
| 13 | 500 | 0,3 | 0,2 | 5,1858 |
| 14 | 500 | 0,3 | 0,25 | 6,2161 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 5,0664 |

Tabulka 13 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na drsnost povrchu Rz vzorku při konstantní v_c

Při posuzování pouze drsnosti Rz je získán nejlepší výsledek u parametrů: posuv $f_z = 0,2$ mm a šířka řezu $a_e = 0,2$ mm. Nejhorší výsledek je u parametrů: posuv $f_z = 0,2$ mm a $a_e = 0,25$ mm. Bohužel není z výsledků patrná žádná lineární závislost změny šířky řezu na posuvu a naopak. Výsledky téměř kopírují výsledky drsnosti Ra. Poznatky z výsledků Rz nám neprozrazují žádnou novou informaci, proto je můžeme ve výsledném porovnání zanedbat a používat pouze hodnot Ra. Hodnoty Ra mají v této práci i vyšší opodstatnění, protože je to jedna z hodnot zadaných zákazníkem a dá se dobře posuzovat s hodnotami metody používané pro obrábění zárovňých nástřiků a to je metoda broušení.

5.6.3 Vyhodnocení nosného podílu jednotlivých vzorků

Nosný podíl je graficky vyjádřen pomocí křivky materiálového toku neboli Abbottovi křivky, jak již bylo vysvětleno v teoretické části práce. Na obrázku 39 je vyobrazena křivka vytvořená přímo měřícím strojem Alicona IFM G4 v podobě měřícího protokolu. Kompletní měřící protokol pro pokus č. 10 je k nalezení v příloze (Příloha č. 8, 9, 10).



Measurement line

BA(z) = 50.0000%

z = -0.0126µm

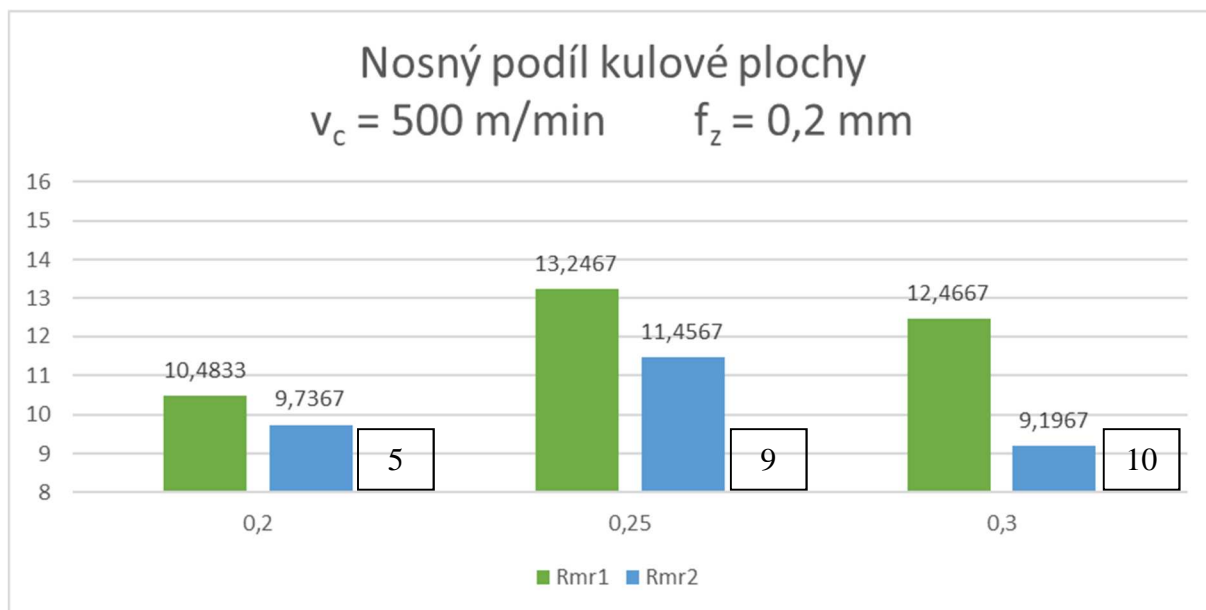
| Name | Value | Unit | Description |
|------|----------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rk | 1.4556 | µm | Core roughness depth, Height of the core material |
| Rpk | 0.6871 | µm | Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material |
| Rvk | 0.5781 | µm | Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material |
| Rmr1 | 9.3900 | % | Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material |
| Rmr2 | 91.4600 | % | Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load |
| l | 2.5809 | mm | Profile Length |
| Lc | 250.0000 | µm | LambdaC: cut off wavelength |

Obrázek 39 - Znázornění nosného podílu vzorku pomocí Abbottovi křivky

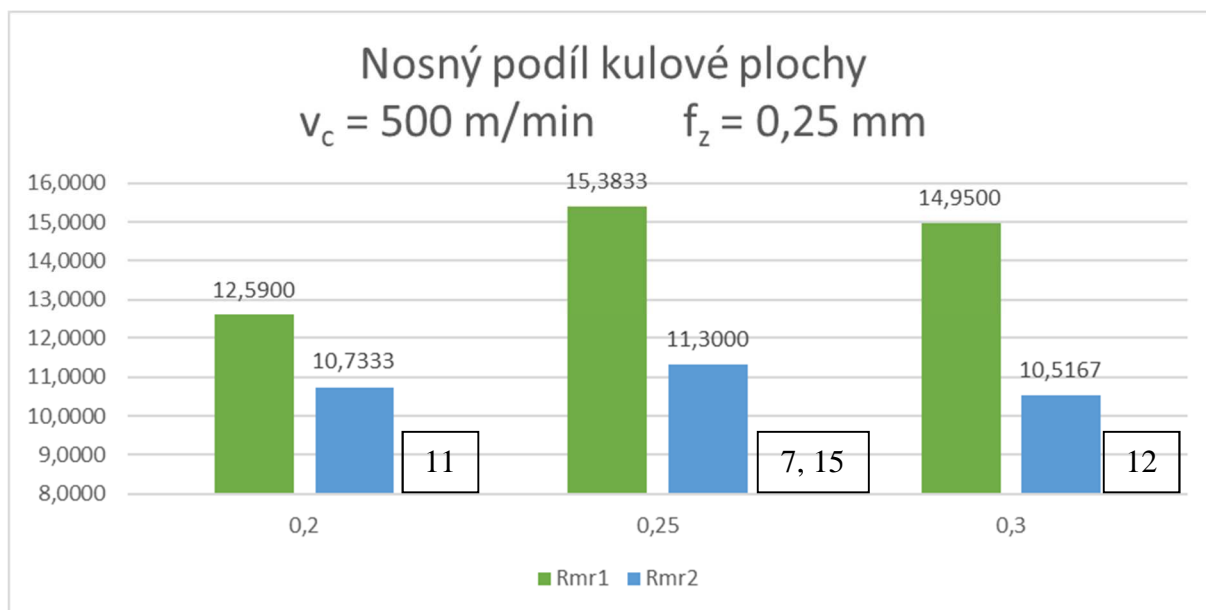
Pro upřesnění hodnota Rmr₂, tedy podíl materiálu pod profilem jádra, není 91,46 %, ale dopočet této hodnoty do 100 %. Výsledná hodnota Rmr₂ je 8,54 %.

Pro potřeby experimentu jsou nejdůležitějšími hodnotami Rmr₁ a Rmr₂, tedy materiálový podíl nad a pod profilem jádra. Pro lepší názornost došlo k rozdělení do třech grafů dle různých f_z . Při měření byly provedeny tři řezy materiálem. Výsledná hodnota je aritmetický průměr

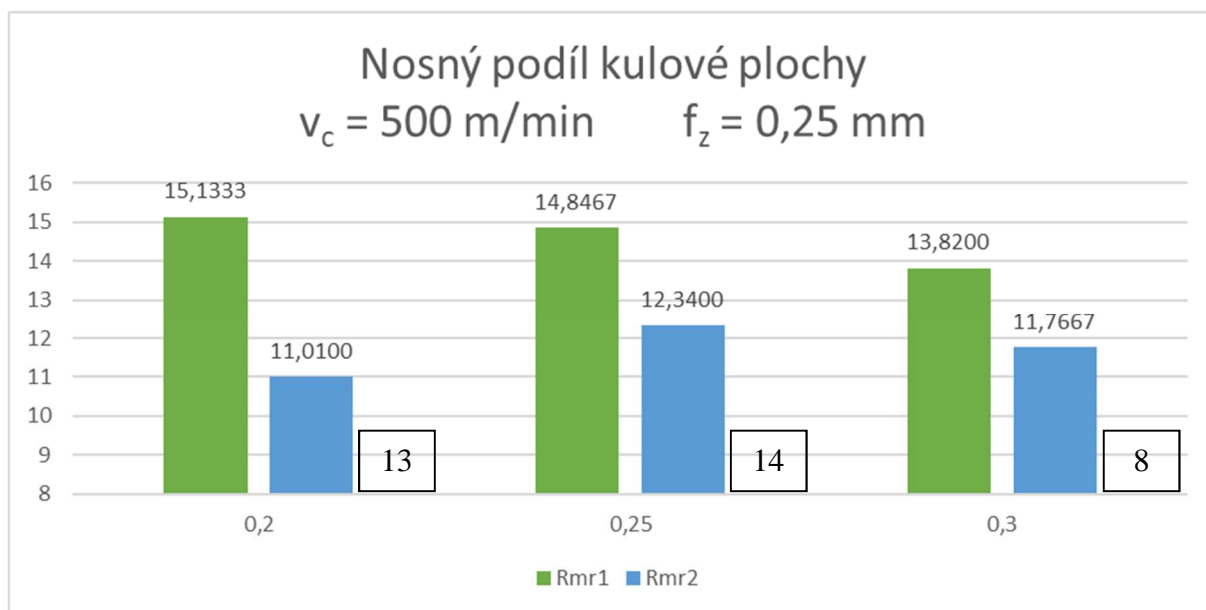
těchto hodnot. Jako v předchozích vyhodnoceních bylo vytvořeno grafické (graf. 4, 5, 6) a tabulkové (tab. 14) znázornění. Důvodem pro grafické a současně tabulkové znázornění je dublovaná hodnota pro $f_z = a_e = 0,25$ mm. V grafické podobě je použito aritmetického průměru pro její vyjádření, zatímco v tabulce jsou hodnoty obě. Zdvojení jedné z hodnot nám může pomoci pro ověření správnosti výsledků a vyloučení náhodného jevu při měření i při samotném obrábění. V grafech je konstantní složkou řezných podmínek v_c a f_z proměnou složkou řezných podmínek je a_e . V tabulce je konstantní složkou řezných podmínek v_c , proměnou složkou řezných podmínek je a_e, f_z .



Graf 4 - Vliv šířky řezu na materiálový podíl nad a pod profilem jádra vzorku při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,2 mm)



Graf 5 - Vliv šířky řezu na materiálový podíl nad a pod profilem jádra vzorku při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,25 mm)



Graf 6 - Vliv šířky řezu na materiálový podíl nad a pod profilem jádra vzorku při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,3 mm)

V tabulce 14 můžeme vidět shrnutí dat z vyhodnocení jednotlivých vzorků.

| Číslo pokusu | v_c [mm] | f_z [mm] | a_e [mm] | Rmr1 [%] | Rmr2 [%] |
|--------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| 5 | 500 | 0,2 | 0,2 | 10,4833 | 9,7367 |
| 9 | 500 | 0,2 | 0,25 | 13,2467 | 11,4567 |
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 12,4667 | 9,1967 |
| 11 | 500 | 0,25 | 0,2 | 15,1333 | 11,0100 |
| 7 | 500 | 0,25 | 0,25 | 14,8467 | 12,3400 |
| 15 | 500 | 0,25 | 0,25 | 13,9067 | 10,9333 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 13,8200 | 11,7667 |
| 13 | 500 | 0,3 | 0,2 | 15,1333 | 11,0100 |
| 14 | 500 | 0,3 | 0,25 | 14,8467 | 12,3400 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 13,8200 | 11,7667 |

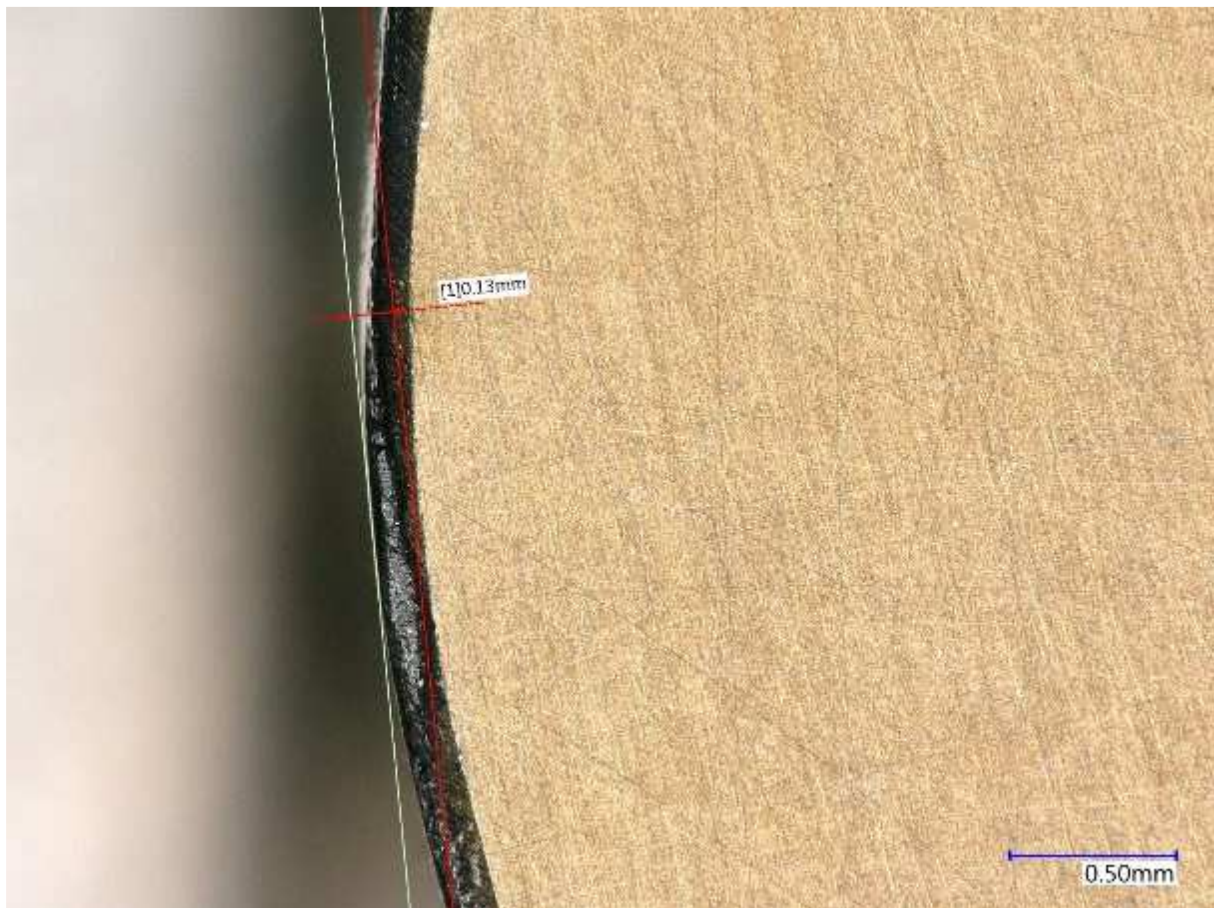
Tabulka 14 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na materiálový podíl nad a pod profilem jádra při konstantní v_c

Dle vyhodnocených výsledků můžeme říci, že povrch vzorku má více hrotů než rýh. Z toho důvodu bude doporučena dokončovací operace zabíhání, díky které dojde ke zploštění hrotů, aby při použití v kloubovém mechanismu nedošlo k otisku hrotů do protikusu kloubu. Výsledky nám korespondují s výsledky drsnosti R_a , proto si můžeme dovojit je ve výsledném porovnání zanedbat stejně jako hodnoty R_z . Můžeme si všimnout větší rovnoměrnosti výsledků oproti drsnosti R_a , což je dalším důvodem pro možné zanedbání těchto výsledků ve výsledném porovnání.

5.7 Měření a vyhodnocení opotřebení VBD LX11

Opotřebení výměnných břitových destiček LX11 bylo prováděno v halové laboratoři experimentálního obrábění na pracovišti RTI. Pro měření byl použit digitální mikroskop Keyence VHX6000. Vyhodnocení opotřebení výměnných břitových destiček není prováděno strojem, ale ručně za pomoci stroje. Hlavním rozdílem je v posuzování velikosti opotřebení, kdy linie opotřebení kreslí operátor, zatímco při měření drsnosti, měření i vyhodnocení provádí software. Z toho důvodu musí celé měření experimentu provádět jeden operátor, aby výsledky nebyly zatíženy různým pohledem na posuzovanou oblast.

Pro ukázkou jsou přiloženy obrázky č. 40, 41, na kterých je vidět čelo a hřbet výměnné břitové destičky s rozměry opotřebení, stejně jako výše v podkapitole 5.2.

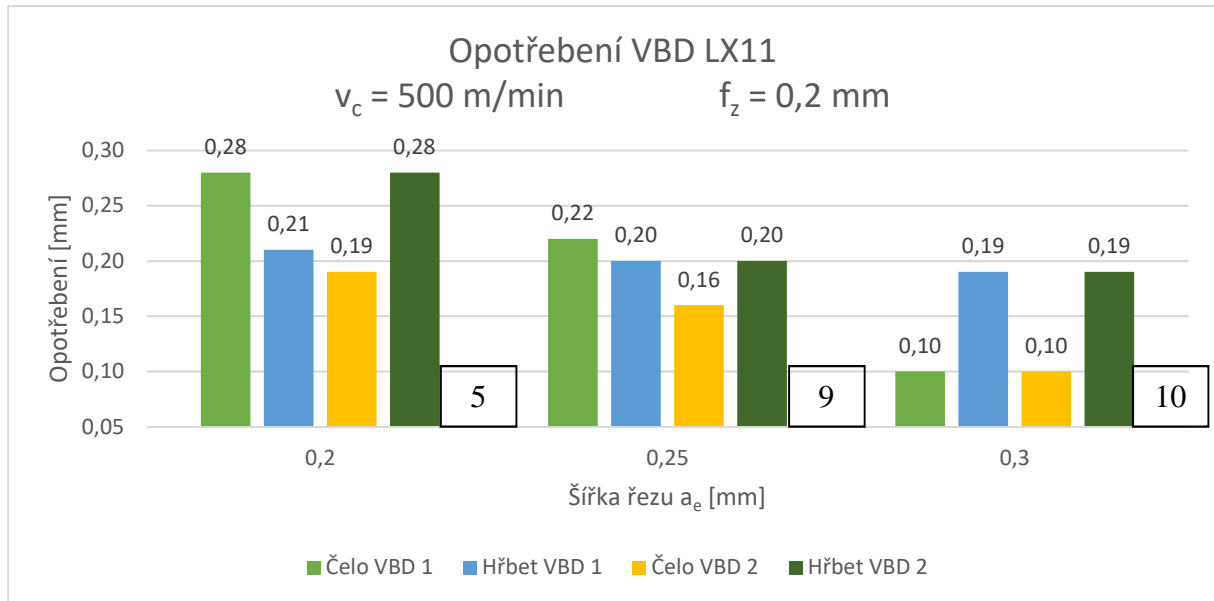


Obrázek 40 - Opotřebení na čele VBD s odměřenou hodnotou opotřebení

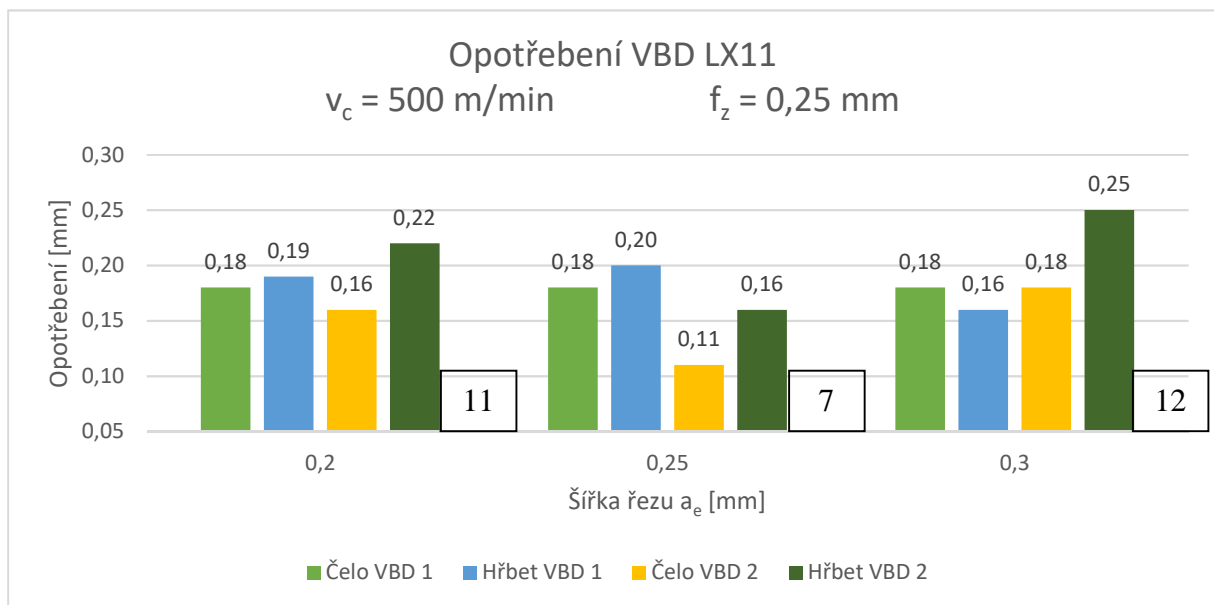


Obrázek 41 - Opotřebení na hřbetu VBD s odměřenou hodnotou opotřebení

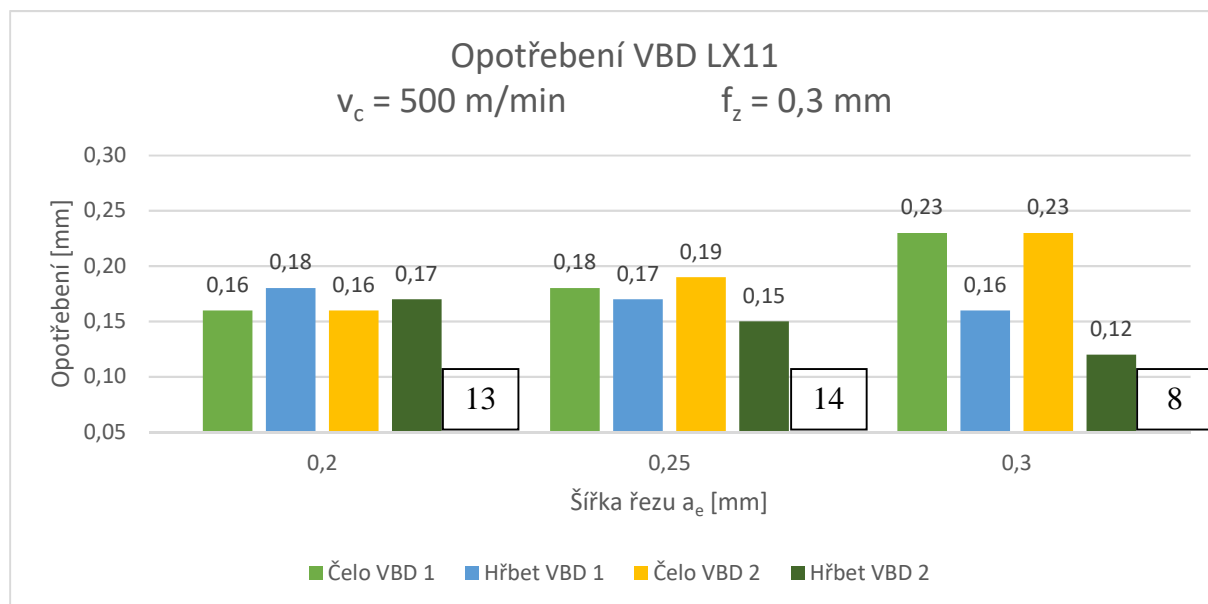
Stejně jako v předešlém případě jsou data vynesena ve třech grafech (graf. 7, 8, 9) pro jejich přehlednost. U tohoto vyhodnocení nepracujeme s aritmetickými průměry jako v předešlých případech, ale přímo s odměřenými maximálními hodnotami opotřebení jednotlivých břitových destiček. V tomto případě není počítána ani hodnota pro parametry posuvu $f_z = 0,25$ mm a šířky řezu $a_e = 0,25$ mm jako aritmetický průměr, jelikož s destičkou pro pokus č. 15 byl obroben i pokus č. 16 a tudíž je z vyhodnocení vynechána. Hodnoty jsou sumarizovány v tabulce (tab. 15) i přes absenci dublované položky, pro vzájemné porovnání obou proměnných složek f_z , a_e .



Graf 7 - Vliv šířky řezu a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,2 mm)



Graf 8 - Vliv šířky řezu a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,25 mm)



Graf 9 - Vliv šířky řezu a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c (500 m/min) a f_z (0,3 mm)

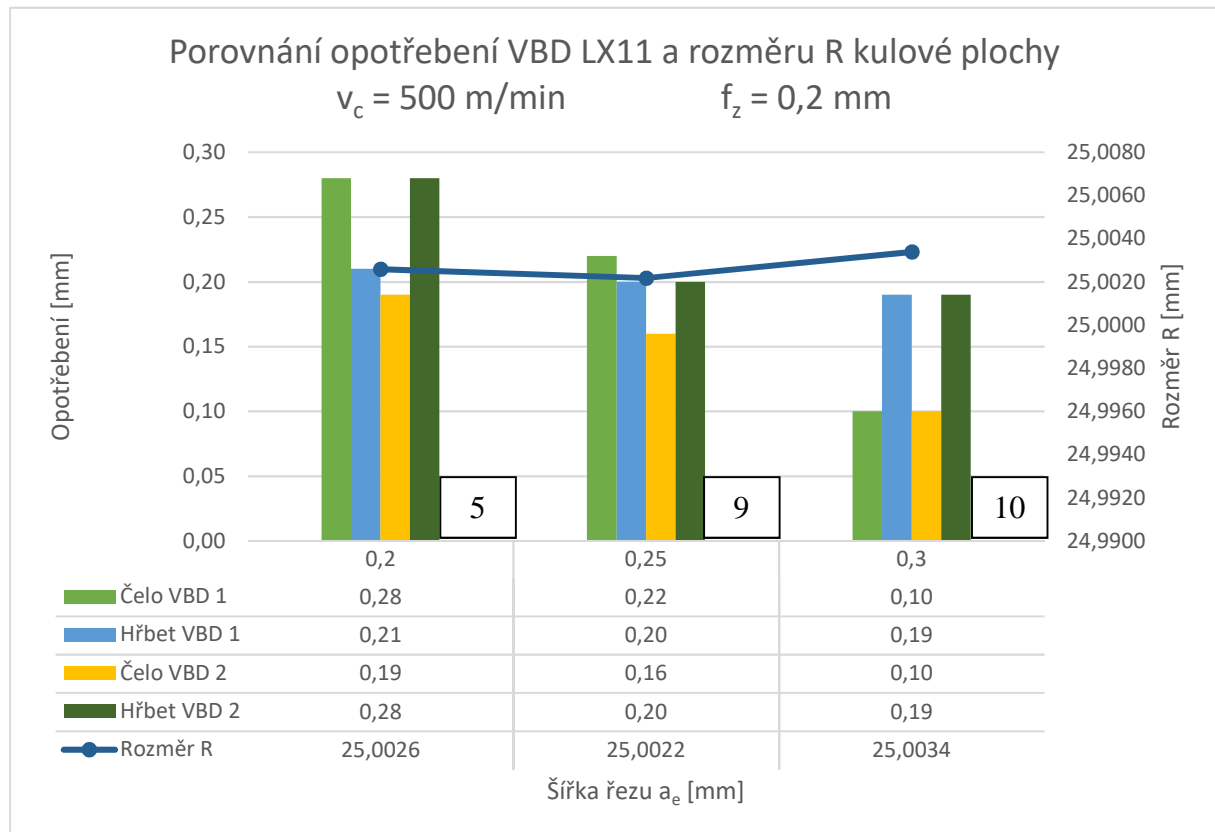
V tabulce 15 můžeme vidět shrnutí dat z vyhodnocení jednotlivých vzorků.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Čelo des. 1 [mm] | Hřbet des. 1 [mm] | Čelo des. 2 [mm] | Hřbet des. 2 [mm] |
|--------------|---------------|------------|------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 5 | 500 | 0,2 | 0,2 | 0,28 | 0,21 | 0,19 | 0,28 |
| 9 | 500 | 0,2 | 0,25 | 0,22 | 0,20 | 0,16 | 0,20 |
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 0,10 | 0,19 | 0,10 | 0,19 |
| 11 | 500 | 0,25 | 0,2 | 0,18 | 0,19 | 0,16 | 0,22 |
| 7 | 500 | 0,25 | 0,25 | 0,18 | 0,20 | 0,11 | 0,16 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 0,18 | 0,16 | 0,18 | 0,25 |
| 13 | 500 | 0,3 | 0,2 | 0,16 | 0,18 | 0,16 | 0,17 |
| 14 | 500 | 0,3 | 0,25 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,15 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 0,23 | 0,16 | 0,23 | 0,12 |

Tabulka 15 - Shrnutí výsledků vlivu f_z a a_e na opotřebení VBD při konstantní v_c

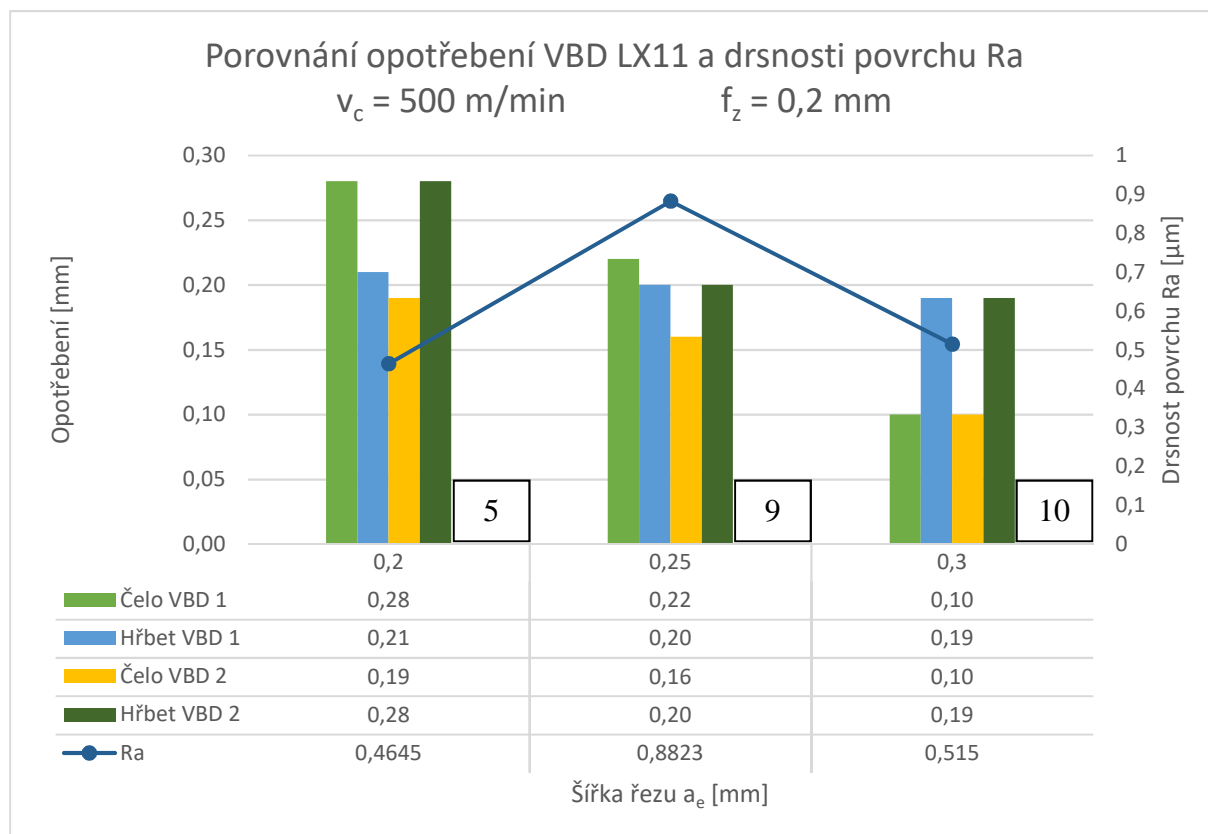
Vyhodnocení opotřebení výměnných břitových destiček se liší od předešlých vyhodnocení rozměru a drsnosti v posuzování čtyř hodnot. Bylo by možné posuzovat výměnné břitové destičky jednotlivě, ale takové rozhodnutí by mohlo negativně ovlivnit výsledky práce. Proto musíme posuzovat výměnné břitové destičky v páru, stejně jak byly použity při experimentu. Z výsledků můžeme vidět, že při experimentu nedošlo u žádné kombinace parametrů k výraznému poškození výměnné břitové destičky. Výsledné hodnoty si rozdělíme na vhodné a méně vhodné. Vhodné parametry budou takové, kde ani jedna hodnota opotřebení nepřesáhla 0,2 mm včetně. Z této úvahy nám vychází, že vhodnější kombinace parametrů je u vzorku č. 7, 10, 13, 14. Ostatní kombinace vyhodnocujeme z hlediska opotřebení výměnných břitových destiček jako méně vhodné, ale přesto možné pro další použití.

5.8 Porovnání opotřebení, rozměru a drsnosti vlivem parametrů



Graf 10 - Vliv parametru obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,2 \text{ mm}$

V grafu 10 můžeme vidět opotřebení výměnných břitových destiček porovnané s rozměrem R kulové plochy při posuvu $f_z = 0,2 \text{ mm}$. Nejlépe nám vychází pokus č. 9, kde máme aritmetický průměr opotřebení $0,195 \text{ mm}$ a současně nejmenší odchylku od rozměru $R = 25 \text{ mm}$, $\sigma = 0,0022 \text{ mm}$. Pokud bude pro nás hlavním faktorem opotřebení, tak nám nejlépe vychází pokus č. 10, kde máme nejnižší aritmetický průměr opotřebení výměnné břitové destičky $0,145 \text{ mm}$ a odchylku na rozměru $R = 25 \text{ mm}$, $\sigma = 0,0034 \text{ mm}$, která je 1,5 násobná oproti pokusu č. 9, ale přesto je to hodnota měřená v tisícinách milimetru. Pokus č. 5 se díky největšímu opotřebení tváří ze všech vzorků ve faktorovém plánu jako nejhorší, ovšem pokud budeme jako hlavní faktor brát výsledný rozměr kulové plochy, tak se s $\sigma = 0,0026 \text{ mm}$ dostáváme téměř na úroveň vzorku č. 9. Veškeré hodnoty je možné vidět v tabulce 16.



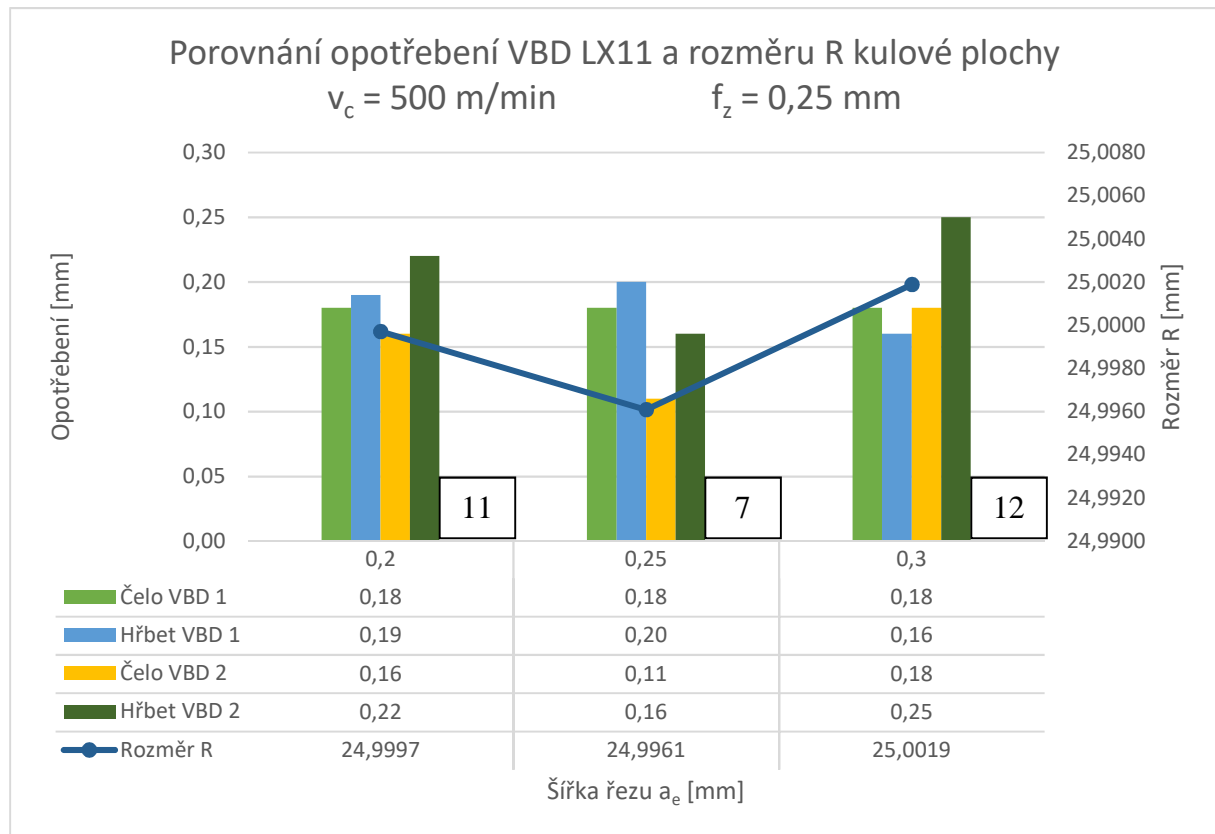
Graf 11 - Vliv parametrů obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,2 \text{ mm}$

V grafu 11 můžeme vidět opotřebení výměnné břitové destičky jako v grafu 10, ale zde porovnané s drsností povrchu Ra. Z tohoto porovnání nejlépe vychází pokus č. 10, kde máme aritmetický průměr opotřebení 0,145 mm a současně drsnost Ra = 0,515 μm . Nejnížší hodnoty drsnosti při $f_z = 0,2 \text{ mm}$ máme u vzorku č. 5, kde ovšem máme nejhorší opotřebení. Oproti rozměru, kde pokus č. 9 dosahoval nejlepších hodnot, tak u drsnosti naopak pokus č. 9 dosahuje hodnot nejhorších. Veškeré hodnoty je možné vidět v tabulce 16.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Prům. hodnota opotřebení VBD [mm] | Odchylka R = 25 mm [mm] | Ra [μm] |
|--------------|------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 5 | 500 | 0,2 | 0,2 | 0,240 | 0,0026 | 0,4645 |
| 9 | 500 | 0,2 | 0,25 | 0,195 | 0,0022 | 0,8823 |
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 0,145 | 0,0034 | 0,5150 |

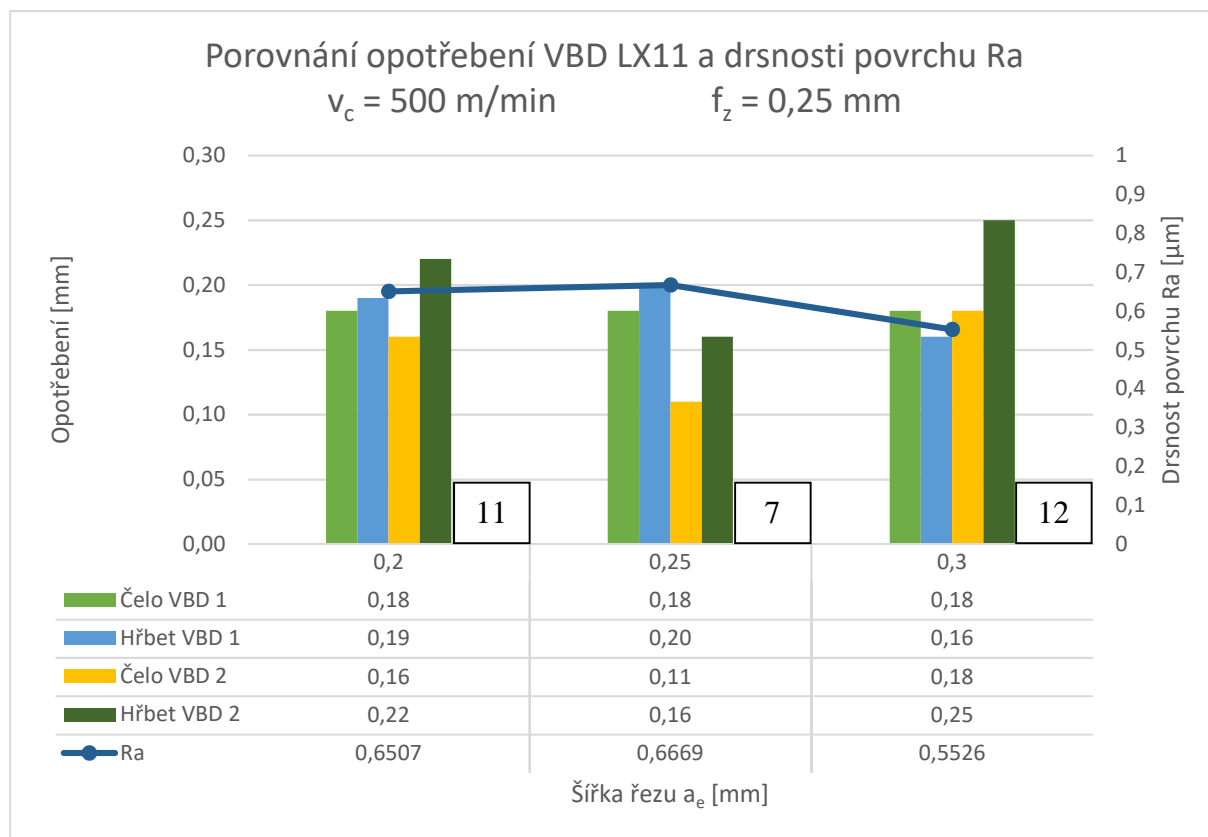
Tabulka 16 - Porovnání opotřebení VBD, rozměru a drsnosti Ra při konstantní v_c , $f_z = 0,2 \text{ mm}$

Pokud budeme posuzovat všechny tři výsledné hodnoty současně při $f_z = 0,2 \text{ mm}$, tak nejlépe vychází pokus č. 10, kde máme nejnižší hodnotu opotřebení výměnných břitových destiček a současně dobré hodnoty drsnosti povrchu a rozměru. Při aplikaci poznatků bude volba parametrů záležet na požadavku zadavatele, zda bude preferovat nižší opotřebení břitových destiček nebo výsledný povrch či rozměr obrobku.



Graf 12 - Vliv parametru obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z=0,25 \text{ mm}$

V grafu 12 je znázorněno opotřebení břitových destiček porovnané s rozměrem kulové plochy při posuvu $f_z = 0,25 \text{ mm}$. Z tohoto grafu můžeme vyčíst, že nejlepším výsledkem je pokus č. 11, kdy máme perfektní hodnotu odchylky od rozměru $R = 25 \text{ mm}$ a to $\sigma = 0,0003 \text{ mm}$ a současně velmi dobrou hodnotu opotřebení v rozsahu $0,22 \text{ mm}$. Jako nejhorší se jeví pokus č. 12, ale zprůměrováním hodnoty opotřebení dostáváme výsledku pouze o $0,005 \text{ mm}$ horšího než u výsledku pokusu č. 11, který byl hodnocen jako nejlepší, přičemž odchylka rozměru je $\sigma = 0,019 \text{ mm}$. Nejlepší výsledek při posuzování opotřebení výměnné břitové destičky je u pokusu č. 7 při průměrné hodnotě opotřebení výměnné břitové destičky $0,163 \text{ mm}$, ale při posuzování odchylky rozměru je to hodnota nejhorší, $\sigma = 0,0039 \text{ mm}$. Problémem je záporná hodnota této odchylky, kdy dle požadavků zadavatele je záporná tolerance rozměru $R = 25 \text{ mm}$ nevyhovující. Proto by se dal tento pokus zařadit na nejhorší příčku, ale při korekci nastavení programu by se záporná tolerance dala odstranit. Veškeré hodnoty je možné vidět v tabulce 17.



Graf 13 - Vliv parametrů obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,25 \text{ mm}$

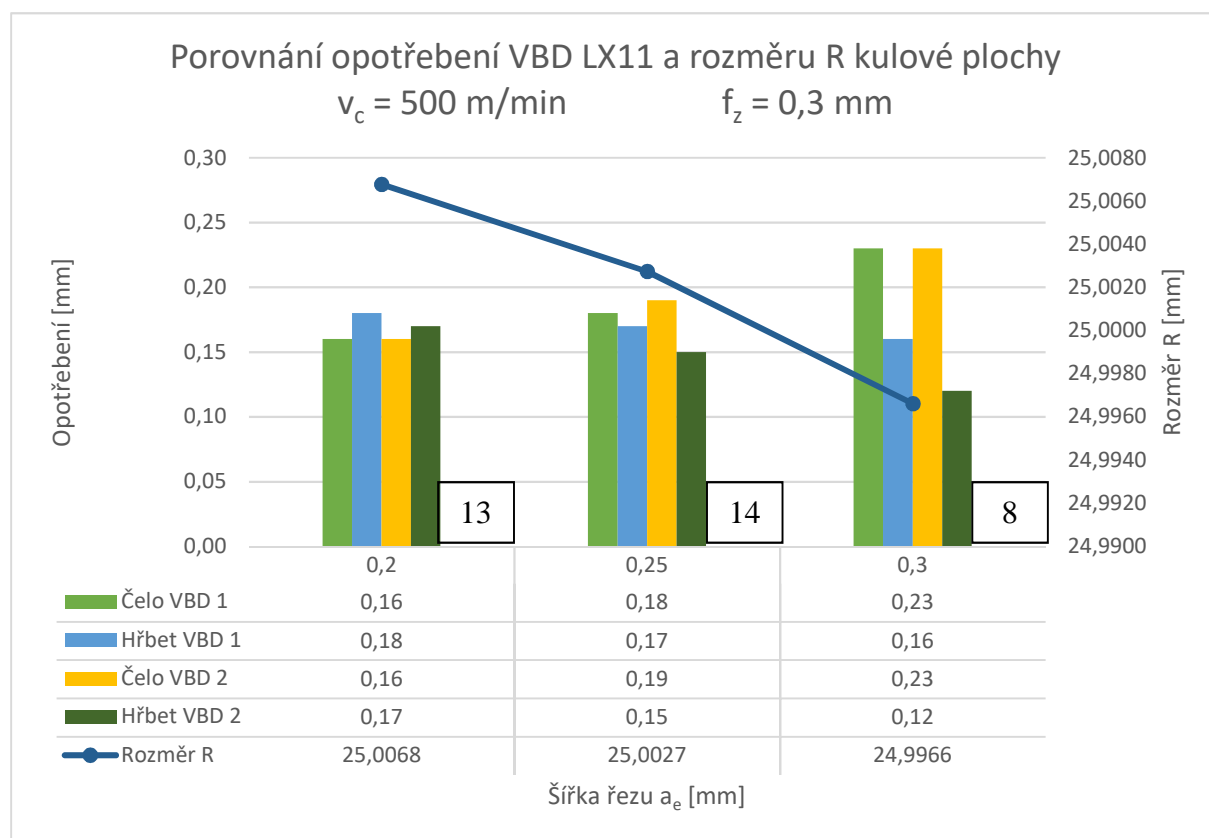
V grafu 13 můžeme vidět opotřebení výměnné břitové destičky jako v grafu 12, ale zde porovnané s drsností povrchu Ra. Drsnost povrchu Ra je nejlepší u pokusu č. 12 a to $0,553 \mu\text{m}$, dle tabulky 17 přibližně o $0,1 \mu\text{m}$ vyšší oproti pokusům č. 7 a 11. Opotřebení, jak již bylo popsáno u grafu 12, je sice u pokusu č. 12 nejhorší, ale současně se aritmetický průměr opotřebení pokusu č. 12 vměstná do $0,2 \text{ mm}$, jak je vidět v tabulce 17. Proto by se dalo říci, že při posouzení opotřebení a současně drsnosti povrchu Ra je nastavení těchto parametrů nejlepší variantou. Nejhorší variantou je pokus č. 11, díky obdobnému opotřebení jako u pokusu č. 12 a současně $Ra = 0,651 \mu\text{m}$. Pokus č. 7 má nejlepší hodnotu opotřebení výměnné břitové destičky, ale nejhorší hodnotu Ra (viz tabulka 17), přibližně stejnou jako pokus č. 11. Veškeré hodnoty je možné vidět v tabulce 17.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Prům. hodnota opotřebení VBD [mm] | Odchylka R = 25 mm [mm] | Ra [μm] |
|--------------|------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 11 | 500 | 0,25 | 0,2 | 0,188 | 0,0003 | 0,6507 |
| 7 | 500 | 0,25 | 0,25 | 0,163 | 0,0039 | 0,6669 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 0,193 | 0,0019 | 0,5526 |

Tabulka 17 - Porovnání opotřebení VBD, rozměru a drsnosti Ra při konstantní v_c , $f_z = 0,25 \text{ mm}$

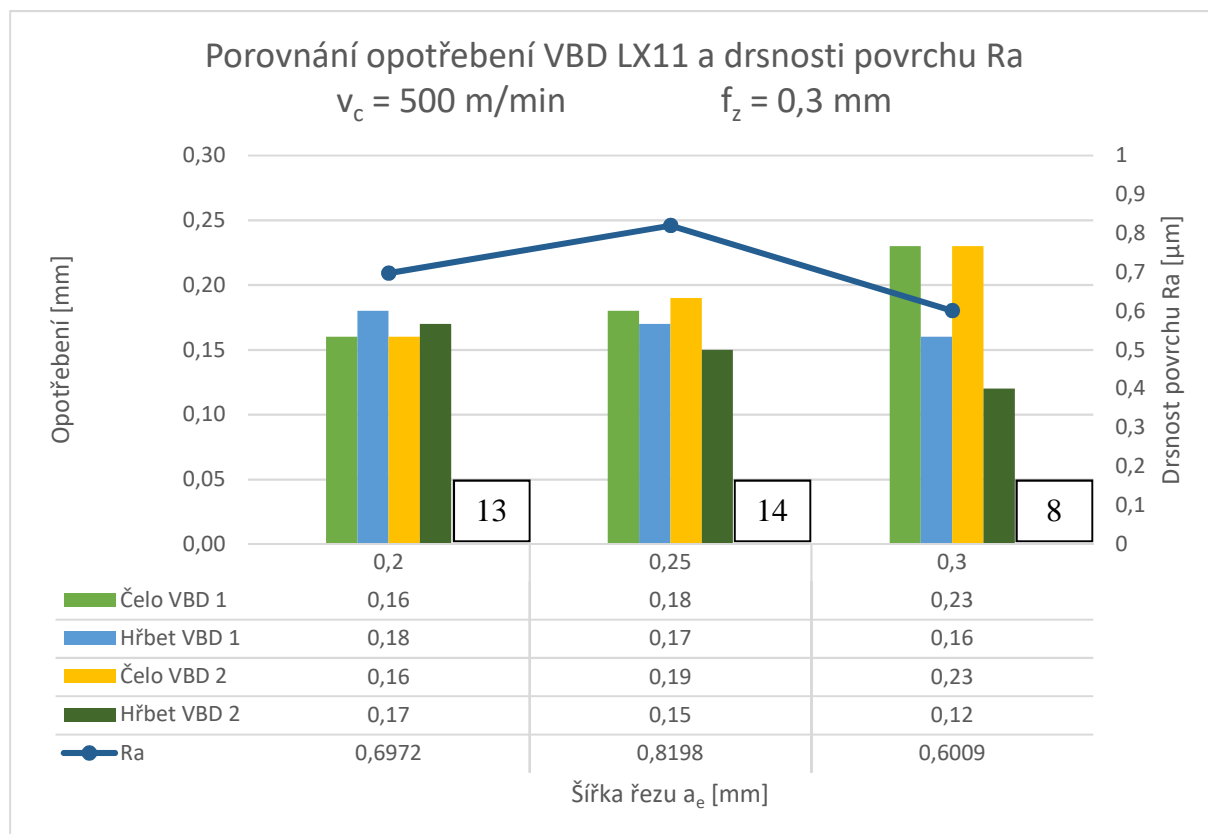
Pokud budeme posuzovat všechny tři výsledné hodnoty současně při $f_z = 0,25 \text{ mm}$, tak nejlépe vychází pokus číslo 12, kde máme sice nejvyšší hodnotu opotřebení výměnných břitových destiček, ale současně dobrou hodnotu rozměru a nejlepší hodnotu drsnosti povrchu

Ra. Stejně jako u $f_z = 0,2$ mm, bude při aplikaci poznatků volba parametrů záležet na požadavku zadavatele, zda bude preferovat nižší opotřebení břitových destiček nebo výsledný povrch či rozměr obrobku.



Graf 14 - Vliv parametru obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,3$ mm

V grafu 14 je znázorněno opotřebení výměnných břitových destiček porovnané s rozměrem kulové plochy při posuvu $f_z = 0,3$ mm. Nejlepší výsledek máme při parametru $a_e = 0,25$ mm (pokus č. 14), kdy máme nejnižší odchylku od rozměru $R = 25$ mm, $\sigma = 0,0027$ mm a současně dobrou hodnotu opotřebení břitů. Aritmetický průměr opotřebení je 0,173 mm dle tabulky 18. Při primárním posuzování opotřebení řezného břitu máme nejlepší výsledek u pokusu č. 13, aritmetický průměr hodnot opotřebení je 0,168 mm, jak ale můžeme vidět hodnota je vyšší pouze o 0,005 mm v porovnání s pokusem č. 14. V případě pokusu č. 13 je však výrazně vyšší odchylka od rozměru $R = 25$ mm a to $\sigma = 0,0068$ mm. Díky takto vysoké odchylce od rozměru $R = 25$ mm můžeme říct, že toto nastavení parametrů je výsledkově nejhorší. Ač má pokus č. 8 největší hodnotu aritmetického průměru opotřebení břitových destiček 0,185 mm, tak tento pokus můžeme výsledkově zařadit na druhé místo. A to díky malému rozdílu v opotřebení břitových destiček a přijatelné hodnotě odchylky od rozměru $R = 25$ mm, $\sigma = 0,0034$ mm. Veškeré hodnoty je možné vidět v tabulce 18.



Graf 15 - Vliv parametrů obrábění a_e na opotřebení VBD a rozměr R při konstantní v_c , $f_z = 0,3 \text{ mm}$

V grafu 15 je znázorněno opotřebení výměnných břitových destiček jako v grafu 14, ale zde porovnané s drsností povrchu Ra. Nejhorší kombinace řezných parametrů je u pokusu č. 14, kdy máme, jak již bylo napsáno u minulého grafu, dobrou hodnotu aritmetického opotřebení výměnných břitových destiček, ale drsnost povrchu pokusu je $Ra = 0,8189 \mu\text{m}$, což je hodnota téměř nejvyšší napříč všemi variantami parametrů. Díky podobné hodnotě aritmetického průměru opotřebení výměnné břitové destičky všech tří pokusů, můžeme říct, že nejlepším výsledkem je pokus č. 8, kde máme nejnižší drsnost povrchu $Ra = 0,6009 \mu\text{m}$. Hodnota Ra je téměř o $0,1 \mu\text{m}$ nižší než u druhého nejlepšího výsledku (pokus č. 13). Rozdíl mezi opotřebení výměnných břitových destiček pokusu č. 13 a 14 je $0,017 \text{ mm}$, tato hodnota není zanedbatelná, ale přesto má pro zadavatele větší hodnotu výsledný povrch, proto bylo zvoleno za nejlepší variantu pokus č. 8.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Prům. hodnota opotřebení VBD [mm] | Odchylka $R = 25 \text{ mm}$ [mm] | Ra [μm] |
|--------------|------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|
| 13 | 500 | 0,3 | 0,2 | 0,168 | 0,0068 | 0,6972 |
| 14 | 500 | 0,3 | 0,25 | 0,173 | 0,0027 | 0,8198 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 0,185 | 0,0034 | 0,6009 |

Tabulka 18 - Porovnání opotřebení VBD, rozměru a drsnosti Ra při konstantní v_c , $f_z = 0,3 \text{ mm}$

Z tabulky 18 můžeme vyčíst, že pro každou změnu parametru máme vždy jednu hodnotu výsledku nejlepší a současně i jednu hodnotu výsledku nejhorší. Jak bylo napsáno výše,

hodnoty aritmetických průměrů opotřebení výměnných břitových destiček jsou podobné a žádná z výsledných hodnot není výrazně horší. Naopak u odchyly od rozměru $R = 25 \text{ mm}$ a u drsnosti povrchu R_a tomu tak je. U odchyly od rozměru $R = 25 \text{ mm}$ je výrazně nejhorší hodnota pokus č. 13, u drsnosti povrchu je výrazně horší výsledná hodnota u pokusu č. 14. Z toho důvodu volíme jako nejlepší nastavení parametrů u pokusu č. 8, tedy $a_e = 0,3 \text{ mm}$.

| Číslo pokusu | v_c [m/min] | f_z [mm] | a_e [mm] | Prům. hodnota opotřebení VBD [mm] | Odchylka $R = 25 \text{ mm}$ [mm] | R_a [μm] |
|--------------|------------------|---------------|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|
| 10 | 500 | 0,2 | 0,3 | 0,145 | 0,0034 | 0,5150 |
| 12 | 500 | 0,25 | 0,3 | 0,193 | 0,0019 | 0,5526 |
| 8 | 500 | 0,3 | 0,3 | 0,185 | 0,0034 | 0,6009 |

Tabulka 19 - Porovnání nejlepších výsledných hodnot jednotlivých f_z

V tabulce 19 můžeme vidět porovnání výsledků z vyhodnocení pro jednotlivé posuvy f_z . Můžeme si všimnout, že ve všech případech byl jako nejlepší vyhodnocen parametr $a_e = 0,3 \text{ mm}$. Můžeme tedy říci, že pro řeznou rychlost $v_c = 500 \text{ m/min}$ je vhodný parametr šířky řezu $a_e = 0,3 \text{ mm}$. Pokus č. 10 je nejlepší při posuzování aritmetického průměru opotřebení výměnné břitové destičky a současně i při posouzení drsnosti povrchu R_a . Odchylku od rozměru $R = 25 \text{ mm}$ má pokus č. 10 stejnou jako pokus č. 8. Pokus č. 12 má nejnižší odchylku od rozměru $R = 25 \text{ mm}$, která je nižší oproti pokusu č. 10 a 8 o $0,0015 \text{ mm}$, ale má nejhorší aritmetický průměr opotřebení výměnné břitové destičky, větší téměř o $0,05 \text{ mm}$ než pokus č. 10 a drsnost povrchu má horší oproti pokusu č. 10 o $0,0376 \mu\text{m}$. Pokus č. 8 má, jak již bylo řečeno, stejnou hodnotu odchylky od $R = 25 \text{ mm}$ jako pokus č. 10, hodnotu opotřebení výměnné břitové destičky má o $0,04 \text{ mm}$ větší než nejlepší výsledek pokusu č. 10 a drsnost povrchu má nejhorší, horší oproti pokusu č. 10 o $0,0859 \text{ mm}$.

Pokud budeme sumarizovat jednotlivé výsledky, tak z těchto poznatků můžeme určit, že nejlepším volbou jsou parametry $v_c = 500 \text{ m/min}$, $f_z = 0,2 \text{ mm}$ a $a_e = 0,3 \text{ mm}$, tedy pokus č. 10. Toto nastavení parametrů je nejvhodnější, i pokud budeme posuzovat samostatně výsledné hodnoty opotřebení výměnných břitových destiček.

Pokud by hlavním posuzovaným parametrem byla odchylka od rozměru $R = 25 \text{ mm}$, tak nejlepší volbou parametrů bude $v_c = 500 \text{ m/min}$, $f_z = 0,25 \text{ mm}$ a $a_e = 0,2 \text{ mm}$, tedy pokus č. 11. U tohoto nastavení ovšem došlo k výraznému zhoršení drsnosti povrchu.

Pokud by hlavním posuzovaným parametrem byla drsnost povrchu R_a , tak nejlepší volbou parametrů bude $v_c = 500 \text{ m/min}$, $f_z = 0,2 \text{ mm}$ a $a_e = 0,2 \text{ mm}$, tedy pokus č. 5. U tohoto nastavení ovšem došlo k výraznému opotřebení výměnných břitových destiček.

6 Technicko-ekonomické zhodnocení

Současná technologie obrábění žárových nástřiků je broušením. Broušení je možné aplikovat i na tvrdé materiály. Vytvoříme jím kvalitní obrobený povrch, ale broušení je velmi časově náročné v důsledku úběrů tenkých vrstev na jednotku posuvu. Dosažení stejných výsledků obrobeného povrchu je pouze začátkem změny technologie pro její výrobu. Jedna z podmínek pro nahrazení technologie je úspora nákladů. V předchozích odstavcích jsme potvrdili, že rozměrově a kvalitativně je možné metodu broušení nahradit. V obou případech bude následovat operace zabíhání, proto ji můžeme zanedbat.

6.1 Výpočet jednotkových strojních časů obrábění

Výpočet normy broušení bude vycházet z broušení na kulato. Bude potřeba speciální unášec, který bude mít možnost rotace obrobku a současně bude kopírovat rozměr $R = 25$ mm. Šířka vrstvy žárového nástřiku pro broušení je $a = 0,25$ mm. Na jeden přejezd bude $a_p = 0,05$ mm. Broušená délka vychází z obvodu kruhu, který je $o = 157$ mm, s přídavky na nájezd a výjezd $l_n = l_p = 5$ mm. Posuv brusného kotouče na jednu otáčku obrobku je $f_{ot} = 0,5$ mm/ot. Otáčky obrobku jsou $n_o = 30$ ot/min.

$$L = l_n + o/4 + l_p = 5 + 157/4 + 5 = 49,3 \text{ mm}$$

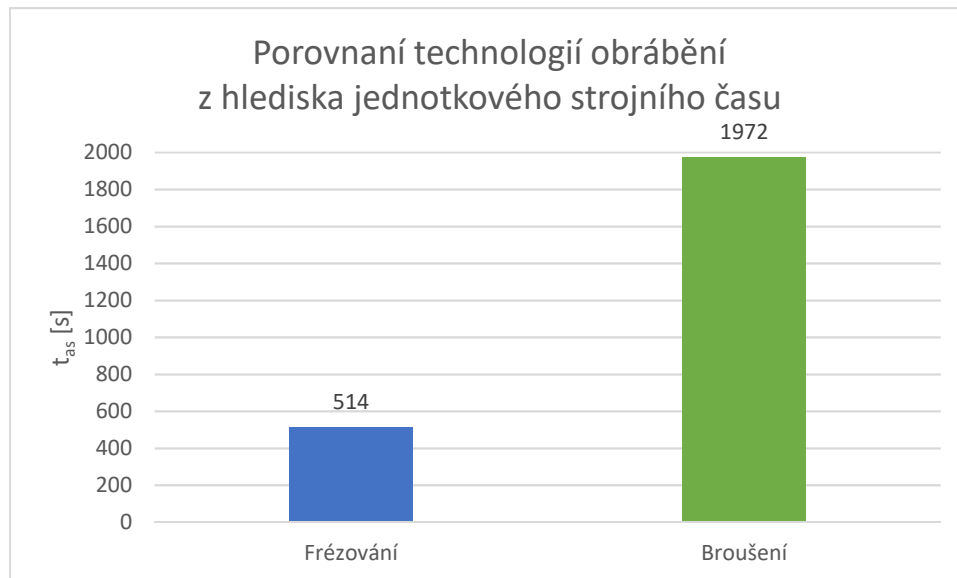
$$i = a / a_p = 0,25 / 0,05 = 5$$

$$t_{as} = 2 \times L \times i / (f_{ot} \times n_o) = 2 \times 49,3 \times 5 / (0,5 \times 30) = 32,867 \text{ min} = 1\,972 \text{ s}$$

Čas frézování byl u vzorků měřen. Jako referenční budeme brát dle vyhodnocení nejlepší pokus. Nejlepším byl pokus č. 10 s $t_{as} = 8,34 \text{ min} = 514 \text{ s}$.

6.2 Porovnání nákladů

Z vypočtených jednotkových strojních časů pro broušení a změřeného strojního času frézování nyní můžeme vytvořit graf porovnání těchto dvou technologií z pohledu jednotkového strojního času.



Graf 16 - Porovnání technologií obrábění z hlediska jednotkového strojního času

Při pohledu na graf 16 můžeme říci, že přechodem na frézování nám vznikne úspora 74 % na jednotkovém strojním čase. Musíme brát v potaz, že vypočtené hodnoty jsou pouze teoretické a není do nich zahrnuto mnoho dalších faktorů.

Nyní můžeme pomocí vypočtených strojních časů určit celkovou nákladovost výroby. Další vstupy do výpočtu jsou voleny dle nejlepšího vědomí a svědomí, ale mohou se lišit od skutečnosti společností, stejně jako mohou být v jednotlivých společnostech odlišné. Vstupy jsou hodinová sazba strojů, cena nástrojů a počet obráběných kusů. Dle experimentu budeme uvažovat použití pěti řezných břitů u jedné výměnné břitové destičky. Stejně tak budeme uvažovat, že diamantový kotouč bude muset být po pěti obrobenech dílech přestřen a jeho životnost budou 4 cykly. Náklady na přebroušení kotouče nebudeme uvažovat stejně jako pootočení destičky po každém obrobku. Z důvodů výše volíme dávku 5 ks obrobků.

- Strojní hodinová sazba CNC frézování 2 000 Kč
- Strojní hodinová sazba broušení 1 100 Kč
- Cena VBD LX11 250 Kč
- Cena diamantového kotouče 1 000 Kč
- Jednotkový strojní čas frézování 514 s
- Jednotkový strojní čas broušení 1 972 s
- Počet obráběných kusů 5 ks

Cena výroby 5 kusů frézováním

$$N = (250 \times 2) + (2\,000 \times 514 \times 5 / 3\,600) = 1\,928 \text{ Kč}$$

Cena výroby 5 kusů broušením

$$N = (1\,000 / 4) + (1\,100 \times 1\,972 \times 5 / 3\,600) = 3\,263 \text{ Kč}$$

Nyní známe teoretickou finanční náročnost obou technologií. Technologie frézování vychází z obou zkoumaných pohledů, časového i finančního. Z porovnání vidíme, že časová náročnost frézování je téměř čtvrtinová oproti broušení. Z finančního hlediska je frézování levnější o 40% oproti broušení, ale jak již bylo zmíněno, pro přesnou finanční analýzu by bylo nutné mít kompletní a ověřené vstupy.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo objasnit vliv řezných podmínek na kvalitu a rozměr obrobeného povrchu žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si na tvarové ploše a prověřit možné nahrazení broušení metodou frézování. Myšlenkou pro nahrazení metody je zkrácení jednotkových časů výroby při zachování kvality povrchu, čímž bude zvýšena produktivita výroby. Diplomová práce je složena z několika částí, které lze jednoduše rozdělit na část teoretickou a část praktickou.

V úvodu diplomové práce najdeme rekapitulaci prací, které jsou s touto prací spjaté. Problematikou frézování žárového nástřiku Cr-Ni-B-Si se bohužel žádná předchozí práce nezabývá, přesto můžeme v pracích, na které jsou zpracované rešerše v této kapitole najít poznatky, které pomohou tomuto experimentu. Rešerše jsou ze zápisů z konferencí, vědeckých prací a z předchozích prací provedených na pracovišti RTI ZČU.

Další kapitola této práce se věnuje teoretické problematice experimentu. Můžeme si přečíst o aplikaci žárových nástřiků, jejich rozdělení a metodě žárového nástřiku HVOF. Pokračování teoretické části je věnováno frézování, přesněji tvarovému frézování a strategii 3D frézování „konstant Z“. Závěr teoretické části pojednává o parametrech drsnosti povrchu, Ra, Rz a nosnému podílu.

Začátek praktické části se zabývá plánem experimentu a jeho podmínkami. Zde se dozvídáme o použité soustavě S-N-O-P, použité technologii a řezných podmínkách experimentu.

Experiment se řídí programovým plánem, který nám rozděluje experiment na dvě části, preexperiment a experiment dle faktorového plánu. Na začátku kapitoly si představujeme možná opotřebení výměnných břitových destiček. V části preexperimentu vyhodnocujeme obrobení pěti kulových ploch a popisujeme jejich výsledky. Následně již pracujeme s faktorovým plánem, díky čemuž dojde k prověření všech kombinací proměnných faktorů a_e a f_z .

V dalších částech probíhá vyhodnocení dle jednotlivých faktorů. Jako první vyhodnocujeme odchylku od rozměru kulové plochy, kde nejlepších výsledků je při parametrech frézování $f_z = 0,25$ mm a $a_e = 0,2$ mm. Dále vyhodnocujeme dle parametru drsnosti povrchu Ra a nejlepší výsledek dostáváme při $f_z = 0,2$ mm a $a_e = 0,2$ mm. Stejného výsledku nejlepších parametrů máme i u drsnosti povrchu Rz a nosného podílu, proto dále tyto výsledky zanedbáváme a používáme pouze drsnost povrchu Ra v dalších vyhodnoceních. Nakonec v části vyhodnocování jednotlivých parametrů vyhodnotíme opotřebení výměnných břitových destiček LX11. Zde díky vícehodnotovým výsledkům určíme pouze vhodnost, kdy vhodnější jsou dle výsledků u pokusů č. 7, 10, 13, 14.

Následující část se zabývá kombinací opotřebení na výměnných břitových destičkách a to buď s drsností povrchu Ra, nebo s rozměrem obrobené plochy. Nejlepší výsledek je u pokusu č. 10, tedy parametrů $f_z = 0,2$ mm a $a_e = 0,3$ mm. Tyto parametry hodnotíme jako nejvhodnější. Pokud bychom chtěli upřednostnit pouze jeden parametr výsledných hodnot, tak při vyhodnocení opotřebení výměnných břitových destiček je to pokus č. 10, $f_z = 0,2$ mm a $a_e = 0,3$ mm. Při upřednostnění odchylky od rozměru je nejlepším výsledkem pokus č. 11, $f_z = 0,25$ mm a $a_e = 0,2$ mm. Při upřednostnění drsnosti povrchu Ra je nejlepším výsledkem pokus č. 5, $f_z = 0,2$ mm a $a_e = 0,2$ mm.

V poslední kapitole posuzujeme možnost nahrazení metody broušení metodou frézování. Z výsledků nám vychází, že teoreticky je možné docílit finanční úspory na jednotku výrobku

až 40 % při započtení jednotkových strojních časů a nákladů na nástroje. V tomto výpočtu není zahrnuta energetická náročnost strojů, jejich amortizace a jejich správa.

Závěrem lze říci, že výsledky experimentu jsou přínosné pro další řešení této problematiky a posouvají nás o krok dále. Pro další výzkum by bylo vhodné lépe prověřit ekonomickou úsporu dané změny metody obrábění, pomocí experimentů obrábění rovinných ploch metodou frézování.

8 Seznam použité literatury

- [1] Žárové stříkání. PLASMAMETAL [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [2] Žárové a plazmové technologie – žárové nástřiky. SAMMETAL [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <http://www.sammetal.cz/technologie/zarov-a-plazmove-technologie-zarove-nastriky>
- [3] Žárové nástřiky. PRIGA [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://driga.cz/nastriky.html>
- [4] Líbal, M.: *Stanovení hlavních parametrů ovlivňujících přilnavost a odolnost povlaků žárových nástřiků vytvořených elektrickým obloukem*, [diplomová práce], Plzeň ZČU, FST, KMM, 2013
- [5] Šildberger, R.: *Optimalizace parametrů nástřiku elektrickým obloukem*, [diplomová práce], Brno VUTBR, FSI, ÚST, 2008.
- [6] Princip vytváření a struktura žárového nástřiku. [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/62/47464281/images/13-0.jpg>
- [7] Česánek, Z.: *Žárově stříkané povlaky používané v korozně působícím prostředí* [disertační práce]. Plzeň ZČU, FST, KMM, 2015.
- [8] Hardfacing Alloys. Kennametal Stellite [online]. [cit. 2018-08-30]. Dostupné z: http://www.stellite.com/content/dam/kennametal/stellite/literature/Brochures/B-16-05107_KMT_Stellite_HardfacingAlloys_Brochure_EN_LR.pdf
- [9] Žárové nástřiky. Tribo engineering [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <http://www.triboing.cz/zarove-nastriky.htm>
- [10] Porovnání metod nanášení žárových nástřiků [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/39/18249171/images/32-0.png>
- [11] Legované oceli třídy 16, jejich složení a tepelné zpracování [online]. [cit. 2019-09-18]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-oceli/oceli-tridy-16/>
- [12] Materiálový list NiCrBSi [online]. [cit. 2019-09-18]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/pridavne-materialy/produkty/prasky/18/>

- [13] Materiálový list ČSN 16343 [online]. [cit. 2019-09-18]. Dostupné z: http://www.bogner.cz/files/files/Materialovy_list_1.6582.pdf
- [14] ZEISS Česká republika – Zeiss Prismo [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo.html>
- [15] Vybavení laboratoře dílenské metrologie [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: http://rti.zcu.cz/laboratore/ldm/vybaveni_ldm.html
- [16] Vybavení laboratoře experimentálního obrábění [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://rti.zcu.cz/laboratore/obrabeni/vybaveni.html>
- [17] Měření jakosti povrchu obrobku [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>
- [18] Tribologie [online] Liberec, 2003. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf. Scriptum. Technická univerzita v Liberci.
- [19] Nezdařilová M. Metrologická confirmace měřidla [online]. 2011, [cit. 2020-5-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432
- [20] Strojírenská technologie obrábění [online] Plzeň, 2011. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kto/sto/prednasky.html>. Přednáška 12. Západočeská univerzita v Plzni.
- [21] Strojírenská technologie obrábění [online] Plzeň, 2011. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kto/sto/prednasky.html>. Přednáška 6, 7. Západočeská univerzita v Plzni.
- [22] Frézování [online] [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf
- [23] Co je to tvarové frézování? [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [24] Vyspělé strategie ve 3D frézování [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyspele-strategie-ve-3d-frezovani.html>

[25] Hrubovací frézování [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hrubovaci-frezovani.html>

[26] Obráběcí centrum DMU 40 eVo linear [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu-evo/dmu-40-evo-linear?gclid=CjwKCAjwmf_4BRABEiwAGhDfScofkQdhk1g23h9WhOsxZquh9PzFEgan7yUop01Blj9_XAsqrzdsNhoCYfQQAxD_BwE




[27] HSR/HSM moduly pro 3D vysokorychlostní frézování [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/cam-moduly/3d-hsm-vysokorychlostni-frezovani/>

[28] CAD.CZ. CAM systémy a výroba tvarových ploch [online]. 2011 [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovychploch.html>

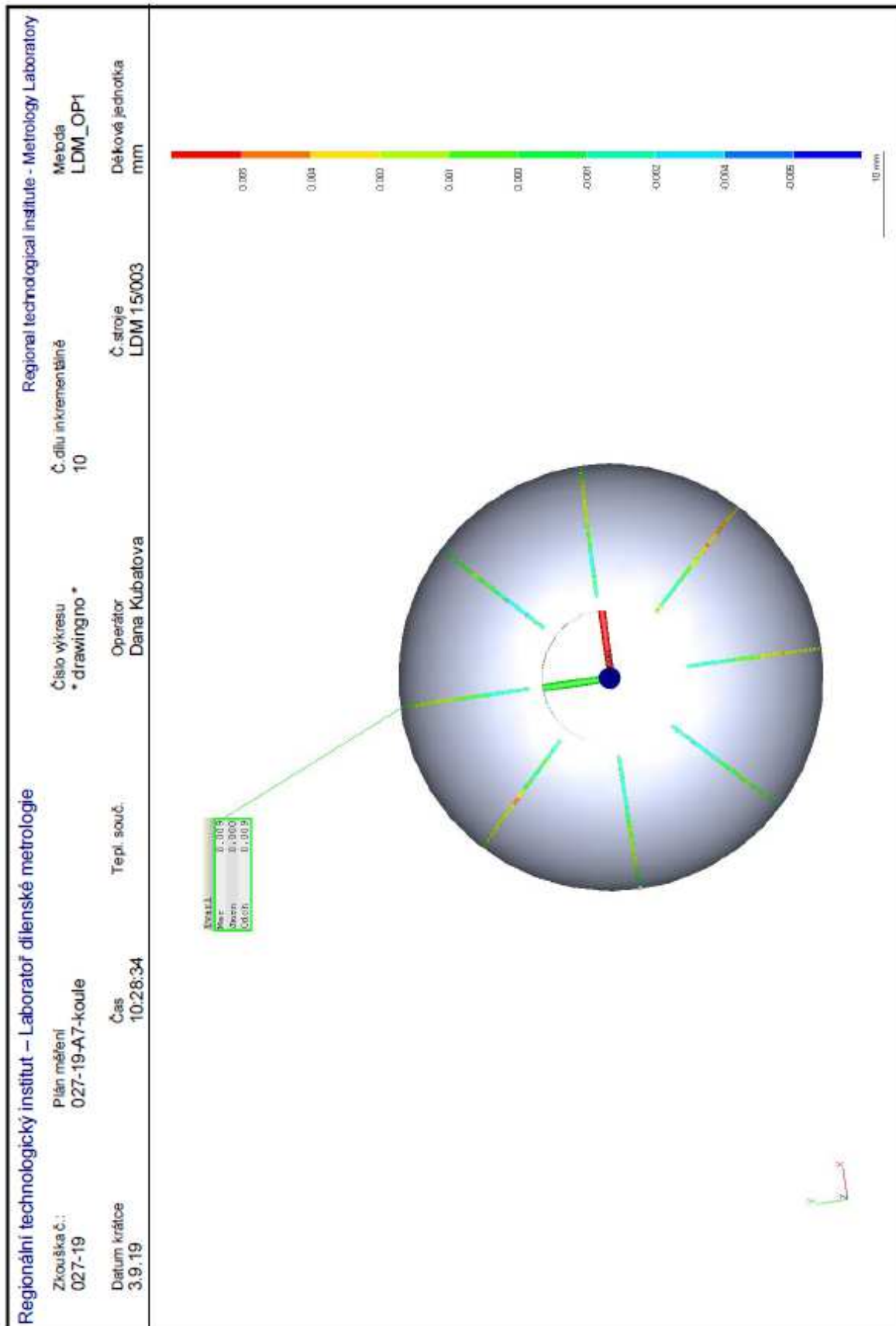
9 Seznam příloh

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| PŘÍLOHA 1 – Protokol měření rozměru a tvaru pokusu č. 10 str. 1 | I |
| PŘÍLOHA 2 – Protokol měření rozměru a tvaru pokusu č. 10 str. 2 | II |
| PŘÍLOHA 3 – Protokol měření rozměru a tvaru pokusu č. 10 str. 3 | III |
| PŘÍLOHA 4 – Protokol měření rozměru a tvaru pokusu č. 10 str. 4 | IV |
| PŘÍLOHA 5 – Protokol měření rovinné drsnosti povrchu pokusu č. 10 řez 1 | V |
| PŘÍLOHA 6 – Protokol měření rovinné drsnosti povrchu pokusu č. 10 řez 2 | VI |
| PŘÍLOHA 7 – Protokol měření rovinné drsnosti povrchu pokusu č. 10 řez 3 | VII |
| PŘÍLOHA 8 – Protokol měření nosného podílu drsnosti povrchu pokusu č. 10 řez 1 | VIII |
| PŘÍLOHA 9 – Protokol měření nosného podílu drsnosti povrchu pokusu č. 10 řez 2 | IX |
| PŘÍLOHA 10 – Protokol měření nosného podílu drsnosti povrchu pokusu č. 10 řez 3 | X |

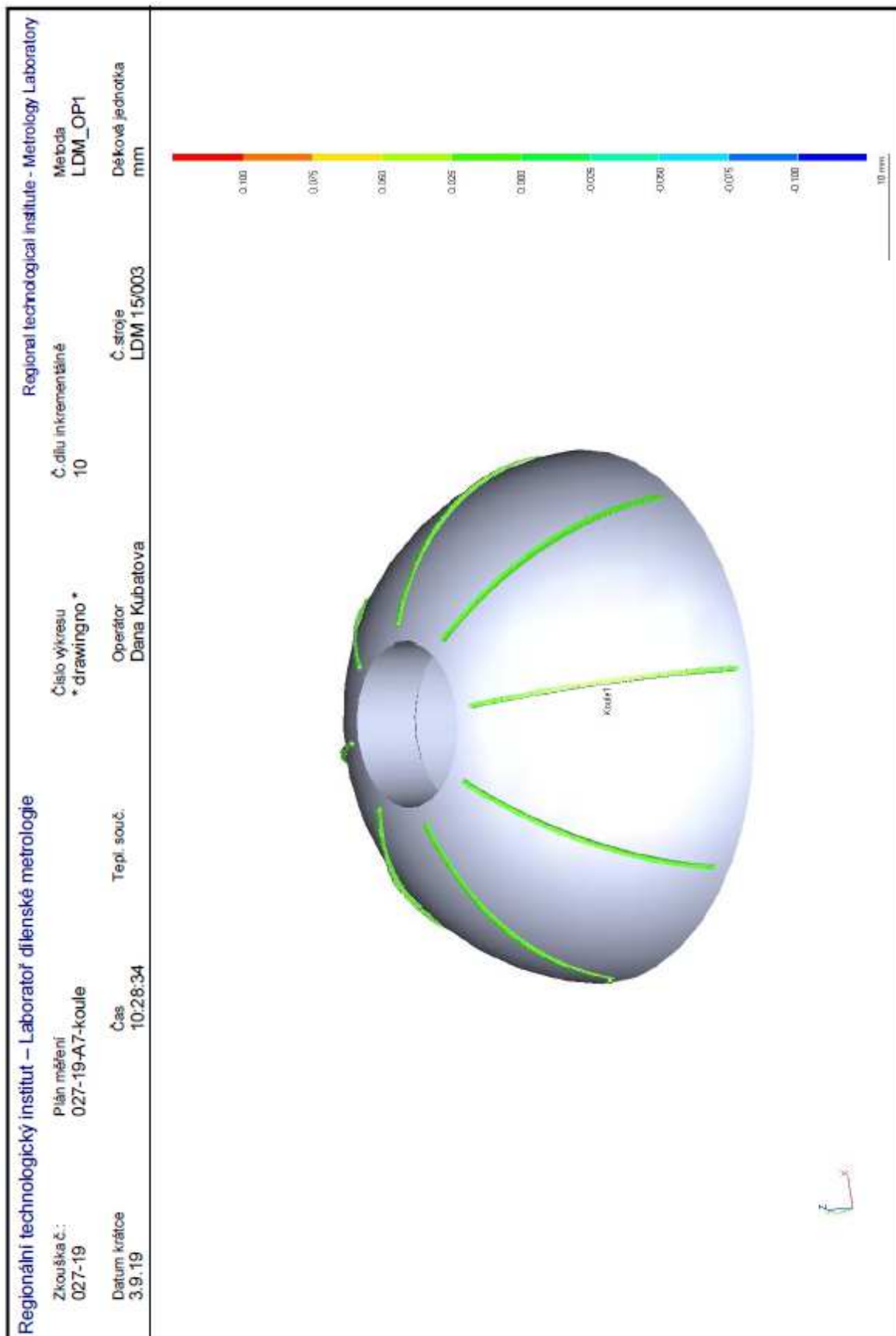
PŘÍLOHA č. 1 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROZMĚRU A TVARU POKUSU č. 10 str. 1

| Regionální technologický institut - Laboratoř dílenské metrologie | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------|----------------------------|------------------------|
| Regional technological institute - Metrology Laboratory | | | | | |
| Zkouška č. (Test no.): 027-19 | | | | | |
| Plán měření 027-19-A7-koule | | Datum krátoe 3.9.19 | | Metoda LDM_OP1 | |
| Číslo výkresu * drawingno * | | Čas 10:30:26 | | Tepl. souč. | |
| Operátor Dana Kubatova | | Stroj * LDM 15/003 * | | Č.dílu inkrementálně 10 | Délková jednotka mm |
| Stránka 1 / 1 | Měř.hod. | Jm.hod. | Horní tol. | Dolní tol. | Odchylka |
|  | Celkový výsledek | | | | |
| | Všechny charakteristiky: 2 | | | | |
| | ...v toleranci: 2 | | | | |
| | ...Mimo toleranci: 0 | | | | |
| | ...Nad výstražnou mezí: 0 | | | | |
| | ...Nevypočteno: 0 | | | | |
| | Souř.systémů celkem: 0 | | | | |
| | ...Nevypočteno: 0 | | | | |
| | Text.elementů celkem: 0 | | | | |
|  | Průměr_Koule1 | | | | ┌ |
| | 50.014 | 50.000 | 0.100 | -0.100 | 0.014 |
|  | Tvar1 | | | | ┌— |
| | 0.009 | 0.000 | 0.010 | | 0.009 |

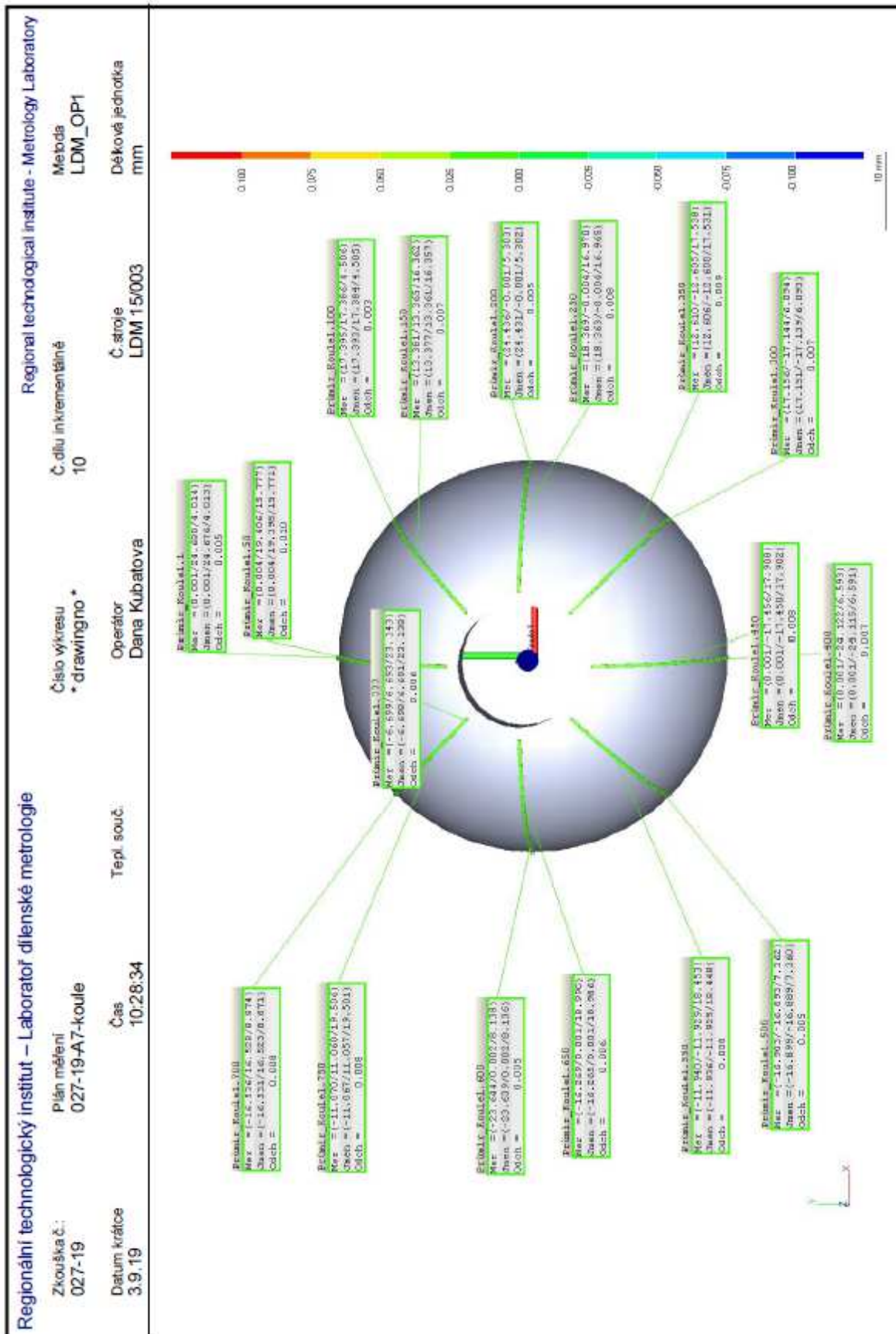
PŘÍLOHA č. 2 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROZMĚRU A TVARU POKUSU č. 10 str. 2



PŘÍLOHA č. 3 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROZMĚRU A TVARU POKUSU č. 10 str. 3



PŘÍLOHA č. 4 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROZMĚRU A TVARU POKUSU č. 10 str. 4



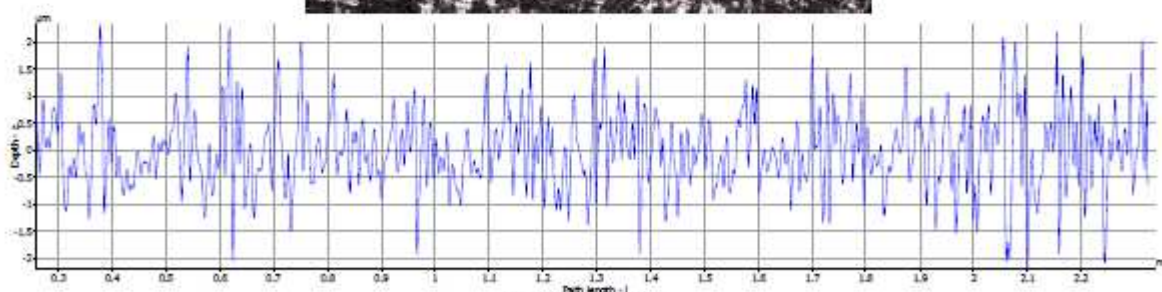
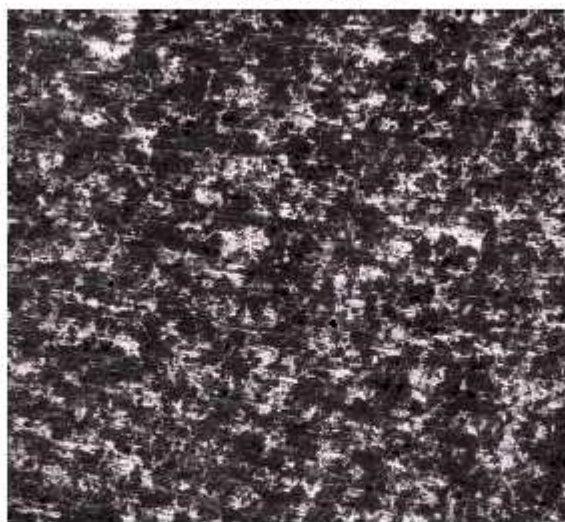
PŘÍLOHA č. 5 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROVINNÉ DRSNOSTI POVRCHU
POKUSU č. 10 řez 1

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

alicon

Měřicí protokol
Profile Measurement

10_vzorekFR



Ra: 0.5296µm
Rq: 0.6856µm
Rz: 3.9364µm

Filter: high pass - roughness profile
Lc:= 250.0000µm

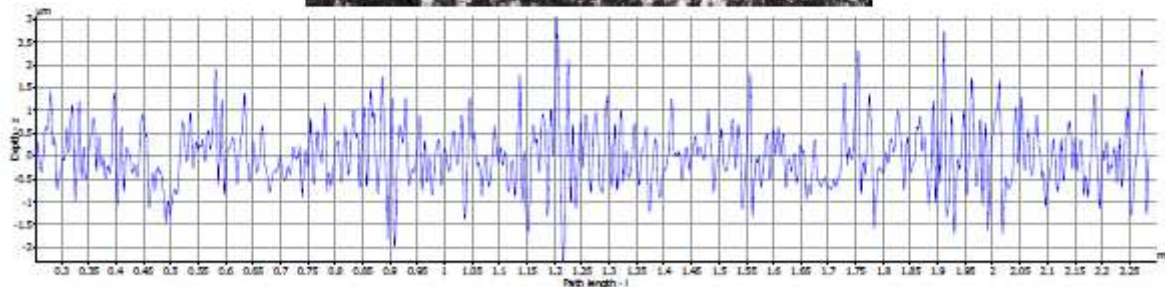
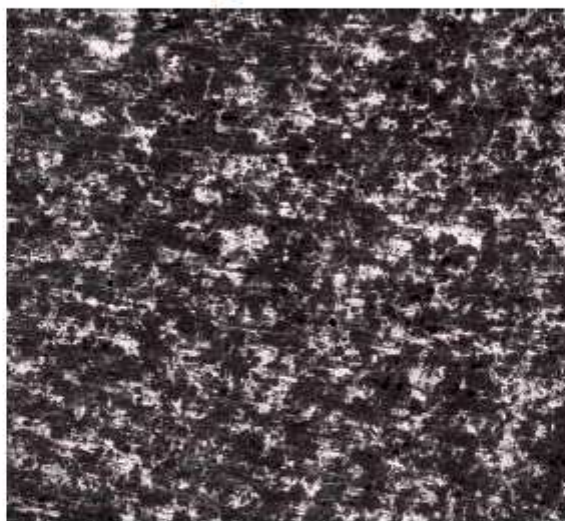
PŘÍLOHA č. 6 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROVINNÉ DRSNOSTI POVRCHU
POKUSU č. 10 řez 2

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

alicon

Měřicí protokol
Profile Measurement

10_vzorekFR



Ra: 0.5024 μm
Rq: 0.6499 μm
Rz: 4.1599 μm

Filter: high pass - roughness profile
Lc: = 250.0000 μm

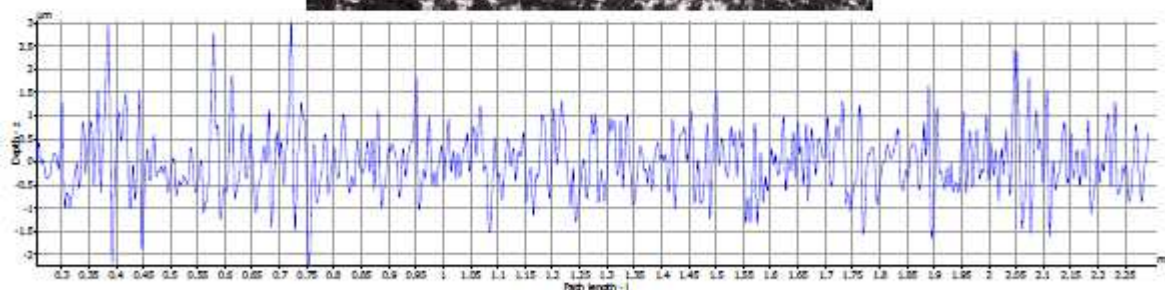
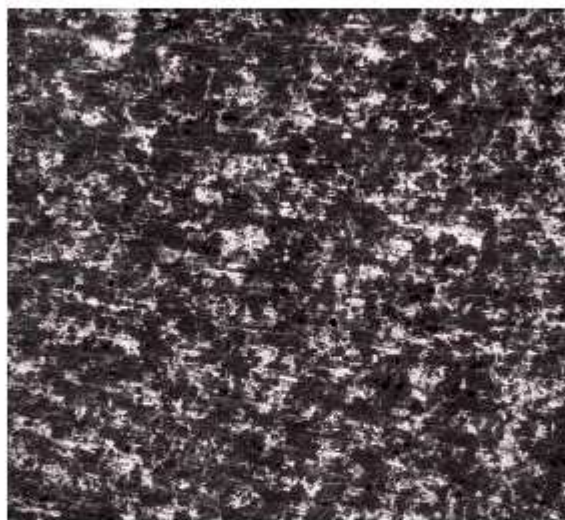
PŘÍLOHA č. 7 – PROTOKOL MĚŘENÍ ROVINNÉ DRSNOSTI POVRCHU
POKUSU č. 10 řez 3

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

alicon

Měřicí protokol
Profile Measurement

10_vzorekFR



Ra: 0.5131µm
Rq: 0.6664µm
Rz: 4.0762µm

Filter:

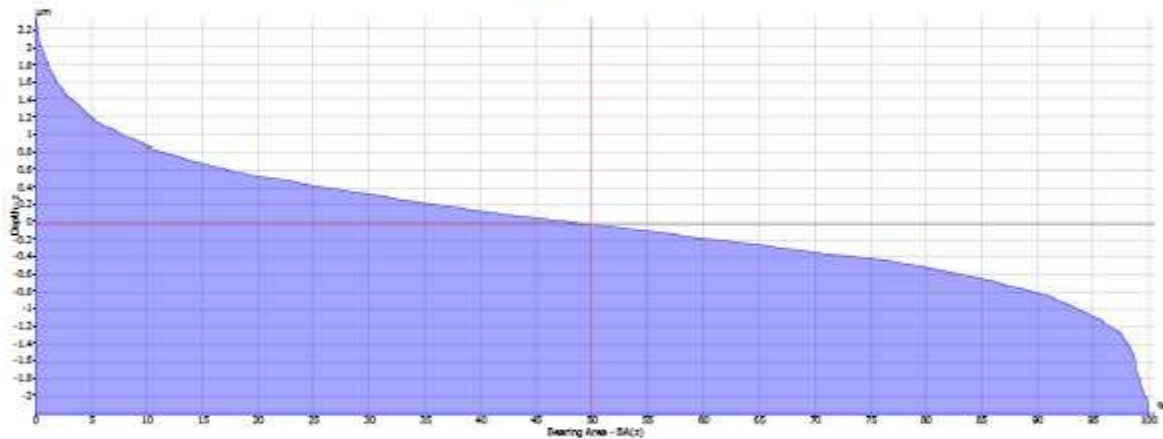
high pass - roughness profile
Lc:= 250.0000µm

**PŘÍLOHA č. 8 – PROTOKOL MĚŘENÍ NOSNÉHO PODÍLU DRSNOSTI POVRCHU
POKUSU č. 10 řez 1**

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

alicon

Měřicí protokol
Profile Measurement
Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve
of Roughness Profile
 $L_c = 250.0000\mu\text{m}$
10_vzorekFR



Measurement line

$BA(z) = 50.0000\%$

$z = -0.0196\mu\text{m}$

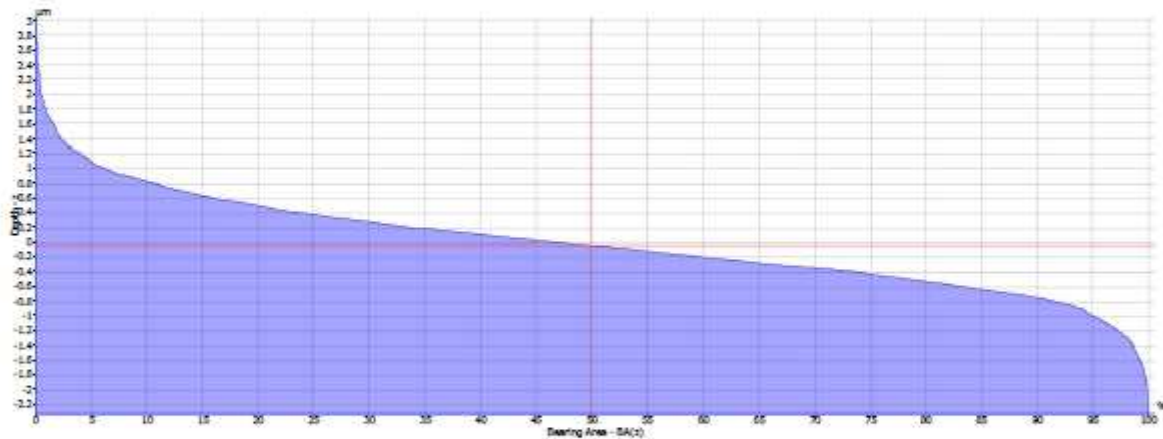
| Name | Value | Unit | Description |
|------|----------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rk | 1.5785 | μm | Core roughness depth, Height of the core material |
| Rpk | 0.8514 | μm | Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material |
| Rvk | 0.7192 | μm | Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material |
| Rmr1 | 12.6600 | % | Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material |
| Rmr2 | 89.9300 | % | Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load |
| l | 2.5817 | mm | Profile Length |
| Lc | 250.0000 | μm | LambdaC: cut off wavelength |

**PŘÍLOHA č. 8 – PROTOKOL MĚŘENÍ NOSNÉHO PODÍLU DRSNOSTI POVRCHU
POKUSU č. 10 řez 2**

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

alicon

Měřicí protokol
Profile Measurement
Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve
of Roughness Profile
Lc = 250.0000 μ m
10_vzorekFR



Measurement line

BA(z) = 50.0000%

z = -0.0357 μ m

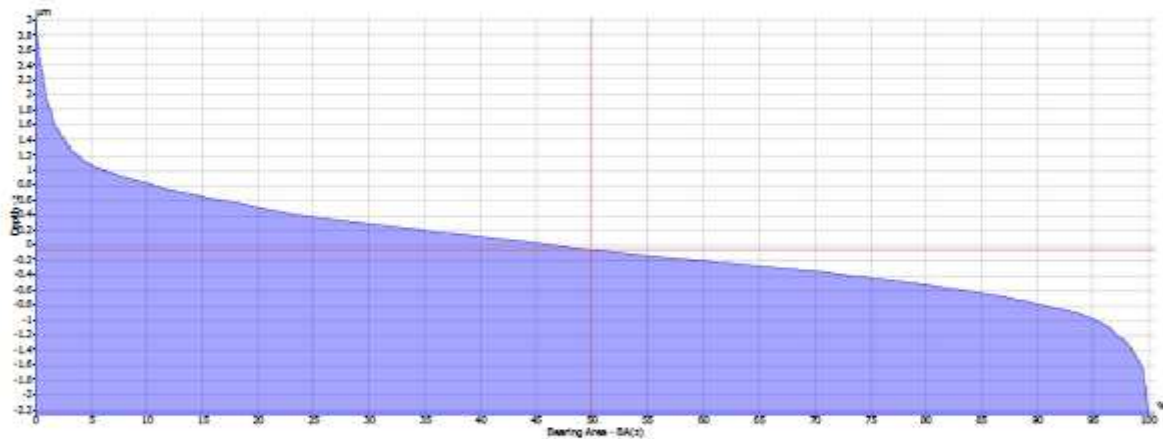
| Name | Value | Unit | Description |
|------|----------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rk | 1.5082 | μ m | Core roughness depth, Height of the core material |
| Rpk | 0.8351 | μ m | Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material |
| Rvk | 0.6673 | μ m | Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material |
| Rmr1 | 12.6300 | % | Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material |
| Rmr2 | 91.4200 | % | Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load |
| l | 2.5387 | mm | Profile Length |
| Lc | 250.0000 | μ m | LambdaC: cut off wavelength |

**PŘÍLOHA č. 10 – PROTOKOL MĚŘENÍ NOSNÉHO PODÍLU DRSNOSTI POVRCHU
POKUSU č. 10 řez 3**

Fakulta strojní - Regionální technologický institut
Univerzitní 8
306 00 Plzeň

alicon

Měřicí protokol
Profile Measurement
Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve
of Roughness Profile
 $L_c = 250.0000\mu\text{m}$
10_vzorekFR



Measurement line

$BA(z) = 50.0000\%$

$z = -0.0510\mu\text{m}$

| Name | Value | Unit | Description |
|------|----------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rk | 1.5624 | μm | Core roughness depth, Height of the core material |
| Rpk | 0.8809 | μm | Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material |
| Rvk | 0.6021 | μm | Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material |
| Rmr1 | 12.1100 | % | Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material |
| Rmr2 | 91.0600 | % | Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load |
| l | 2.5481 | mm | Profile Length |
| Lc | 250.0000 | μm | LambdaC: cut off wavelength |