

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Hodnocení integrity povrchu za použití rozdílných měřicích
přístrojů**

Autor: Bc. Michael PETR

Vedoucí práce: Ing. Dana KUBÁTOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michael PETR**
Osobní číslo: **S20N0012P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Hodnocení integrity povrchu za použití rozdílných měřicích přístrojů**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod a definice cílů
2. Rešerše současného stavu
3. Návrh experimentů
4. Vyhodnocení experimentů a jejich zhodnocení
5. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava, VŠB Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- Characterisation of areal surface texture. Editor R. K. LEACH. Berlin: Springer, c2013. ISBN 978-3-642-36457-0.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Ing. Michal Povolný**
Regionální technologický institut
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Autorská práva

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

Poděkování

Těmito řádky bych velice rád poděkoval Ing. Daně Kubátové, Ph.D. za vedení mé diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Mgr. Martinovi Vančurovi za užitečné rady během tvoření této práce. Velký dík patří také celé mé rodině za lásku a finanční podporu během celého studia, a hlavně mé manželce za pevné nervy.

Nakonec bych chtěl poděkovat celé Západočeské univerzitě za zkušenosti, kterých jsem po dobu studia nabýval.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | | | |
|-------------------------|---|------------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Petr | Jméno Michael | |
| STUDIJNÍ PROGRAM | N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality | | |
| VEDOUCÍ PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubátová, Ph.D. | Jméno Dana | |
| PRACOVIŠTĚ | ZČU – FST – KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Hodnocení integrity povrchu za použití rozdílných měřicích přístrojů | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2022 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 95 | TEXTOVÁ ČÁST | 64 | GRAFICKÁ ČÁST | 31 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|--|--|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Diplomová práce se zabývá bezkontaktním měřením drsnosti povrchu metodou Focus Variation. K měření bylo použito dvou mikroskopů, jeden od společnosti Alicona, druhý od společnosti Keyence. Cílem experimentů bylo hledání optimálního nastavení mikroskopů a jejich srovnání pro případný transfer měření. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | Drsnost povrchu, bezkontaktní metody měření, Focus Variation |

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

| | | |
|--------------------------|---|--|
| AUTHOR | Surname Petr | Name Michael |
| STUDY PROGRAMME | N0715A270011 – Machining, additive technology and quality assurance | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubátová, Ph.D. | Name Dana |
| INSTITUTION | ZČU – FST – KTO | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Evaluation of Surface Integrity Using Different Measuring Instruments | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KTO | SUBMITTED IN | 2022 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 95 | TEXT PART | 64 | GRAPHICAL PART | 31 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|--|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The master's thesis deals with non-contact surface roughness measurement using the Focus Variation method. Two microscopes were used, one from Alicona and the other from Keyence. The aim of the experiments was to find the optimal setting of the microscopes and their comparison for possible transfer of measurements. |
| KEY WORDS | Surface roughness, non-contact measurement method, Focus Variation |

Obsah

| | |
|--|----|
| Přehled použitých zkratk a symbolů..... | 10 |
| Seznam obrázků | 11 |
| Seznam tabulek | 11 |
| Seznam grafů..... | 12 |
| 1 Úvod a definice cílů | 14 |
| 1.1 Cíl diplomové práce..... | 14 |
| 1.2 Obsah diplomové práce | 15 |
| 1.3 Obecné termíny a definice | 15 |
| 1.3.1 Rozdělení metod měření..... | 15 |
| 1.3.2 Definice termínů a parametrů..... | 21 |
| 1.3.3 Popis procesu měření drsnosti povrchu..... | 27 |
| 1.3.4 Hodnocení drsnosti povrchu..... | 29 |
| 1.3.5 Vyhodnocování výsledků měření..... | 30 |
| 2 Rešerše současného stavu..... | 33 |
| 2.1 ALICONA IFM G4 | 33 |
| 2.2 KEYENCE vhx 6000..... | 34 |
| 3 Návrh experimentů..... | 36 |
| 4 Vyhodnocení experimentů a jejich zhodnocení | 41 |
| 4.1 Vyhodnocení experimentu I – porovnání metod „čáry“ a „cikcak“ na mikroskopu Alicona | 44 |
| 4.2 Vyhodnocení experimentu II – porovnání měření s různým zvětšením na mikroskopu Alicona | 48 |
| 4.3 Vyhodnocení experimentu III – porovnání metody „čáry“ na mikroskopu Alicona a Keyence..... | 52 |
| 4.4 Vyhodnocení experimentu IV – porovnání druhů světla na mikroskopu Keyence.. | 55 |
| 4.5 Vyhodnocení experimentu V – porovnání vlivu ostřící páčky na mikroskopu Keyence..... | 57 |
| 4.6 Souhrn výsledků z provedených experimentů..... | 60 |
| 5 Závěr..... | 61 |
| 7 Seznam použitých zdrojů | 63 |
| PŘÍLOHA č. 1 | i |

| | |
|-------------------|-------|
| PŘÍLOHA č. 2..... | xi |
| PŘÍLOHA č. 3..... | xvi |
| PŘÍLOHA č. 4..... | xx |
| PŘÍLOHA č. 5..... | xxvii |

Přehled použitých zkratk a symbolů

| | |
|-------------------------------|---|
| P,R,W | označení parametrů základního profilu, drsnosti a vlnitosti |
| λ_c | vlnová délka rozhraní drsnosti a vlnitosti mm |
| λ_s | dolní mezní vlnová délka drsnosti mm |
| λ_f | vlnová délka rozhraní vlnitosti a delších složek mm |
| l_p | základní délka pro základní profil mm |
| l_r | základní délka pro profil drsnosti mm |
| l_w | základní délka pro profil vlnitosti mm |
| l_n | vyhodnocovaná délka profilu mm |
| ČSN | Česká technická norma |
| EN | Evropská norma |
| ISO | Mezinárodní organizace pro normalizaci |
| GPS | Geometrické požadavky na výrobky |
| R_p (W_p, P_p) | největší výška výstupku profilu μm |
| R_v (W_v, P_v) | největší hloubka prohlubně profilu μm |
| R_z (W_z, P_z) | největší výška profilu μm |
| R_c (W_c, P_c) | průměrná výška prvků profilu μm |
| R_t (W_t, P_t) | celková výška profilu μm |
| R_a (W_a, P_a) | průměrná aritmetická úchylka profilu μm |
| R_q (W_q, P_q) | průměrná kvadratická úchylka profilu μm |
| R_{sk} (W_{sk}, P_{sk}) | šikmost profilu (skewness) 1 |
| R_{ku} (W_{ku}, P_{ku}) | špičatost profilu (kurtosis) 1 |
| R_{Sm} (W_{Sm}, P_{Sm}) | průměrná šířka prvků profilu μm |
| R_{dq} (W_{dq}, P_{dq}) | průměrný kvadratický sklon profilu deg |
| $R_{mr(c)}$ (W, P) | materiálový poměr profilu (nosný podíl) % |
| R_{dc} (W_{dc}, P_{dc}) | rozdíl výšky úseku profilu μm |
| Z_p | výška výstupku profilu μm |
| Z_v | hloubka prohlubně profilu μm |
| per | periodický |
| aper | aperiodický |
| CSV | comma-separated values = hodnoty oddělované čárkou |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Schéma kontaktního snímání povrchu [1] | 16 |
| Obr. 2 Schéma profilového projektoru [4] | 17 |
| Obr. 3 Schéma principu strukturovaného světla [5]..... | 18 |
| Obr. 4 Princip konfokálního mikroskopu [6]..... | 19 |
| Obr. 5 Schéma principu Focus-Variation [8] | 20 |
| Obr. 6 Profil povrchu [11]..... | 21 |
| Obr. 7 Rozdíl mezi drsností a vlnitostí povrchu [12]..... | 22 |
| Obr. 8 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [11] | 23 |
| Obr. 9 Schéma vyhodnocované délky [19] | 24 |
| Obr. 10 Zpracovávané parametry [28] | 26 |
| Obr. 11 Periodický povrch (vlevo mikroskop Alicona – vpravo mikroskop Keyence)..... | 27 |
| Obr. 12 Aperiodický povrch (vlevo mikroskop Alicona – vpravo mikroskop Keyence) | 27 |
| Obr. 13 Gaussovo rozdělení chyb [25]..... | 31 |
| Obr. 14 Mikroskop Alicona IFM G4 [26]..... | 33 |
| Obr. 15 Mikroskop Keyence vhx 6000 [27] | 34 |
| Obr. 16 Vzorky periodického profilu Ra0,5, Ra1 a Ra3,2..... | 36 |
| Obr. 17 Vzorky periodického povrchu Ra0,4 a Ra1,6 | 36 |
| Obr. 18 Vzorky periodického a aperiodického povrchu Ra0,2..... | 37 |
| Obr. 19 drsnoměr – Hommel Etamic T8000 [24] | 38 |
| Obr. 20 Měření metodou „čáry“ a „cikcak čáry“ | 38 |
| Obr. 21 Typy světel..... | 39 |
| Obr. 22 Ostřící páčka | 40 |
| Obr. 23 Vliv ostřící páčky „normal“ – „mezi“ – „edge“ | 40 |
| Obr. 24 Popis vzorového grafu | 41 |
| Obr. 25 Nečistota na vzorku Ra0,2 obj50x povrch aper | 43 |
| Obr. 26 Metoda „kruh“ - vzorek Ra3,2 | 46 |
| Obr. 27 Přeoraganizované pracoviště | 52 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Parametry struktury povrchu 4287 [11] | 24 |
| Tab. 2 Parametry struktury povrchu 12085 [13]..... | 25 |

| | |
|---|----|
| Tab. 3 Parametry struktury povrchu 13565 [14] [15] | 25 |
| Tab. 4 Tabulka s měřicími podmínkami pro parametr Rsm [18]..... | 28 |
| Tab. 5 Tabulka s měřicími podmínkami pro parametr Ra [18]..... | 29 |
| Tab. 6 Tabulka s měřicími podmínkami pro parametr Rz a Rz1max [18]..... | 29 |
| Tab. 7 Referenční data z drsnoměru Hommel Etamic T8000..... | 37 |
| Tab. 8 Doporučené druhy objektivů [23] | 39 |
| Tab. 9 Zvolené objektivy | 39 |
| Tab. 10 Vzorová data pro tvorbu grafů (parametr Ra – Ra0,2 aper metoda „čáry“)..... | 41 |
| Tab. 11 Vzorová data pro tvorbu grafů (parametr Ra – Ra0,2 aper metoda „cikcak“)..... | 42 |
| Tab. 12 Vzorová data pro tvorbu grafů (parametr Ra – ref. Ra0,2 aper)..... | 43 |
| Tab. 13 Druhy světla u mikroskopu Keyence na vzorku Ra3,2..... | 56 |

Seznam grafů

| | |
|--|----|
| Graf 1 Vzorek Ra0,2 aper zvětšení 50x parametr Ra..... | 44 |
| Graf 2 Vzorek Ra1,6 zvětšení 10x parametr Rp | 44 |
| Graf 3 Vzorek Ra1,6 zvětšení 10x parametr Rv | 45 |
| Graf 4 Vzorek Ra1,6 zvětšení 10x parametr Rz..... | 45 |
| Graf 5 Vzorek Ra1 parametr Rz..... | 46 |
| Graf 6 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční pro metodu „čáry“..... | 47 |
| Graf 7 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční pro metodu „cikcak“ . | 47 |
| Graf 8 Vzorek Ra1,6 parametr Ra metoda „cikcak“ | 48 |
| Graf 9 Vzorek Ra1,6 parametr Ra metoda „čáry“ | 48 |
| Graf 10 Vzorek Ra0,4 parametr Ra metoda „čáry“ | 49 |
| Graf 11 Vzorek Ra0,4 parametr Ra metoda „cikcak“ | 49 |
| Graf 12 Vzorek Ra1,6 parametr Rdq metoda „čáry“ | 50 |
| Graf 13 Vzorek Ra0,2 parametr Rdq metoda „čáry“ a „cikcak“ | 50 |
| Graf 14 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční různým zvětšením metodou „čáry“ | 51 |
| Graf 15 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční různým zvětšením metodou „cikcak“ | 51 |
| Graf 16 Zprůměrované naměřené hodnoty | 53 |
| Graf 17 Odchylky parametru Ra0,5 | 54 |

| | |
|---|----|
| Graf 18 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční metodou „čáry“ na mikroskopu Alicona | 54 |
| Graf 19 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční metodou „čáry“ na mikroskopu Keyence..... | 55 |
| Graf 20 Vzorek Ra3,2 parametr Ra „mezi“ | 55 |
| Graf 21 Vzorek Ra3,2 parametr Rz „mezi“ | 57 |
| Graf 22 Vzorek Ra3,2 parametr Rz „normal“ | 58 |
| Graf 23 Vzorek Ra3,2 parametr Rz „edge“..... | 58 |
| Graf 24 Relativní odchylky – nastavení „mezi“ | 59 |

1 Úvod a definice cílů

Kvalita obrobeneho povrchu výrobku je v dnešní době velké téma. Každá technologie má nějaký vliv na jakost a drsnost povrchu, ať už se jedná o konvenční, nekonvenční či aditivní metody. Zároveň struktura povrchu dává dané součásti specifické vlastnosti. Nelze říct, že čím je drsnost menší, tím je výsledek lepší. Pakliže se budou vyžadovat od výrobku dobré mazací vlastnosti, tak kvůli malé drsnosti na výrobku nebudou ulpívat mazací oleje atd. Proto je nutné dodržovat a kontrolovat předepsanou drsnost.

K objektivnímu stanovení drsnosti povrchu je možné použít metody kontaktní i bezkontaktní. Kontaktní metody jsou dlouhodobým standardem měření drsnosti povrchu. Jelikož má ale tato metoda řadu limitací, došlo postupem času k rozvoji metod bezkontaktních. Mezi bezkontaktní metody patří mimo jiné měření drsnosti pomocí mikroskopů. Povrch je mikroskopem snímán a různými způsoby je vyhodnocována jeho struktura.

Jedním ze způsobů mikroskopického vyhodnocování drsnosti povrchu je Focus Variation. Tato metoda využívá různého rozlišení optických systémů mikroskopu, aby bylo docíleno maximální hloubky ostrosti. Výsledkem je komplexní obraz s vysokým rozlišením, na kterém mohou být barevně diferencovány různé hladiny ostrosti. Jelikož se jedná o metodu mikroskopickou, je možná i detekce skutečné barvy povrchu.

Na katedře technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni se k bezkontaktnímu měření drsnosti povrchu v současné době používá především optický mikroskop od společnosti Alicona (ALICONA IFM G4), který k měření využívá metodu Focus Variation. Tento mikroskop má ale určité nevýhody. Jednou z nich je jeho konstrukce, která neumožňuje přenos přístroje. Katedra nově disponuje mikroskopem Keyence (KEYENCE vhx 6000), který používá stejnou metodu měření, ale je mobilní. Bylo by tedy vhodné zjistit, za jakých podmínek by bylo možné začít v běžné praxi měřit na mikroskopu od společnosti Keyence a jaké je jeho optimální nastavení. Zároveň ale může dále probíhat i měření na mikroskopu Alicona. Záleží ale opět na jeho správném nastavení a případných výhodách.

1.1 Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je seznámit čtenáře s různými metodami měření drsnosti povrchu se zaměřením na bezkontaktní metodu Focus Variation, včetně postupu při měření. Dále by součástí práce měl být popis dvou měřicích strojů, které by měly být porovnány. Experimenty budou zacíleny na způsoby nastavení mikroskopů tak, aby bylo dosaženo optimálních měřicích vlastností, a na srovnání jejich výsledků měření, aby bylo možné dosáhnout transferu měření mezi těmito přístroji.

Měření bude probíhat na katedře technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni na obou zmíněných mikroskopech (mikroskop společnosti Alicona a Keyence). Porovnávání výsledků bude možné díky použití několika etalonů s různými povrchovými charakteristikami. Referenční měření bude provedeno kontaktním drsnoměrem Hommel Etamic T8000. Následně budou výsledky měření porovnány graficky. Základem bude srovnání výsledků měření jednotlivých mikroskopů při různém nastavení s referenčním měřením drsnoměrem. V některých experimentech budou porovnány oba mikroskopy mezi

sebou a zároveň s referenčním měřením, aby bylo možné dosáhnout případného přenosu měření mezi nimi.

1.2 Obsah diplomové práce

V práci bude nejprve stručně shrnuta problematika měření drsnosti povrchu, jeho hodnocení a základní terminologie v této oblasti. Dále bude následovat rešerše současného stavu. Součástí této části je popis obou mikroskopů, způsob, jakým měří drsnost povrchu, jejich výhody a nevýhody. Praktická část diplomové práce je potom složena z návrhu experimentů, kde bude popsáno, jakým způsobem bude testování probíhat, vyhodnocení experimentu a celkové zhodnocení.

1.3 Obecné termíny a definice

Jak již z úvodu vyplývá, hlavním nosným tématem této práce je měření drsnosti povrchu. Než proběhne samotné měření a vyhodnocování výsledků je nutné popsat jaké metody se používají pro měření drsnosti povrchu. Proto musí být nejprve vysvětleno pár základních pojmů a rozdělení.

1.3.1 Rozdělení metod měření

Metody měření jsou děleny na kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní metoda je založena na principu tažení měřicího doteku po povrchu. Přístroje, kterými se toto měření provádí se nazývají profilometry. Bezkontaktní metoda se zakládá na principu odražení světla od zkoumaného povrchu. Mezi bezkontaktní metody patří např. konfokální mikroskopie, variace ohniska, strukturované světlo, elektronová mikroskopie a profilové projektory. [1]

1.3.1.1 Kontaktní metody

Metoda dotykového snímání povrchu je nejpoužívanější způsob hodnocení struktury povrchu. Principem je skluz diamantového hrotu konstantní rychlostí po povrchu vzorku a vyhodnocení rozdílů výšky. V praxi se nejvíce používají dílenské přístroje, které mohou být přenosné, a tedy i snadno využitelné. Vyhodnocují ale pouze základní parametry drsnosti. Pro přesnější měření je nutné použít přístroje laboratorní, které jsou připojené k počítači. Ty díky vyhodnocovacímu softwaru mohou dopočítat kromě struktury povrchu i jeho rozměry. [2]

Výhody

- Měření má jednoduchý princip snímání i převodu signálu. Díky tomu jsou přístroje přenosné a levnější.
- Dílenské přístroje se dají použít i na velké součásti.
- Dotykovými metodami se dají měřit i vnitřní povrchy.
- Připojením k počítači je možné zjistit různé parametry včetně rozměru součásti.
- Měření má více tolerance vůči znečištění. Nevadí mu malé nečistoty ani olejová vrstva.

Nevýhody

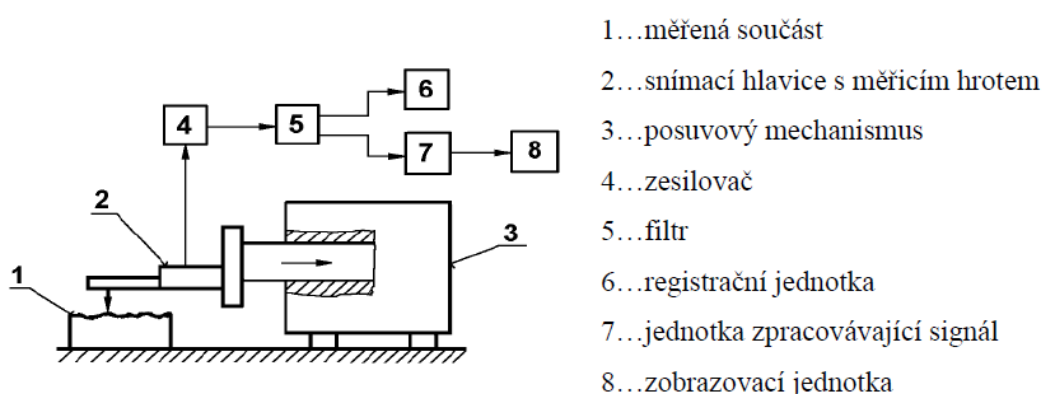
- Výsledky jsou méně přesné.
- Některé povrchy se touto metodou nedají měřit. Příkladem jsou moderní technické povrchy, které mají příliš velké rozměrové rozdíly profilu povrchu a není tedy možné měřit hrotem (např. sestavy mikrorozměrných čoček, součástky paměťových zařízení).
- Dílenské přístroje neumožňují vyhodnocení 3D povrchu. Přístroje připojené na počítač sice tuto možnost mají, výrazně se tím ale prodlužuje doba měření (přístroj musí měřit ve dvou osách).
- Celkově je čas měření delší. Rychlost snímání nelze zrychlit, protože by hrot odskakoval od povrchu.

Stavba přístroje

Mechanická část přístroje slouží ke snímání povrchu – měřicí smyčka. Zahrnuje všechny součásti, které slouží k upevnění, polohování a posouvání měřené součásti. Součástí je měřicí hlava (snímač), na které je snímací hrot. Ten je diamantový a má tvar kužele. Může mít různý poloměr zaoblení (2 μm , 5 μm , 10 μm) a různý vrcholový úhel (60°, 90°), což ovlivňuje přesnost výsledku. Dalšími mechanickými částmi jsou posuvná jednotka, upínací přípravek a referenční vedení, což je geometricky přesná dráha snímače, která slouží pro srovnání. Schéma stavby přístroje je znázorněno na obrázku 1. [2]

Elektrický převodník signálu je umístěn v rameni. Přeměňuje svislé souřadnice snímaného profilu na určitou formu elektrického signálu, který je dále zpracováván.

Hrot se pohybuje konstantní rychlostí a pro správné měření na něj musí být vyvíjena měřicí síla, aby co nejlépe kopíroval povrch. Zpracování vstupního signálu může být piezoelektrické, které je vhodné pro dílenské přenosné drsnoměry. Jejich měřicí síla se pohybuje v řádu jednotek mN. Druhým typem zpracování je indukční, které se používá pro přesnější měření. Měřicí síla je o něco vyšší (do 10 mN). [2]



Obr. 1 Schéma kontaktního snímání povrchu [1]

1.3.1.2 Bezkontaktní metody

Bezdotykové, nebo také optické, snímání drsnosti je moderní metodou pro posouzení povrchu součástí. Existuje několik technických řešení, které mají různé výhody a nevýhody. Obecně se dá říct, že oproti kontaktnímu měření mají:

Výhody

- Umožňují 3D zobrazení povrchu
- Rychlejší měření
- Možnost použití i na měkkých površích

Nevýhody

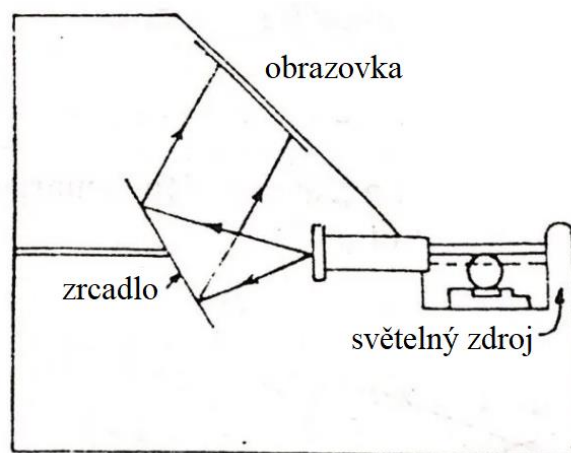
- Vysoká pořizovací cena přístrojů
- Omezení u některých tvarů a velikostí součástí
- Závislost na znečištění povrchu.

Mezi metody bezkontaktního měření se řadí tyto:

- a) Profilové projektory
- b) Strukturované světlo
- c) Konfokální měření
- d) Focus Variation

a) Profilové projektory

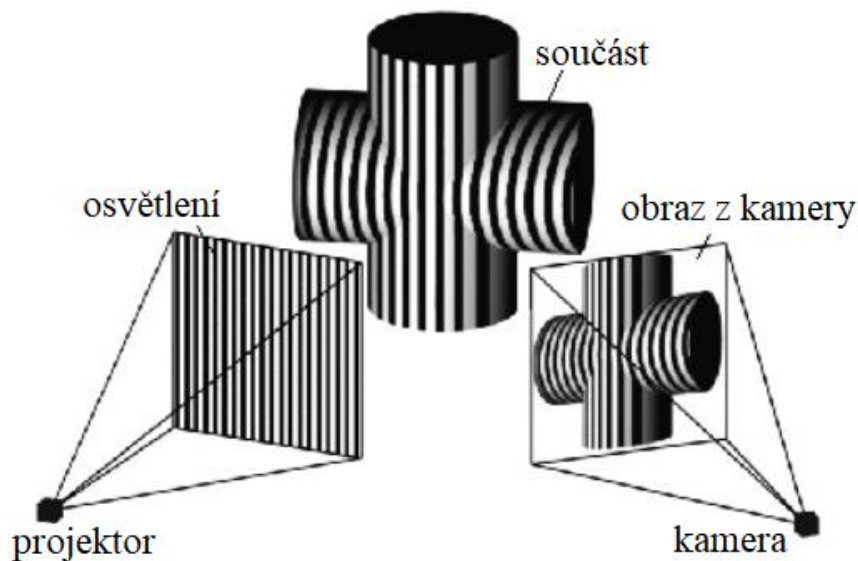
Jedná se o nejstarší metodu optického měření (Obr.2). Profilové projektory zvětšují povrchové charakteristiky součástí a promítají obraz na plátno. Prostřednictvím shody vzoru je obrázek porovnán s referenčním modelem. Výhodou je rychlost, kdy je měření provedeno během několika sekund. Nevýhodou je, že automatické měření geometrických prvků se dá použít pouze na dvourozměrné. Další nevýhodou je jeho citlivost na zarovnání objektu. V závislosti na jeho orientaci lze získat různé výsledky měření. [3] [4]



Obr. 2 Schéma profilového projektoru [4]

b) Strukturované světlo

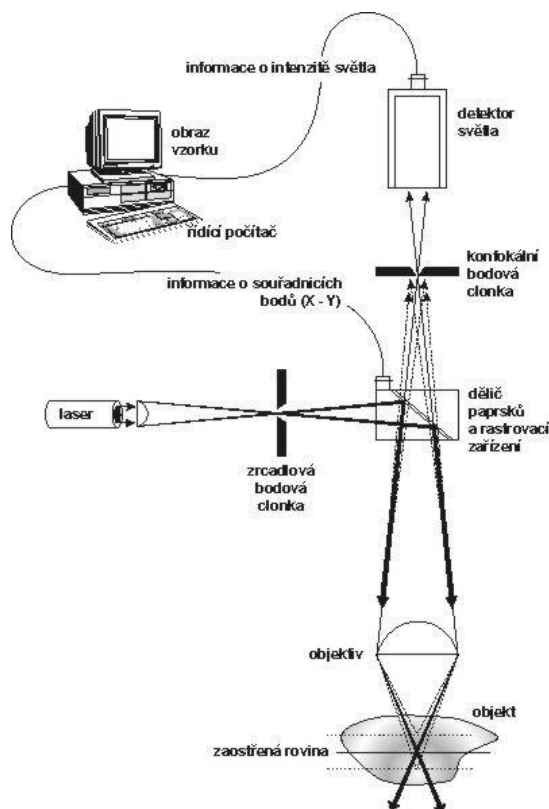
Princip metody (Obr.3) spočívá v projektoru, který osvětluje měřený objekt několika světlými a tmavými pruhy a zachycuje jej alespoň jednou kamerou. Topografie vzorku narušuje vzor pruhů projektoru. Zkreslený vzor je zaznamenán kamerou. Snímaný obraz je zpracován a programem je dopočtena topografie povrchu. Jednou z výhod strukturovaného světla je vysoká rychlost měření při měření velkých ploch. Technologie se proto primárně používá pro měření velmi velkých dílů (např.: karoserie). Na druhou stranu má tato technologie menší přesnost měření hloubky menší než mikrometru, což je ale potřeba například pro měření drsnosti povrchu. Nízká hloubka ostrosti a vysoká citlivost na různé charakteristiky povrchu značně omezují rozsah použití. [3] [5]



Obr. 3 Schéma principu strukturovaného světla [5]

c) Konfokální měření

Konfokální měření (Obr.4) je charakteristické vysokým bočním rozlišením. Přímě v ohnisku uvnitř detektoru se používá další clona k blokování světla nad a pod ohniskovou rovinou. Detektorem tak prochází pouze světlo v ohniskové rovině. Detekcí nejsilnějšího signálu se měří hloubka. Konfokální systémy jsou vhodné zejména pro měření velmi hladkých povrchů, které jsou např. na křemíkových strukturách nebo polovodičích. Výhoda vysokého rozlišení je ale doprovázena zvýšenou citlivostí vůči vibracím. [3] [6]



Obr. 4 Princip konfokálního mikroskopu [6]

d) Focus Variation

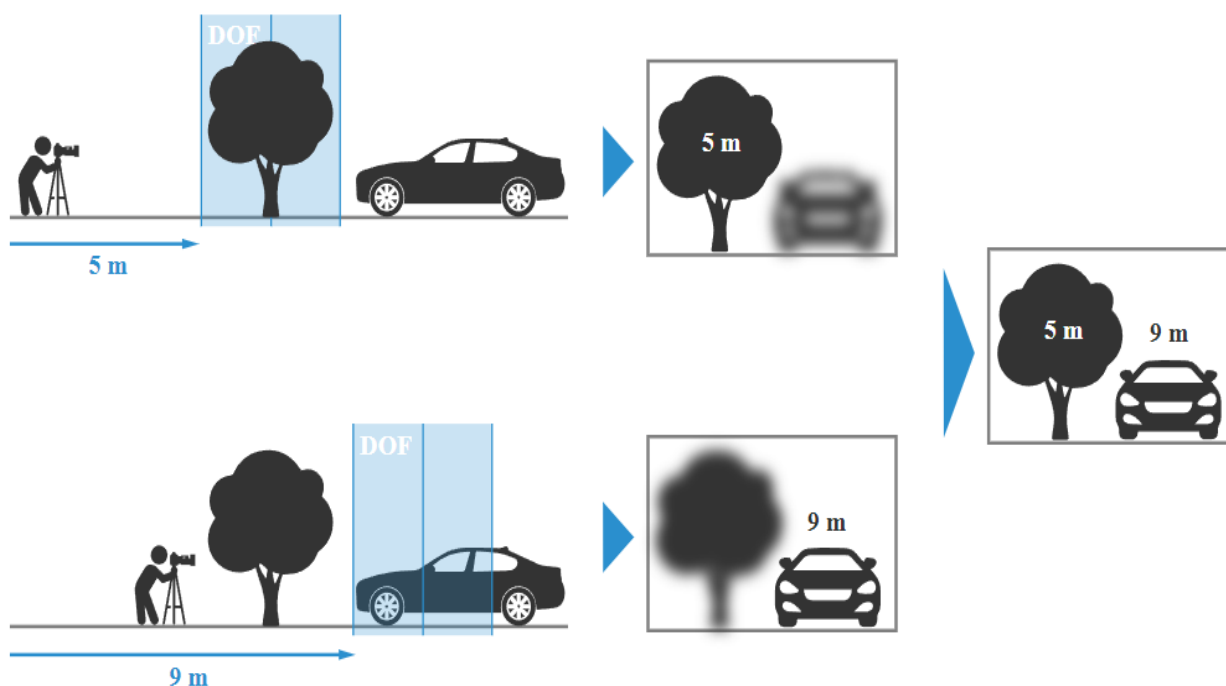
Tato metoda optického měření shromažďuje nejen informace o hloubce, ale také registruje skutečnou barvu povrchu. Metoda Focus Variation kombinuje malou hloubku ostrosti, poskytovanou optickým systémem, s vertikálním skenováním, aby poskytla topografické a barevné informace. Přesná optika zahrnuje různé systémy čoček, které mohou být vybaveny různými objektivy, což umožňuje měření s různým rozlišením. Světlo ze zdroje bílého světla je vloženo do optické dráhy systému a zaostřeno na vzorek pomocí zrcadla rozdělujícího paprsek. Jakmile světlo dopadne na vzorek přes objektiv, odráží se v různých směrech v závislosti na topografii měřeného vzorku. Pokud topografie vykazuje difúzní reflexní vlastnosti, světlo se odráží stejně silně do každého směru. Zrcadlové odrazy rozptylují světlo převážně jedním směrem. Všechny paprsky vycházející od vzorku a dopadající na čočku objektivu jsou sdruženy v optice a shromažďovány senzorem citlivým na světlo za zrcadlem, který rozděluje paprsek. Vzhledem k malé hloubce ostrosti optiky lze jasně zobrazit pouze malé části objektu. Optika se pohybuje vertikálně podél optické osy, přičemž nepřetržitě zachycuje data z povrchu, aby byl plně detekován povrch s plnou hloubkou ostrosti. Jinými slovy, každá část objektu je zachycena s maximální ostroť (Obr.5). Získaná data senzoru jsou pomocí algoritmů převedena na 3D informace s věrným barevným rozložením a plnou hloubkou ostrosti. Toho je dosaženo analýzou variace ohniska podél vertikální osy. [3] [7]

Optický barevný obraz snímáný zároveň s hloubkou usnadňuje měření, pokud jde o identifikaci a lokalizaci polí měření nebo charakteristických povrchových znaků. Vizualní

korelace mezi optickým barevným obrazem povrchu vzorku a informací o jeho hloubce spolu často souvisí a jsou proto základním aspektem smysluplného 3D měření. Protože popsaná technika spoléhá na analýzu variace ohniska, je použitelná pouze na povrchy, kde se ohnisko dostatečně mění během procesu vertikálního skenování. Povrchy, které nesplňují tento požadavek, jako jsou průhledné vzorky nebo součásti s pouze malou místní drsností, jsou obtížně měřitelné.

V zásadě je Focus Variation použitelný na povrchy s velkým rozsahem různých hodnot optické odrazivosti. Jelikož optická technika je velmi flexibilní, pokud jde o použití světla, lze se vyhnout typickým omezením, jako je měření povrchů se silně proměnlivými odrazivými vlastnostmi i ve stejném zorném poli. Vzorek se může lišit od lesklého po difúzně odrážející, od homogenního po složený materiál a od hladkého po drsný povrch. Focus Variation překonává aspekt omezených možností měření, pokud jde o odrazivost, kombinací osvětlení, řízení parametrů snímače a integrované polarizace. Modulované osvětlení znamená, že intenzita osvětlení není konstantní, ale mění se. Komplexní variace intenzity může být generována generátorem signálu.

Díky velikým rozsahům různých zdrojů osvětlení Focus Variation umožňuje měření úhlů sklonu přesahujících 87° . Focus Variation obvykle poskytuje opakovatelné výsledky měření pro povrchy s místním R_a 0,009 μm při l_c 2 μm . Používá se k provádění 3D měření povrchu s vysokým rozlišením pro zajištění kvality ve výrobě, stejně jako výzkumné a vývojové činnosti v laboratoři. Klíčovými aplikacemi jsou povrchová analýza a charakterizace např. při výrobě nástrojů a forem, přesné výrobě, letectví, automobilovém průmyslu, všech druzích materiálových věd, koroze a tribologii, elektronice, vývoji lékařských zařízení. Technika Focus Variation se vzhledem ke svým technickým specifikacím používá pro měření tvaru i drsnosti. [8]



Obr. 5 Schéma principu Focus-Variation [8]

1.3.2 Definice termínů a parametrů

Každý povrch má určitou strukturu, kterou je možné objektivizovat. Parametry struktury povrchu jsou hodnoceny na jeho profilu a jsou definovány určitými normami. Níže jsou shrnuty základní termíny a parametry nezbytné pro další postup diplomové práce.

1.3.2.1 Struktura povrchu

Struktura povrchu je definována jako opakované nebo náhodné úchyly od geometrického povrchu, které tvoří třírozměrnou topografii povrchu. Struktura povrchu je především spojení drsnosti a vlnitosti. Vliv na strukturu mají také stopy po obrábění, nedokonalosti a úchyly tvaru na omezené ploše povrchu. [9] [10]

Vlnitost povrchu

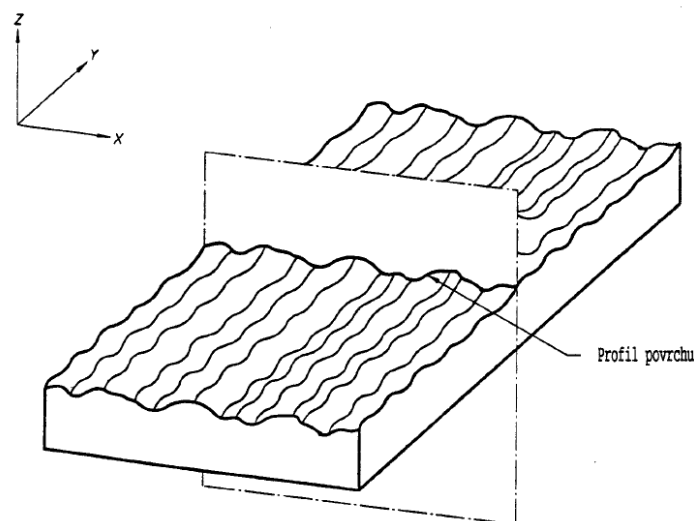
Vlivem stroje vznikají při výrobě na povrchu součásti relativně větší nerovnosti, které mají často určitou periodicitu. Způsobit je může např. nepřesné uložení obrobku nebo jeho kmitání. [11]

Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je souhrnem nerovností povrchu, které mají menší rozměry než vlnitost. Tyto nerovnosti vznikají také během výrobního procesu a největší vliv na ně má řezná rychlost, tvar nástroje, posuv, opotřebení nástrojů atd. Vady povrchu (důlky, vrypy, trhlínky atd.), které se vyskytují náhodně v malé míře a vznikají vadami materiálu, poškozením apod., se nepočítají do drsnosti povrchu. [10]

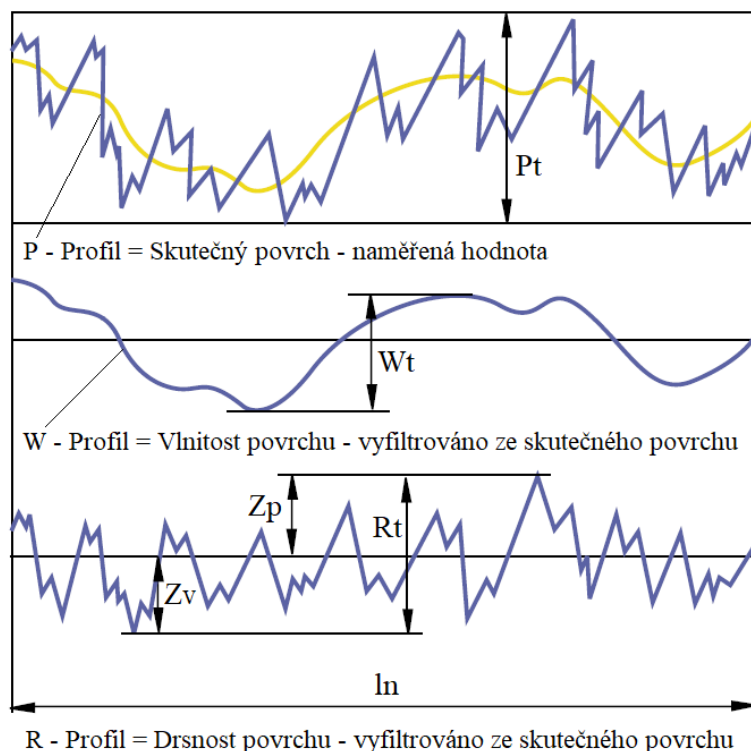
1.3.2.2 Profil povrchu

Struktura povrchu je popisována pomocí profilu povrchu. Ten je definován takto: profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (viz Obr.6). V praxi je obvykle volena rovina, která je kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem. [11]



Obr. 6 Profil povrchu [11]

- **Základní profil povrchu (P profil)** – Slouží k hodnocení parametrů skutečného povrchu, tedy spojení drsnosti a vlnitosti. Hodnoty vztahující se k základnímu profilu jsou označovány písmenem P.
- **Profil drsnosti (R profil)** – Pokud je na základní profil použit filtr pro potlačení dlouhovlnných složek, je získán profil drsnosti. Z tohoto profilu je možné hodnotit parametry drsnosti, které se značí R. Přenosové pásmo pro profil drsnosti je definováno filtry povrchu λ_s a λ_c (viz Obr.7)
- **Profil vlnitosti (W profil)** – Na základní profil je aplikován filtr λ_f a poté filtr profilu λ_c . Díky tomu jsou nejprve odfiltrovány dlouhovlnné a poté krátkovlnné složky. Profil vlnitosti je základem pro hodnocení parametrů profilu vlnitosti, které jsou značeny W. [11]



Obr. 7 Rozdíl mezi drsností a vlnitostí povrchu [12]

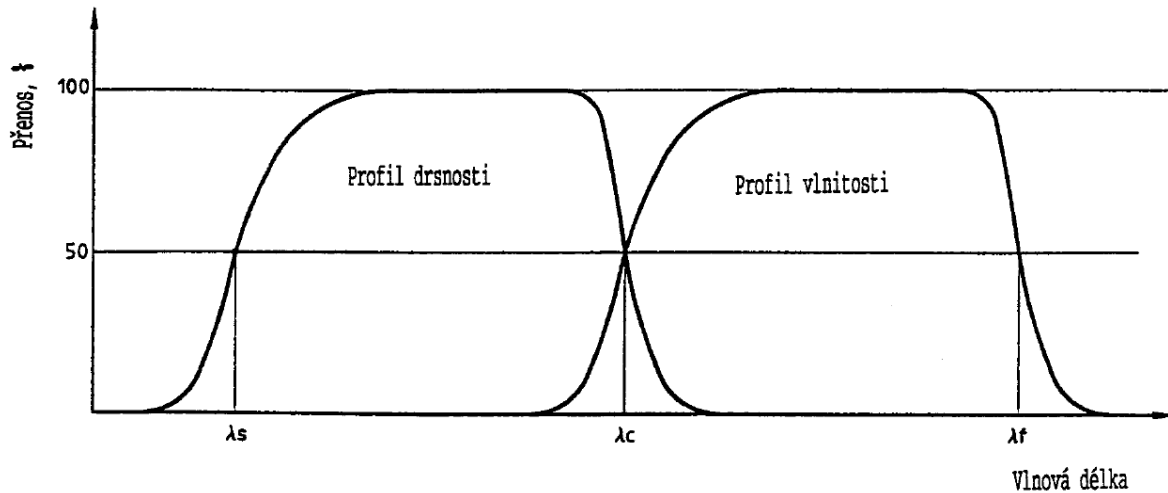
1.3.2.3 Filtry

Pro usnadnění hodnocení a rozlišení jednotlivých složek povrchu lze použít filtry. Jejich správné nastavení je základem pro přesné měření. Nejčastěji jsou používány filtry hardwarové, které jsou součástí měřicího přístroje, a jejich použití je tedy velmi jednoduché.

Filtr profilu

Filtry profilu dokáží oddělit dlouhovlnnou a krátkovlnnou složku pod nebo nad danou frekvencí. Liší se od sebe různou hodnotou mezní vlnové délky (Obr.8). Jejich hlavním využitím je rozlišení profilu vlnitosti a profilu drsnosti.

- **Filtr profilu λ_c** – „Filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomných na povrchu.“ [11]
- **Filtr profilu λ_s** – „Filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.“ [11]
- **Filtr profilu λ_f** – „Filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomných na povrchu.“ [11]



Obr. 8 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [11]

1.3.2.4 Parametry profilu

Základní délka

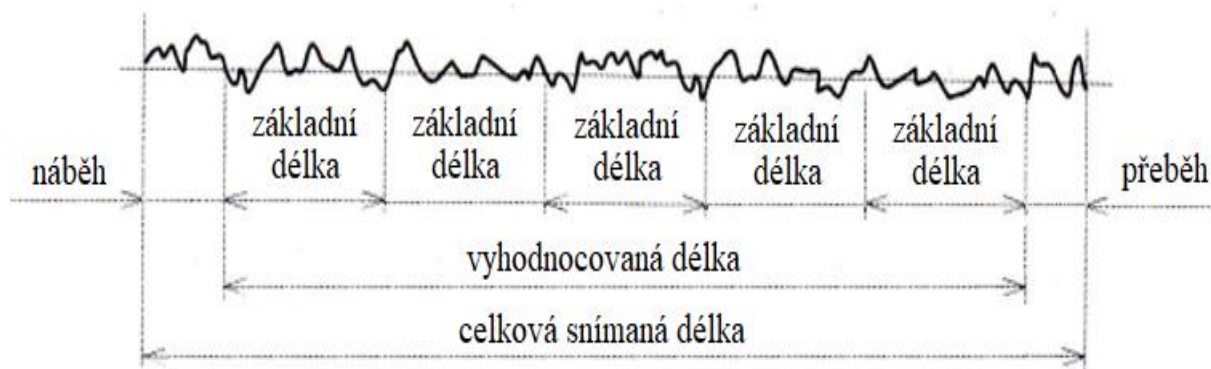
Parametry profilu jsou hodnoceny na tzv. základní délce, kterou je možné nastavit. Směr základní čáry je určen podle hlavního směru profilu (viz níže). Označuje se také jako mezní vlnová rozteč tedy cut – off.

- l_p - základní délka pro základní (primární) profil se rovná vyhodnocované délce
 - l_r - základní délka profilu drsnosti se číselně rovná zvolené vlnové délce filtru λ_c
 - l_w - základní délka profilu vlnitosti se číselně rovná zvolené vlnové délce filtru λ_f .
- [11]

Vyhodnocovaná délka l_n se používá k posouzení vyhodnocovaného profilu. Může obsahovat i několik základních délek. Běžně se používá 5 základních délek. [12]

$$l_n = 5 l_r \quad (1)$$

Celková dráha snímače je prodloužena ještě o náběh a přeběh. (Obr.9)



Obr. 9 Schéma vyhodnocované délky [19]

Tabulky parametrů struktury povrchu

Tab. 1 Parametry struktury povrchu 4287 [11]

| Parametry struktury povrchu dle normy ČSN EN ISO 4287 | |
|---|---|
| Název parametru | značka |
| Výškové parametry | |
| Největší výška výstupku profilu | R _p (W _p ,P _p) |
| Největší hloubka prohlubně profilu | R _v (W _v ,P _v) |
| Největší výška profilu | R _z (W _z ,P _z) |
| Průměrná výška profilu | R _c (W _c ,P _c) |
| Celková výška profilu | R _t (W _t ,P _t) |
| Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu | R _a (W _a ,P _a) |
| Průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu | R _q (W _q ,P _q) |
| Šikmost posuzovaného profilu | R _{sk} (W _{sk} ,P _{sk}) |
| Špičatost posuzovaného profilu | R _{ku} (W _{ku} ,P _{ku}) |
| Délkové parametry | |
| Průměrná šířka prvků profilu | R _{Sm} (W _{Sm} ,P _{Sm}) |
| Tvarové parametry | |
| Průměrný kvadratický sklon posuzovaného povrchu | R _{dq} (W _{dq} ,P _{dq}) |
| Křivky a odpovídající parametry | |
| Materiálový poměr profilu (nosný profil) | R _{mr(c)} (W _{mr(c)} P _{mr(c)}) |
| Rozdíl výšky úseku profilu | R _{dc} (W _{dc} ,P _{dc}) |
| Vzájemný materiálový poměr | P _{mr} , R _{mr} , W _{mr} |

Tab. 2 Parametry struktury povrchu 12085 [13]

| Parametry struktury povrchu dle normy ČSN EN ISO 12085 | |
|--|-----------------|
| Název parametru | značka |
| Parametry metody Motif pro profil drsnosti | |
| Průměrná hloubka prvků Motif drsnosti | R |
| Největší hloubka profilu nerovnosti | R _x |
| Průměrná rozteč prvků Motif drsnosti | AR |
| Parametry metody Motif pro profil vlnitosti | |
| Průměrná hloubka prvků Motif vlnitosti | W |
| Největší hloubka vlnitosti | W _x |
| Průměrná rozteč prvků Motif vlnitosti | AW |
| Celková hloubka vlnitosti | W _{te} |

Tab. 3 Parametry struktury povrchu 13565 [14] [15]

| Parametry struktury povrchu dle normy ČSN EN ISO 13565 | |
|--|-----------------------------------|
| Název parametru | značka |
| Parametry křivky lineárního poměru materiálu | |
| Hloubka jádra drsnosti | R _k |
| Materiálový podíl | Mr ₁ |
| Materiálový podíl | Mr ₂ |
| Redukovaná výška výstupku | R _{pk} |
| Redukovaná hloubka prohlubně | R _{vk} |
| Parametry křivky lineárního poměru materiálu | |
| Hloubka jádra drsnosti | R _{ke} |
| Materiálový podíl | Mr _{1e} |
| Materiálový podíl | Mr _{2e} |
| Redukovaná výška výstupku | R _{pke} |
| Redukovaná hloubka prohlubně | R _{vke} |
| Parametry pravděpodobnostní křivky mat. | |
| Sklon regresní přímky vedené oblastí pošinek | P _{pq} , R _{pq} |
| Sklon regresní přímky vedené oblastí prohlubní | P _{vq} , R _{vq} |
| Relativní materiálový poměr v místě průsečíku oblastí | P _{mq} , R _{mq} |

Níže v obrázku 10 jsou podrobněji popsány vybrané klíčové parametry pro experimenty. Jmenovitě se jedná o parametry:

Ra – Střední aritmetická hodnota drsnosti

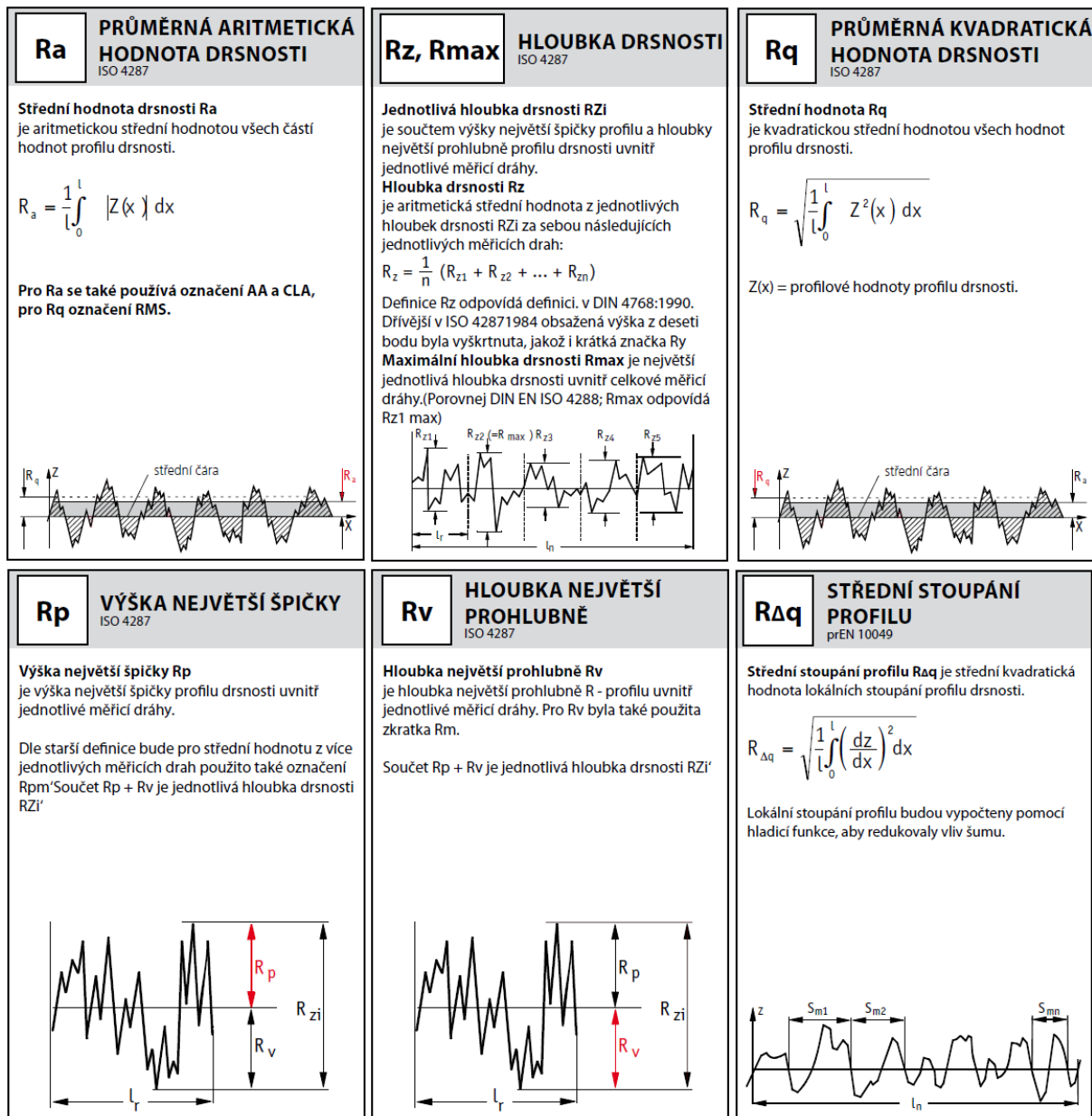
Rz – Maximální výška profilu

Rq – Střední kvadratická hodnota

Rdq = RΔq – Střední kvadratické stoupání profilu

Rp – Největší výška výstupku profilu

Rv – Největší hloubka prohlubně profilu

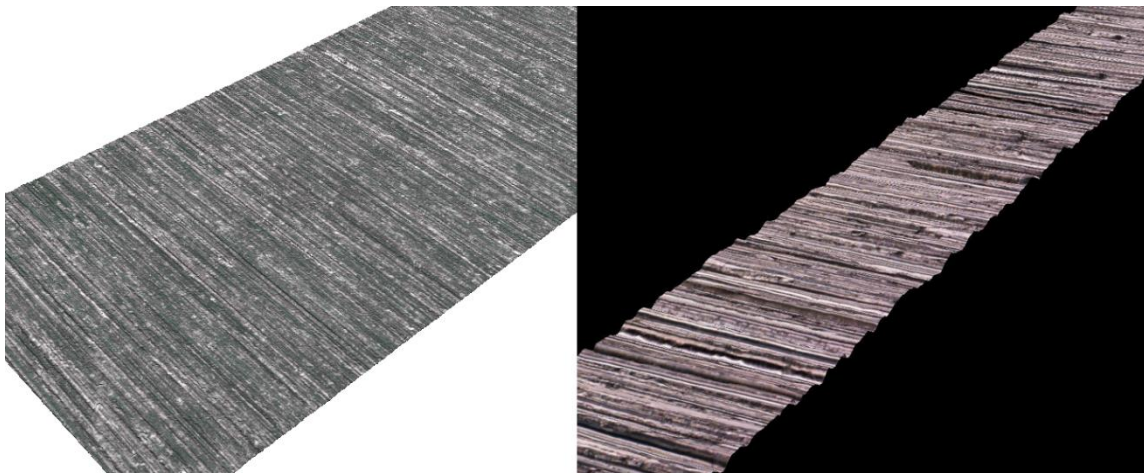


Obr. 10 Zpracovávané parametry [28]

1.3.3 Popis procesu měření drsnosti povrchu

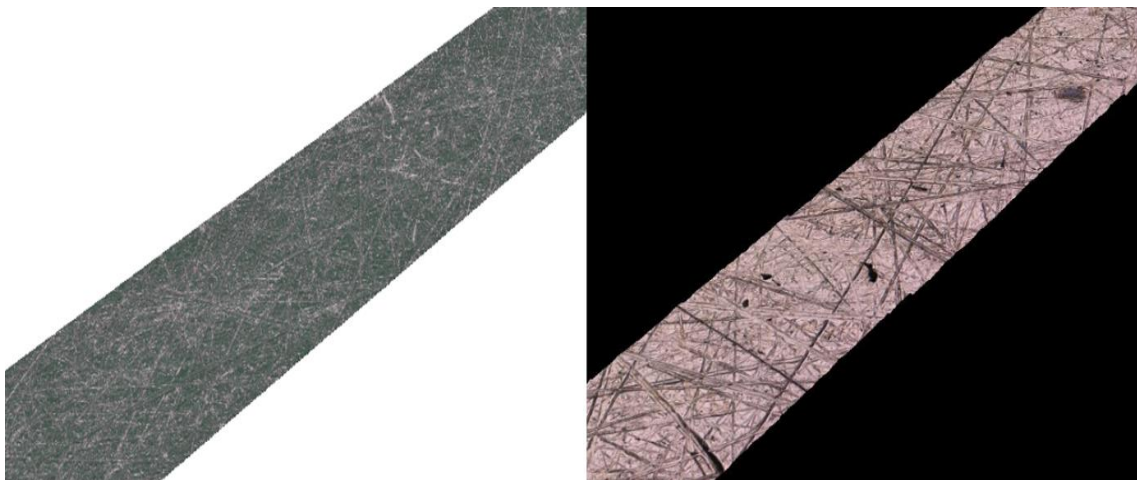
Povrch může být periodický nebo aperiodický:

- Periodický povrch – Nerovnosti mají zřetelně jeden dominující směr. Výrazné linie nerovností vznikají, když po sobě výrobní stroj zanechává v povrchu obráběné součásti stopy v určitém směru. Pro získání vypovídajících hodnot je nutné řídit se pravidlem snímání povrchu kolmo na vzniklé stopy po nástroji. Tento typ povrchu vzniká například při frézování a soustružení. Ukázka periodického povrchu je vidět na obrázku 11, kde levý povrch s bílým podkladem je snímán z mikroskopu Alicona a pravý obrázek s černým podkladem je z mikroskopu Keyence. Jedná se o povrch s drsností Ra1,6 μm . [16]



Obr. 11 Periodický povrch (vlevo mikroskop Alicona – vpravo mikroskop Keyence)

- Aperiodický povrch – Směr nerovností, vzniklých při výrobě, je nahodilý. Směr snímání v tomto případě nemá vliv na výsledky měření. Typicky tento povrch vzniká při kování, odlévání, broušení nebo vyjiskřování. Ukázka aperiodického povrchu s drsností Ra0,2 μm je vidět na obrázku 12, kde povrch s bílým podkladem je z mikroskopu Alicona a černý podklad patří mikroskopu Keyence. [16]



Obr. 12 Aperiodický povrch (vlevo mikroskop Alicona – vpravo mikroskop Keyence)

Určení mezní vlnové délky cut-off

Před měřením drsnosti povrchů je nutné určení mezní vlnové délky neboli cut-off filtru λ_c . V některých případech je určena základní délka (např. ve výrobní dokumentaci), která je v takovém případě brána jako mezní vlnová délka. Pokud základní délka není určena, je měřený objekt snímán tak, aby řez procházel přes místa s kritickými hodnotami parametrů drsnosti (R_a , R_z). Tato místa můžeme odhadnout i pouhým okem. Dále je nutné vizuálně zhodnotit, zda se jedná o periodický či aperiodický materiál. [17]

Pro periodické povrchy se využívá následujícího postupu:

- 1) Na povrchu s neznámou drsností je odhadnut parametr R_{sm} (Střední vzdálenost rýh).
- 2) Pro odhadnutý parametr R_{sm} je následně určena hodnota mezní vlnové délky λ_c dle tabulky 4, která změní hodnotu R_{sm} .
- 3) Pokud nová hodnota R_{sm} podle mezní vlnové délky λ_c z bodu 2) není v souladu s rozsahem parametru dle tabulky 4, je pro měření vybrána nová hodnota mezní vlnové délky (menší nebo větší).
- 4) Jestliže nyní hodnota parametru R_{sm} koreluje s tabulkou 4, je možné získané parametry z mikroskopu odečíst, uložit a dále zpracovávat.

Tab. 4 Tabulka s měřicími podmínkami pro parametr R_{sm} [18]

| R_{sm} [mm] | Mezní vlnová délka λ_c [mm] | Základní délka drsnosti l_r [mm] | Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm] |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| $0,013 < R_{sm} < 0,04$ | 0,08 | 0,08 | 0,04 |
| $0,04 < R_{sm} < 0,13$ | 0,25 | 0,25 | 1,25 |
| $0,13 < R_{sm} < 0,4$ | 0,8 | 0,8 | 4 |
| $0,4 < R_{sm} < 1,3$ | 2,5 | 2,5 | 12,5 |
| $1,3 < R_{sm} < 4$ | 8 | 8 | 40 |

Pro aperiodické povrchy je využit následující postup:

- 1) Odhadnou se parametry drsnosti povrchu, které se pravděpodobně vyskytují na měřeném vzorku. Parametry profilu drsnosti R_a (střední aritmetická hodnota drsnosti) a R_z (maximální výška profilu) mohou být odhadnuty vizuální prohlídkou.
- 2) Pro odhadnutý parametr R_a nebo R_z se následně určí hodnota mezní vlnové délky λ_c dle tabulky 5 nebo 6, která jejich hodnotu změní.
- 3) Mikroskopem s nastavenou hodnotou filtru λ_c se získá reprezentativní měření hodnot R_a , R_z nebo R_{sm} .
- 4) Naměřené hodnoty R_a , R_z nebo R_{sm} se porovnají s rozsahem hodnot v tabulkách 4, 5 nebo 6. Pokud naměřené hodnoty neodpovídají rozsahu, provede se změna nastavení mezní vlnové délky λ_c na menší nebo větší.

- 5) Následně se provedou další měření pro jednu menší nebo větší mezní vlnovou délku filtru λ_c . Opět se provede porovnání s hodnotami v tabulkách. Pokud alespoň jeden parametr koreluje s tabulkou, je toto měření považované za správné.
- 6) Použitím správné hodnoty mezní vlnové délky λ_c se získá reprezentativní měření žádaných parametrů.

Tab. 5 Tabulka s měřicími podmínkami pro parametr Ra [18]

| Ra [μm] | Mezní vlnová délka λ_c [mm] | Základní délka drsnosti l_r [mm] | Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm] |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| 0.006 < Ra < 0.02 | 0,08 | 0,08 | 0,04 |
| 0.02 < Ra < 0.1 | 0,25 | 0,25 | 1,25 |
| 0.1 < Ra < 2 | 0,8 | 0,8 | 4 |
| 2 < Ra < 10 | 2,5 | 2,5 | 12,5 |
| 10 < Ra < 80 | 8 | 8 | 40 |

Tab. 6 Tabulka s měřicími podmínkami pro parametr Rz a Rz1max [18]

| Rz, Rz1max. [μm] | Mezní vlnová délka λ_c [mm] | Základní délka drsnosti l_r [mm] | Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm] |
|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| 0.025 < Rz < 0,1 | 0,08 | 0,08 | 0,04 |
| 0.1 < Rz < 0.5 | 0,25 | 0,25 | 1,25 |
| 0.5 < Rz < 10 | 0,8 | 0,8 | 4 |
| 10 < Rz < 50 | 2,5 | 2,5 | 12,5 |
| 50 < Rz < 200 | 8 | 8 | 40 |

Rz ... je použito při měření R_y, R_v, R_p, R_c , a R_t

Rz1max ... je použito jen při měření $R_{y1max}, R_{v1max}, R_{p1max}$ a R_{c1max}

1.3.4 Hodnocení drsnosti povrchu

1.3.4.1 Určení základní délky

Základní délka se vybírá z normalizované řady, aby bylo možné porovnávat výsledky měření. Zvolená velikost se vybírá podle druhu povrchu (periodický nebo aperiodický), technologie výroby, výšky a rozteče nerovností povrchu. Použitý filtr (určený na podkladě základní délky)

ovlivňuje výsledky měření. Nevhodně zvolená základní délka může vést k zásadnímu rozdílu v měření (až 100 % rozdíl). Volba základní délky (a filtru) je tedy rozhodující pro správnost výsledku měření. [19]

1.3.4.2 Hodnocení parametrů profilu drsnosti

Vyhodnocovaná délka se vždy nemusí rovnat pěti základním délkám. V takovém případě musí být horní a dolní mez přepočtena a je vztažena k vyhodnocované délce, která je rovna pěti základním délkám. Pokud se provede více měření je výsledná vyhodnocená délka větší. Díky tomu je menší nejistota průměru hodnot parametrů. Čím více se tedy provede měření, tím jsou výsledky přesnější. Zároveň ale roste i časová náročnost a náklady na měření. Důležité je tedy najít kompromis mezi náročností měření a jeho spolehlivostí.

1.3.5 Vyhodnocování výsledků měření

Žádné měření nemůže být stoprocentně přesné. Vždy je totiž ovlivněno externími a interními vlivy. Před zhodnocením přesnosti vyhodnocovaných výsledků je nejdříve nutné zvážit, jaké nejistoty mohou během měření vznikat. Dále by se měly zhodnotit také ostatní faktory, které mohou měření ovlivnit.

1.3.5.1 Nejistoty měření

Nejistotou měření je myšlen rozsah kolem změřené hodnoty, ve kterém se s největší pravděpodobností nalézá skutečná hodnota hledaného parametru. Velikost tohoto intervalu se určuje na základě pravděpodobnosti, se kterou se skutečný výsledek nachází v daném intervalu. Pro stoprocentní jistotu výskytu přesné hodnoty by musel být interval nekonečně velký. Nejčastěji se volí rozptyl podle směrodatné odchylky – nejčastěji její dvojnásobek. Těmto odchýlkám se říká standartní odchylka a značí se „u“. Nejistota může být způsobena řadou vlivů a je možné rozlišit je na typ A a B. Ty se od sebe liší způsobem vyhodnocení a původem nejistot. [2] [20]

Mezi základní faktory, které ovlivňují měření, patří:

1. Lidský faktor – odchylka měření může vzniknout odlišným subjektivním vnímáním, nepřesností měření, nepozorností, nedodržováním postupů aj.
2. Okolní prostředí – osvětlení, teplota, hlučnost, vibrace a další náhodné vlivy
3. Metoda měření – výběr metod, postup měření, hodnoty použitých konstant
4. Měřicí vybavení – dostatečná informovanost o vybavení, způsob výběru měřených vzorků, metrologické confirmace kalibračních nejistot
5. Manipulace s měřicím vybavením

Standartní nejistoty typu A – u_A

Jednotlivé nejistoty typu A vedou k náhodným a systematickým chybám měření, jejichž původ není zcela objasněn. Vyhodnocení probíhá opakovaným měřením stejné hodnoty dané veličiny ve stejných podmínkách. Velikost této nejistoty se se zvyšujícím počtem měření zmenšuje. Rozložení těchto chyb je normální – Gaussovské. Tyto nejistoty jsou děleny do 3 kategorií:

1. Na čase nezávislé – projevy jsou náhodné v průběhu času, např. chyby v opakovatelnosti a reprodukovatelnosti
2. Vznik na podkladě specifických podmínek měření
3. Vznik na podkladě náhodné heterogenity materiálu [2] [20]

Standartní nejistoty typu B – u_B

Mezi nejistoty typu B patří opět chyby náhodné i systematické (odchytky). Jejich vznik se dá odhadnout. Náhodné chyby nemohou být korigovány, systematické ano. Hodnocení je prováděno experimentátorem (nikoli opakovaným uniformním měřením) a je pro něj nutná značná zkušenost. Výsledná nejistota u_B je dána sumací různých typů chyb u_B , které obvykle vznikají následujícími vlivy:

1. Etalony a měřidla, která byla kalibrována v externích laboratořích
2. Fyzikální konstanty, které byly použity pro výpočet a zaokrouhlení průběžných výpočtů
3. Působení prostředí, které se nedá řešit statisticky
4. Odlišnosti v provedení měření a uspořádání měřicích přístrojů
5. Vady nebo nedostatek rozlišovací možnosti měřicích přístrojů [2] [20]

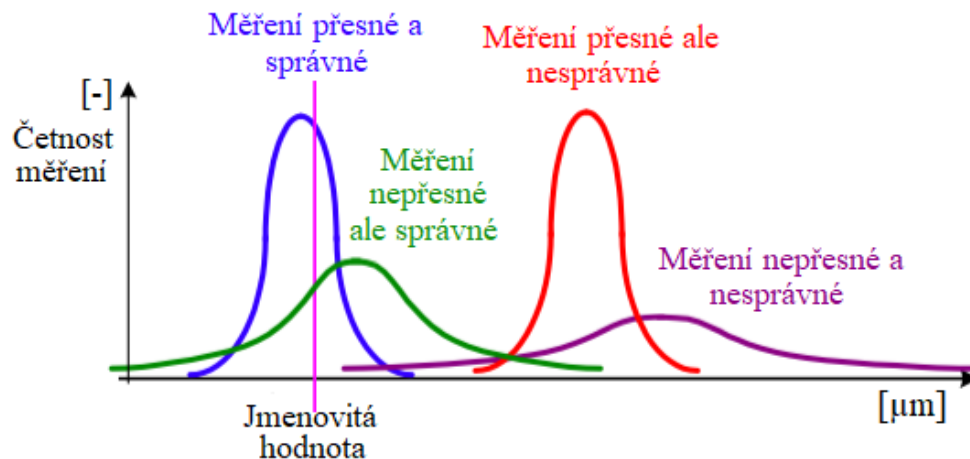
Kombinovaná standartní nejistota – u_c

Kombinovaná nejistota je součtem nejistot A a B. Jedná se o interval, ve kterém se s největší pravděpodobností vyskytuje skutečný výsledek. Používá se nejčastěji a nerozlišuje se, která část spadá pod nejistotu A a která pod B. [2] [20]

Rozšířená standartní nejistota – U

Pro situaci, kdy je nezbytná ještě větší pravděpodobnost výskytu skutečného výsledku v daném rozmezí, je určena rozšířená nejistota U . Jde o dvojnásobek kombinované standartní odchylky – součinitel $k_u = 2$. [2] [20]

Za předpokladu, že náhodnost chyb má v grafu podobu Gaussovy křivky a současně jsou známa všechna fakta o nejistotách, je možné vyhodnocovat výsledky měření jako na obrázku 13.



Obr. 13 Gaussovo rozdělení chyb [25]

1.3.5.2 Normální rozdělení

Pro výpočet nejistot se běžně využívá standartní nejistota, která je vyjádřena díky směrodatné odchylce. Odhad směrodatné odchylky σ je při normálním Gaussovském rozdělení výběrová směrodatná odchylka s , která se vypočítá následujícím vztahem:

Výběrová směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [\mu m] \quad (2)$$

n – počet naměřených hodnot

x_i – jednotlivé naměřené hodnoty

\bar{x} – jejich aritmetický průměr

Aritmetický průměr \bar{x} je možné vypočítat vztahem:

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [\mu m] \quad (3)$$

Horní směrodatná odchylka s_h jde získat vztahem:

Horní směrodatná odchylka

$$s_h = \bar{x} + s \quad [\mu m] \quad (4)$$

Dolní směrodatná odchylka s_d se vypočítá ze vztahu:

Dolní směrodatná odchylka

$$s_d = \bar{x} - s \quad [\mu m] \quad (5)$$

Relativní odchylka byla získána následujícím vztahem:

Relativní odchylka

$$rel_{odchylka} = \frac{s}{\bar{x}} \quad [-] \quad (6)$$

Procentuální relativní odchylka byla získána

Procentuální relativní odchylka

$$rel_{odchylka}^{procentuální} = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad [\%] \quad (7)$$

2 Rešerše současného stavu

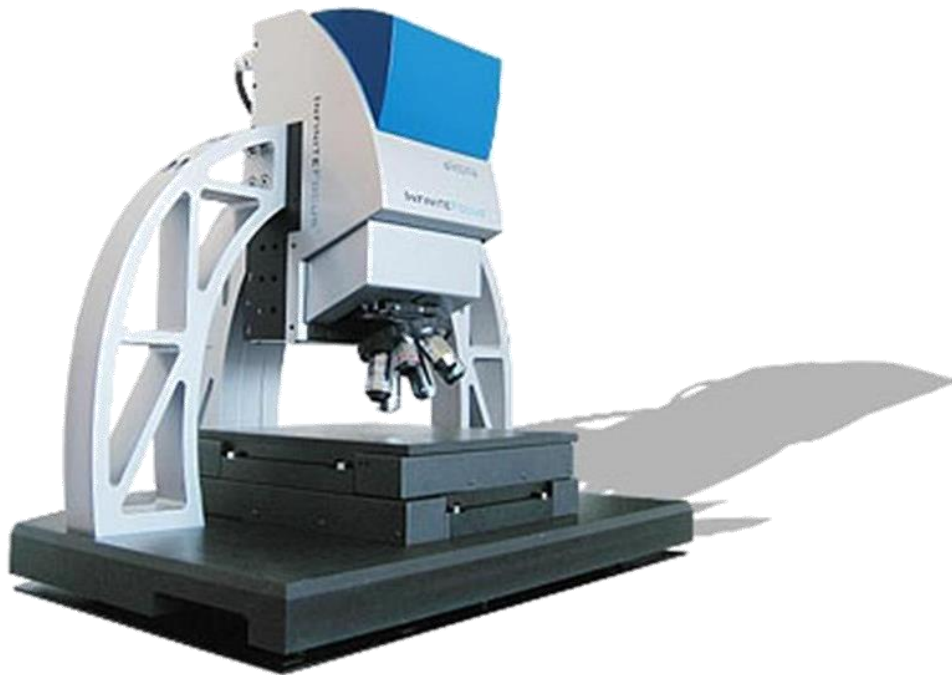
V současné době se na katedře technologie obrábění Západočeské univerzity v Plzni používá mikroskop ALICONA IFM G4 (dále jen Alicona). Do budoucna by ale bylo výhodné začít používat mikroskop KEYENCE vhx 6000 (dále jen Keyence) díky praktičtějšímu použití (viz níže). Oba tyto mikroskopy používají k měření drsnosti povrchu metodu Focus Variation (viz výše v kapitole 2.1.2 Bezkontaktní). Dále budou tyto dva mikroskopy více specifikovány.

2.1 ALICONA IFM G4

Mikroskop Alicona (Obr.14) je spolehlivý a přesný. Oproti novějšímu přístroji od firmy Keyence dokáže vyhodnocovat parametry Abbotovy křivky. Dále také umožňuje měření metodou „cikcak“, kdy je celý vzorek systematicky proměřen zubatou linií. Alicona je vynikající pro drsné povrchy a většinu technických povrchů, ale bojuje s vysoce leštěnými povrchy. Je dobrý pro neprůhledné materiály, ale transparentní jsou náročné. [21]

2.1.1.1 Specifikace:

- Šířka: 710 mm, výška: 868 mm, hloubka: 540 mm
- Hmotnost mikroskopu 95–100 kg v závislosti na vybavení
- Rozsah zvětšení od 2,5x – 100x (podle objektivů)
- Objektivů 6 (napevno)
- Pohyb XY – rozsah ± 100 mm
- Pohyb Z – rozsah 100 mm
- Obrazový snímač 1624 (H) \times 1236 (V) [21]



Obr. 14 Mikroskop Alicona IFM G4 [26]

2.2 KEYENCE vhx 6000

Mikroskop je složen ze samotného mikroskopu, počítače a klávesnice. Co se týče rychlosti skenování, tak mikroskop Keyence (Obr.15) je mnohem rychlejší. Mikroskop Keyence disponuje velkou hloubkou ostrosti. Díky naklápěcí hlavě mikroskop dokáže skenovat až pod úhlem 90°. Po skenování je možné obraz zpracovat do podoby 3D, se kterým se dá dále pracovat. Při tvarovém měření lze zapnout automatickou detekci okrajů, která umožňuje rozlišit hrany. Tato funkce je velmi výhodná při sériovém měření, kdy se na projektu střídají dvě osoby. Výsledek měření je tak méně ovlivněn lidským faktorem a vzniká tak méně odlišností v měření. Mimo jiné mikroskop disponuje vysokým HDR rozlišením a odstraňováním odlesků. [22]

2.2.1.1 Specifikace:

- Šířka: 550 mm, výška: 470 mm, hloubka: 200 mm
- Hmotnost mikroskopu okolo 15 kg v závislosti na vybavení
- Rozsah zvětšení od 0,1x – 5 000x (podle objektivů)
- Objektivů 9 (vyměnitelné)
- Motorizovaný XY stolek 100x100mm– rozsah ± 20 mm
- Motorizovaný Z posuv má rozsah 400 mm
- Obrazový snímač 1600 (H) \times 1200 (V)
- Velká hloubka ostrosti až 34 μm (20x větší než běžné optické mikroskopy)
- Umožňuje zobrazení oblasti až 40 mm x 40 mm
- Automatické 2D a 3D sešívání snímků ve vysoké kvalitě (20000 x 20000 pixelů)
- Kamera má maximální snímkovou frekvenci 50 F/s
- Ručně naklonná hlava mikroskopu – úhel otáčení $\pm 90^\circ$ [22]



Obr. 15 Mikroskop Keyence vhx 6000 [27]

V současné době jsou veškerá měření na vzorcích prováděna na mikroskopu Alicona. Kvůli malé mobilitě, která je zapříčiněna především velkou hmotností granitového podstavce mikroskopu, je potřeba převést měření na mikroskop Keyence, aby se veškerý materiál pro měření nemusel přesouvat na velké vzdálenosti. Tento přechod by ušetřil spoustu času. Mikroskop od společnosti Keyence je možné snadno přenést do jiné laboratoře, nebo přímo k výrobnímu stroji, kde se mohou vzorky okamžitě testovat.

3 Návrh experimentů

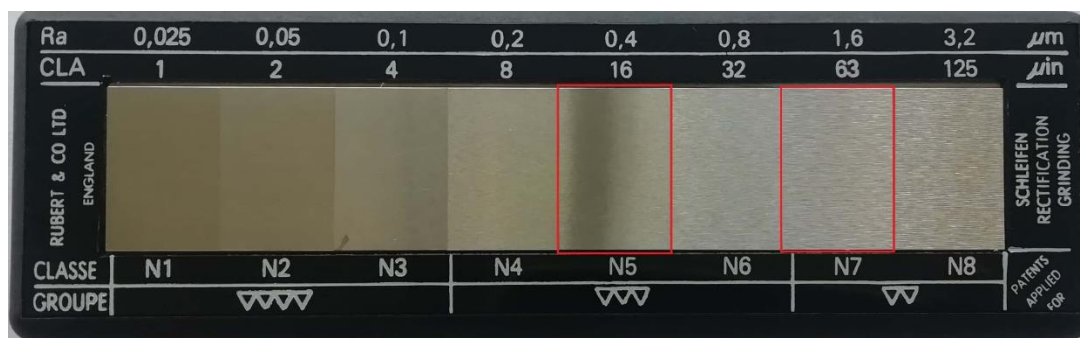
Cílem experimentů je zjistit, jaké jsou optimální parametry měření na mikroskopu Alicona a Keyence při měření drsnosti povrchu, a porovnat tyto mikroskopy mezi sebou v jejich základním nastavení. Pro experimenty budou využity vzorky – navázané kalibrované etalony (Obr. 16,17 a 18) s drsnostmi:

- Ra0,2[μm]
- Ra0,4[μm]
- Ra0,5[μm]
- Ra1[μm]
- Ra1,6[μm]
- Ra3,2[μm]

Jako nejhladší ze vzorků byl zvolen vzorek s drsností Ra0,2 μm . Tato hodnota drsnosti je pro oba mikroskopy limitní, z tohoto důvodu se nezkoumal hladší vzorek. Naopak nejhrubším vzorkem byl zvolen vzorek s drsností Ra3,2 μm , protože většina experimentů nejde dále než na hodnotu drsnosti Ra1,6 μm .

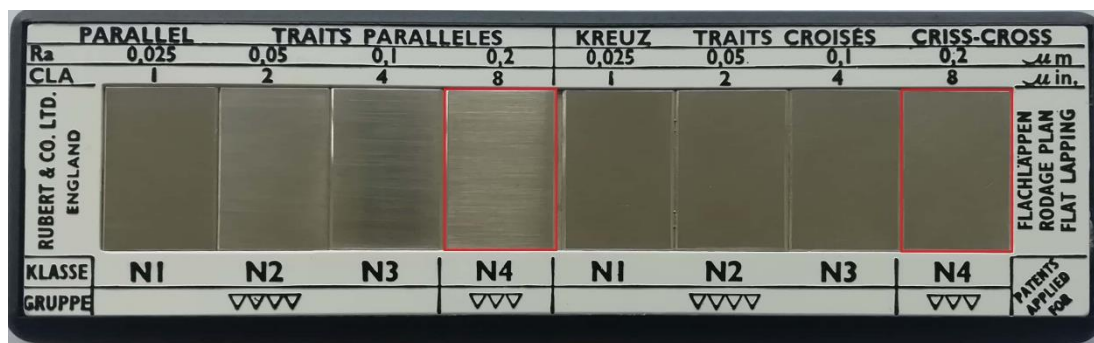


Obr. 16 Vzorky periodického profilu Ra0,5, Ra1 a Ra3,2



Obr. 17 Vzorky periodického povrchu Ra0,4 a Ra1,6

Všechny vzorky na Obr.16 a 17 mají typ povrchu periodický. Pro zjištění fungování mikroskopů na aperiodickém povrchu byl vybrán vzorek Ra0,2 μm viz Obr.18.

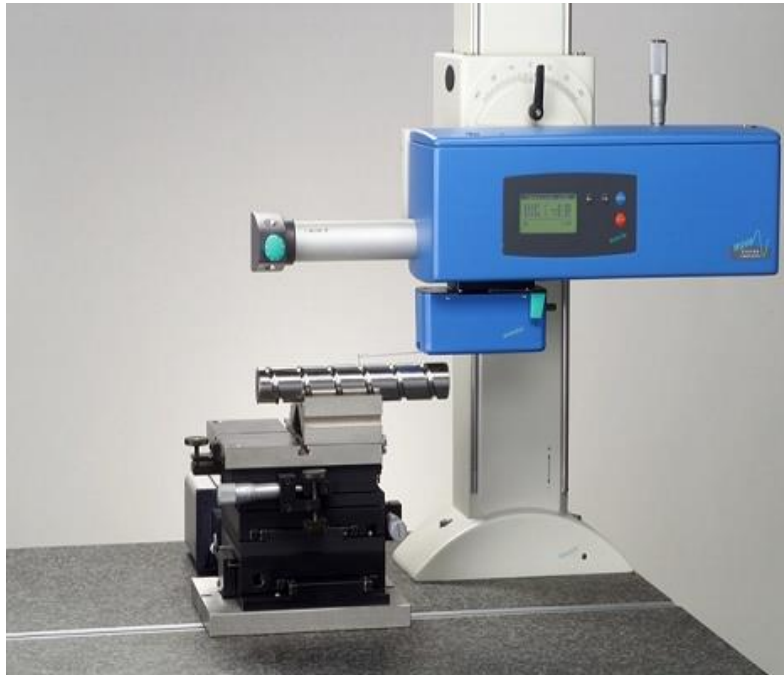


Obr. 18 Vzorky periodického a aperiodického povrchu Ra0,2

Všechny vzorky, na kterých budou prováděny experimenty, byly zkalibrovány drsnoměrem Hommel Etamic T8000 (Obr.19). Všechny experimenty se tudíž budou porovnávat k referenčním datům, která byla na tomto stroji pořízena. Tento drsnoměr se řadí mezi kontaktní metody měření (viz výše v kapitole 2.1.1 Kontaktní). Data z drsnoměru jsou důležitá pro tvorbu grafů a lze je nalézt v tabulce 7. Řádky označené jako „Průměr“ obsahují referenční hodnoty zprůměrovaných měření drsnoměrem – vzor na Obr.24. Pro výpočet horní a dolní směrodatné odchylky jsou potřeba data z řádků „Odchylka“ a řádky „Relativní odchylka“ mají vypovídající hodnotu pro porovnávání jednotlivých parametrů.

Tab. 7 Referenční data z drsnoměru Hommel Etamic T8000

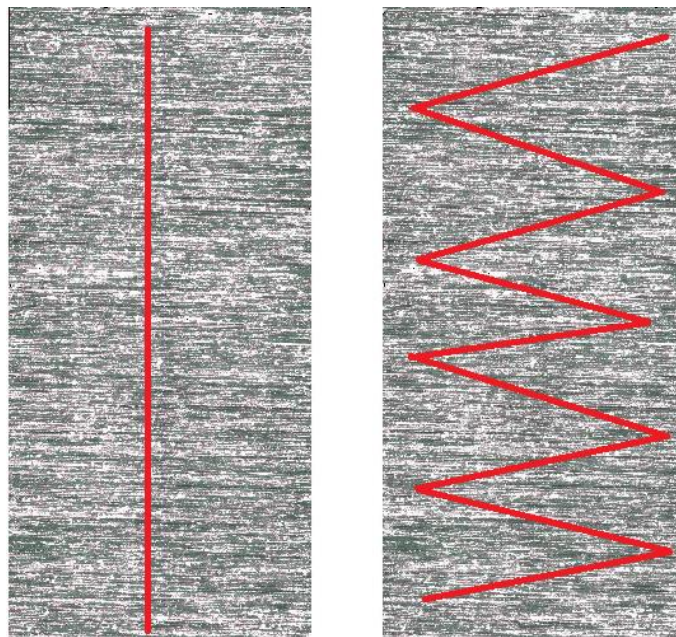
| Vzorky | Ra | Rz | Rq | Rdq | Rp | Rv | | |
|-------------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|------|--------------------|
| Ra0,2- aper | 0,160 | 1,702 | 0,214 | 0,196 | 0,578 | 1,126 | [µm] | Průměr |
| | 0,014 | 0,155 | 0,021 | 0,007 | 0,061 | 0,125 | [µm] | Odchylka |
| | 8,839 | 9,134 | 9,690 | 3,345 | 10,623 | 11,138 | [%] | Relativní odchylka |
| Ra0,2- per | 0,210 | 2,382 | 0,288 | 0,237 | 0,660 | 1,722 | [µm] | Průměr |
| | 0,010 | 0,258 | 0,016 | 0,003 | 0,071 | 0,202 | [µm] | Odchylka |
| | 4,762 | 10,815 | 5,705 | 1,218 | 10,714 | 11,740 | [%] | Relativní odchylka |
| Ra0,4 | 0,330 | 3,150 | 0,430 | 0,290 | 1,294 | 1,856 | [µm] | Průměr |
| | 0,007 | 0,379 | 0,019 | 0,004 | 0,236 | 0,190 | [µm] | Odchylka |
| | 2,143 | 12,043 | 4,351 | 1,325 | 18,211 | 10,213 | [%] | Relativní odchylka |
| Ra0,5 | 0,512 | 1,744 | 0,570 | 0,195 | 0,892 | 0,852 | [µm] | Průměr |
| | 0,004 | 0,071 | 0,000 | 0,011 | 0,066 | 0,008 | [µm] | Odchylka |
| | 0,873 | 4,067 | 0,000 | 5,613 | 7,453 | 0,982 | [%] | Relativní odchylka |
| Ra1 | 1,030 | 3,500 | 1,140 | 0,238 | 1,754 | 1,748 | [µm] | Průměr |
| | 0,007 | 0,026 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,019 | [µm] | Odchylka |
| | 0,687 | 0,756 | 0,620 | 3,579 | 0,510 | 1,100 | [%] | Relativní odchylka |
| Ra1,6 | 1,572 | 11,902 | 1,990 | 0,471 | 5,598 | 6,304 | [µm] | Průměr |
| | 0,100 | 1,323 | 0,138 | 0,011 | 0,522 | 1,048 | [µm] | Odchylka |
| | 6,384 | 11,117 | 6,936 | 2,319 | 9,330 | 16,621 | [%] | Relativní odchylka |
| Ra3,2 | 3,250 | 10,384 | 3,614 | 0,287 | 5,164 | 5,222 | [µm] | Průměr |
| | 0,007 | 0,015 | 0,005 | 0,003 | 0,009 | 0,011 | [µm] | Odchylka |
| | 0,218 | 0,146 | 0,152 | 1,102 | 0,173 | 0,210 | [%] | Relativní odchylka |



Obr. 19 drsnoměr – Hommel Etamic T8000 [24]

3.1.1.1 Experimenty

- **Experiment I** se provede na mikroskopu Alicona. Bude se jednat o měření metodou „čáry“ a „cikcak“. Tyto metody jsou znázorněny na Obr.20. Metoda „čáry“ se drží definice – měřit kolmo na stopy v povrchu, kdežto metoda „cikcak“ se této definice nedrží. Mikroskop Keyence metodou „cikcak“ nedisponuje. Součástí tohoto experimentu bude tedy také zjistit, jaké nastavení měření Keyence nejvíce odpovídá měření „cikcak“ na Aliconě.



Obr. 20 Měření metodou „čáry“ a „cikcak čáry“

- **Experiment II** bude porovnávat výsledky měření s různými typy objektivů na mikroskopu Alicona dle Tab. 8, kterou doporučil výrobce pro rozmezí hodnot drsnosti povrchu, které budou pro test použity. Pro povrchy byly zvoleny první dva nejmenší objektivy, které výrobce doporučuje. Pro lepší orientaci jsou testované objektivy vypsány v Tab. 9.

Tab. 8 Doporučené druhy objektivů [23]

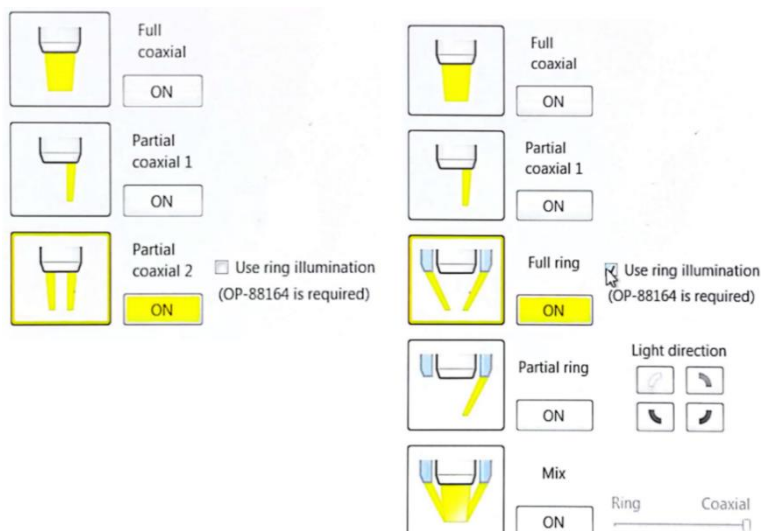
| min. Ra | ~Rz | Vertikální rozlišení | Objektivy (zvětšení) |
|---------|-------|----------------------|--------------------------|
| 5μm | 30μm | <=2μm | 5x*, 10x, 20x, 50x, 100x |
| 1μm | 6μm | <=400nm | 10x, 20x, 50x, 100x |
| 0.5μm | 3μm | <=200nm | 10x*, 20x, 50x, 100x |
| 0,1μm | 0,6μm | <=40nm | 20x*, 50x, 100x |
| 0,05μm | 0,3μm | <=20nm | 50x*, 100x |

*V těchto případech volte delší délky profilu

Tab. 9 Zvolené objektivy

| Ra | Objektivy (zvětšení) |
|----------|----------------------|
| 0,2 aper | 20x, 50x |
| 0,2 per | 20x, 50x |
| 0,4 | 20x, 50x |
| 1,6 | 10x, 20x |

- **Experiment III** se zaměří na porovnávání vzorků změřených metodou „čáry“ mezi mikroskopy Alicona a Keyence v základním nastavení. Na mikroskopu Alicona bude měřeno se zvětšením 20x a na mikroskopu Keyence 1000x.
- **Experiment IV** se bude soustředit na vlivy světla na mikroskopu Keyence. Na Obr. 21 jsou znázorněné druhy osvětlení z prostředí mikroskopu Keyence.

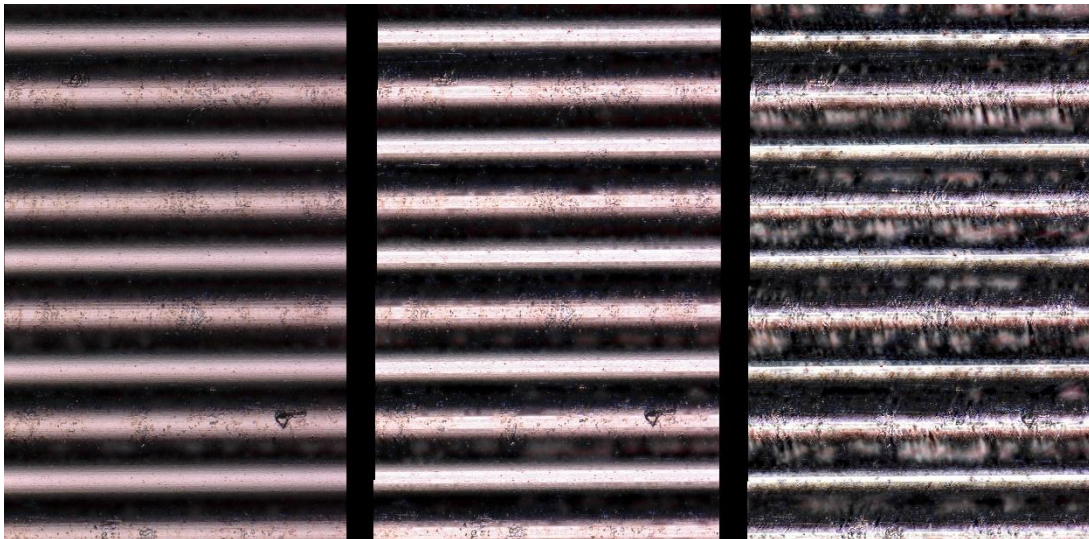


Obr. 21 Typy světél

- **Experiment V** bude soustředěn na vliv nastavení ostřicí páčky Obr.22. Standardně byla ve střední poloze, ale tento experiment se zaměří na krajní hodnoty „normal“, „mezi“ a „edge“. Vizuální rozdíly lze sledovat na Obr.23.



Obr. 22 Ostřicí páčka

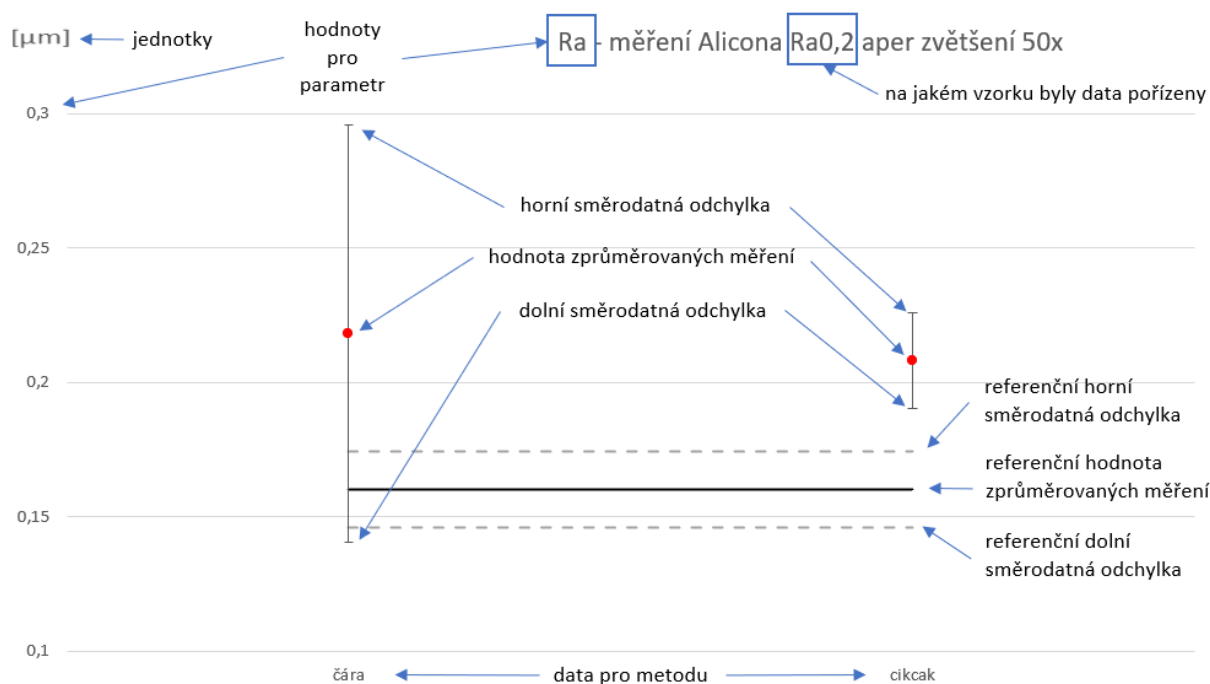


Obr. 23 Vliv ostřicí páčky „normal“ – „mezi“ – „edge“

V experimentech bude snaha o průnik výsledků z měření za určitých podmínek, aby bylo dosaženo co nejvíce podobných výsledků.

4 Vyhodnocení experimentů a jejich zhodnocení

V této kapitole bude provedeno vyhodnocení jednotlivých experimentů. Na obrázku 24 je znázorněn popis vzorového grafu.



Obr. 24 Popis vzorového grafu

V tabulce 10 lze nalézt naměřené a vypočítané hodnoty pro parametr Ra. Z těchto dat byl vytvořen graf na obrázku 24.

Tab. 10 Vzorová data pro tvorbu grafů (parametr Ra – Ra0,2 aper metoda „čáry“)

| | měření 1 [μm] | měření 2 [μm] | měření 3 [μm] | měření 4 [μm] | měření 5 [μm] | průměr [μm] |
|--------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Ra0,2 | 0,173 | 0,175 | 0,215 | 0,175 | 0,353 | 0,218 |
| čára | směrodatná odchylka [μm] | dolní směrodatná odchylka [μm] | Horní směrodatná odchylka [μm] | relativní odchylka [-] | procentuální relativní odchylka [%] | |
| | 0,078 | 0,14 | 0,296 | 0,355 | 35,54 | |

Pro výpočet hodnot byl použit program Excel 365. V softwaru Excel bylo počítáno pro lepší dosažení výsledků se čtyřmi desetinnými místy, pro jednodušší ukázkou výpočtu byla zvolena pouze tři desetinná místa. V ukázce je zaokrouhlováno podle výpočtů se čtyřmi desetinnými místy. Z naměřených dat 1-5 v tabulce 10 byl vypočten průměr z rovnice 3.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\text{měření1} + \text{měření2} + \text{měření3} + \text{měření4} + \text{měření5}}{5} =$$

$$= \frac{0,173 + 0,175 + 0,215 + 0,175 + 0,353}{5} \doteq 0,218 [\mu\text{m}]$$

Pro získání výběrové směrodatné odchylky byla využita rovnice 2.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(0,173 - 0,218)^2 + (0,175 - 0,218)^2 + (0,215 - 0,218)^2 + (0,175 - 0,218)^2 + (0,353 - 0,218)^2}{5 - 1}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,023957}{4}} \doteq 0,078 [\mu\text{m}]$$

Horní směrodatná odchylka byla získána pomocí rovnice 4.

$$s_h = \bar{x} + s = 0,218 + 0,078 \doteq 0,296 [\mu\text{m}]$$

Dolní směrodatná odchylka byla získána použitím rovnice 5.

$$s_d = \bar{x} - s = 0,218 - 0,078 \doteq 0,14 [\mu\text{m}]$$

Relativní odchylka byla vypočtena rovnicí 6.

$$rel_{odchylka} = \frac{s}{\bar{x}} = \frac{0,078}{0,218} \doteq 0,355 [-]$$

Procentuální relativní odchylka byla vypočtena pomocí rovnice 7.

$$rel_{odchylka}^{procentuální} = \frac{s}{\bar{x}} * 100 = \frac{0,078}{0,218} * 100 \doteq 35,54 [\%]$$

Stejným postupem se získala data pro metodu „cikcak“ a referenční hodnoty z drsnoměru, které jsou vidět v tabulce 11 a 12. Všechna tato data tvoří graf na Obr.24.

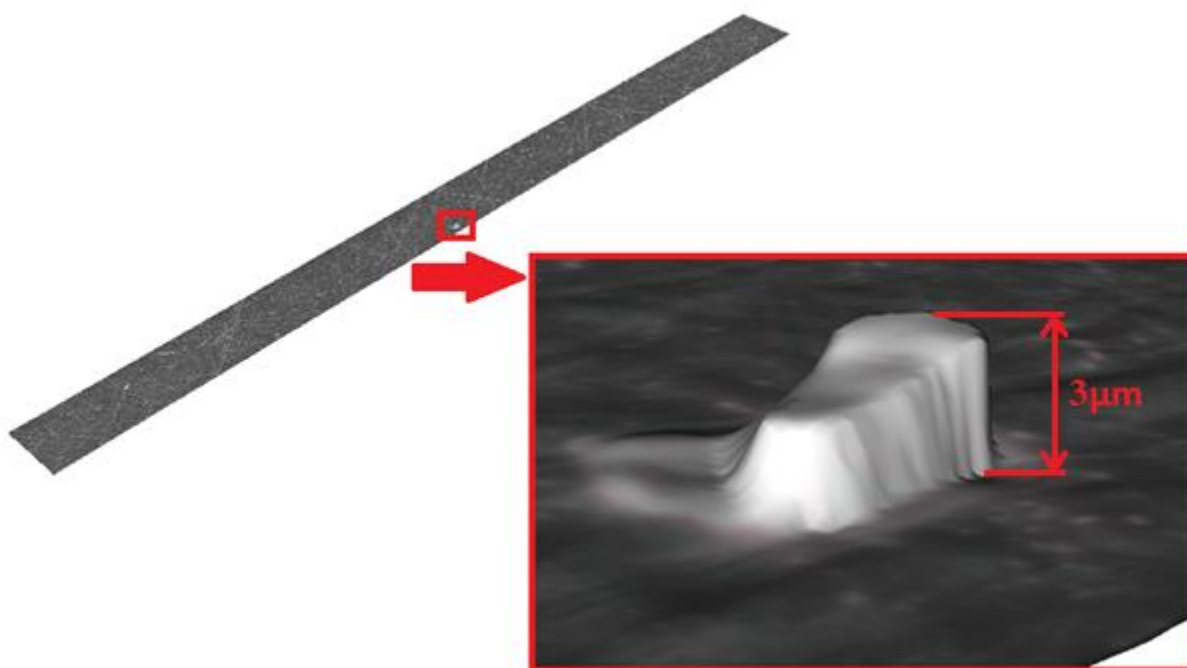
Tab. 11 Vzorová data pro tvorbu grafů (parametr Ra – Ra0,2 aperi metoda „cikcak“)

| | měření 1 [μm] | měření 2 [μm] | měření 3 [μm] | měření 4 [μm] | měření 5 [μm] | průměr [μm] |
|---------------|---|---|---|-------------------------------|--|--------------------------|
| Ra0,2 | 0,183 | 0,202 | 0,207 | 0,225 | 0,225 | 0,208 |
| cikcak | směrodatná odchylka [μm] | dolní směrodatná odchylka [μm] | Horní směrodatná odchylka [μm] | relativní odchylka [-] | procentuální relativní odchylka [%] | |
| | 0,018 | 0,190 | 0,226 | 0,086 | 8,577 | |

Tab. 12 Vzorová data pro tvorbu grafů (parametr Ra – ref. Ra0,2 aper)

| | měření 1 [μm] | měření 2 [μm] | měření 3 [μm] | měření 4 [μm] | měření 5 [μm] | průměr [μm] |
|---------------|--|---|---|----------------------------|---|--------------------------|
| Ra0,2 ref. | 0,15 | 0,17 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,16 |
| | směrodatná odchylka [μm] | dolní směrodatná odchylka [μm] | Horní směrodatná odchylka [μm] | relativní odchylka [-] | procentuální relativní odchylka [%] | |
| | 0,014 | 0,146 | 0,174 | 0,088 | 8,839 | |

Když se během jednoho z pěti měření narazí na výraznou chybu v podobě větší nečistoty, jako na Obr.25, bude namísto vyřazení nahrazeno měřením novým. Díky tomu se docílí zachování stejného postupu výpočtu na všech vzorcích.

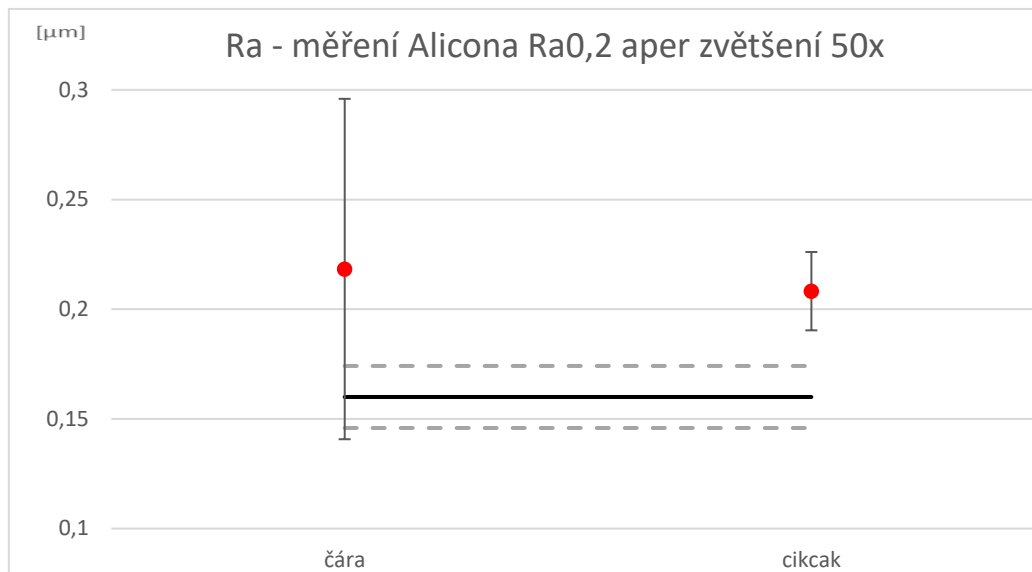


Obr. 25 Nečistota na vzorku Ra0,2 obj50x povrch aper

Vyhodnocovací délky u mikroskopu Alicona se pohybovaly u metody „čáry“ od 4 do 5 mm a u metody „cikcak“ byly vzdálenosti delší – od 20 do 50 mm v závislosti na manuálně nastavené délce. Mikroskop Keyence vyhodnocoval striktně na vzdálenostech 2,75 mm vzorky do hodnoty Ra0,4 μm včetně a zbytek vzorků na délce 3,25 mm.

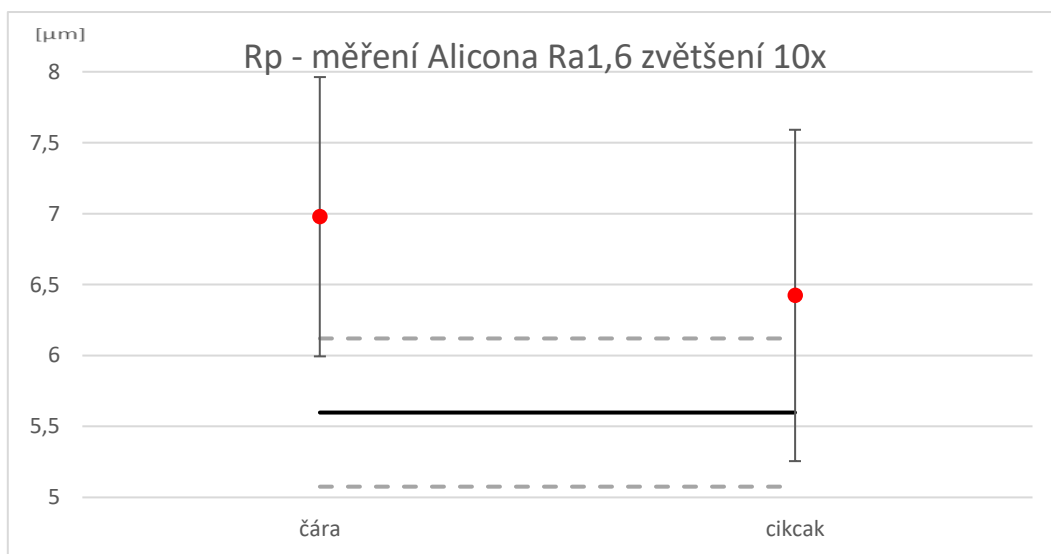
4.1 Vyhodnocení experimentu I – porovnání metod „čáry“ a „cikcak“ na mikroskopu Alicona

Ze získaných dat je patrné, že se metoda „čáry“ i metoda „cikcak“ průměrnými hodnotami orientačně trefují do referenčních středních aritmetických hodnot drsnosti. Například u grafu 1, který popisuje vzorek Ra0,2 s aperiodickým povrchem za použití objektivu se zvětšením 50x je možné pozorovat, že metoda „cikcak“ se svým průměrem více blíží referenčním hodnotám a ve výsledcích si je oproti metodě „čáry“ jistější. Stejně výsledky je možné pozorovat i u vzorku Ra1,6 se zvětšením 10x. Graf pro tento vzorek je možné nalézt v přílohách č. 1 a 2, stejně tak i grafy pro ostatní vzorky.

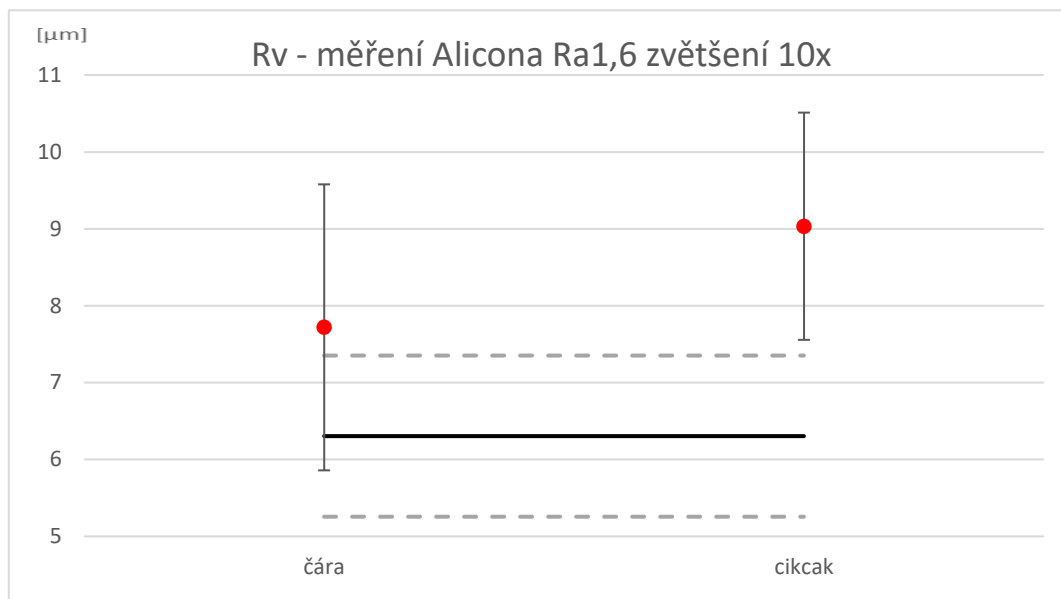


Graf 1 Vzorek Ra0,2 aper zvětšení 50x parametr Ra

Při pozorování parametrů Rp (výška největší špičky) (graf 2) a Rv (hloubka největší prohlubně) (graf 3) je vidět, že metoda „čáry“ i metoda „cikcak“ u vzorku s drsností Ra1,6 dosahuje podobných výsledků.

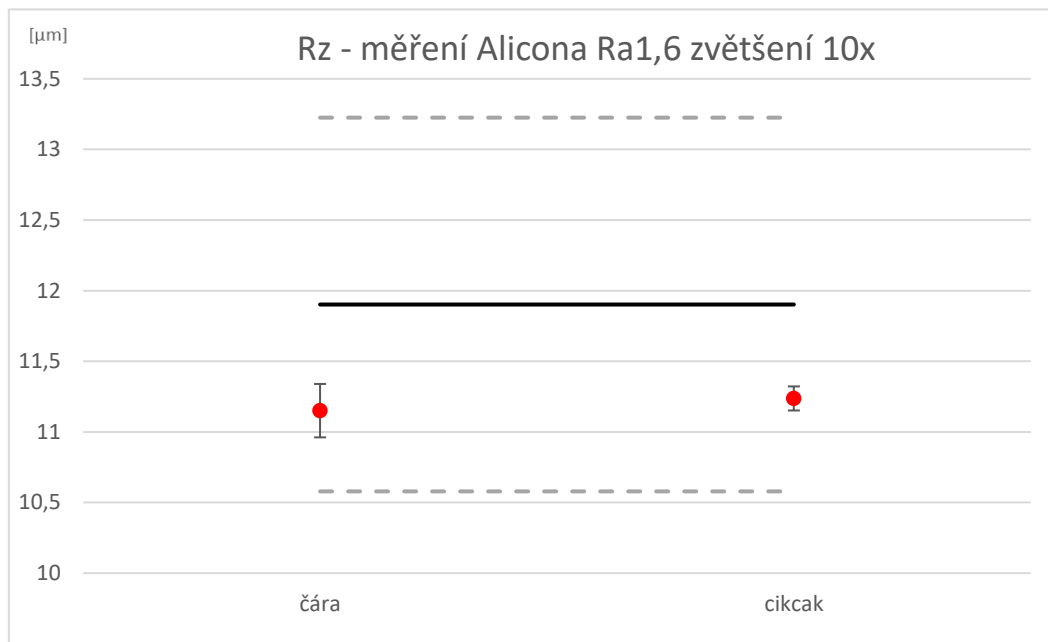


Graf 2 Vzorek Ra1,6 zvětšení 10x parametr Rp

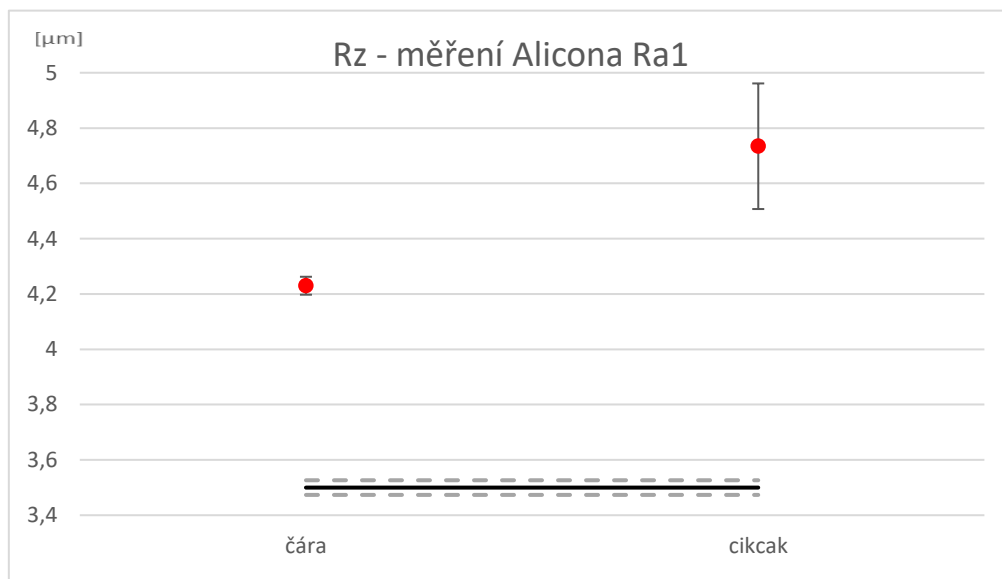


Graf 3 Vzorek Ra1,6 zvětšení 10x parametr Rv

Co se týče maximální výšky profilu, tak u vzorku Ra1,6 se zvětšujícím objektivem 10x (graf 4) je přesnost obdivuhodná, jak u metody „čáry“ tak i metody „cikcak“. To ovšem nelze tvrdit u vzorku Rz1, kde je možné pozorovat u metod „čáry“ a „cikcak“ systematickou chybu, která se liší o více než pětinašobek odchylky (graf 5).

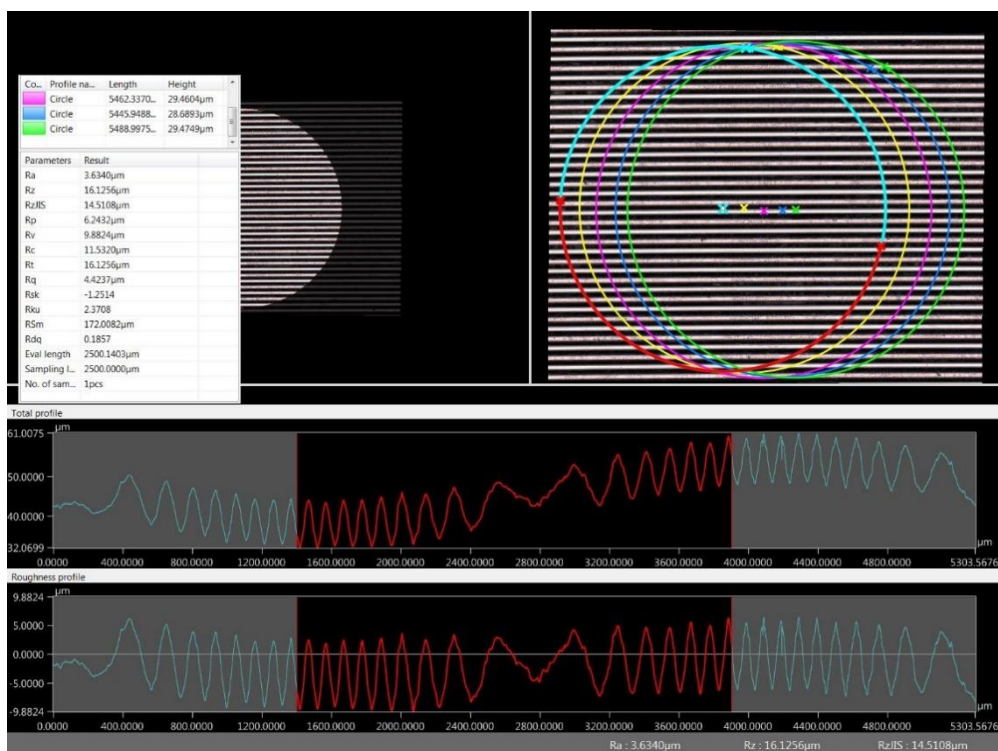


Graf 4 Vzorek Ra1,6 zvětšení 10x parametr Rz



Graf 5 Vzorek Ra1 parametr Rz

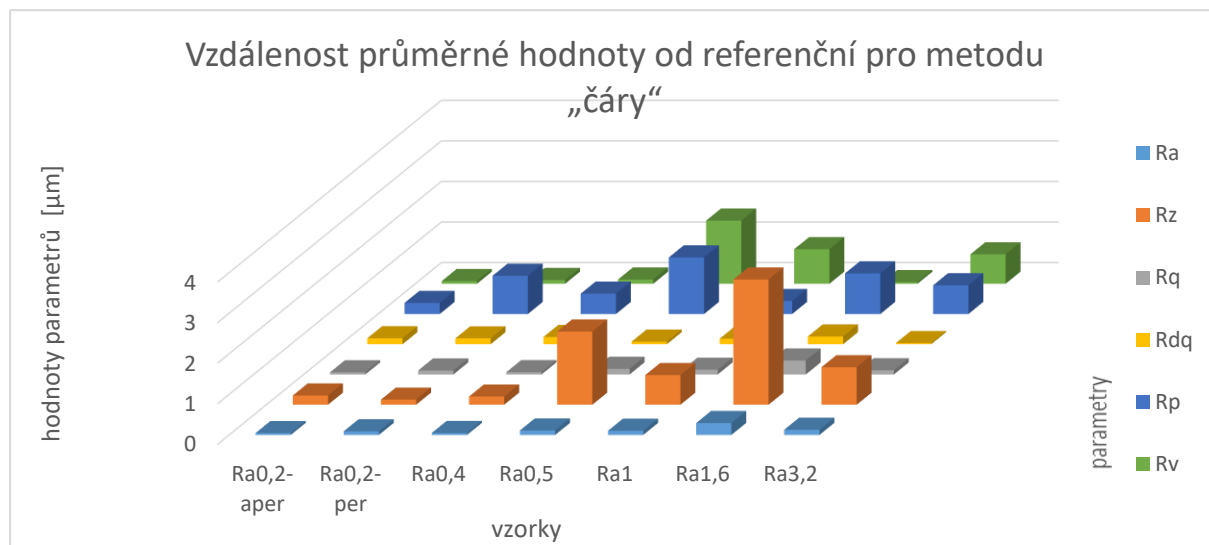
Jelikož mikroskop Keyence metodu „cikcak“ nenabízí, byla snaha o nalezení alternativy. Nejblíže tomu byla metoda „kruhu“, která je vidět na obrázku 26. Od této metody se čekávalo, že stejně jako u metody „cikcak“ bude software vyhodnocovat drsnost z větší délky a obsáhne tak v sobě více informací o povrchu. Bohužel metoda „kruhu“, hned ze začátku nenaplnila očekávání, proto bylo od ní odstoupeno. Jiné alternativy s větší měřicí délkou než metoda „kruhu“ mikroskop Keyence nenabízí.



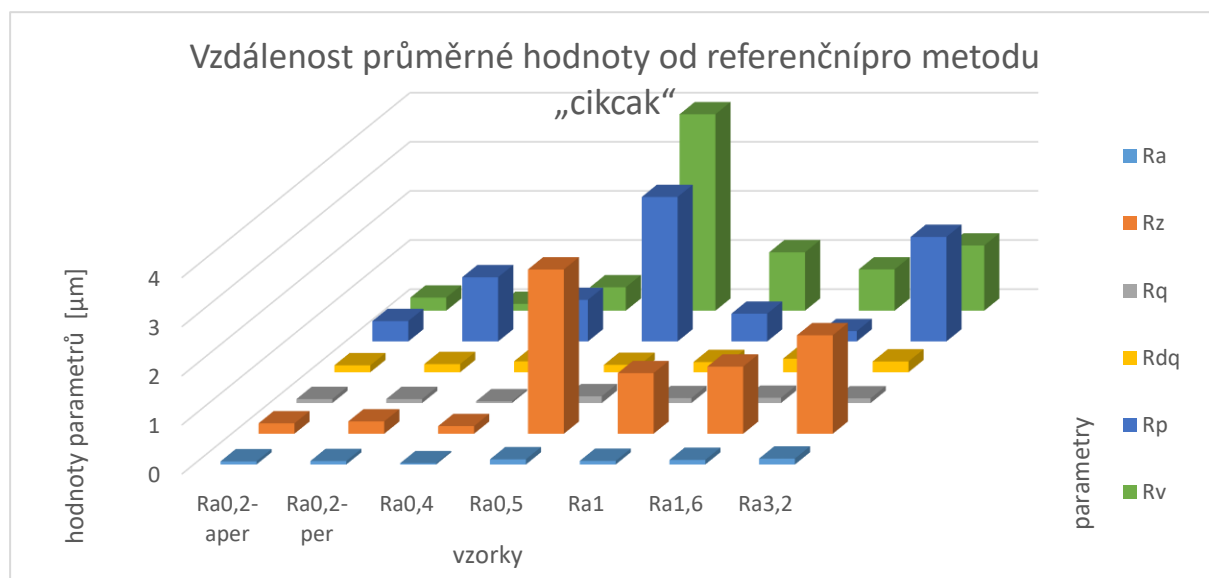
Obr. 26 Metoda „kruh“ - vzorek Ra3,2

Experiment I – sumarizace

Z prvního experimentu vyplývá, že metoda „čáry“ i metoda „cikcak“ dosahuje podobných výsledků. Menších směrodatných odchylek dosahovala metoda „čáry“. U metody „cikcak“ je dosaženo přesnějších výsledků u parametru Ra než u metody „čáry“. Metoda „čáry“ se ukázala lepší u varianty vzorku Ra0,2 s aperiodickým povrchem. Pro měření parametru Rz je spíše vhodnější metoda „čáry“, která byla svými výsledky blíže k referenčním hodnotám. U parametru Rq, Rp a Rv byly výsledky velmi podobné a v získaném parametru Rdq měla přesnější výsledky metoda „čáry“. Rozdíly zprůměrovaných naměřených hodnot s referenčními lze nalézt v grafech 6 a 7.



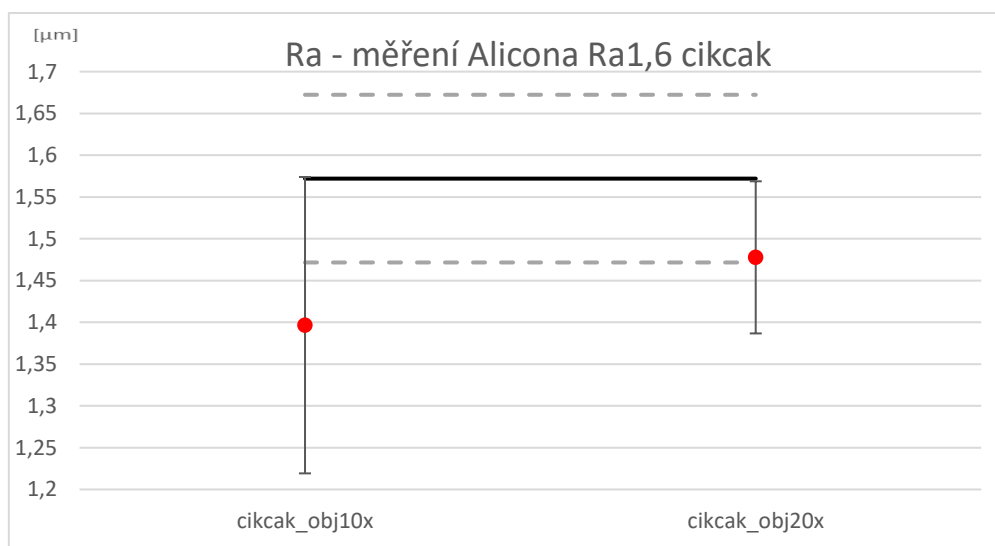
Graf 6 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční pro metodu „čáry“



Graf 7 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční pro metodu „cikcak“

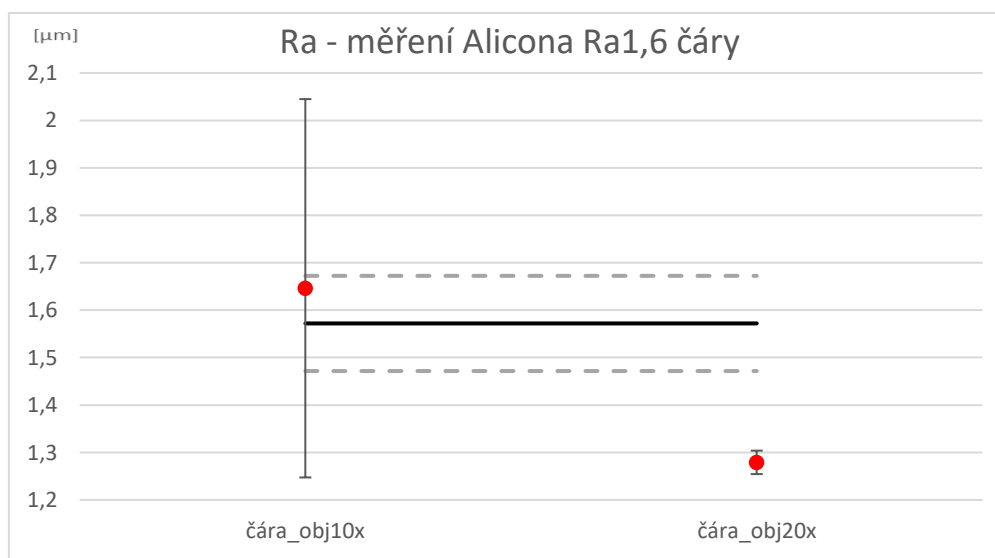
4.2 Vyhodnocení experimentu II – porovnání měření s různým zvětšením na mikroskopu Alicona

Z naměřených dat stejně jako u experimentu I byly vytvořeny grafy pro porovnání objektivů. Z grafů v přílohách je patrné, že se objektivy svými výsledky trefují v rámci dvojnásobku směrodatné odchylky do referenčních hodnot. V grafu 8 pro vzorek Ra1,6 s metodou „cikcak“ je možné pozorovat, že si střední aritmetická odchylka vede lépe u objektivu se zvětšením 20x než u zvětšení 10x.



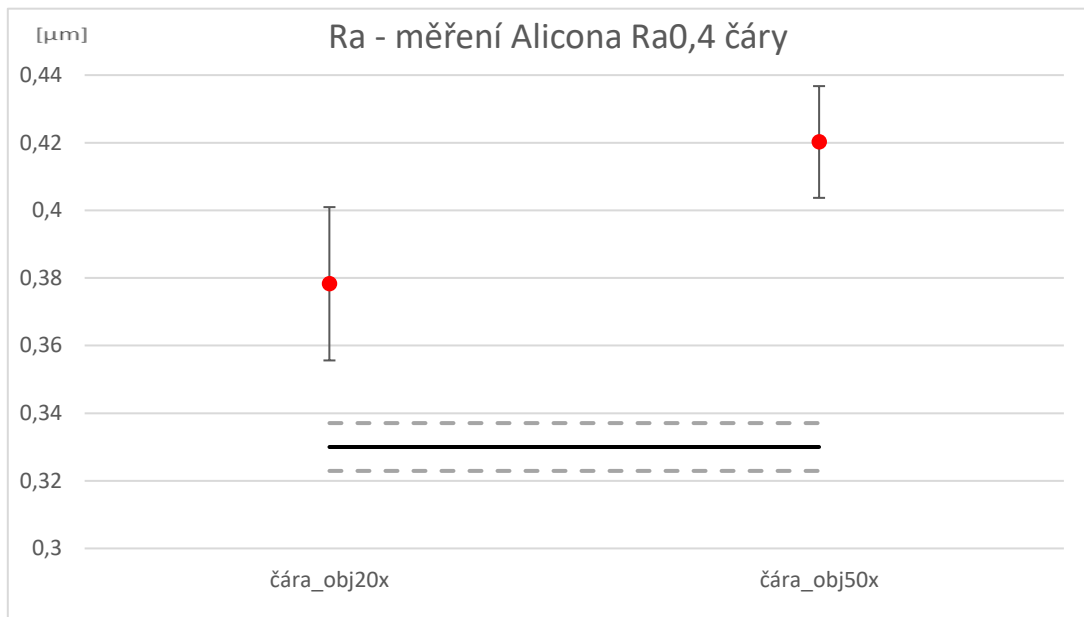
Graf 8 Vzorek Ra1,6 parametr Ra metoda „cikcak“

Při bližším zkoumání grafu 8 a grafu 9, na kterých jsou porovnány objektivy u metod „čáry“ a „cikcak“, je vidět, že odchylka u objektivu se zvětšením 20x je daleko menší než u objektivu se zvětšením 10x. Toto vypovídá o tom, že objektiv se zvětšením 20x si je ve svých výsledcích více jistý než druhý zmiňovaný objektiv.

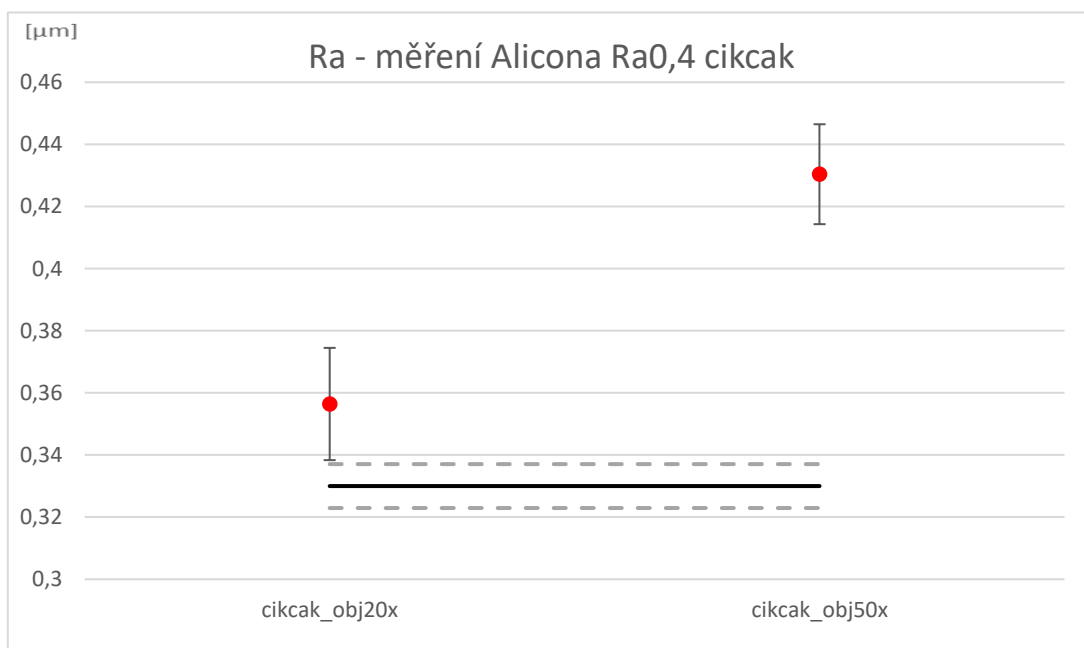


Graf 9 Vzorek Ra1,6 parametr Ra metoda „čáry“

Graf 10 pro metodu „čáry“ stejně jako graf 11 pro metodu „cikcak“ popisuje stále objektiv se zvětšením 20x lépe než objektiv se zvětšením 50x. Odchytky u obou objektivů jsou velmi podobné, ale objektiv se zvětšením 20x vykazuje lepší průměrné hodnoty.

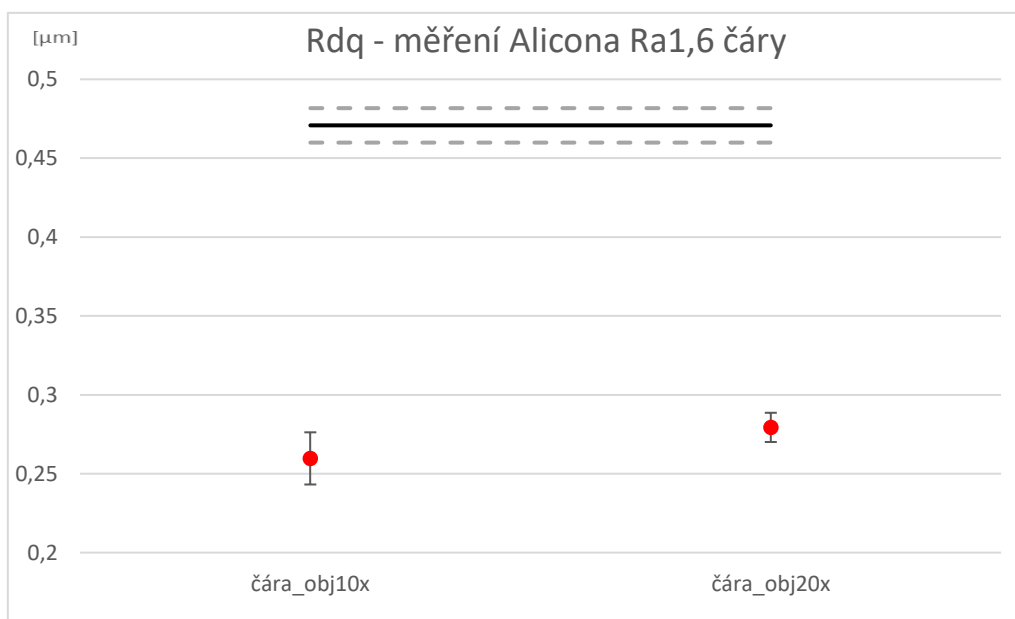


Graf 10 Vzorek Ra0,4 parametr Ra metoda „čáry“

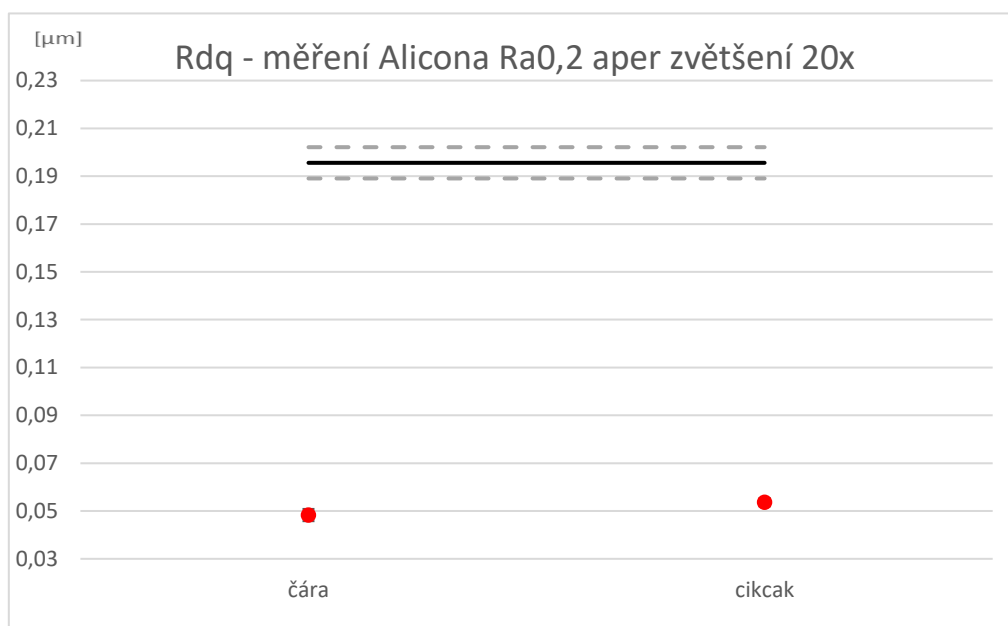


Graf 11 Vzorek Ra0,4 parametr Ra metoda „cikcak“

Co se týče parametru Rd_q , je patrné, že ve většině grafů, např. graf 12 a 13, se hodnoty liší o více než deseti násobek odchylky zkoumané i referenční metody, a tedy se jedná o systematickou chybu měření.



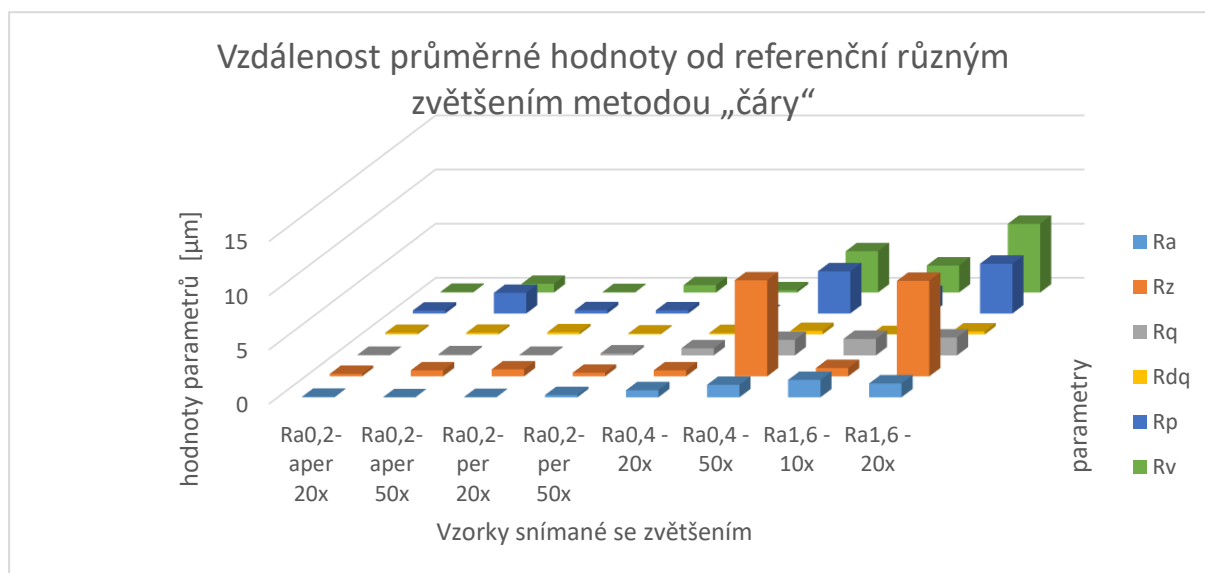
Graf 12 Vzorek Ra1,6 parametr Rd_q metoda „čáry“



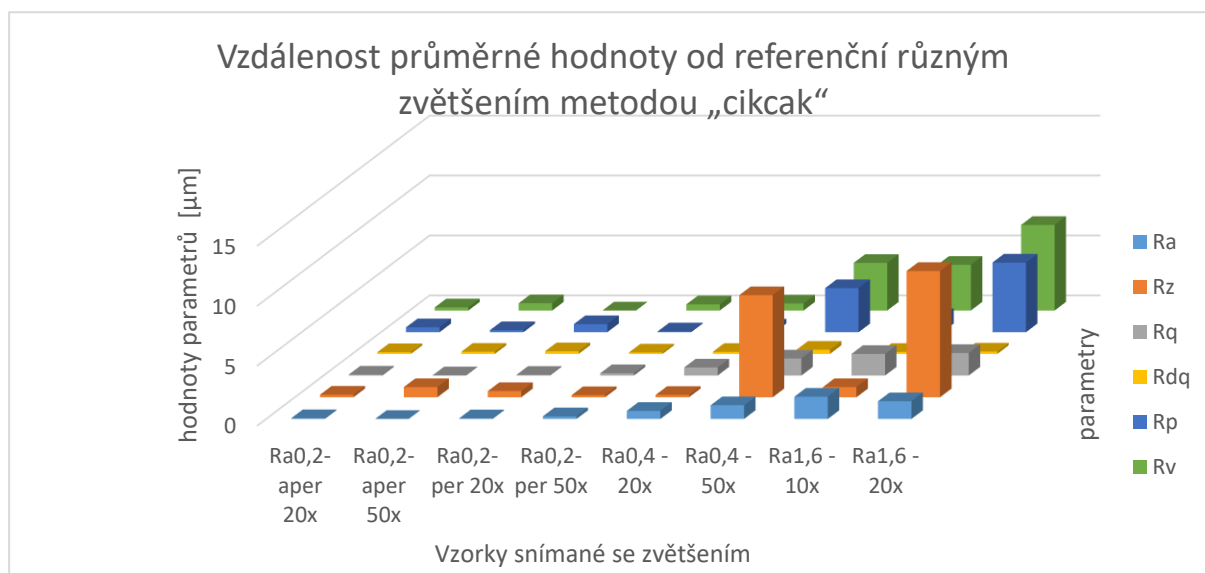
Graf 13 Vzorek Ra0,2 parametr Rd_q metoda „čára“ a „cikcak“

Experiment II – sumarizace

U druhého experimentu se přišlo na to, že nejlépe se osvědčil objektiv se zvětšením 20x. Oproti zvětšení 10x je sice aritmetický průměr méně přesný, ale odchylka v měření je výrazně nižší. V porovnání s měřením se zvětšením 50x je přesnější i aritmetický průměr. Sumarizace rozdílů zpřůměrovaných hodnot s referenčními jsou k vidění v grafech 14 a 15.



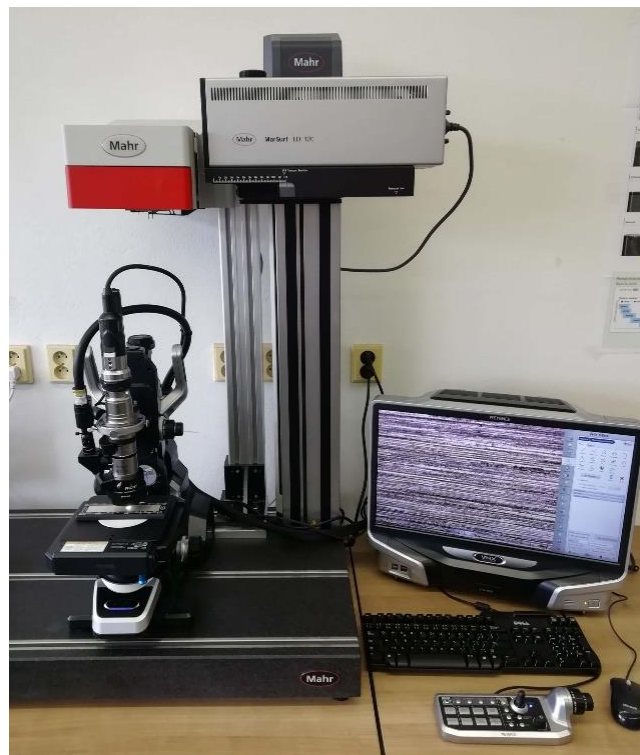
Graf 14 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční různým zvětšením metodou „čáry“



Graf 15 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční různým zvětšením metodou „cikcak“

4.3 Vyhodnocení experimentu III – porovnání metody „čáry“ na mikroskopu Alicona a Keyence

Během měření na mikroskopu Keyence se ukázalo, že se na něm mohlo měřit pouze v době, kdy byly vypnuty všechny ostatní přístroje v laboratoři, hlavně tedy soustružnické centrum EMCO, protože docházelo k rušení měření vibracemi. Mikroskopu vadil i příchod osoby do laboratoře, která neopatrně zavřela dveře. Takový výsledek měření se musel zahodit a skenování se opakovalo. Kvůli veliké citlivosti mikroskopu Keyence bylo třeba drobně změnit koncepci laboratoře (Obr.27) a to tak, že se mikroskop přemístil na granitový stůl drsnoměru MarSurf LD120 od společnosti Mahr, aby se zvýšila tuhost stolu. Díky zvýšené tuhosti stolu se zlepšila kvalita skenování.

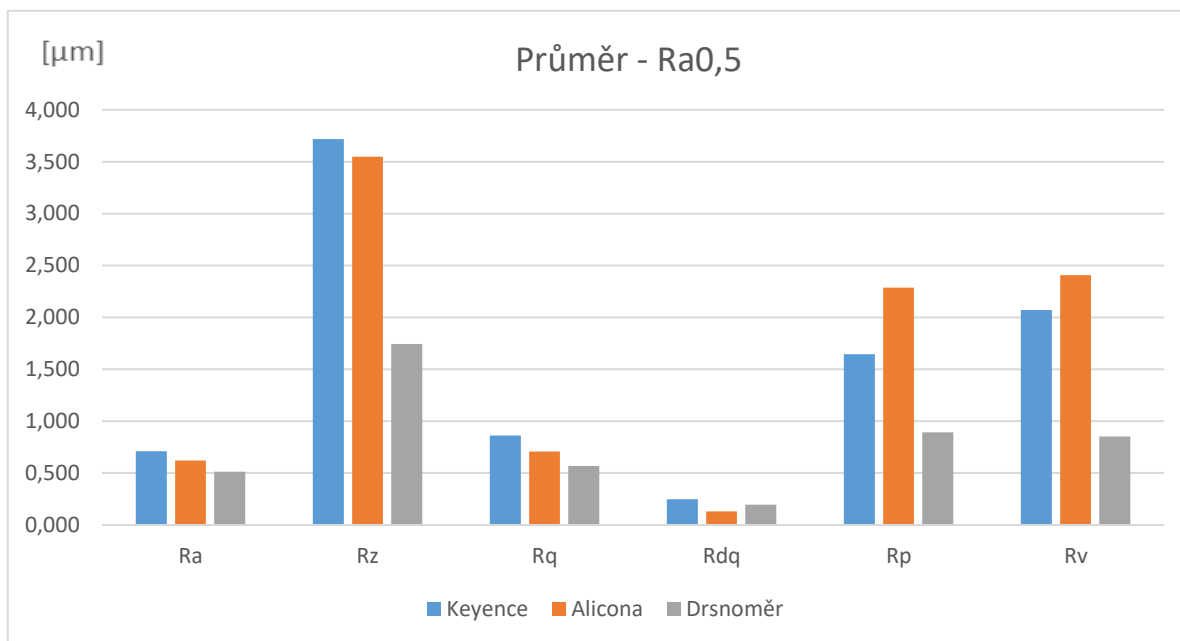


Obr. 27 Přeorganizované pracoviště

Oba mikroskopy jsou schopny naměřená data ukládat ve formátu CSV (comma-separated values = hodnoty oddělované čárkou). CSV data je možné dále zpracovávat například v softwaru Excel. Ovšem před samotným začátkem měření na mikroskopu Keyence je potřeba nastavit jednotky, ve kterých budou data pořizována, protože zpětně už se nedají měnit. Může se totiž stát, že při předchozím měření budou nastaveny jiné jednotky (např. milimetry místo mikrometrů) a mikroskop poté měří s menší přesností. Obdržená data se tak stávají nevyhovujícími a měření se musí opakovat. Příkladem je získaná nevyhovující hodnota 0,0035 mm a vyhovující hodnota po přepnutí a novém měření 3,5211 μm .

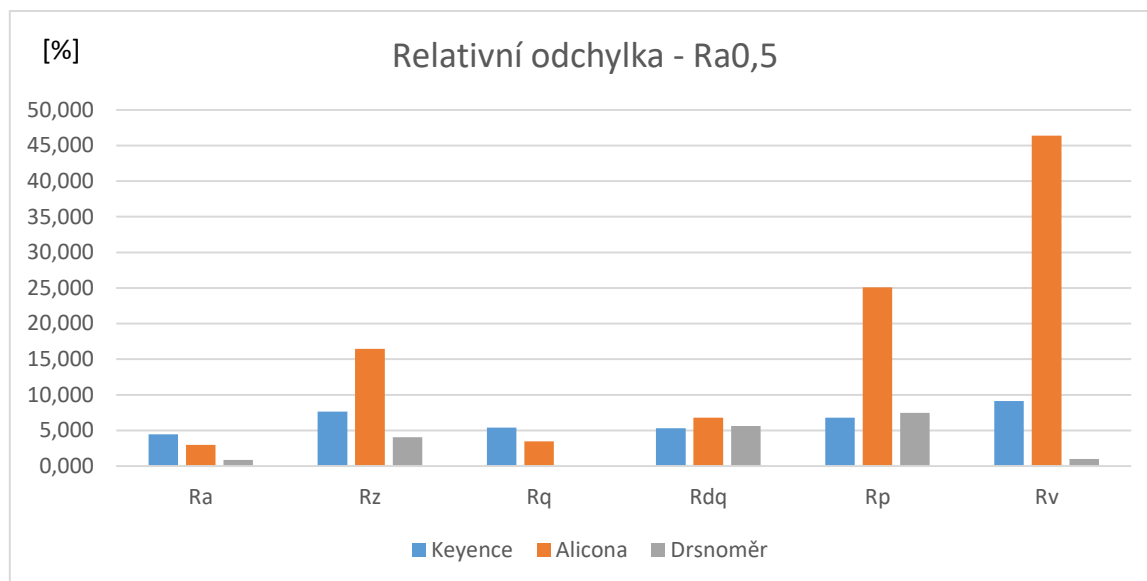
Během zkoumání metody „čáry“ na mikroskopech Keyence a Alicona se ukázalo, že mikroskop Alicona dosahuje napříč parametry bližších výsledků zprůměrovaných naměřených hodnot k referenčním hodnotám z drsnoměru. I když u parametrů R_p a R_v

dosahoval lepších výsledků mikroskop Keyence. To je možné spatřit na grafu 16 pro vzorek Ra0,5, kde na svislé ose jsou vyneseny zprůměrované naměřené hodnoty parametrů, které jsou na vodorovné ose. Více grafů v přílohách.



Graf 16 Zprůměrované naměřené hodnoty

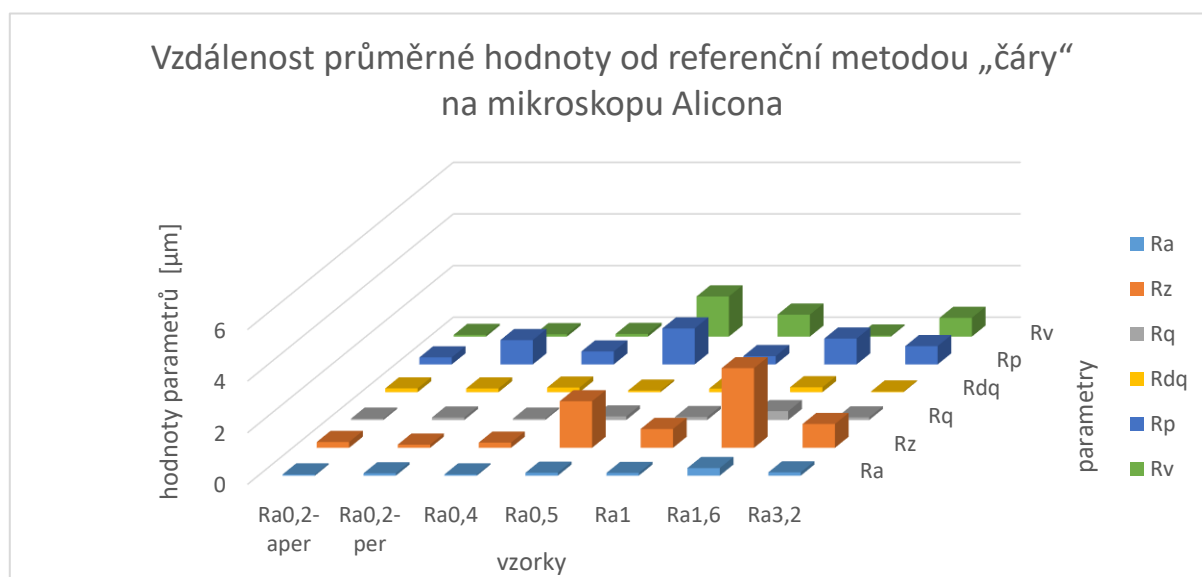
Příklad vypočtených odchylek je vidět v grafu 17, kde na svislé ose jsou vyneseny relativní odchylky v procentech na vzorku Ra0,5 a na vodorovné ose jsou zkoumané parametry pořízeny různými přístroji. Větších odchylek dosahuje mikroskop Alicona. Směrodatná odchylka může vzniknout při měření dvěma způsoby. Jednak hrubost povrchu se může v různých místech lišit, jednak může vzniknout nepřesností přístroje. Toto se obtížně odlišuje a je možné na jednu či druhou variantu usuzovat pouze na základě srovnání s referenční metodou. Pokud přístroj měří s malou směrodatnou odchylkou, ale určená hodnota se výrazně odlišuje od referenční metody, pravděpodobně přístroj měří systematicky špatně a odchylku podhodnocuje. Pokud měří s výrazně větší odchylkou než referenční metoda, pravděpodobně je problém s přesností metody. Měří-li se srovnatelnou nebo menší odchylkou a určuje srovnatelnou průměrnou hodnotu, měří ve shodě s referenční metodou, popř. lépe. Mikroskop Keyence má odchylky téměř ve všech měřeních menší a trefuje se tedy do užšího pole odchylek než mikroskop Alicona. Z toho vyplývá, že mikroskop Keyence má větší opakovatelnost výsledků i přesto, že jsou výsledky někdy méně přesné (průměrná hodnota je více vzdálena skutečnosti).



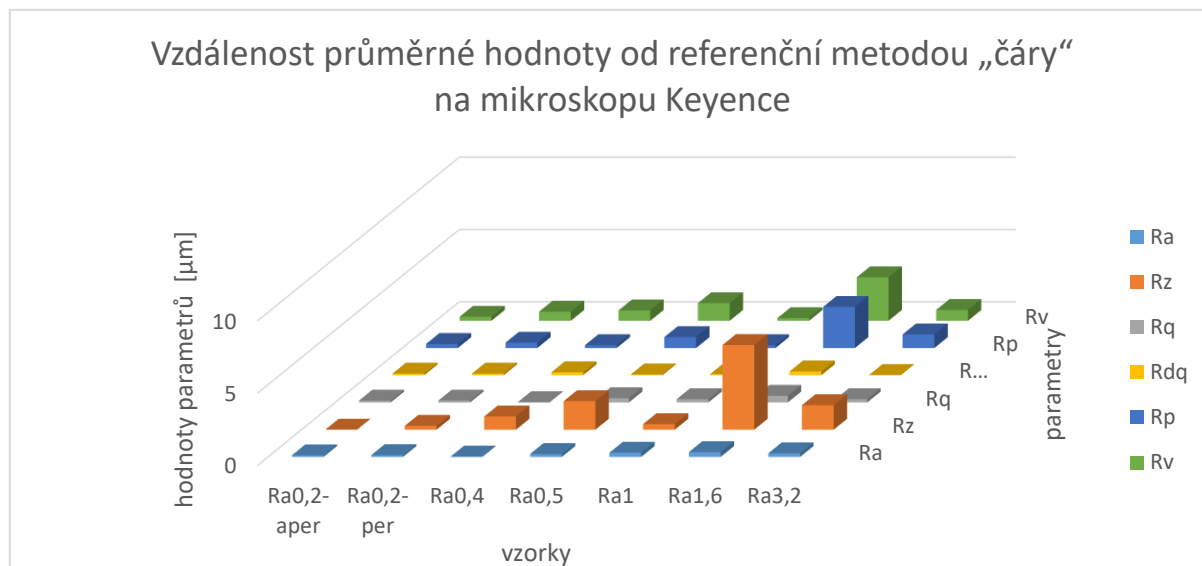
Graf 17 Odchylky parametru Ra0,5

Experiment III – sumarizace

Třetí experiment poukázal na to, že je rozdíl mezi výsledky měření obou mikroskopů. Mikroskop Alicona se zprůměrovanými hodnotami blíží častěji k hodnotám referenčním, ale bohužel s větší odchylkou než mikroskop Keyence, který měl relativní odchylky menší. Jeho průměrné hodnoty měření byly ale méně přesné. Dalo by se tedy říct, že mikroskop Alicona je vhodný především na opakované měření jednoho vzorku, které zaručí větší přesnost měřené průměrné hodnoty. Naopak mikroskop Keyence je vhodný např. pro porovnávání drsnosti mezi různými vzorky bez nutnosti většího počtu opakovaných měření, jelikož jeho výsledky se pohybují v menším rozmezí. Sumarizace dat je níže v grafech 18 a 19.



Graf 18 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční metodou „čáry“ na mikroskopu Alicona

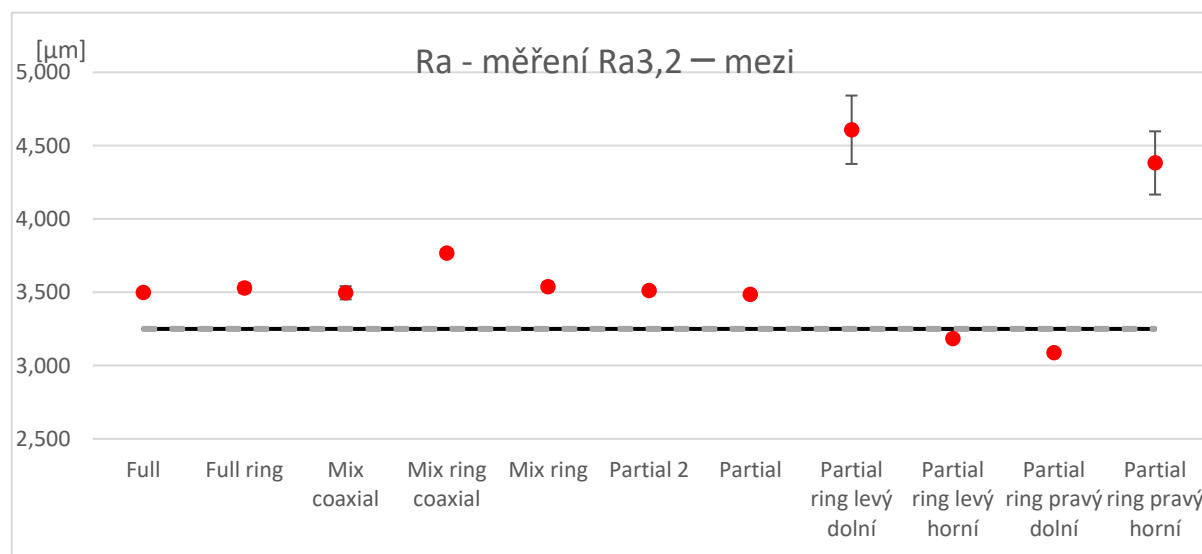


Graf 19 Sumarizace dat – Vzdálenost průměrné hodnoty od referenční metodou „čáry“ na mikroskopu Keyence

4.4 Vyhodnocení experimentu IV – porovnání druhů světla na mikroskopu Keyence




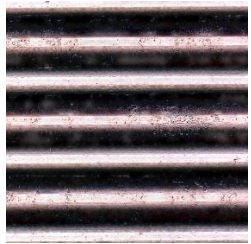

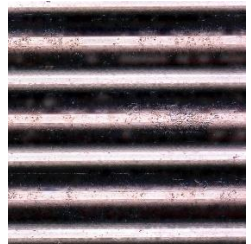

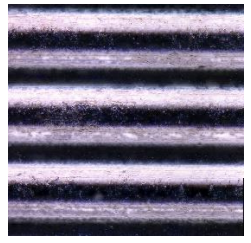
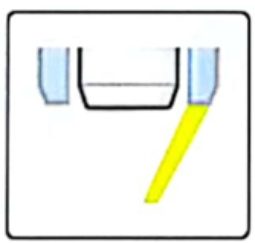
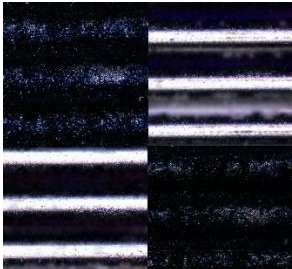

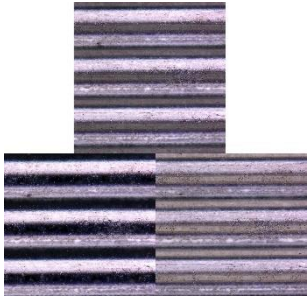
Porovnávání světla se uskutečnilo pouze na vzorku Ra3,2. Díky velké hrubosti oproti hladším vzorkům se očekával největší vliv stínů, tudíž zjištění největších rozdílů. Během experimentu byla poloha ostřící páčky (Obr.22) v poloze mezi maximy „edge“ a „normal“. Všechny druhy osvětlení s vizuálními příklady jsou k nahlédnutí v tabulce 13.

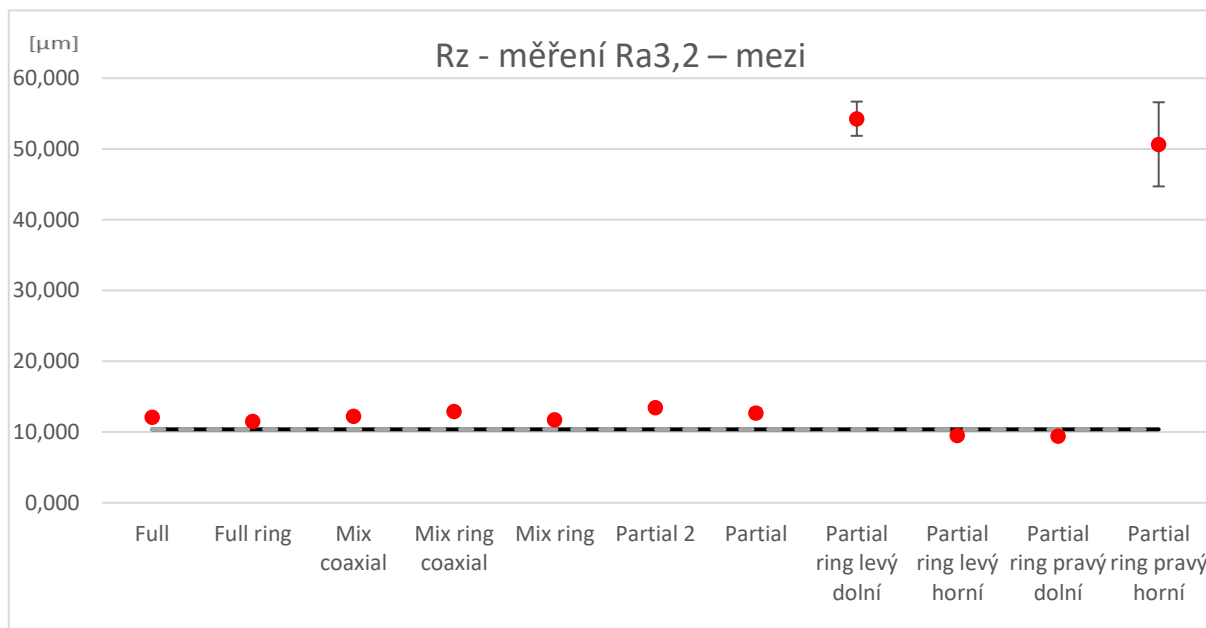
Z grafu 20 je na první pohled patrné, že druhy světelného osvětlení Partial ring levý dolní a Partial ring pravý horní nedosahují kvalit jako ostatní. Oproti tomu Partial ring levý horní a Partial ring pravý dolní společně s metodami Full coaxial (dále jen Full), Full ring a Mix ring dosahují nejlepších výsledků. Stejný jev se ukazuje napříč měřenými parametry. Příkladem toho je graf 21 pro parametr Rz.



Graf 20 Vzorek Ra3,2 parametr Ra „mezi“

Tab. 13 Druhy světla u mikroskopu Keyence na vzorku Ra3,2

| Osvětlení | Název | Fotografie ze vzorku | Vlastnosti |
|---|----------------------|--|---|
|  | Full coaxial |  | pozorování ve světlém poli |
|  | Partial coaxial 1 |  | pozorování v částečně jasném poli je možné zvýraznit výškové rozdíly, jako jsou škrábance |
|  | Partial coaxial 2 |  | pozorování ve světlém poli se sníženým jasnem středu. |
|  | Full ring |  | pozorování v tmavém poli je možné. |
|  | Partial ring |  | Pozorování v částečně tmavém poli je možné zvýraznit výškové rozdíly, jako jsou škrábance lze zvolit čtyři typy směrů světla |
|  | Mix |  | lze upravit podmínky míchání světla Full ring a Full coaxial. |



Graf 21 Vzorek Ra3,2 parametr Rz „mezi“

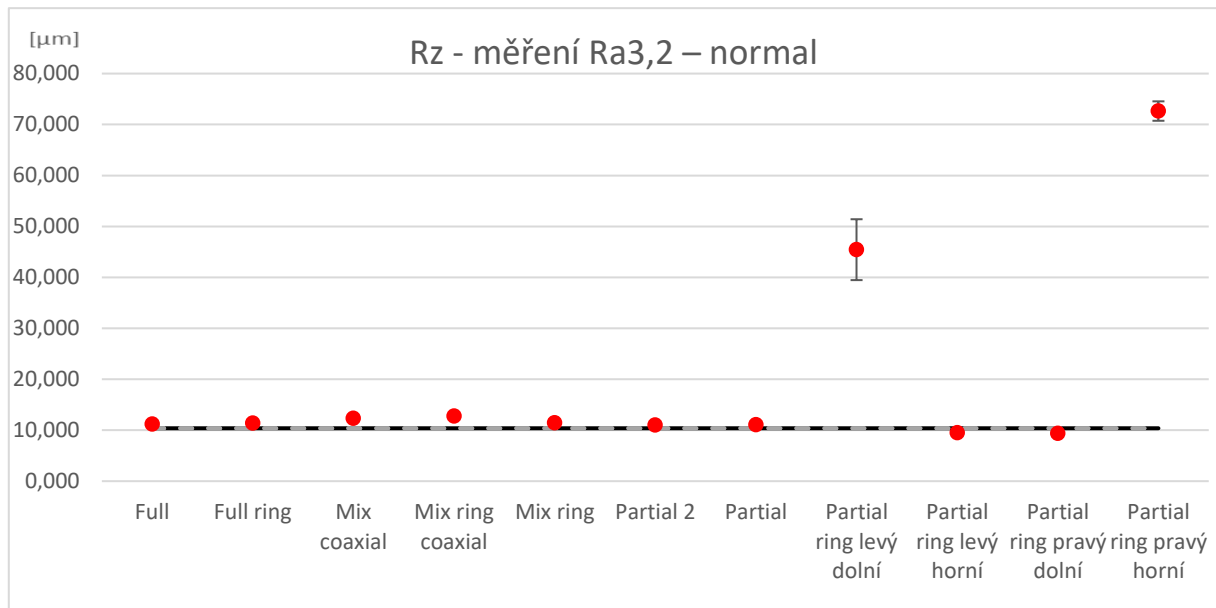
Experiment IV – sumarizace

V porovnávání světel u mikroskopu Keyence se ukázaly jako nejhorší metody Partial ring levý dolní a Partial ring pravý horní, naopak jako nej přesnější metody Partial ring levý horní a Partial ring pravý dolní. Bylo by dobré zjistit, zda na druhy osvětlení Partial ring levý horní a Partial ring pravý dolní má vliv natočení vzorku. Mohlo by se stát, že nejlepších výsledků by pak dosahovalo osvětlení Partial ring levý dolní a Partial ring pravý horní. To by ovšem znamenalo, že osvětlení Partial ring levý horní a Partial ring pravý dolní by se stalo nejhorším. Základní osvětlení „Full“ dosahuje relativně přesných výsledků.

4.5 Vyhodnocení experimentu V – porovnání vlivu ostřící páčky na mikroskopu Keyence

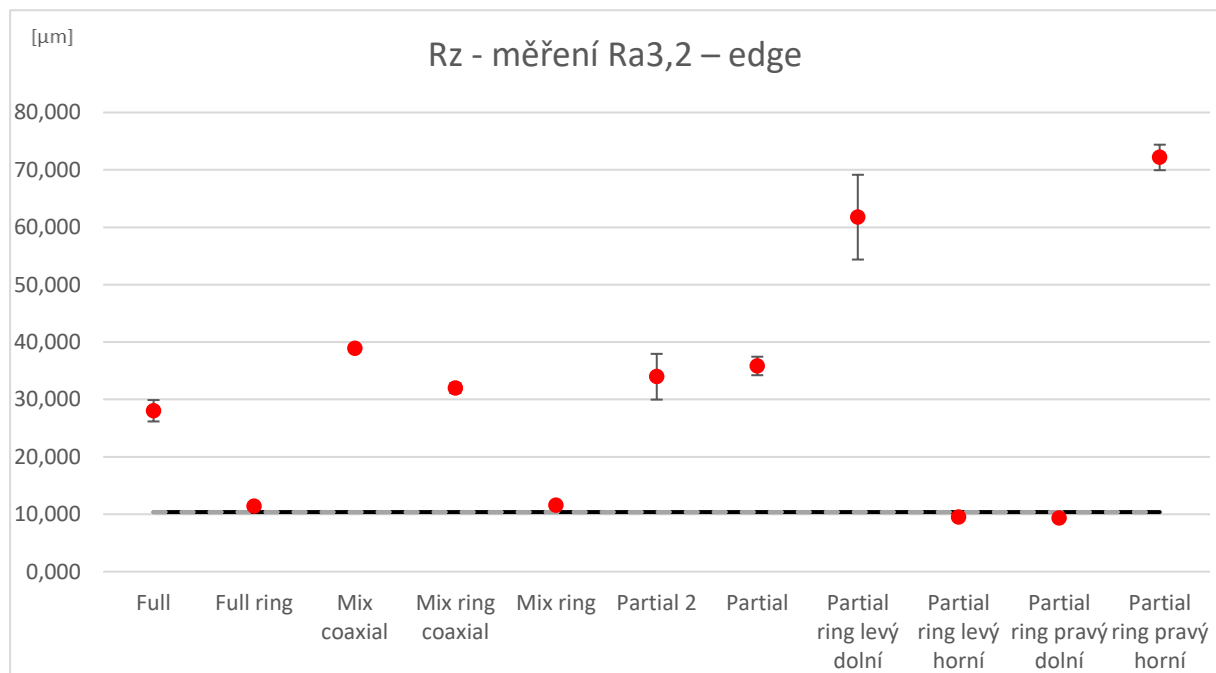
Během tohoto experimentu se zohledňuje vliv ostřící páčky z Obr.22. Jde tedy o vyhodnocení vypočítaných výsledků na základě naměřených hodnot.

Jak lze ze vzorových grafů 21, 22 a 23 vyčíst, tak vliv ostřící páčky není zanedbatelný. V porovnání všech parametrů napříč světelnými zdroji je zjištěno, že u měření světelnými zdroji Partial ring levý dolní a Partial ring pravý horní se získávají nedostatečné výsledky.

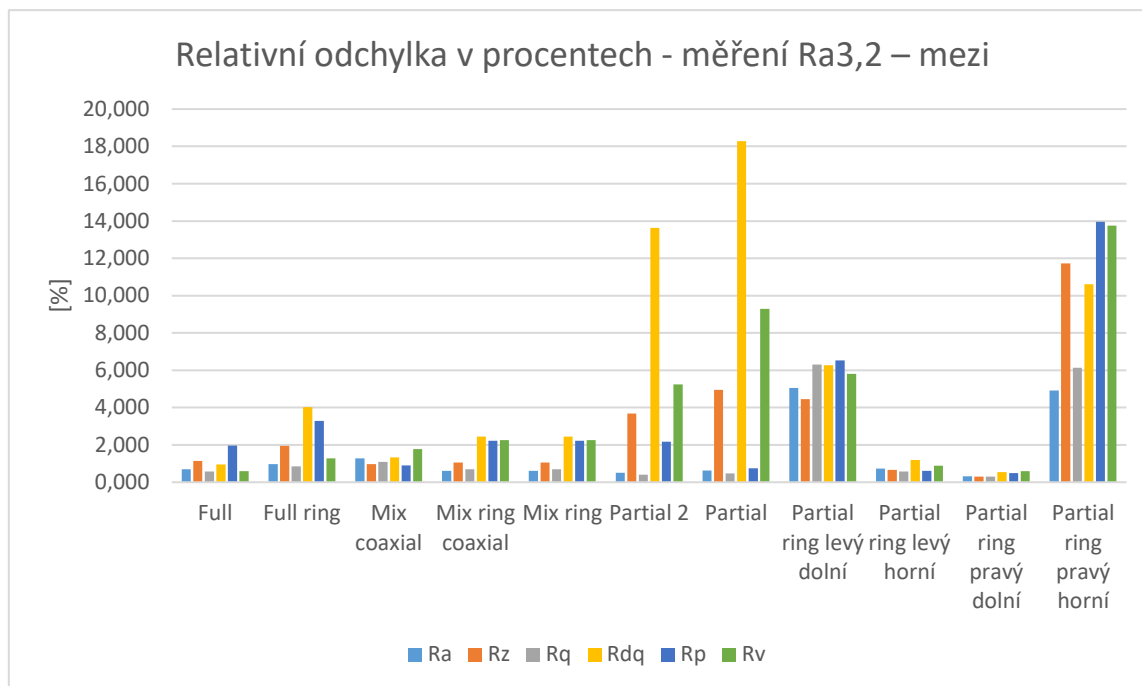


Graf 22 Vzorek Ra3,2 parametr Rz „normal“

Je překvapivé, že měření s osvětlením Partial ring levý horní a pravý dolní si u všech verzí měření drží své kvality. Lze tvrdit, že během této polohy vzorku byl vliv ostřící páčky na tyto dva světelné zdroje minimální.



Graf 23 Vzorek Ra3,2 parametr Rz „edge“



Graf 24 Relativní odchylky – nastavení „mezi“

Relativní odchylky se u jednotlivých nastavení měření také liší. V grafu 24 je možné pozorovat relativní odchylky u nastavení ostřící páčky v poloze „mezi“. Vesměs většina parametrů má relativní odchylky do 5 %. Nejmenších hodnot dosahuje mikroskop v poloze „normal“, graf tohoto nastavení je možno nalézt v příloze č. 5.

Experiment V – sumarizace

Pátým experimentem se ukázalo, že nejvhodnějším nastavením ostřící páčky je „normal“ i když nastavení „mezi“ dosahuje podobných výsledků. Bohužel nastavení „edge“ se ukázalo jako nevyhovující.

4.6 Souhrn výsledků z provedených experimentů

| | |
|----------------|---|
| Experiment I | <p>Menších směrodatných odchylek dosahovala metoda „čáry“.</p> <p>U metody „cikcak“ je dosaženo přesnějších výsledků u parametru Ra než u metody „čáry“.</p> <p>Pro měření parametru Rz nebo Rdq je spíše vhodnější metoda „čáry“, která byla svými výsledky blíže k referenčním hodnotám.</p> <p>U parametru Rq, Rp a Rv byly výsledky velmi podobné.</p> |
| Experiment II | <p>Jako nejvíce univerzální se osvědčil objektiv se zvětšením 20x, protože jeho průměrné výsledky byly blíže k referenčním a směrodatné odchylky byly menší než u zvětšení 10x a 50x.</p> |
| Experiment III | <p>Mikroskop Alicona se zprůměrovanými hodnotami blížil častěji k hodnotám referenčním, ale s větší odchylkou. Je tedy vhodný především k opakovanému měření jednoho vzorku, což zaručí přesnější průměrný výsledek.</p> <p>Mikroskop Keyence má naopak menší relativní odchylky měření, ale průměrné hodnoty byly méně přesné. Výsledky jeho měření jsou tedy stabilní a měření se hodí např. k porovnání drsnosti povrchu více vzorků mezi sebou bez nutnosti většího počtu opakování měření.</p> |
| Experiment IV | <p>Z experimentu vyšlo, že nejvhodnější světelné nastavení je Full ring a Mix ring, jedná se o stejný typ světla dosažený jiným nastavením. Základní osvětlení Full dosahuje relativně přesných výsledků.</p> |
| Experiment V | <p>Nejméně vhodným nastavením ostřicí páčky je poloha „edge“. Přestože nastavení „mezi“ dosahuje podobných výsledků jako „normal“, ostřicí páčka v poloze „normal“ má nejpřesnější výsledky.</p> |

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnat dva mikroskopy určené k měření drsnosti povrchu, zjistit jejich optimální nastavení a porovnat je mezi sebou. V ideálním případě měly experimenty sloužit k budoucímu transferu měření mezi těmito dvěma přístroji. Cíl byl naplňován měřeními na obou mikroskopech v rámci série pěti experimentů, které byly jednotlivě zhodnoceny a vzešlo z nich několik bodů.

Prvním zkoumaným mikroskopem byl přístroj značky Alicona. Jeho hlavní nevýhodou a důvodem, proč je snaha o jeho částečné nahrazení mikroskopem Keyence, je jeho hmotnost, která neumožňuje jeho přesuny. Další nevýhodou je delší doba skenování povrchu, což prodlužuje délku měření nového povrchu. Oba tyto aspekty se projeví i během měření v rámci této diplomové práce. Co se týká výsledků měření, došlo k porovnání metody „čára“ a metody „cikcak“, která proměřuje větší plochu povrchu a byl tedy očekáván přesnější výsledek. Obě metody ale dosahovaly velmi podobných výsledků, které se mírně lišily v závislosti na měřeném parametru. Dalším měřením byla porovnána různá nastavení zvětšení na tomto mikroskopu. Výsledek byl jednoznačný – nejlepšími výsledky bylo docíleno při zvětšení 20x.

Mikroskop Keyence je oproti druhému mikroskopu výrazně lehčí, což ho činí mobilnějším. Hned na začátku měření ale bylo zjištěno, že měření na něm značně limitují okolní otřesy. Je tedy nutné, aby stál na stabilním podkladě. Na základě tohoto zjištění byl objednan gramofonový stůl, který by měl eliminovat okolní vibrace a zkvalitnit tak měření na mikroskopu Keyence. Doba skenování vzorku byla kratší než u mikroskopu Alicona a tedy i celkový čas měření byl kratší. Nastavení mikroskopu nabízí několik variant osvětlení skenovaného vzorku. Jako výhodná se ukázala nastavení Mix ring a Full ring, což je v podstatě stejný typ osvětlení dosažený jiným nastavením. Základní nastavení Full coaxial zajišťuje stabilní výsledky měření. Celkově nejlepšími výsledky dosáhlo měření Partial ring pravý dolní a levý horní. Naopak nejhorší výsledky byly zjištěny při osvětlení Partial ring pravý horní a levý dolní. Otázkou je, zda na výsledky těchto měření nemá vliv natočení vzorku. Další výzkum by se tedy mohl zaměřit na ideální nastavení osvětlení v závislosti na natočení vzorku. Dalším nastavením mikroskopu Keyence je poloha ostřící páčky. Jako nejvýhodnější nastavení se ukázala poloha „normální“.

Základní rozdíly mezi mikroskopy jsou mobilita a délka měření, což byl také důvod k pořízení mikroskopu Keyence. Co se týká měření, byla snaha najít na mikroskopu Keyence alternativu k měření „cikcak“ mikroskopu Alicona, který zajišťuje rovnoměrné proměření celého vzorku. Bohužel žádné nastavení měřicí čáry mikroskopu Keyence nezajišťuje podobnou kvalitu. Měření metodou „čáry“ už bylo k dispozici u obou mikroskopů a mohlo být tedy porovnáno. Výsledky měly poměrně stálou charakteristiku u téměř všech vzorků. Mikroskop Alicona dosahuje přesnějších průměrných hodnot, odchylka výsledků je ale téměř ve všech měřeních vyšší. Naproti tomu mikroskop Keyence má sice ve většině měření průměrnou hodnotu vzdálenější od referenční hodnoty naměřené drsnoměrem. Odchyly v jeho měření jsou ale opravdu malé. U některých vzorků je dokonce odchylka nižší než u referenčního měření drsnoměrem.

Obecně lze tedy říct, že průměrně výsledky naměřené oběma mikroskopy jsou vyšší než hodnoty naměřené drsnoměrem. To je způsobeno tím, že světlo pronikne hlouběji než hrot drsnoměru. Ideálním nastavením mikroskopu Alicona je zvětšení 20x a rozdíl mezi metodou „čáry“ a „cikcak“ je minimální. Mikroskop Keyence dosahuje kvalitních výsledků při nastavení ostřicí páčky do polohy normální a při standartním nastavení osvětlení Full Coaxial – případně lze použít nastavení Mix ring nebo Full ring. Transfer měření mezi oběma mikroskopy je možný při měření metodou čáry. Pro měření více vzorků s hlavním cílem jejich porovnání mezi sebou je výhodnější použít mikroskop Keyence, který vykazuje stabilnější výsledky (menší odchylka). Zároveň je pro tento účel výhodná větší mobilita tohoto mikroskopu. Pro přesnější proměření drsnosti povrchu jednoho vzorku je výhodné opakované měření na mikroskopu Alicona, který dosahuje lepších průměrných hodnot. Ekonomické zhodnocení nebylo v práci provedeno, jelikož oba mikroskopy jsou již ve vlastnosti Západočeské univerzity a na porovnání obou mikroskopů již nemá vliv.

Oba mikroskopy mají určité výhody i nevýhody a oba mají své praktické využití. V budoucnu by bylo dobré zaměřit se především na bližší prozkoumání nastavení jednotlivých parametrů novějšího mikroskopu Keyence. Nastavení zaměřené na konkrétní vzorek by mohlo vést k přesnějším průměrným výsledkům.

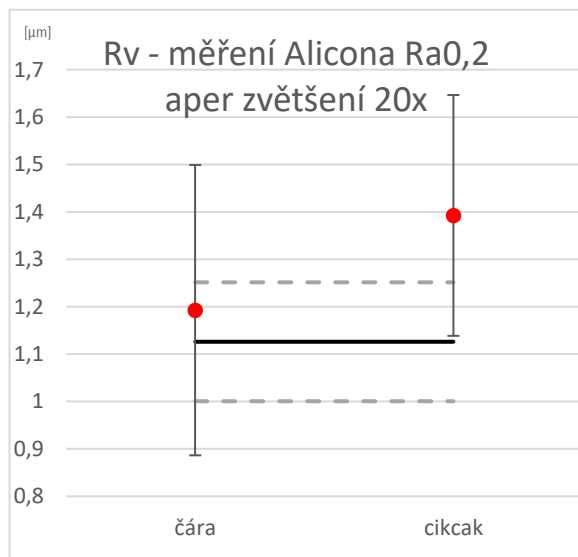
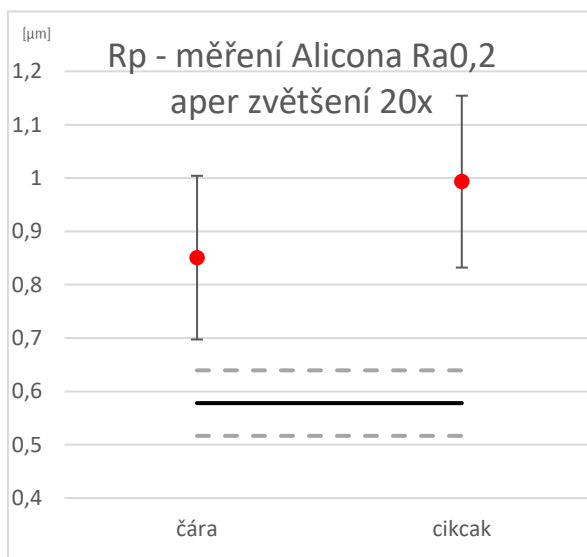
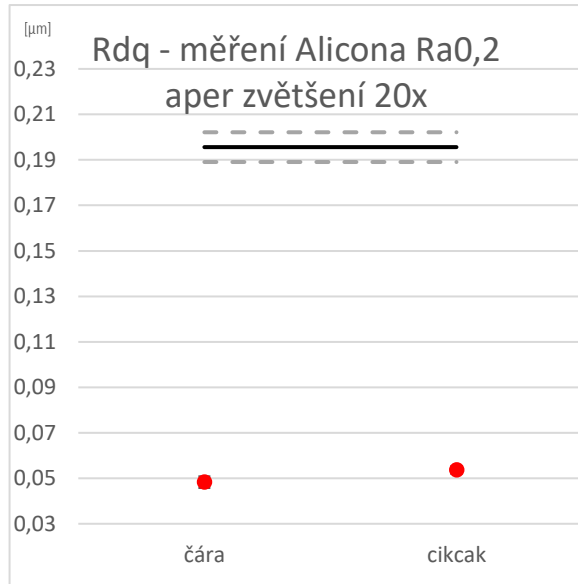
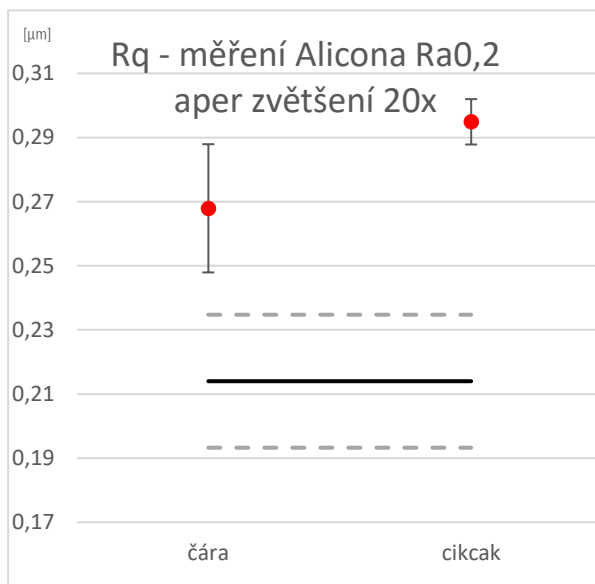
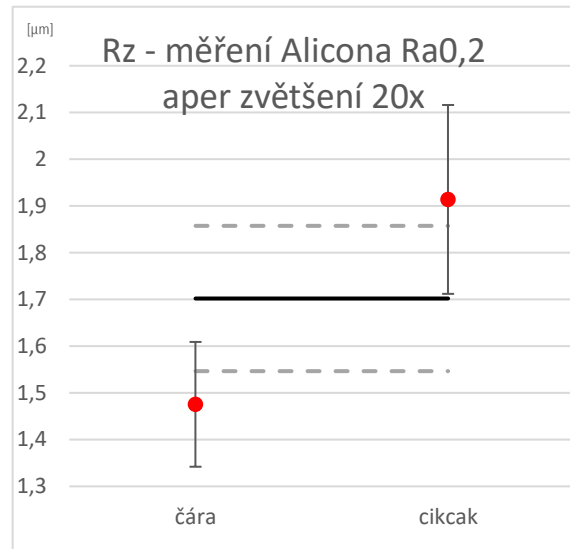
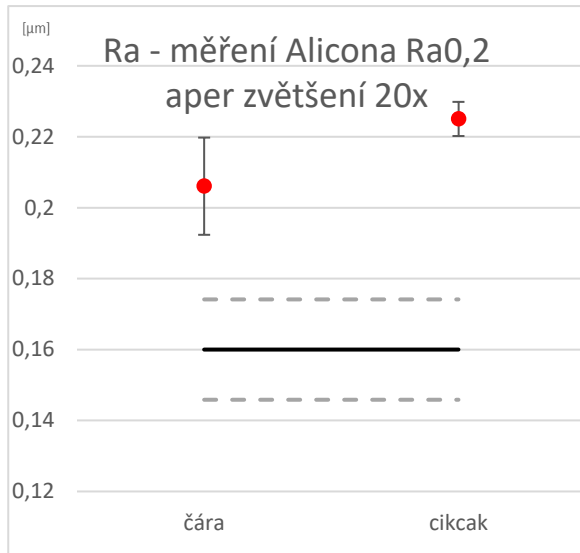
7 Seznam použitých zdrojů

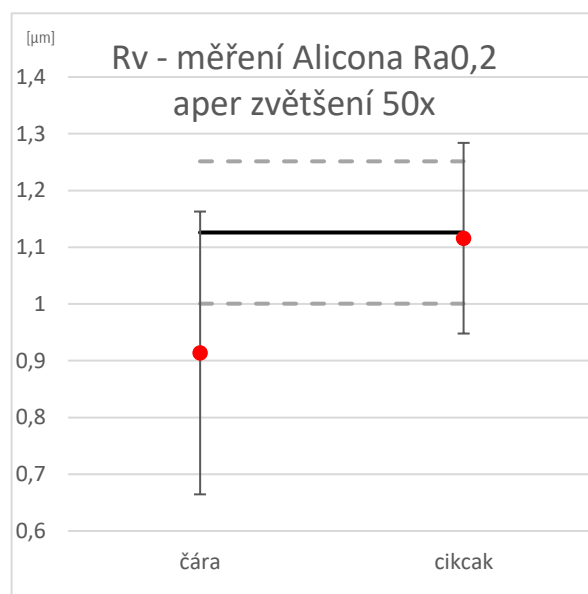
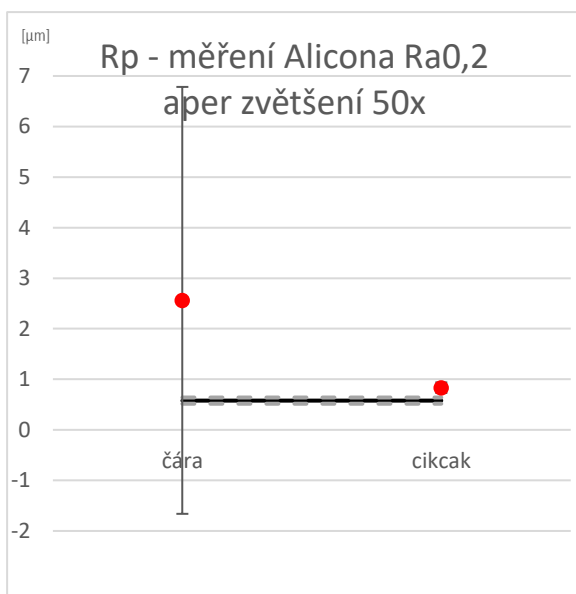
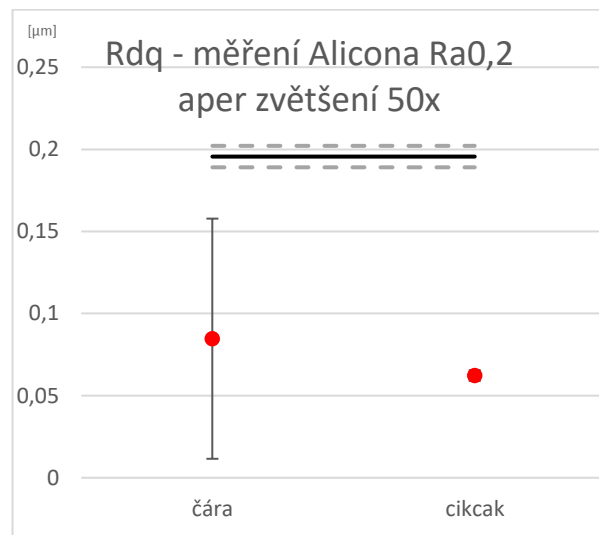
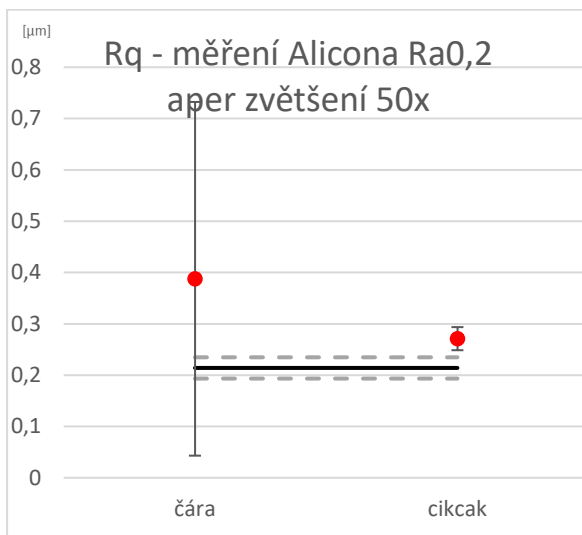
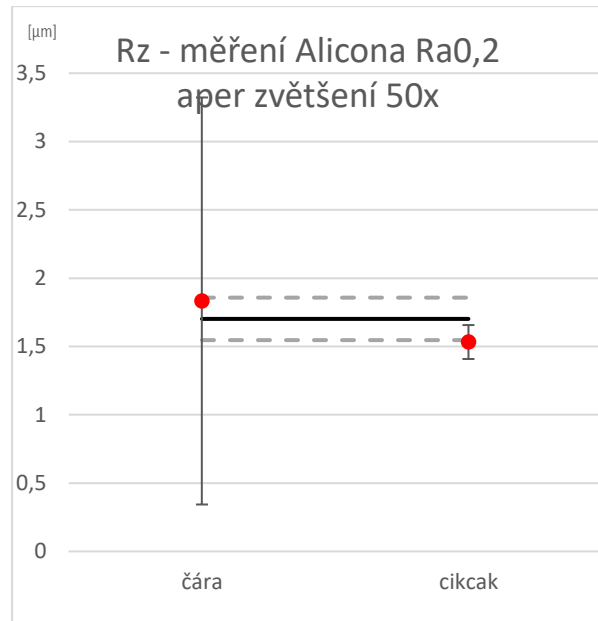
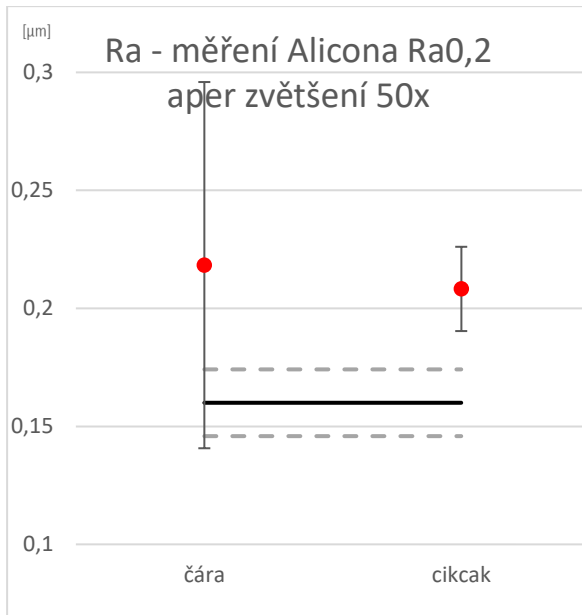
- [1] **Fojtek, Oldřich, Pomykalová, Lenka a Budínský, Dominik.** Elektronická učebnice ELUC. <https://eluc.ikap.cz/>. [Online] 28. 08 2015. <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>.
- [2] **Tichá, Šárka.** *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-1209-6.
- [3] **Janko, Christian.** Bruker Alicona. www.alicon.com. [Online] 2001. <https://www.alicon.com/news-detail/newsitem/focus-variation-in-comparison/>.
- [4] **Sundar.** extrudesign.com. extrudesign.com. [Online] 04. 02 2018. <https://extrudesign.com/optical-profile-projector-working-principle-construction/>.
- [5] **bitfab.** www.bitfab.io. www.bitfab.io. [Online] <https://bitfab.io/blog/3d-structured-light-scanning/>.
- [6] **Plášek, Jaromír.** Vesmír. www.vesmir.cz. [Online] 05. 09 1995. <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1995/cislo-9/konfokalni-mikroskop.html>.
- [7] **Regionální technologický institut.** *Zaměření centra RTI v oblasti výzkumu a vývoje*. [Brožura RTI] Plzeň : Západočeská univerzita, 2021.
- [8] **Janko, Christian.** Bruker Alicona. www.alicon.com. [Online] 2001. <https://www.alicon.com/en/our-technology/focus-variation/>.
- [9] **ČSN EN ISO 8785.** *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)*. [Norma] Brusel : Nedokonalosti povrchu – Termíny, definice a parametry, 2000.
- [10] **Leach, Richard.** *Characterisation of areal surface texture*. Berlin : Springer, 2013. ISBN 978-3-642-36457-0.
- [11] **ČSN EN ISO 4287.** *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)*. [Norma] Brusel : Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu, 1999.
- [12] **Maltoš, Ivan.** JENOPTIK. www.jenoptik.cz. [Online] <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>.
- [13] **ČSN EN ISO 12085.** *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)*. [Norma] Brusel : Struktura povrchu: Profilová metoda - Parametry metody motif, 1999.
- [14] **ČSN EN ISO 13565-1.** *Geometrická požadavky na výrobky (GPS)*. [Norma] Brusel : Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - část 1: Filtrace a všeobecné podmínky měření, 1999.
- [15] **ČSN EN ISO 13565-3.** *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)*. [Norma] Brusel : Struktura povrchu: Profilová metoda, Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu, 2001.
- [16] **Hrabáček P.** *Problematika bezkontaktního měření drsnosti pomocí konfokálního mikroskopu*. [Prezentace] Plzeň : ATeam - materiálový výzkum.

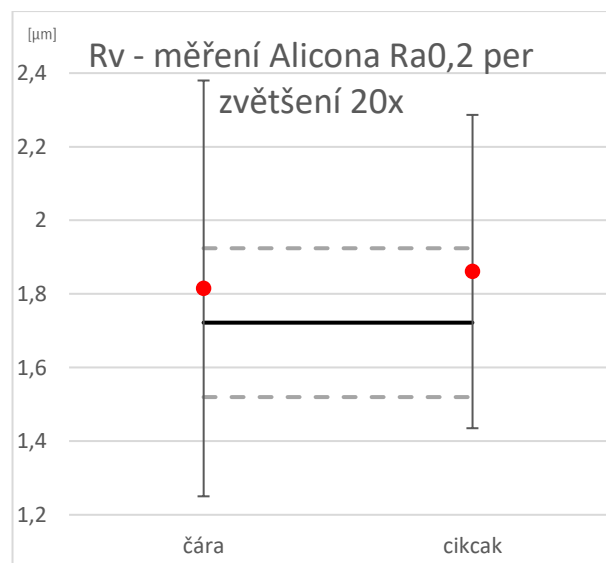
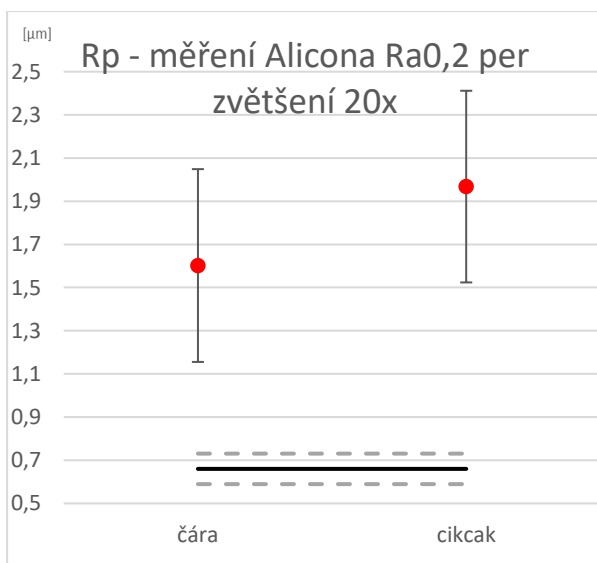
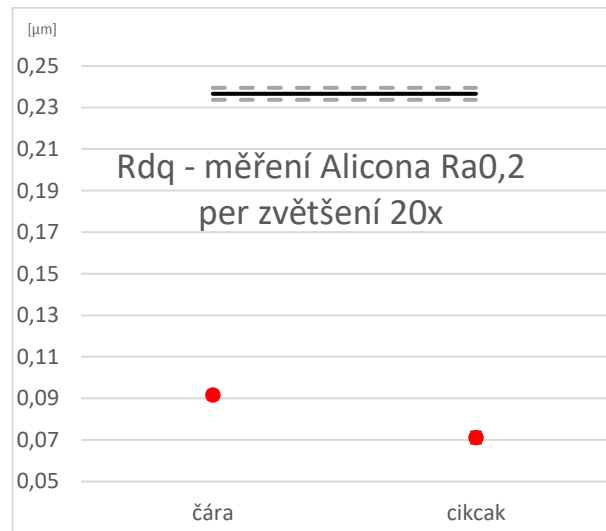
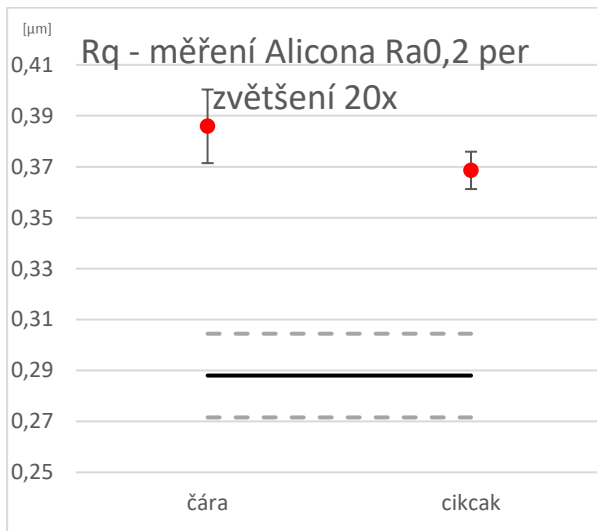
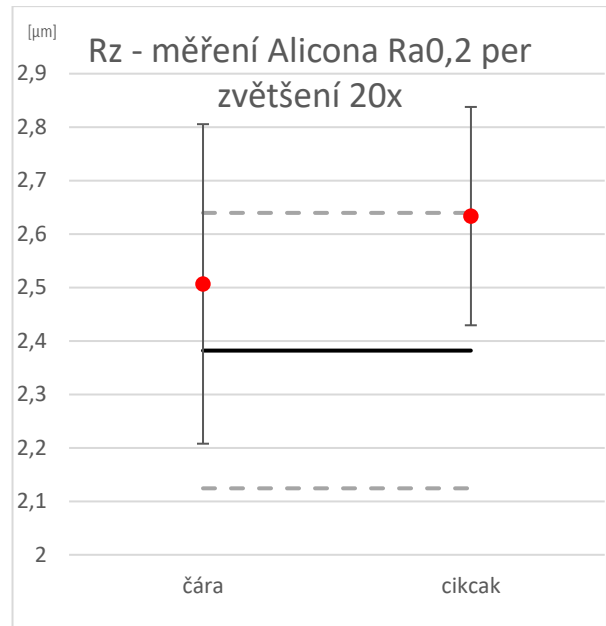
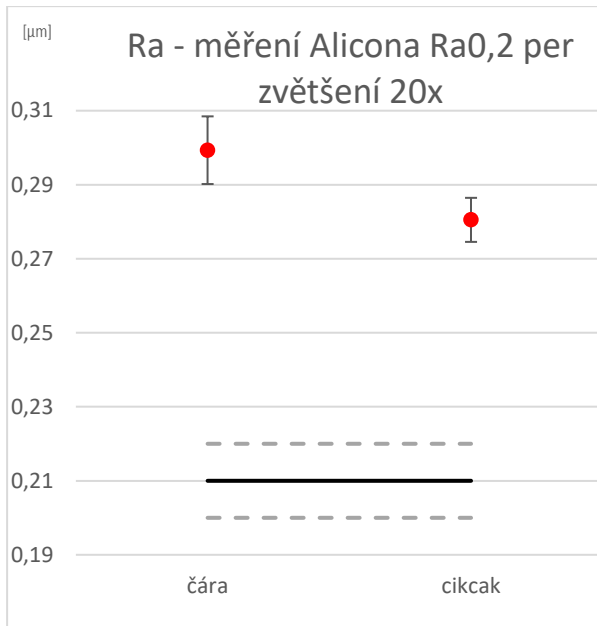
- [17] **Zapolskikh, Oleg.** *Metrologie geometrických vlastností povrchu.* [Bakalářská práce] Praha : ČVUT, 2018.
- [18] **ČSN EN ISO 4288.** *Geometrické požadavky na výrobky (GPS).* [Norma] Brusel : Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu, 1999.
- [19] **Petřkovská, Lenka.** VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. www.projekty.fs.vsb.cz. [Online] 2013. https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%.
- [20] **352LAB.** *Nejistoty měření.* [Dokument] Ostrava : VŠB-TU.
- [21] **ALICONA.** *Infinite Focus Hardware.* [Uživatelská příručka] překlad Jitka Metelková : ALICONA, 2012.
- [22] **KEYENCE.** *Digital Microscope VHX-6000.* [Uživatelská příručka] místo neznámé : KEYENCE.
- [23] **Cristea.** *Optical Roughness Measurement.* [Dokument] místo neznámé : Alicona, 2012.
- [24] **Maltoš, Ivan.** JENOPTIK. www.jenoptik.cz. [Online] 2022. <https://www.jenoptik.cz/cz/produkty/mereni-drsnosti-kontury/t8000-surfscan/>.
- [25] **Horevaj, Michal.** měřicí technika. www.vf-elektronika-foto.cz. [Online] <http://www.vf-elektronika-foto.cz/K2.html>.
- [26] **Břínek, Martin.** VÝROBA SLOŽITÝCH TVAROVÝCH PLOCH POMOCÍ CNC/HEIDENHAIN ITNC 530. www.docplayer.cz. [Online] 2014. <https://docplayer.cz/48049585-Vyroba-slozitych-tvarovych-ploch-pomoci-cnc-heidenhain-itnc-530.html>.
- [27] **KEYENCE.** www.keyence.eu. [Online] <https://www.keyence.eu/cscz/landing/lpc/1811-vh-opticky-mikroskop.jsp>.
- [28] **Mahr spol. s r.o.** www.mahr.cz. www.klz.inshop.cz. [Online] <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>.

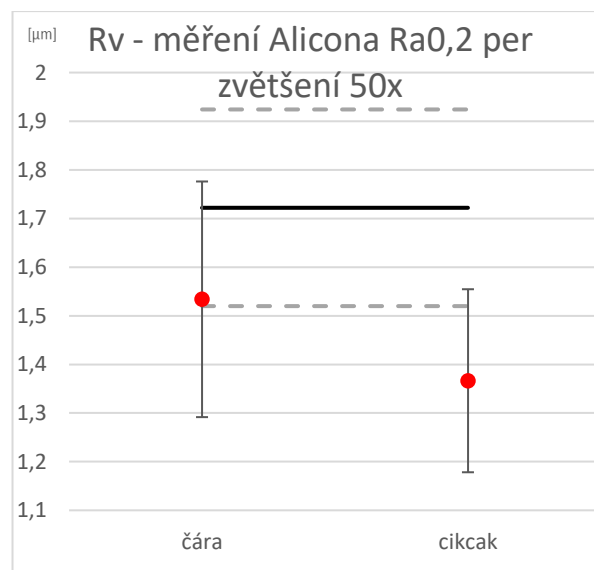
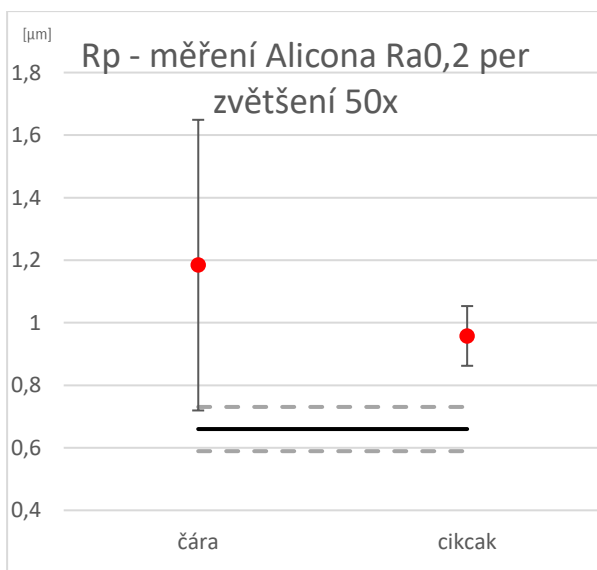
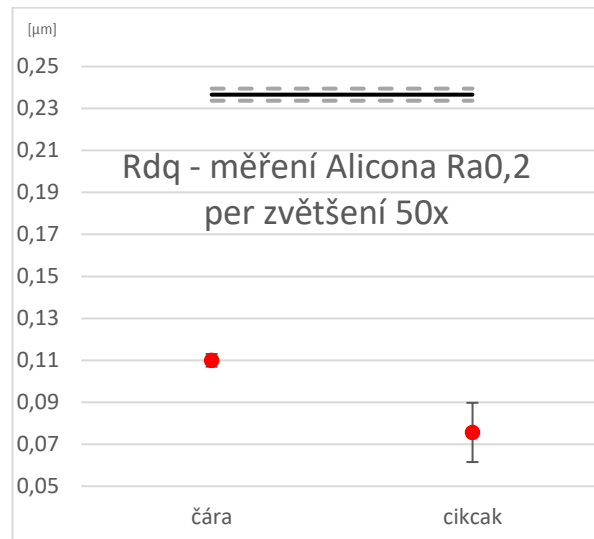
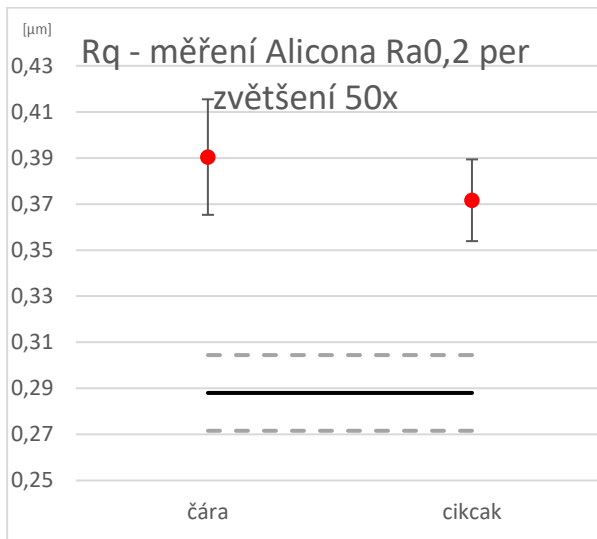
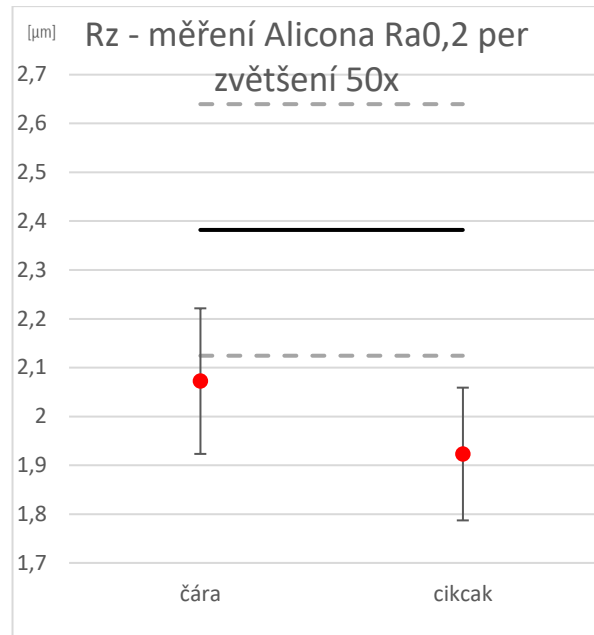
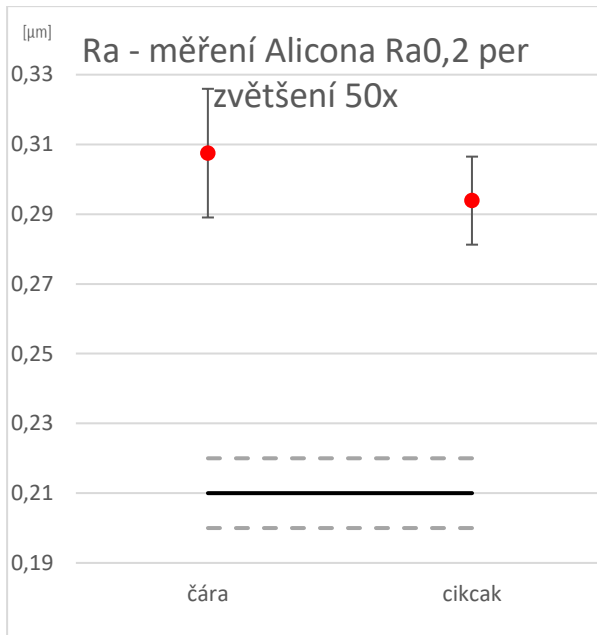
PŘÍLOHA č. 1

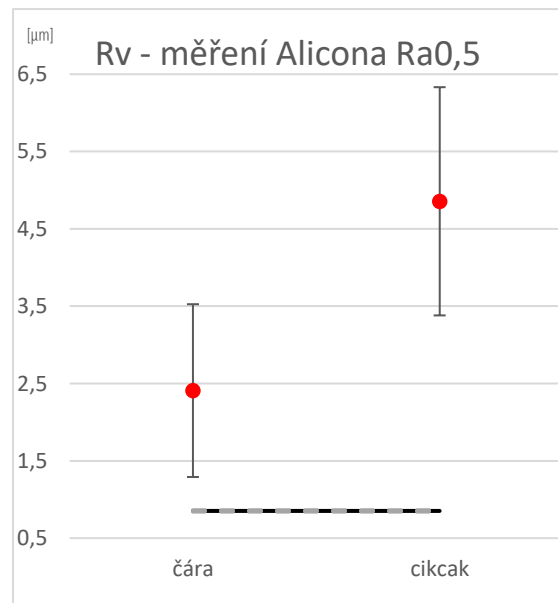
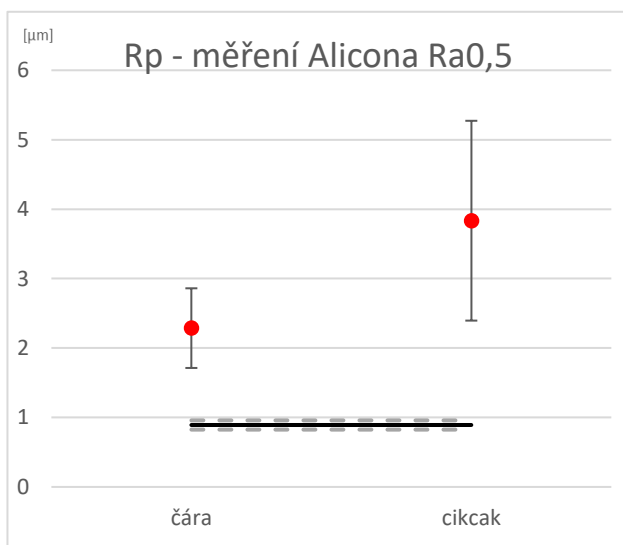
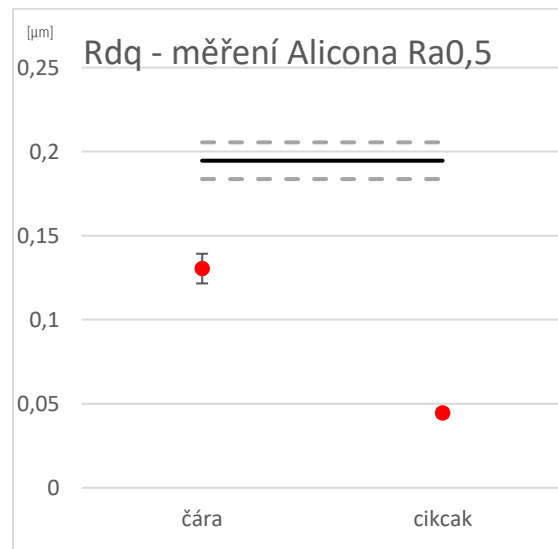
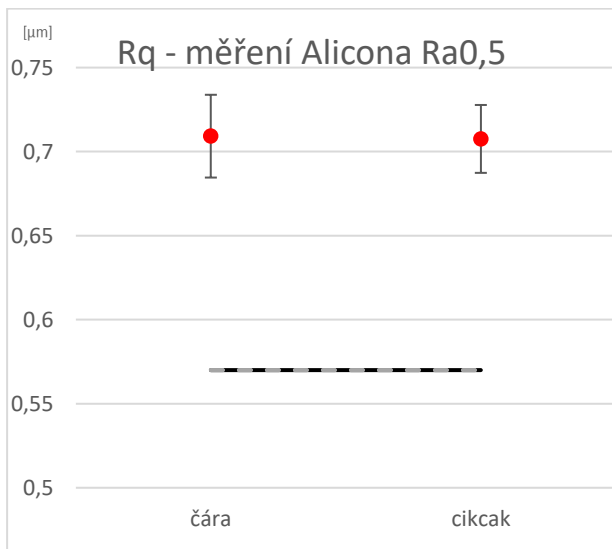
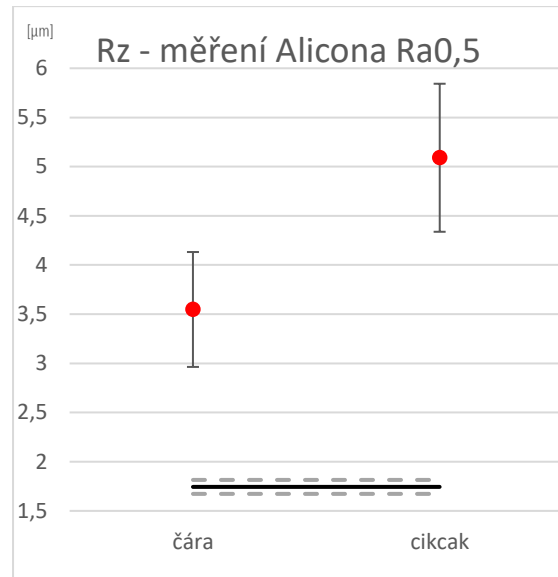
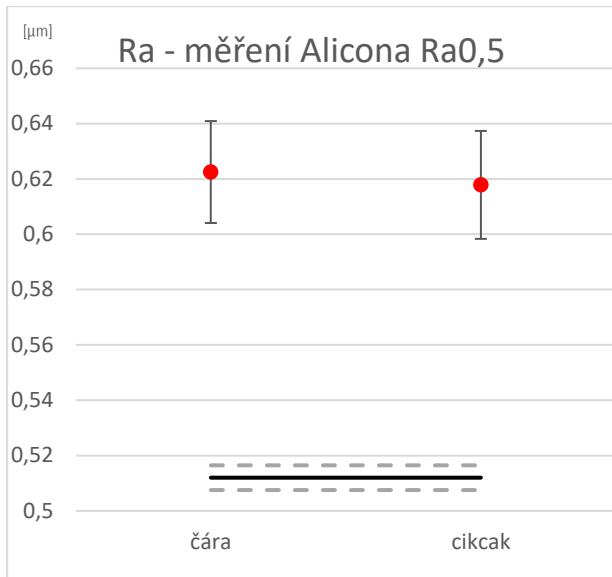
**Grafy pro porovnávání podle metod „čáry“ a „cikcak“
Pro experimenty č. 1 a 2**

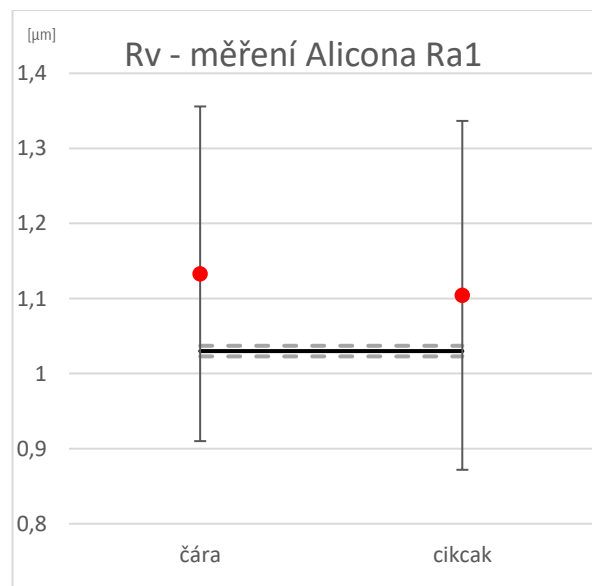
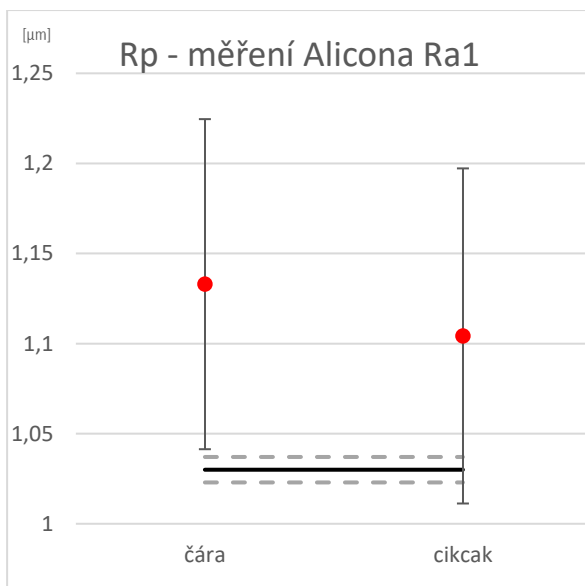
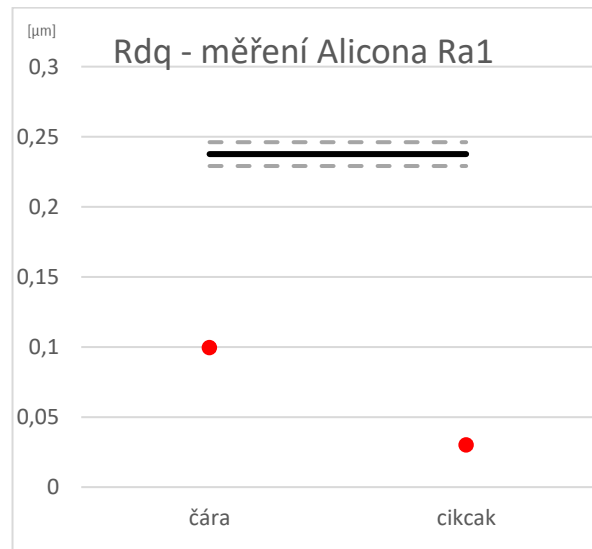
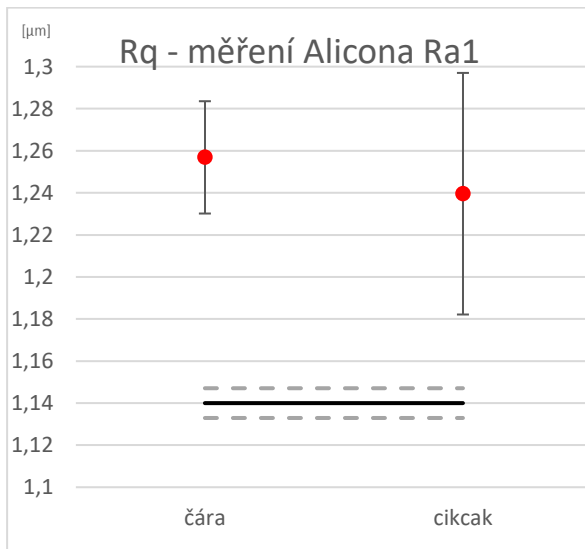
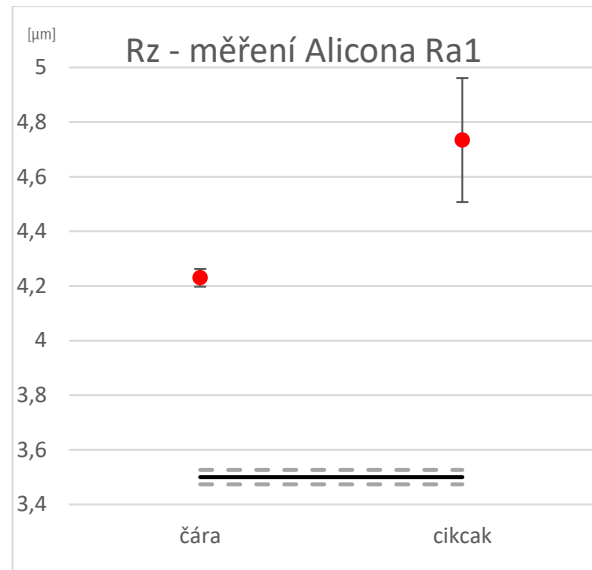
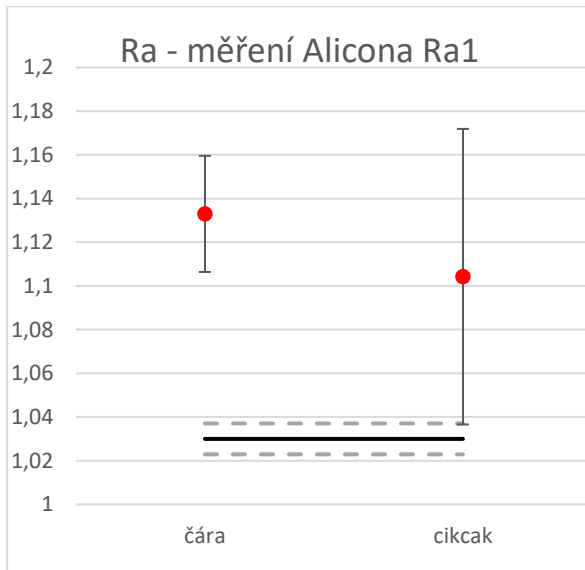


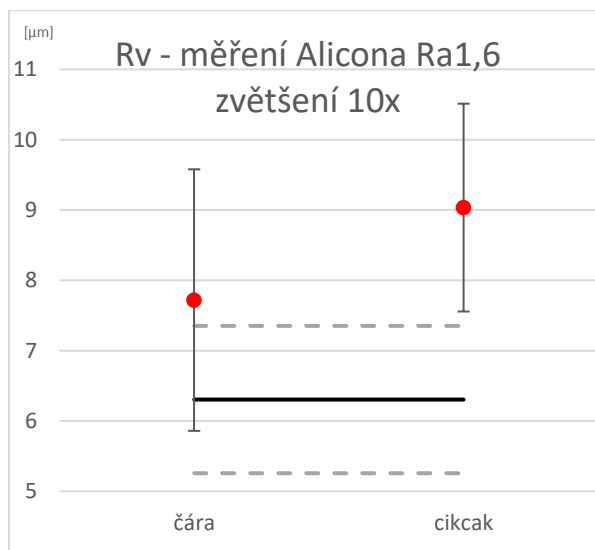
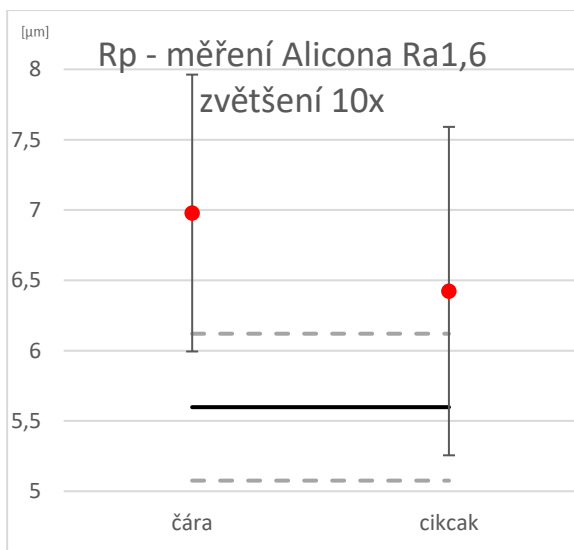
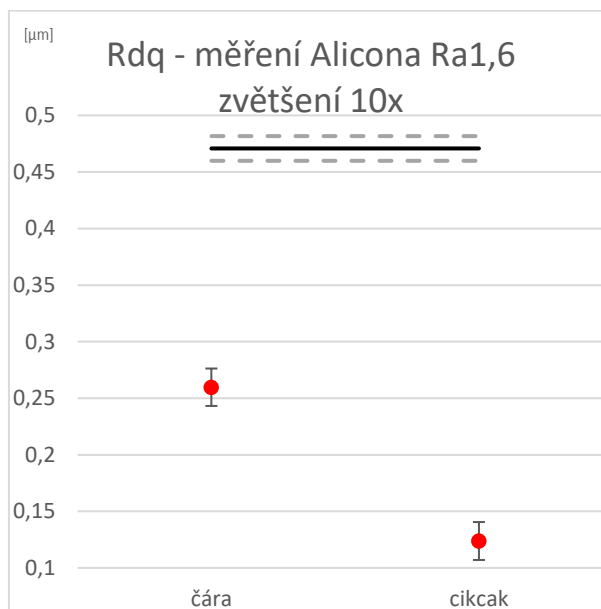
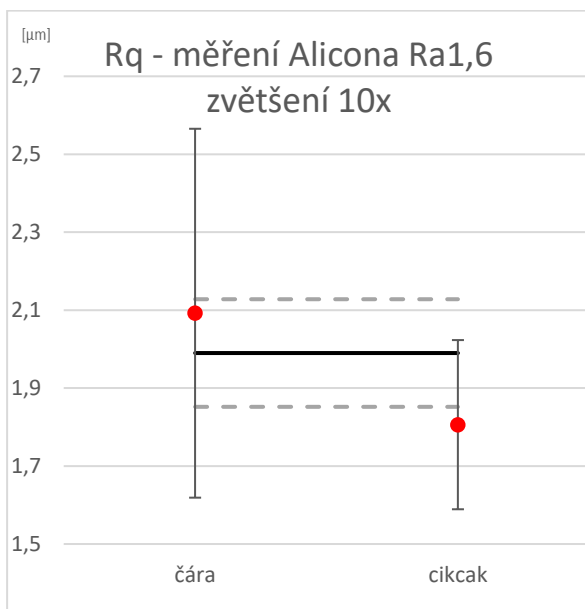
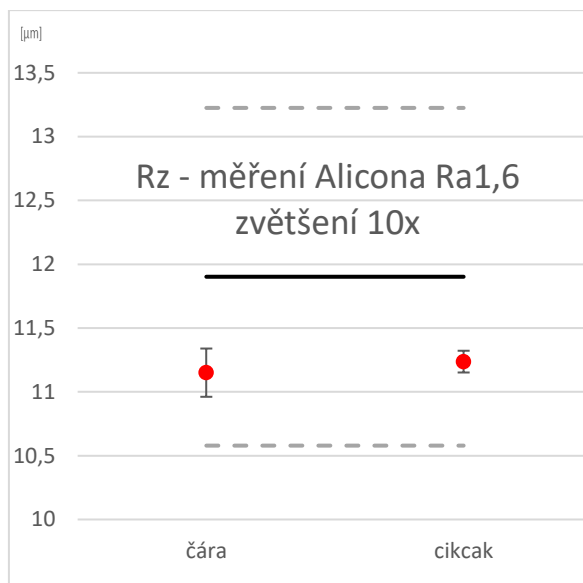
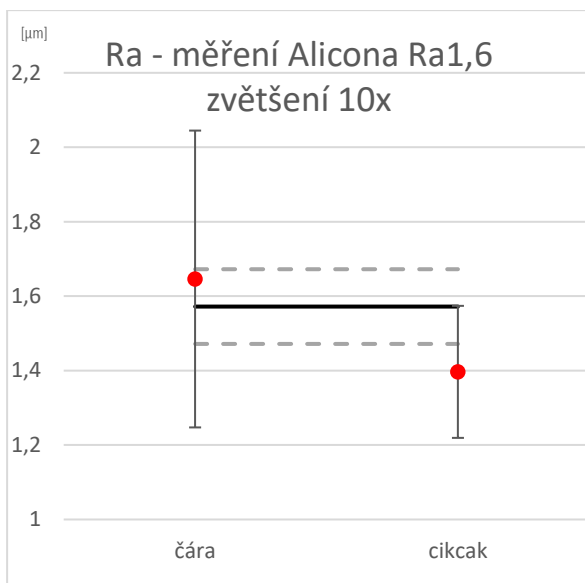


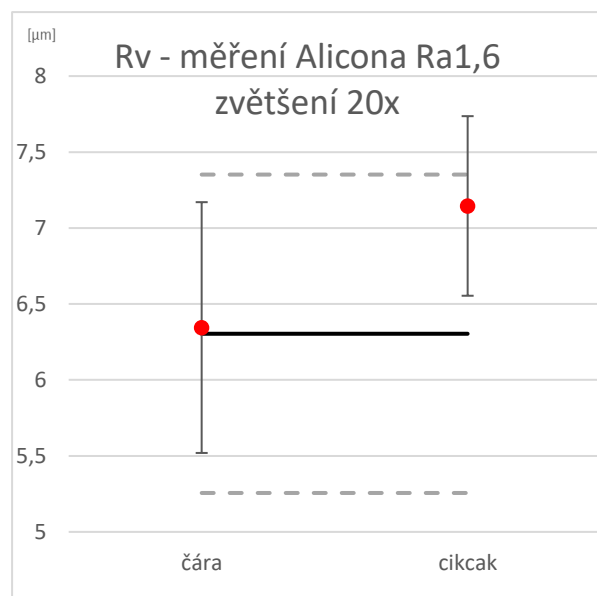
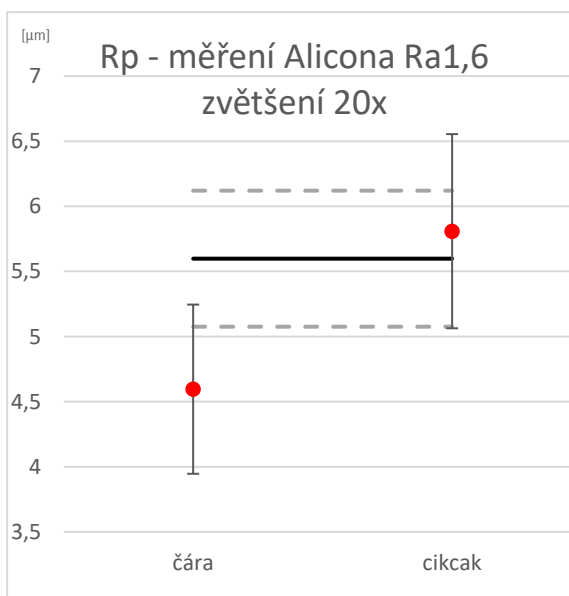
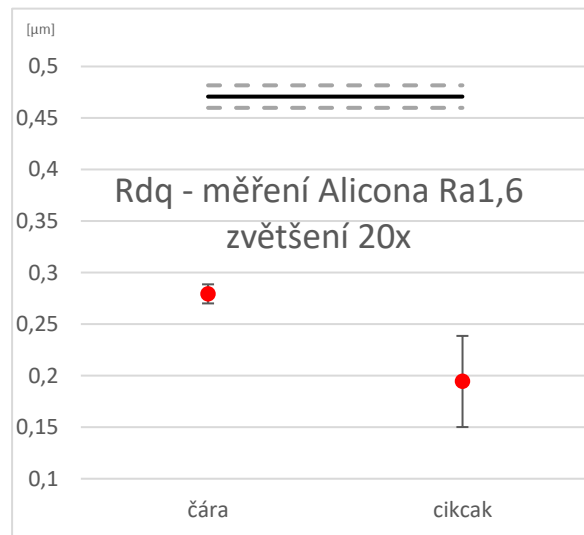
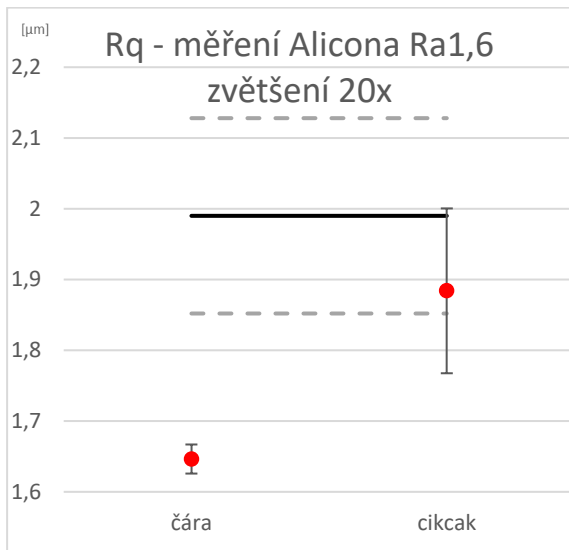
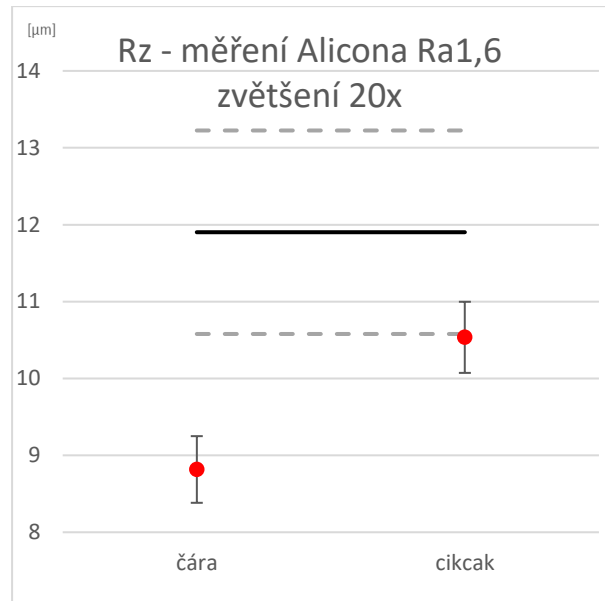
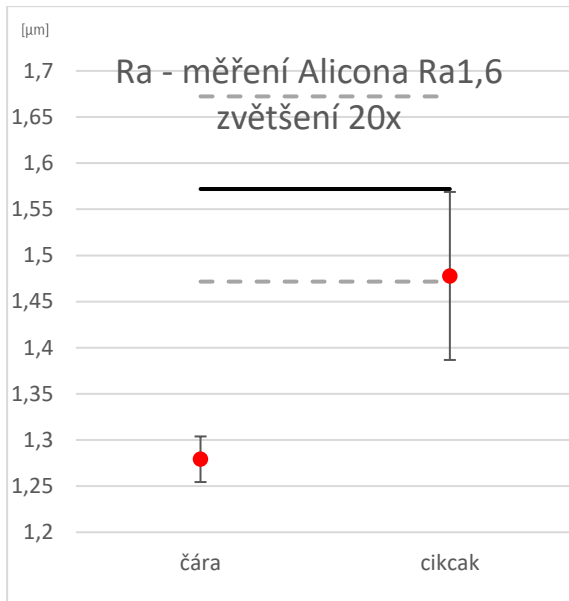


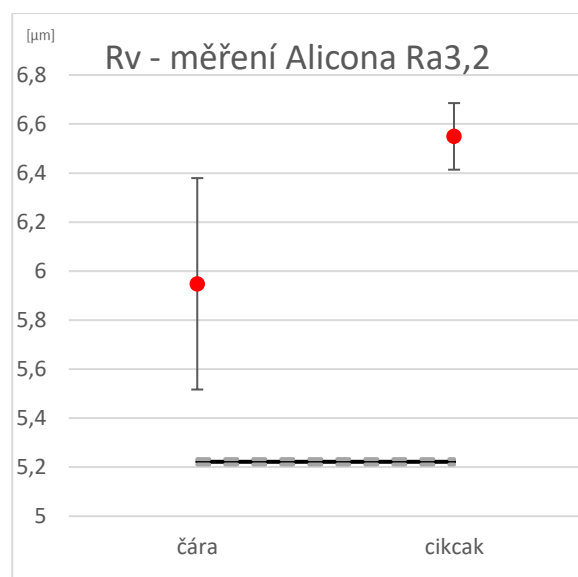
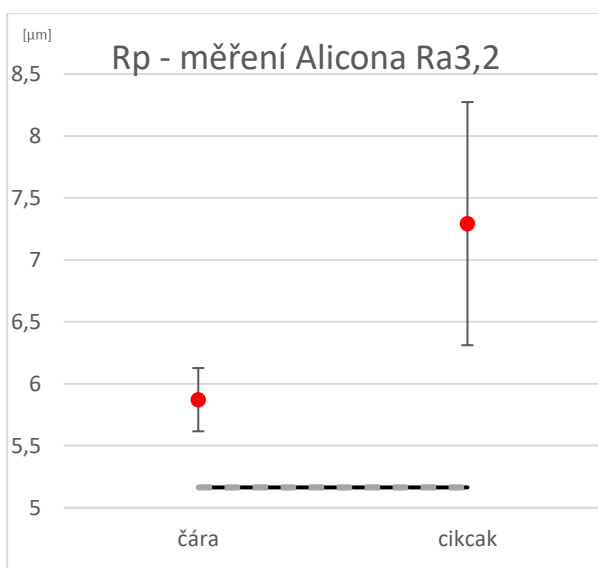
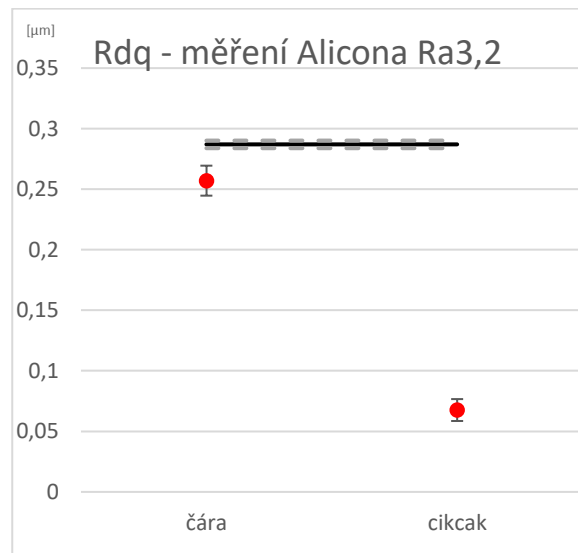
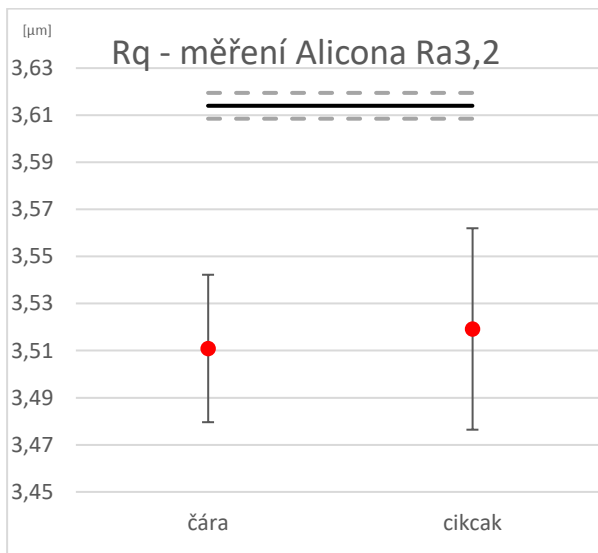
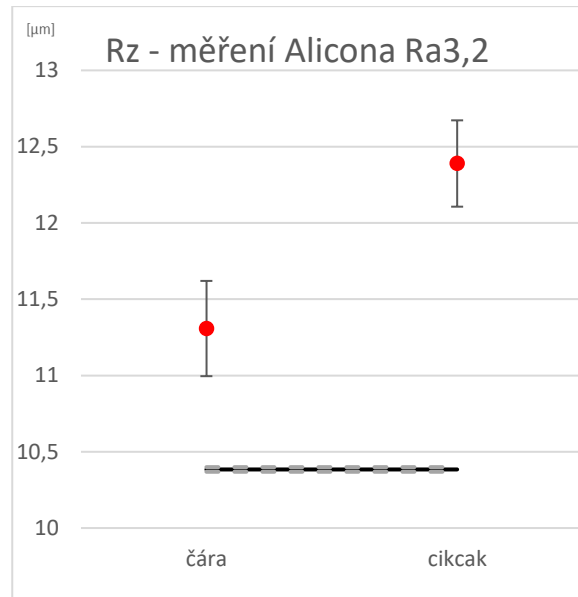
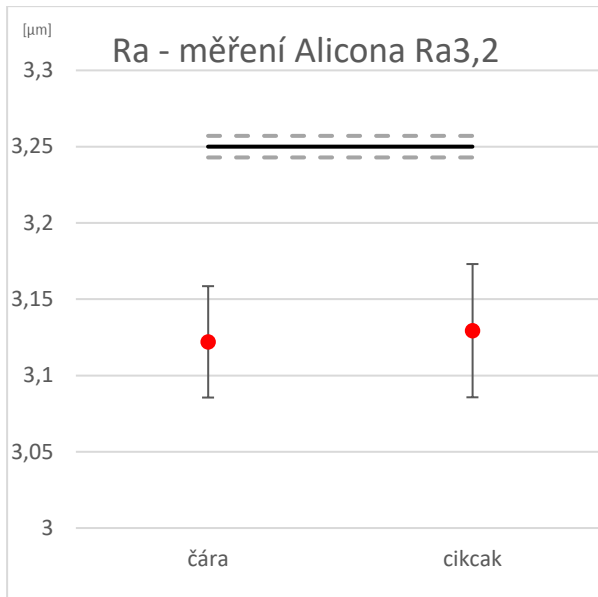






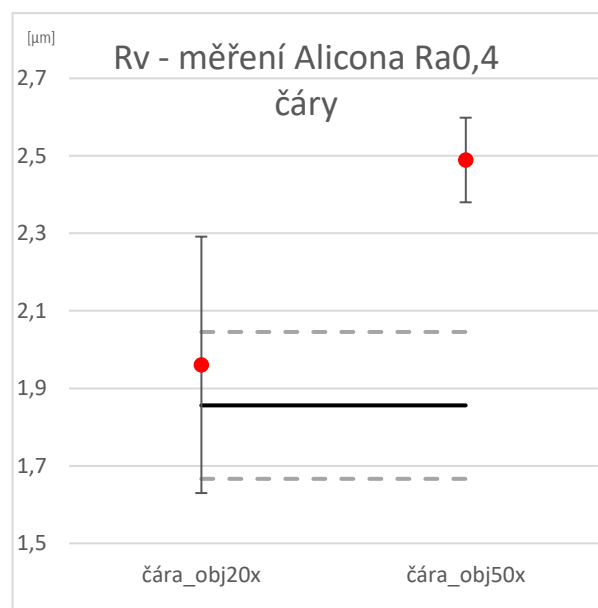
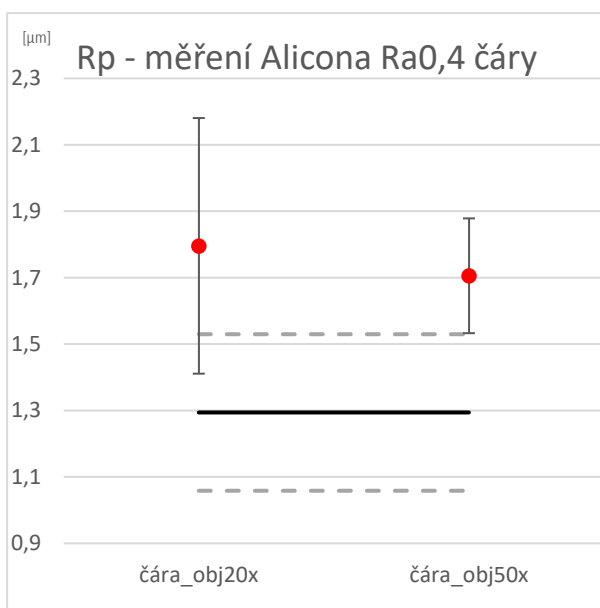
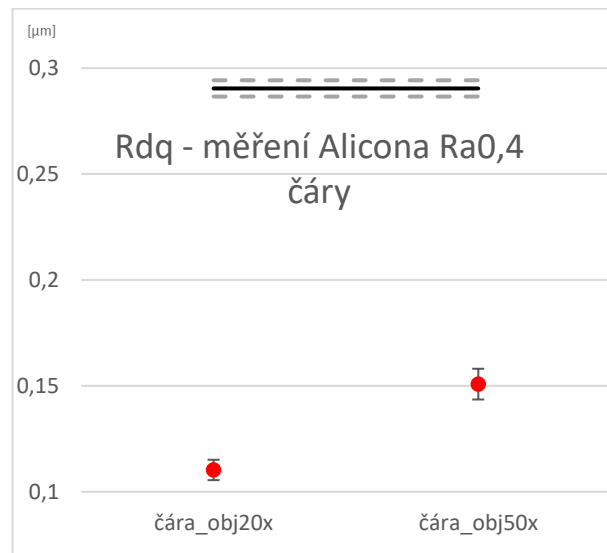
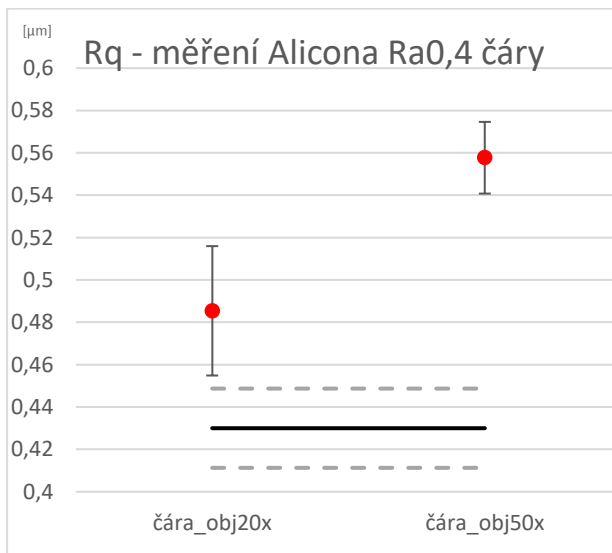
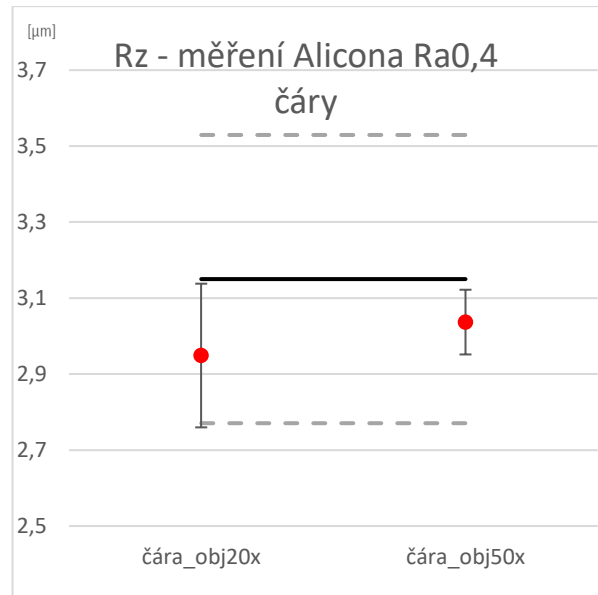
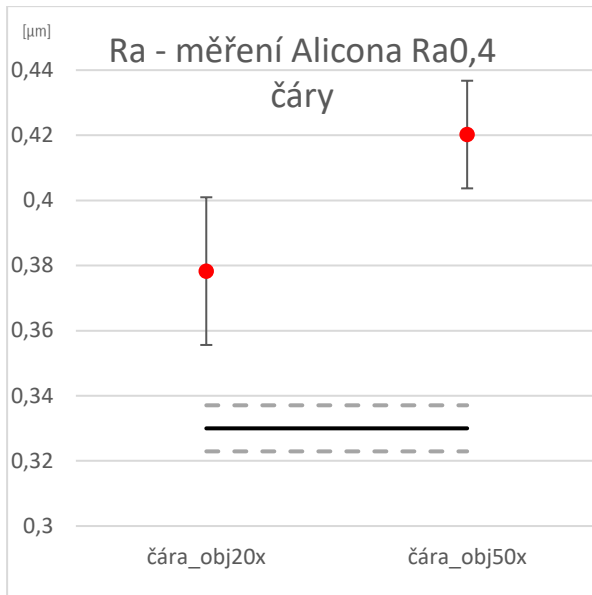


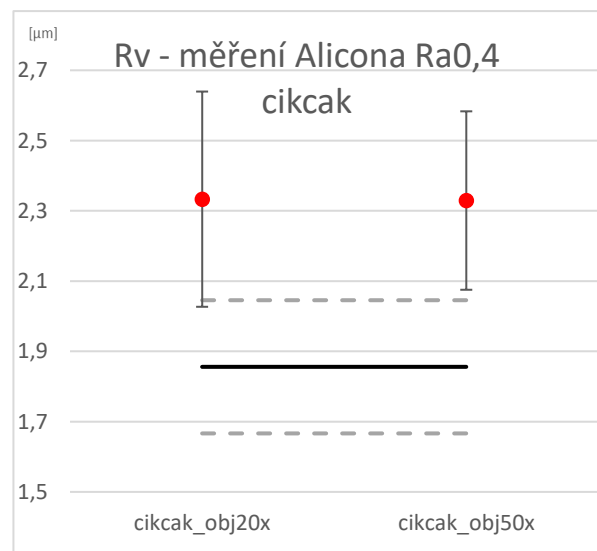
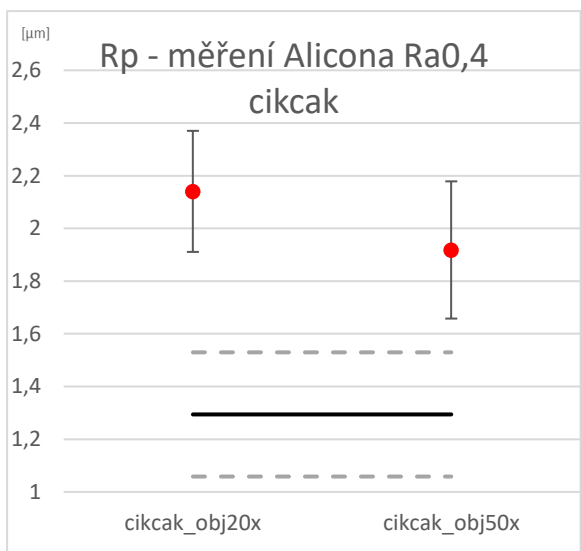
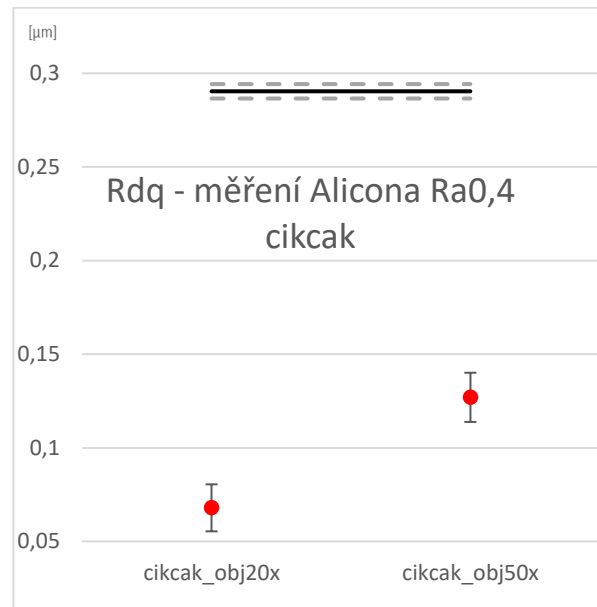
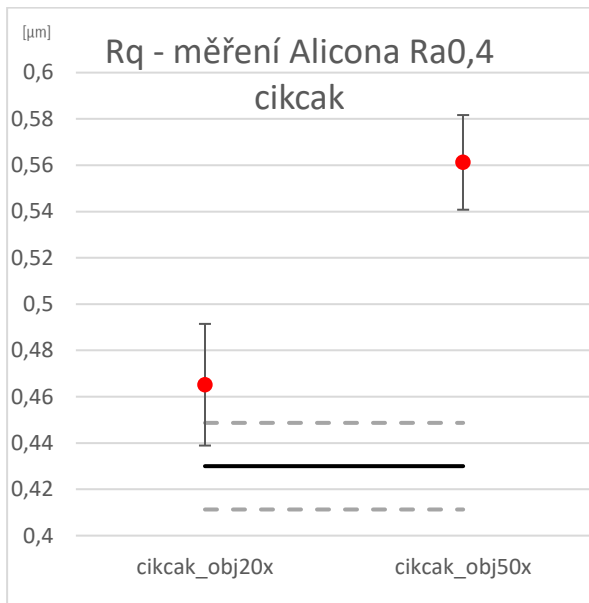
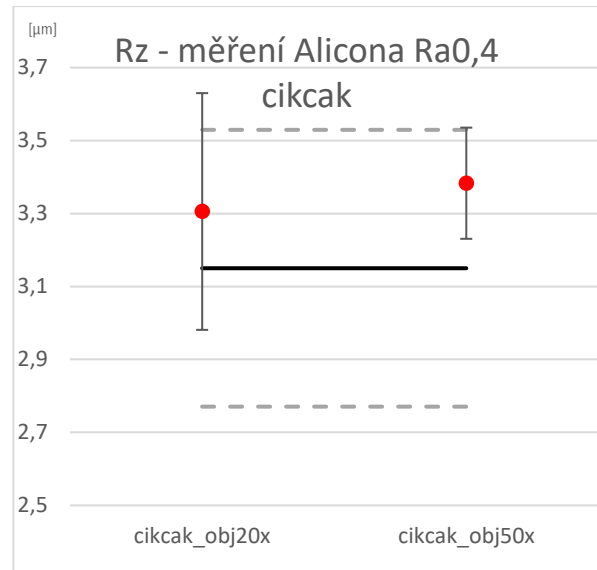
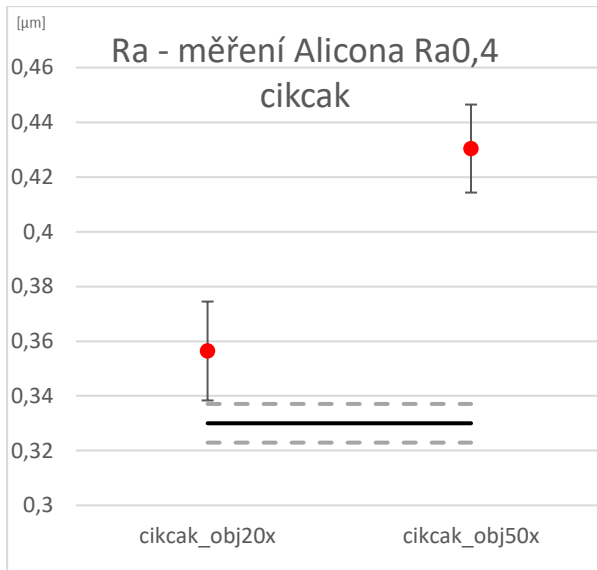


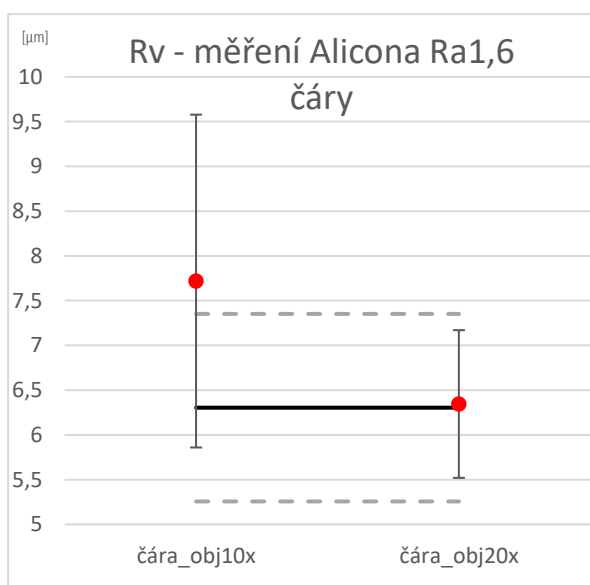
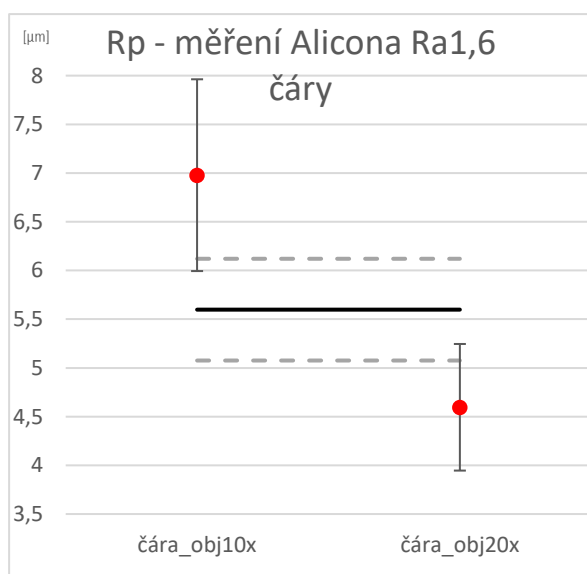
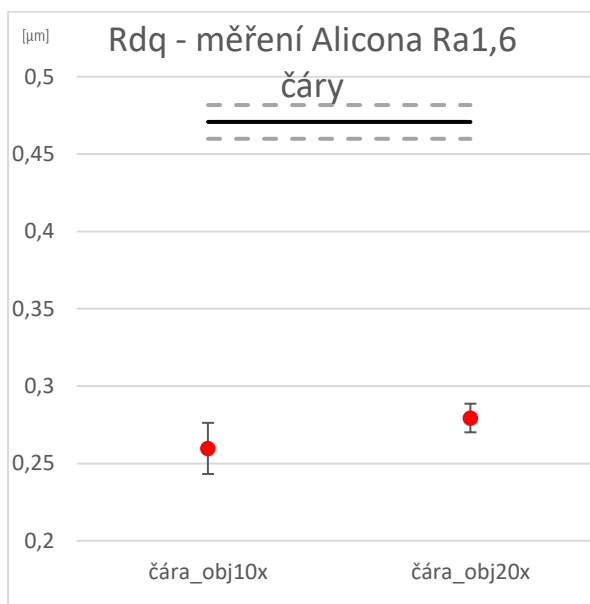
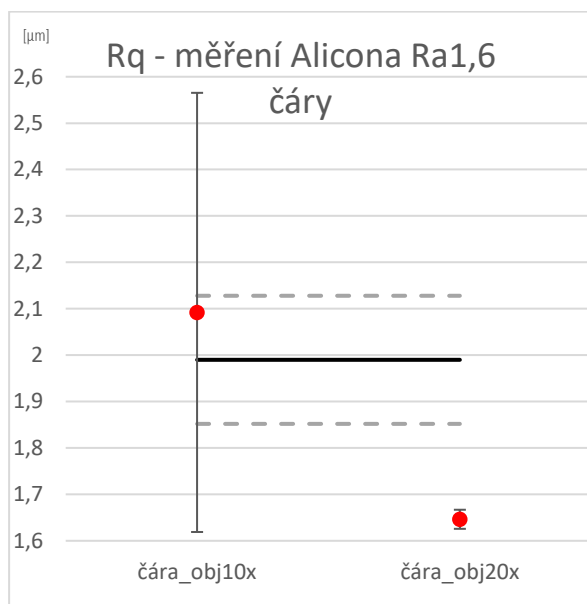
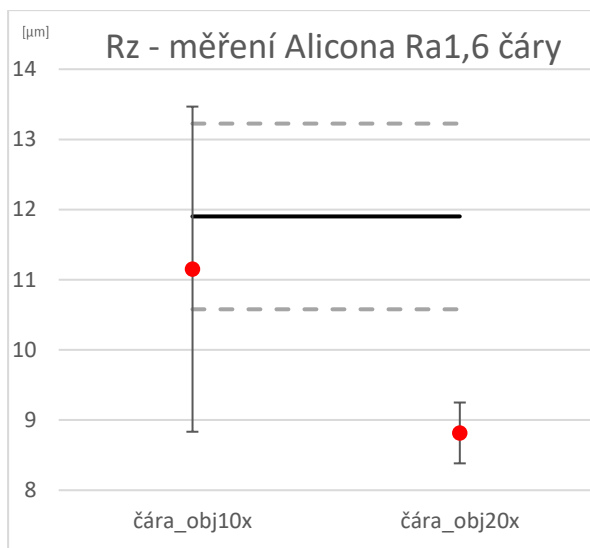
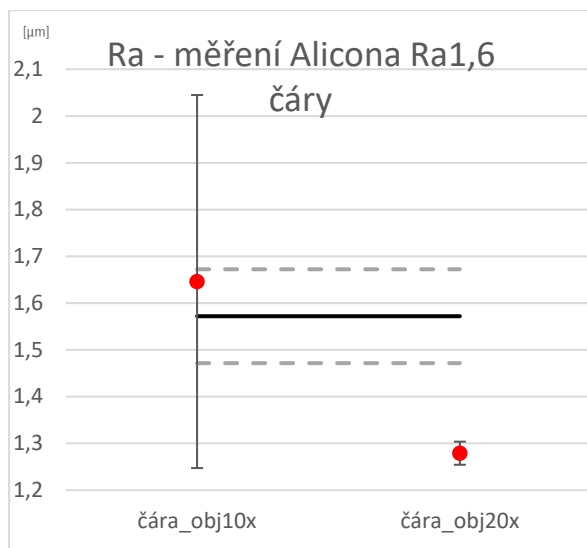


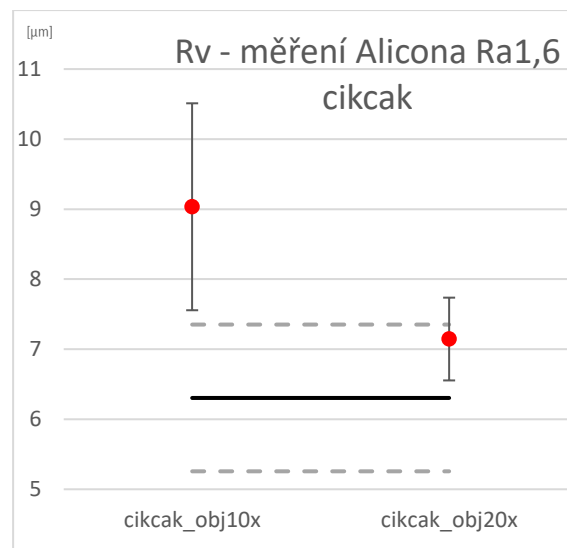
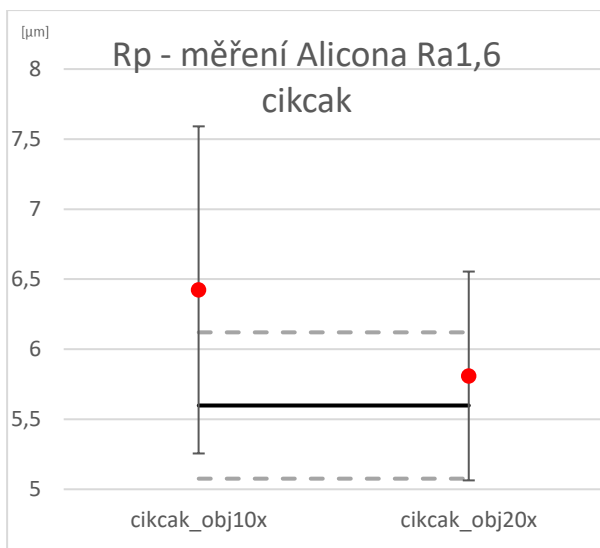
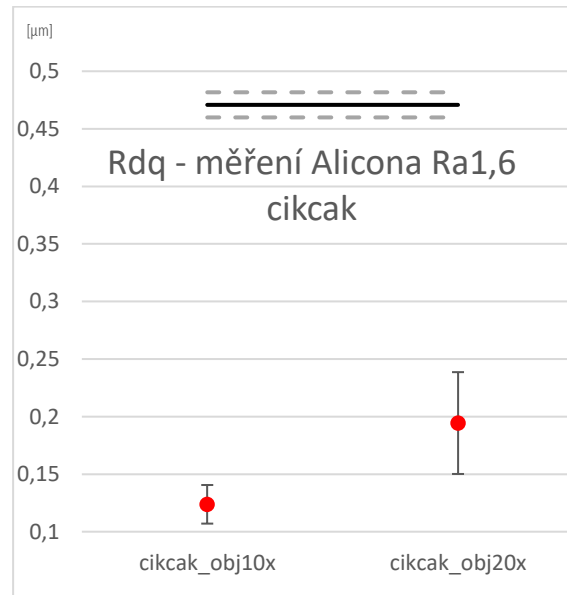
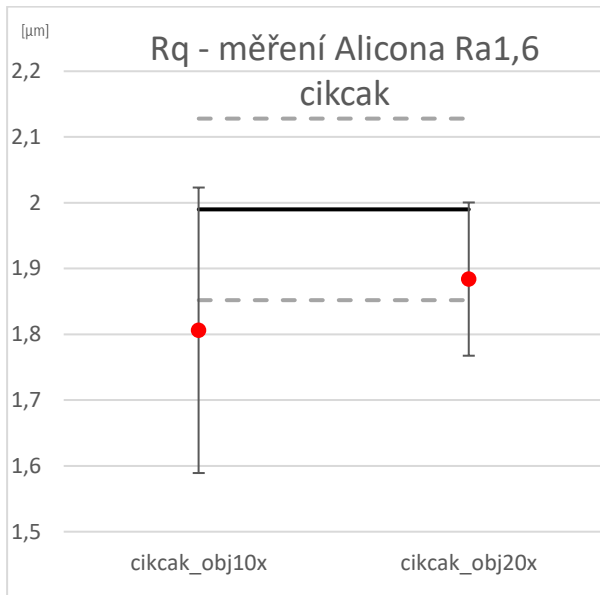
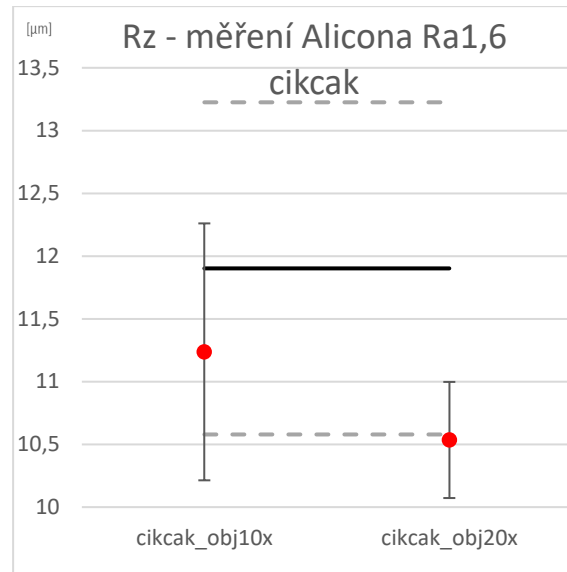
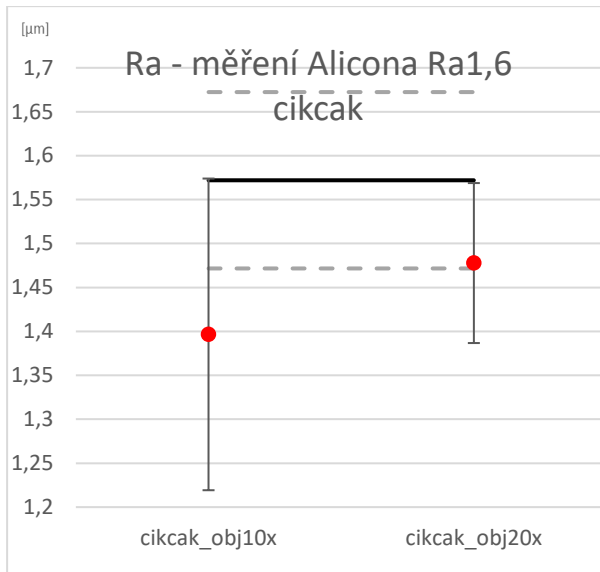
PŘÍLOHA č. 2

Grafy pro porovnávání podle zvětšení objektivů Pro experimenty č. 1 a 2



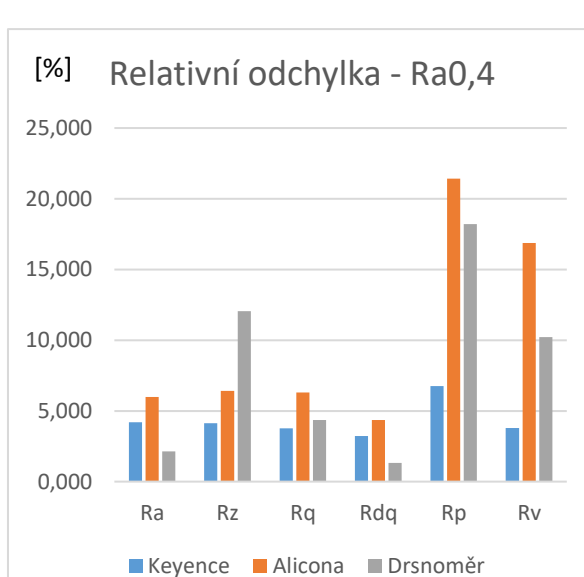
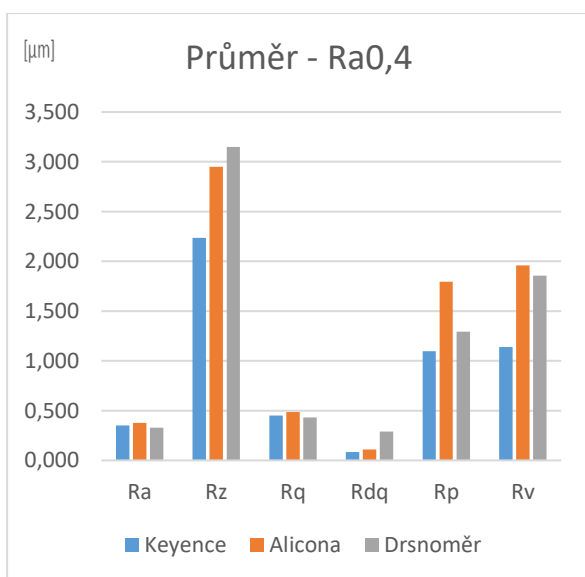
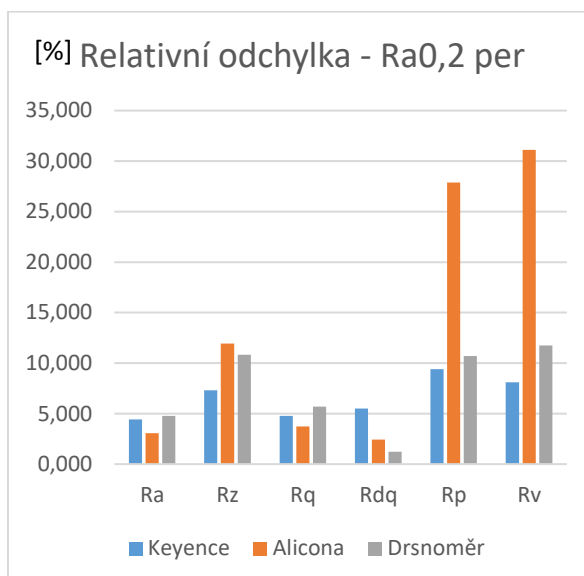
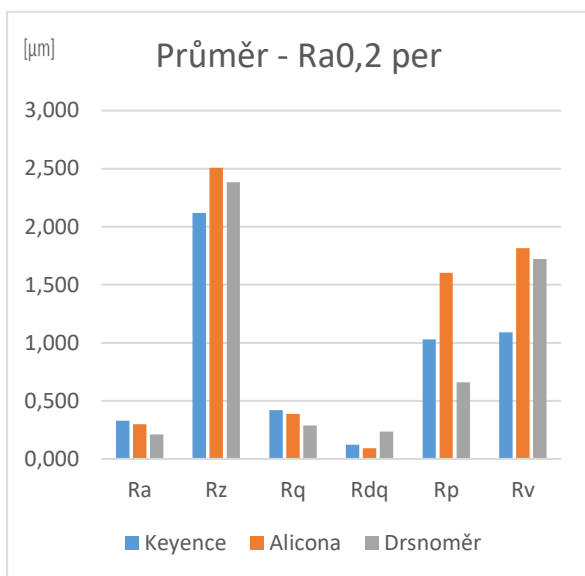
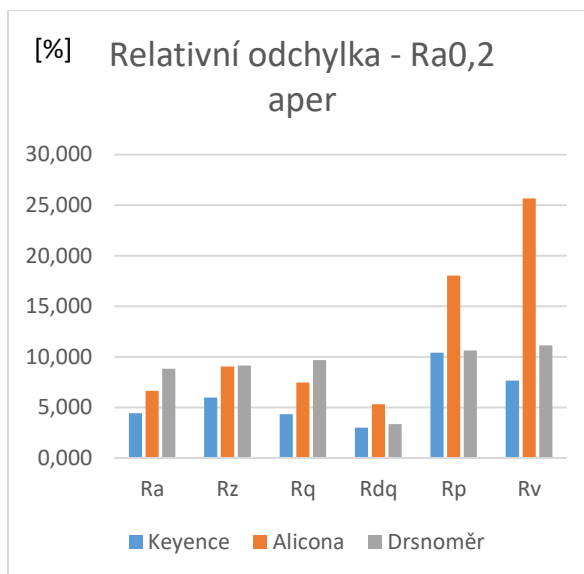
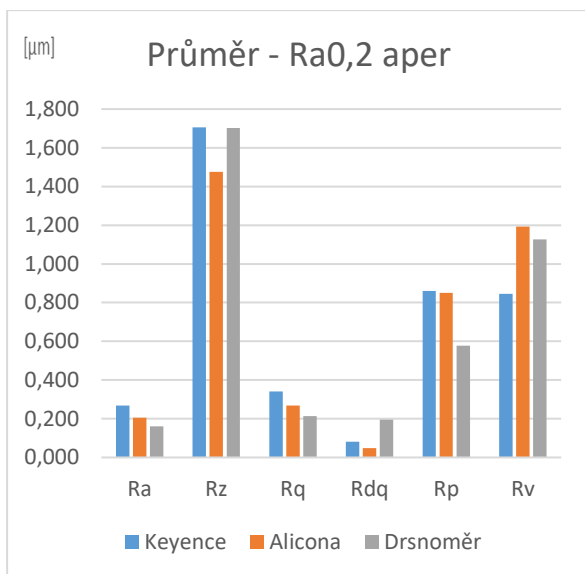


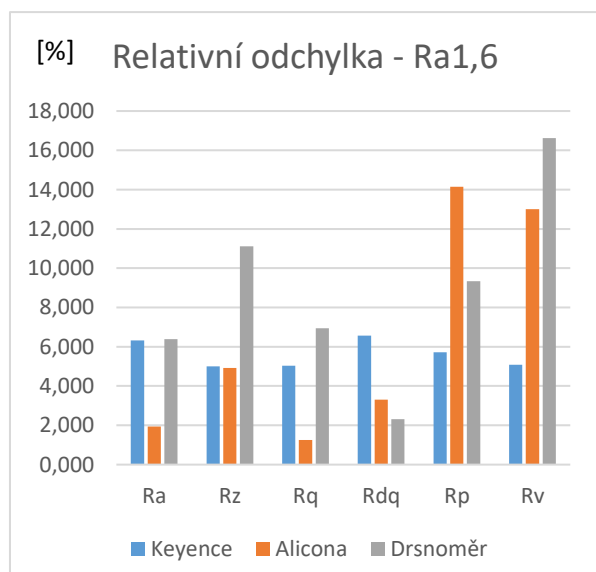
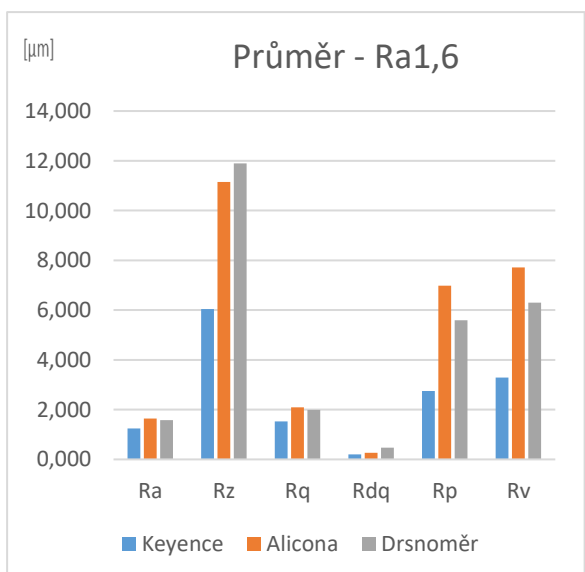
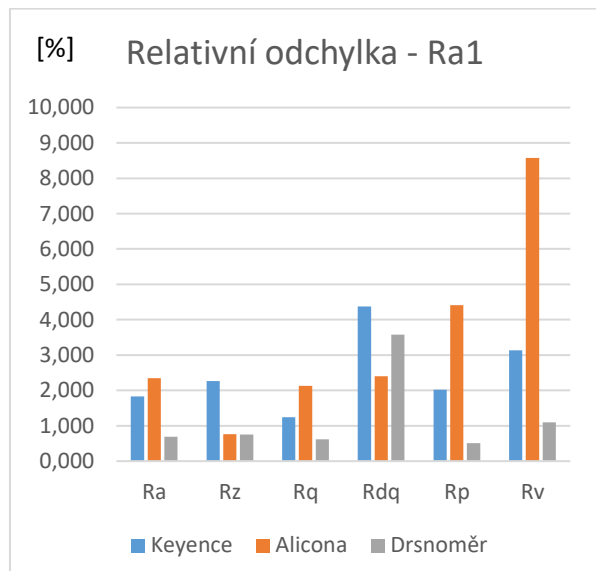
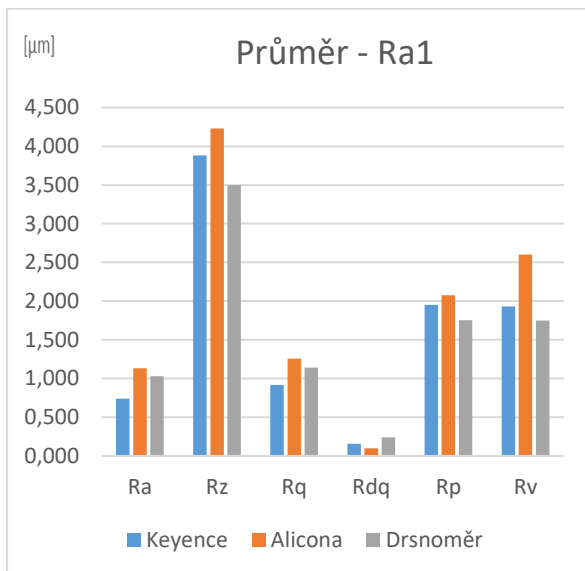
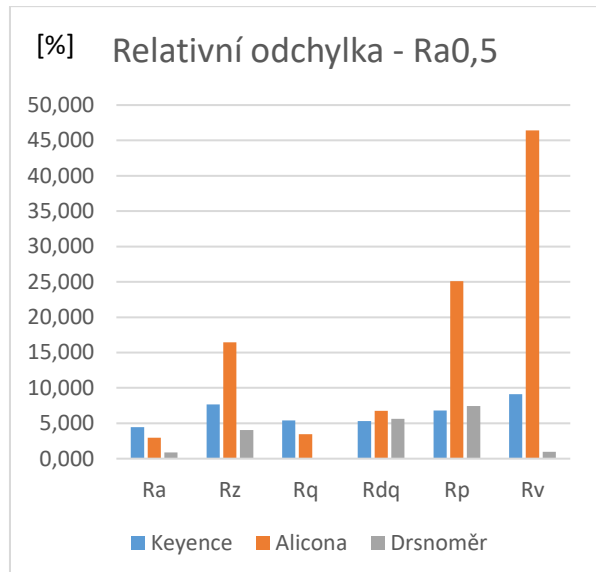
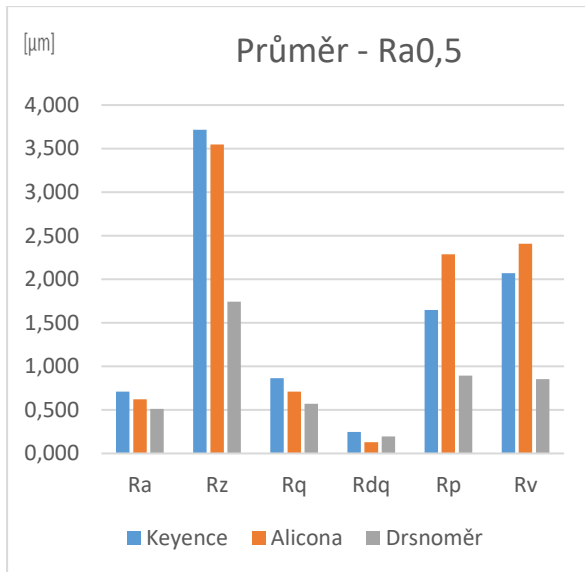


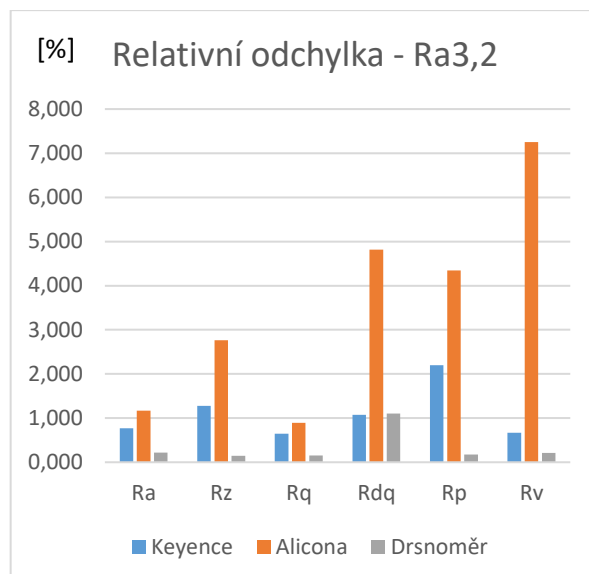
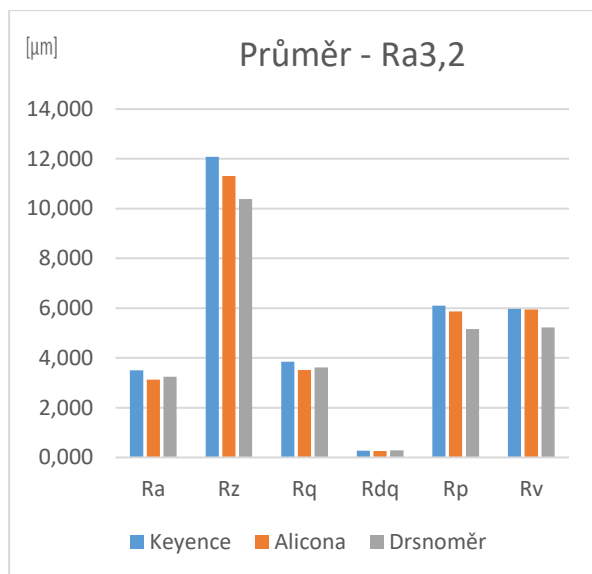


PŘÍLOHA č. 3

**Grafy pro porovnávání podle průměrů parametrů a odchylek
Pro experiment č. 3**

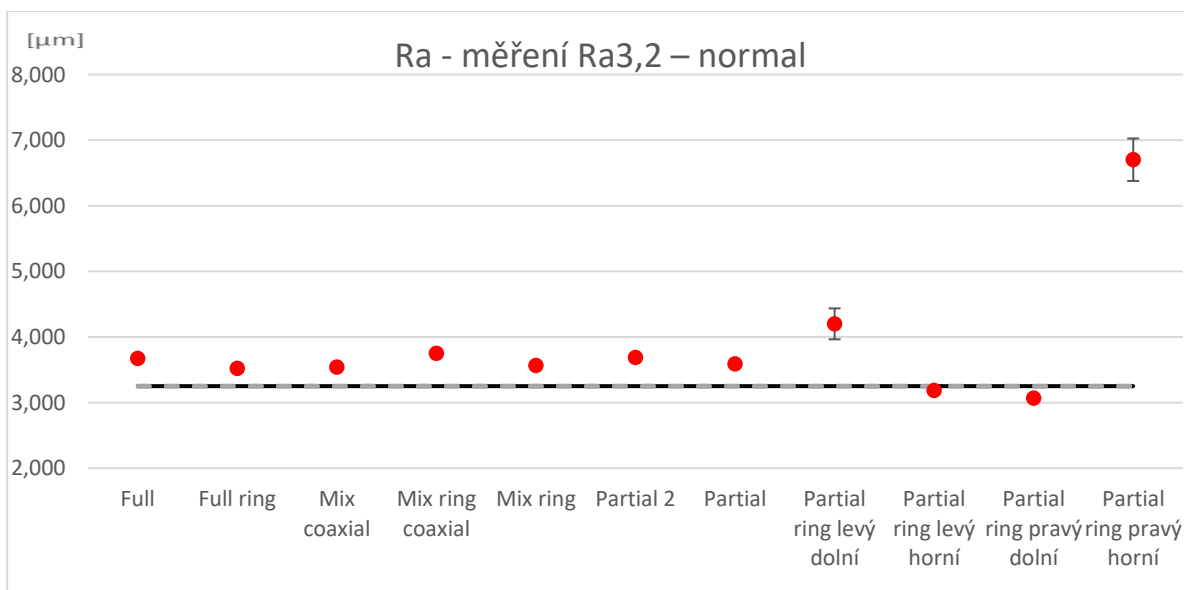
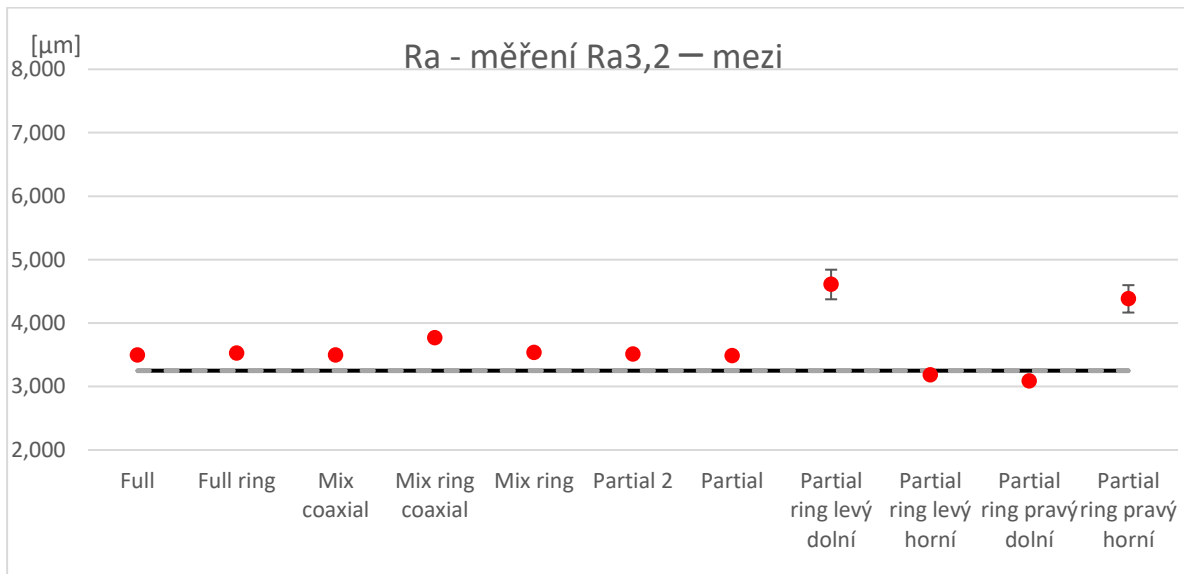
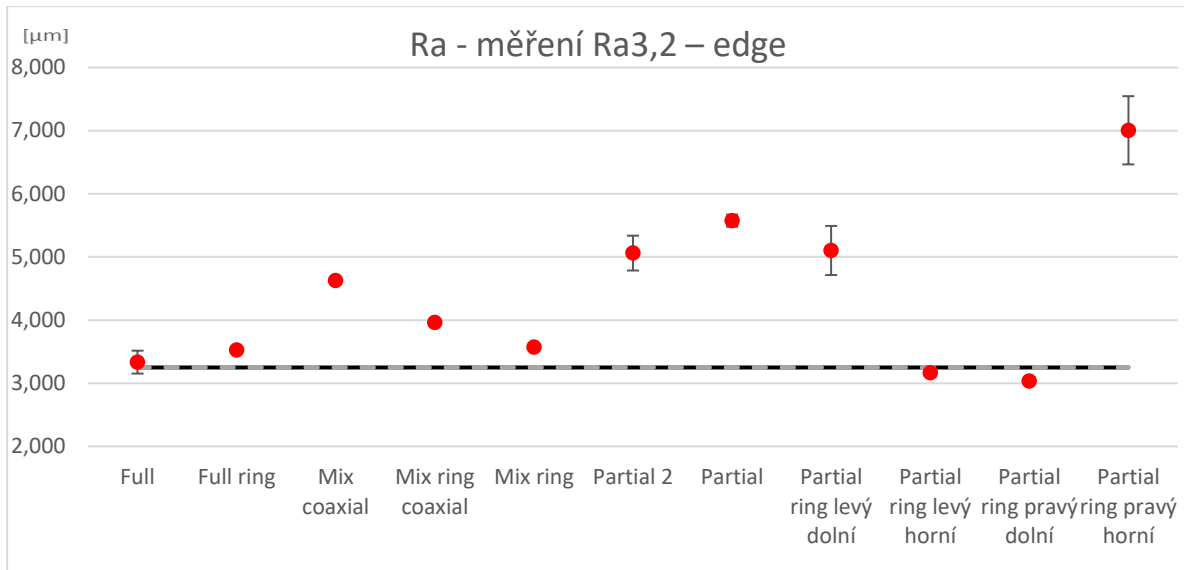


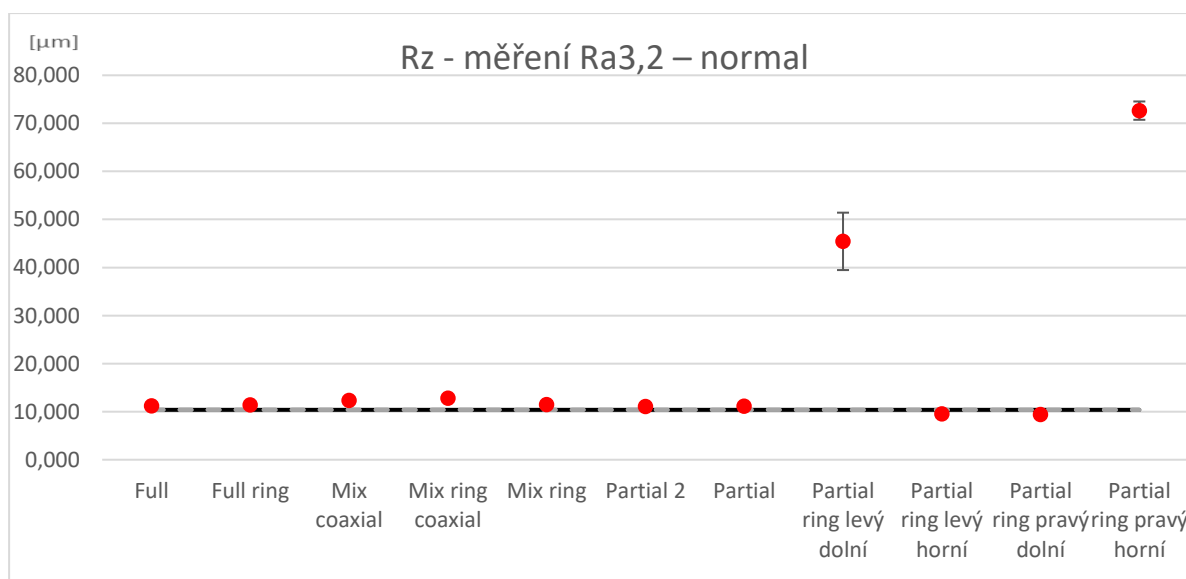
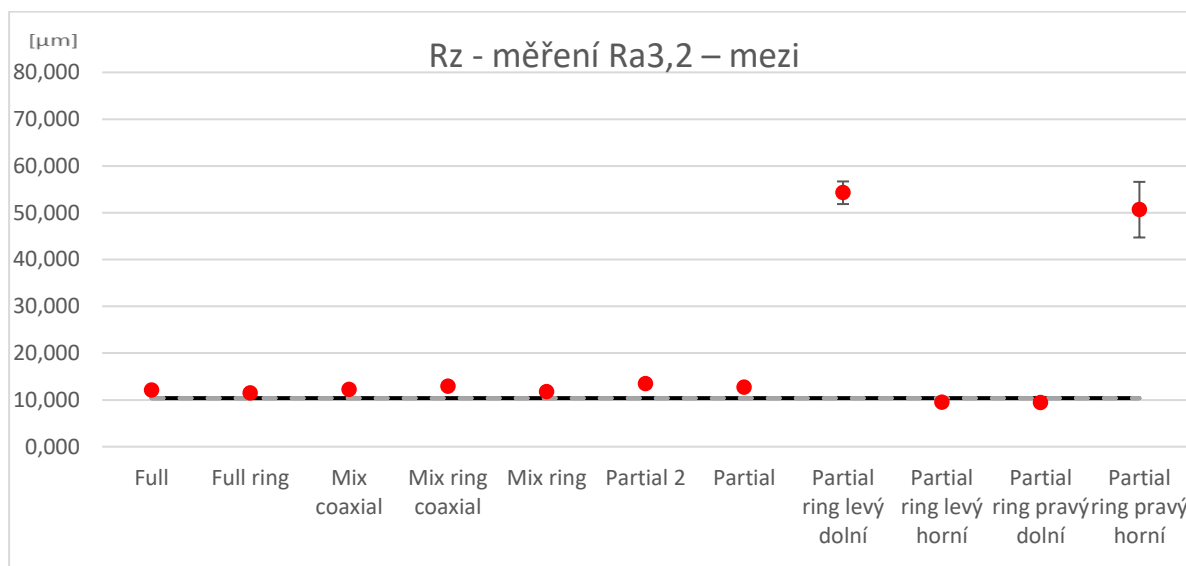
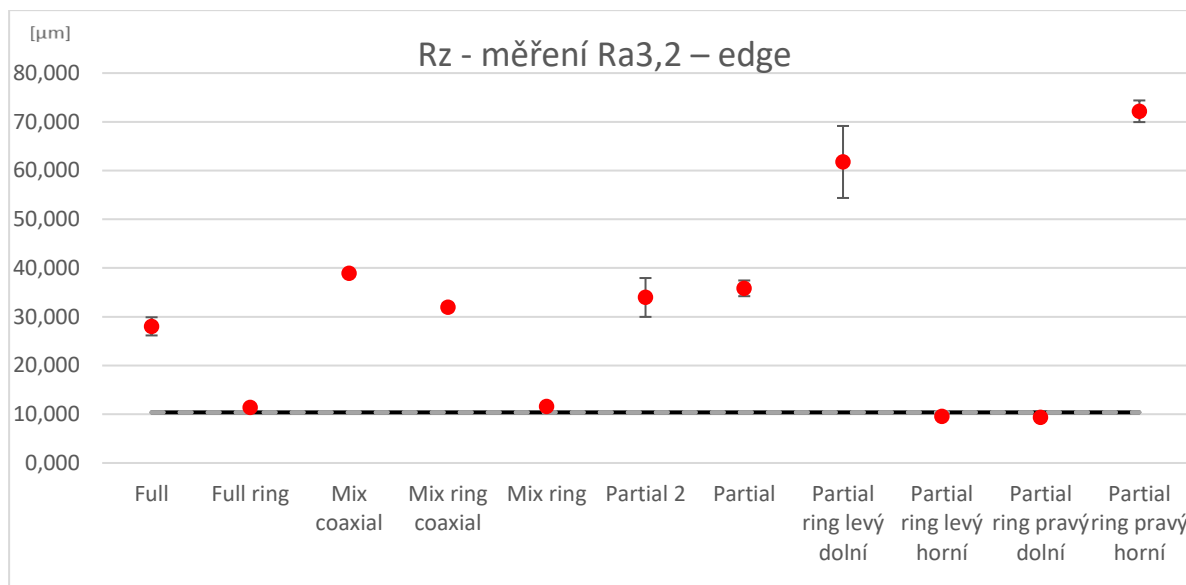


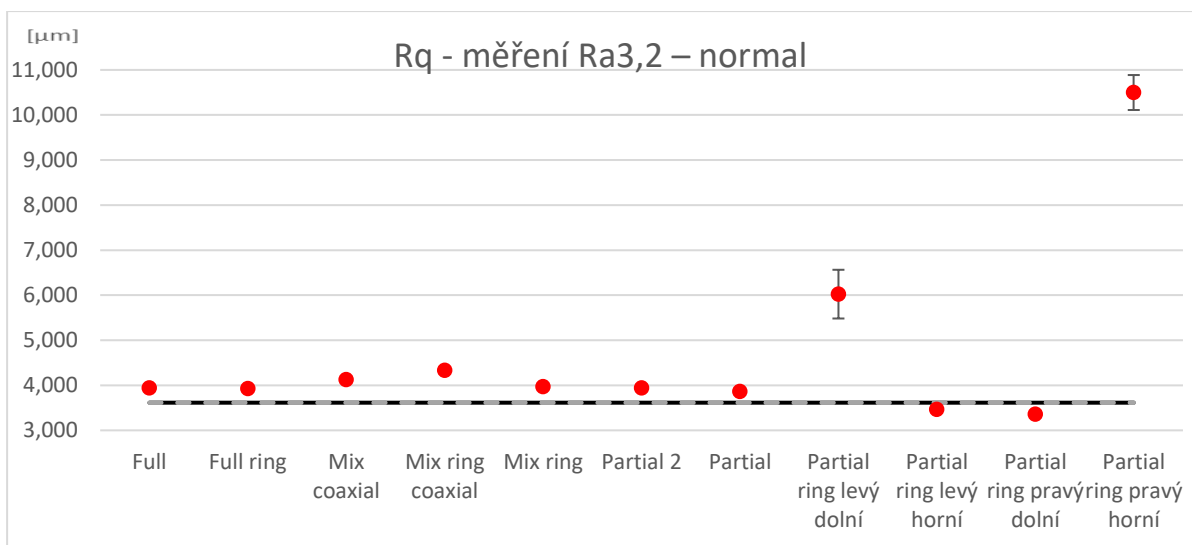
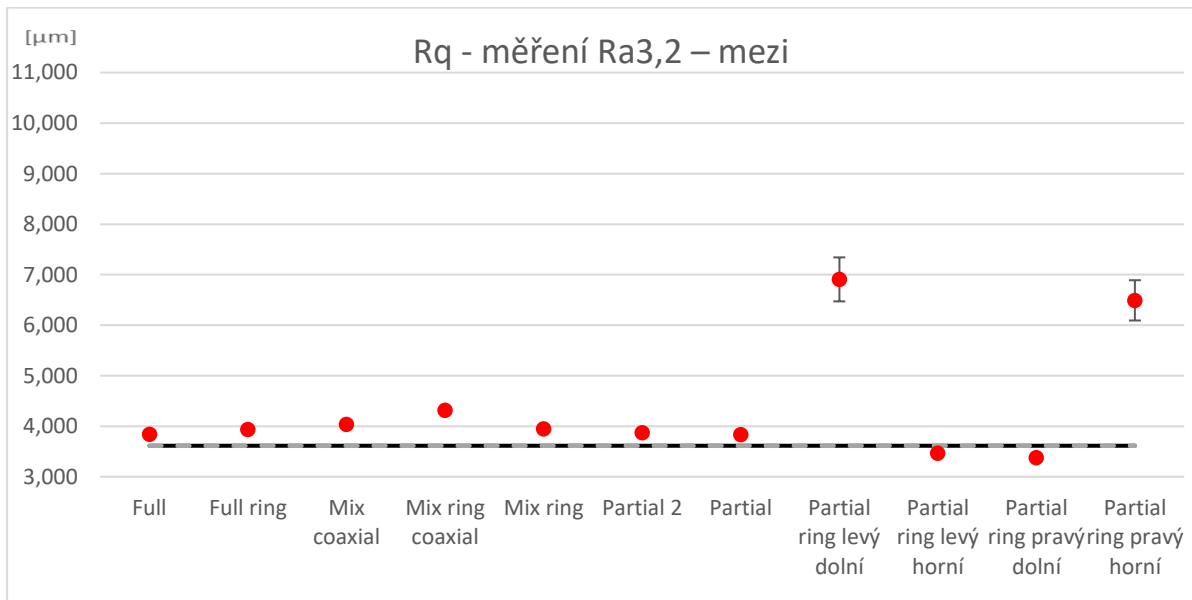
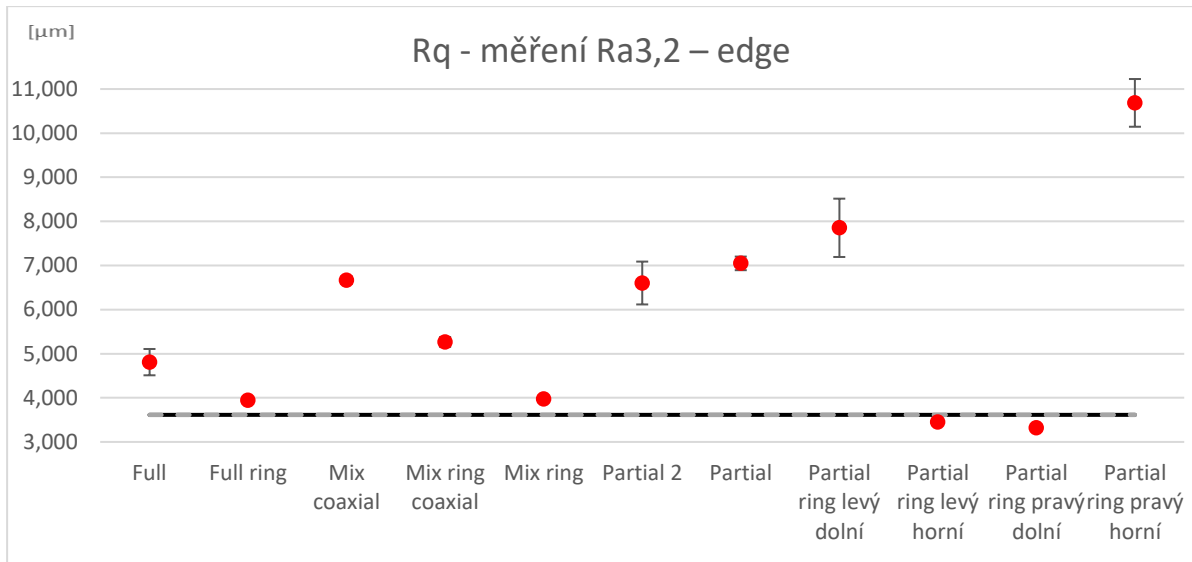


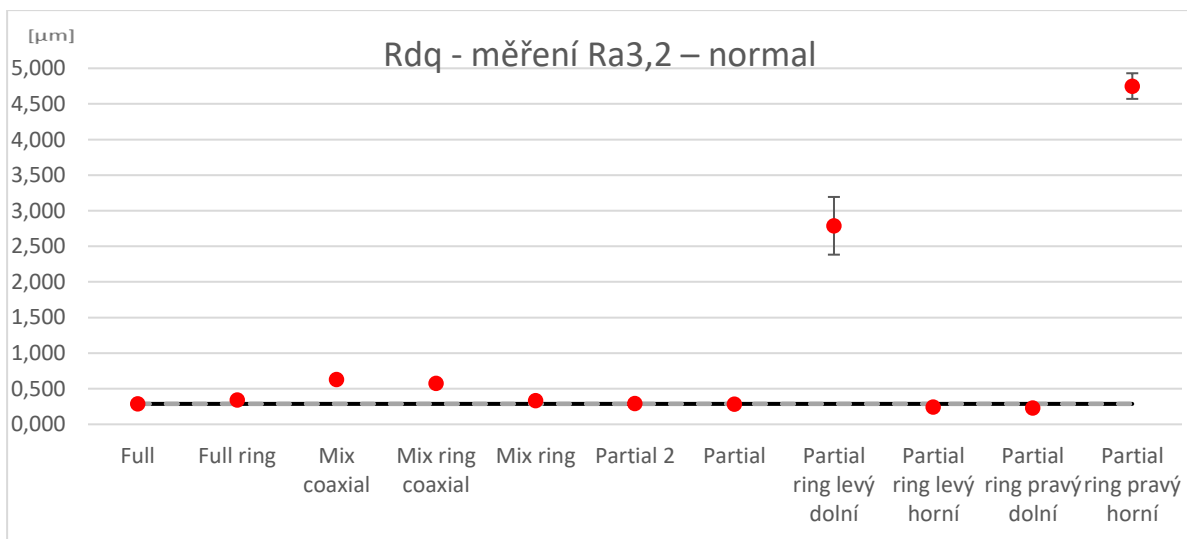
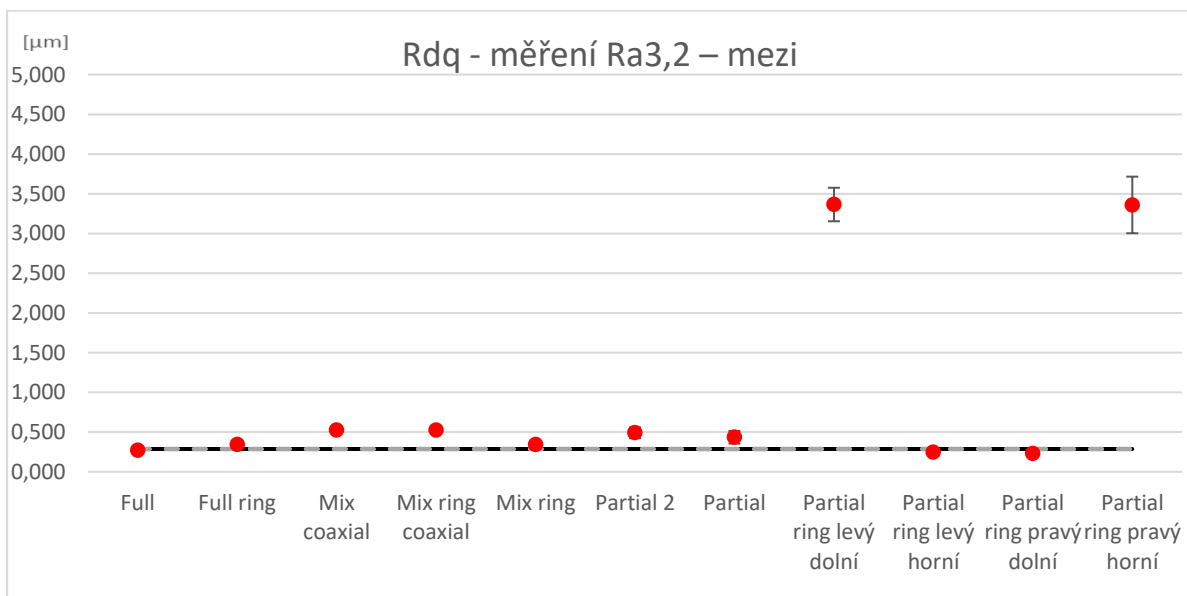
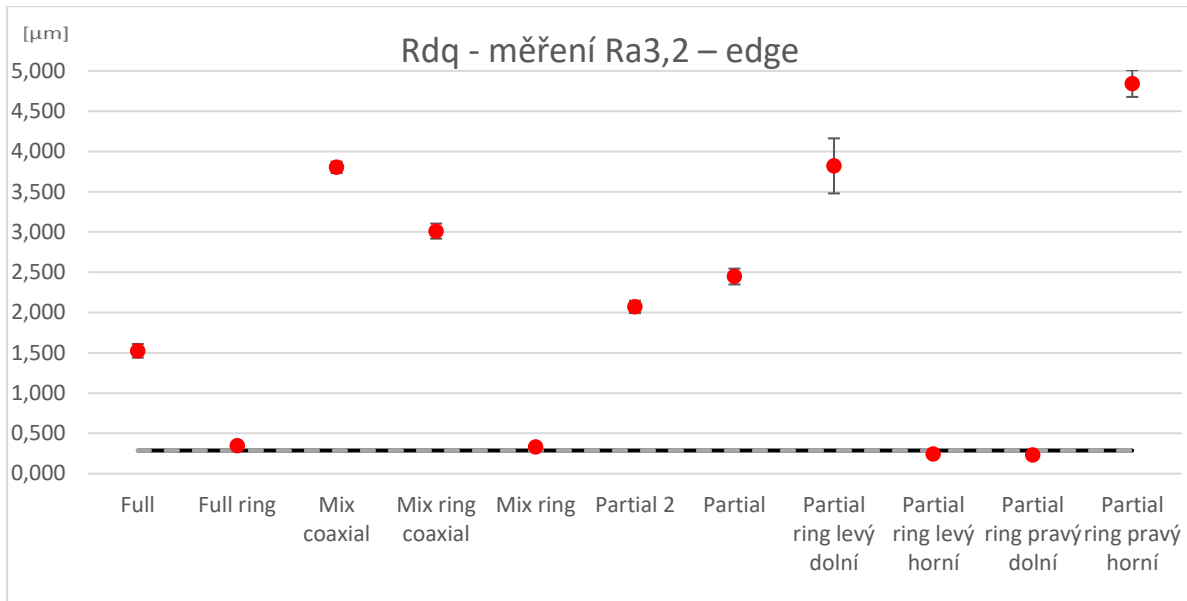
PŘÍLOHA č. 4

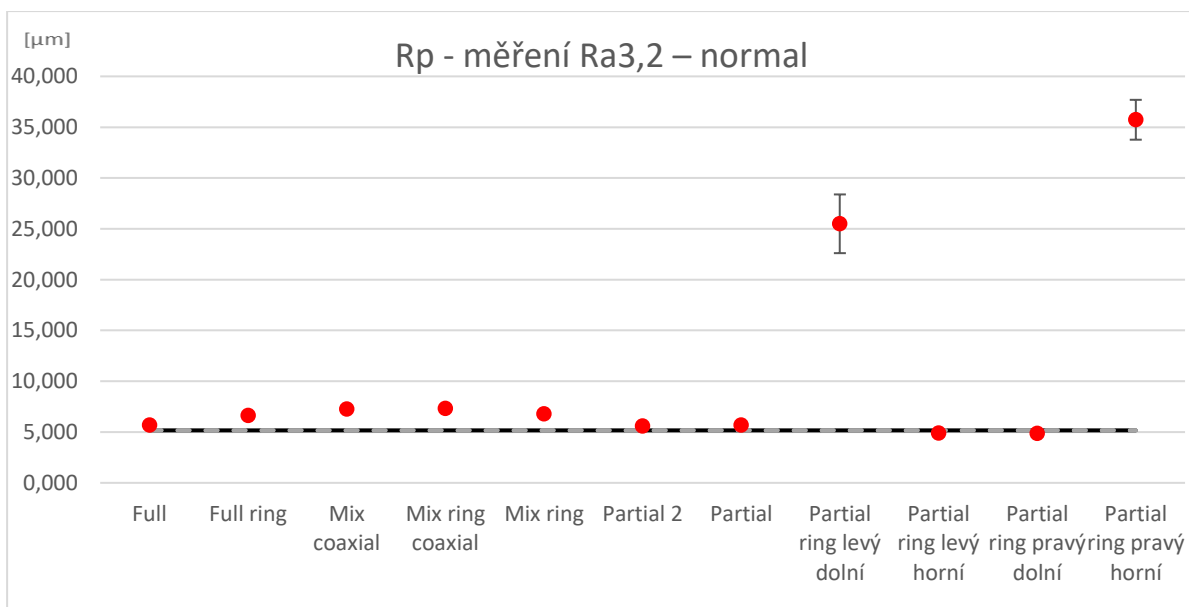
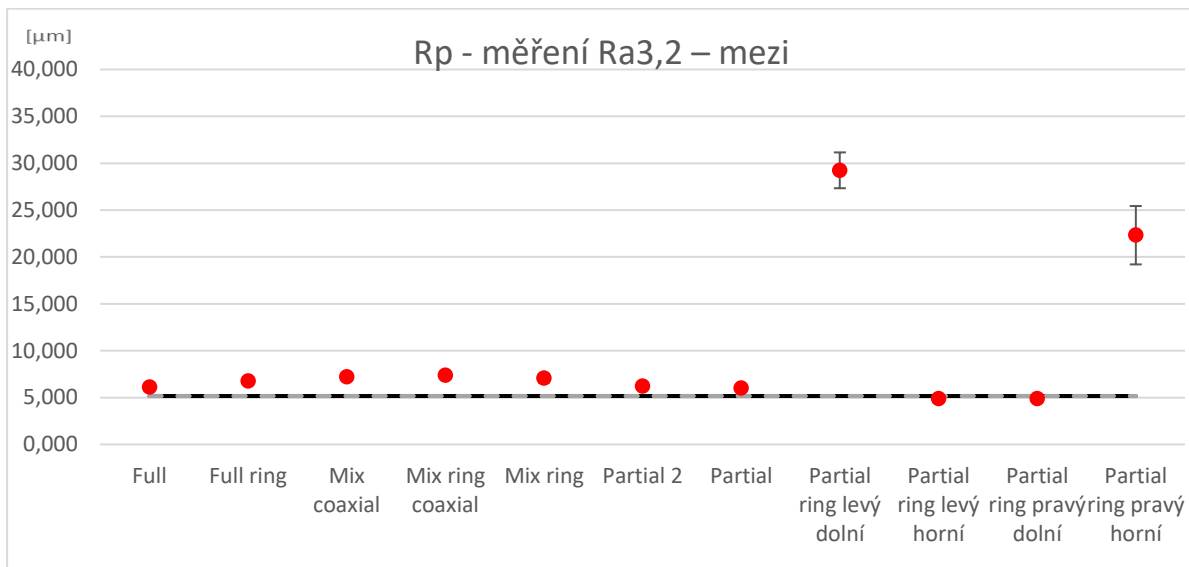
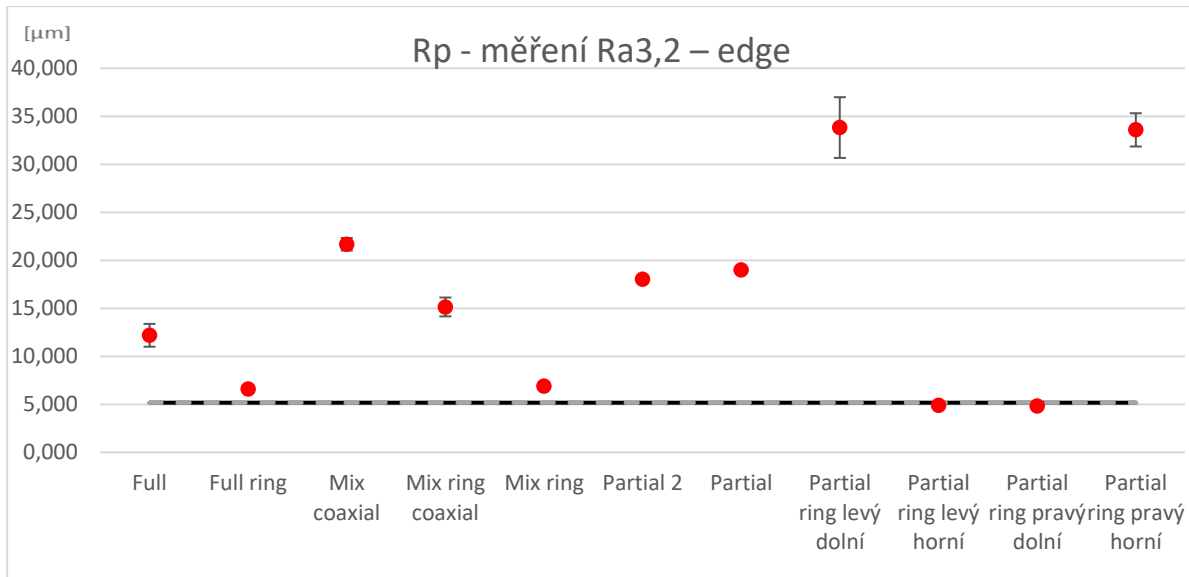
**Grafy pro porovnávání podle typů osvětlení
Pro experimenty č. 4 a 5**

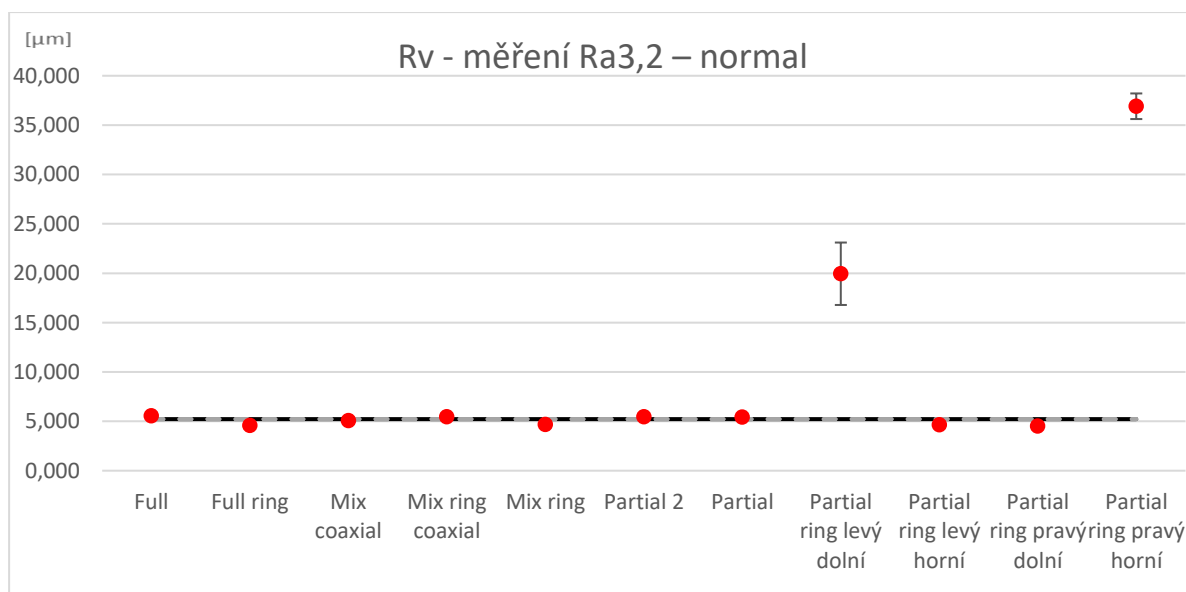
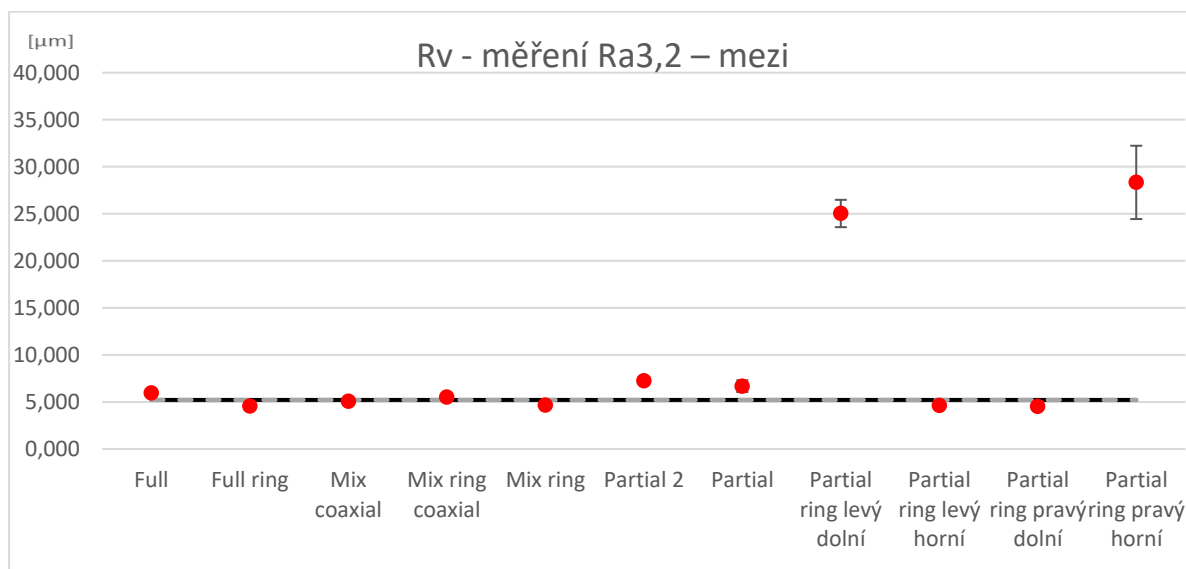
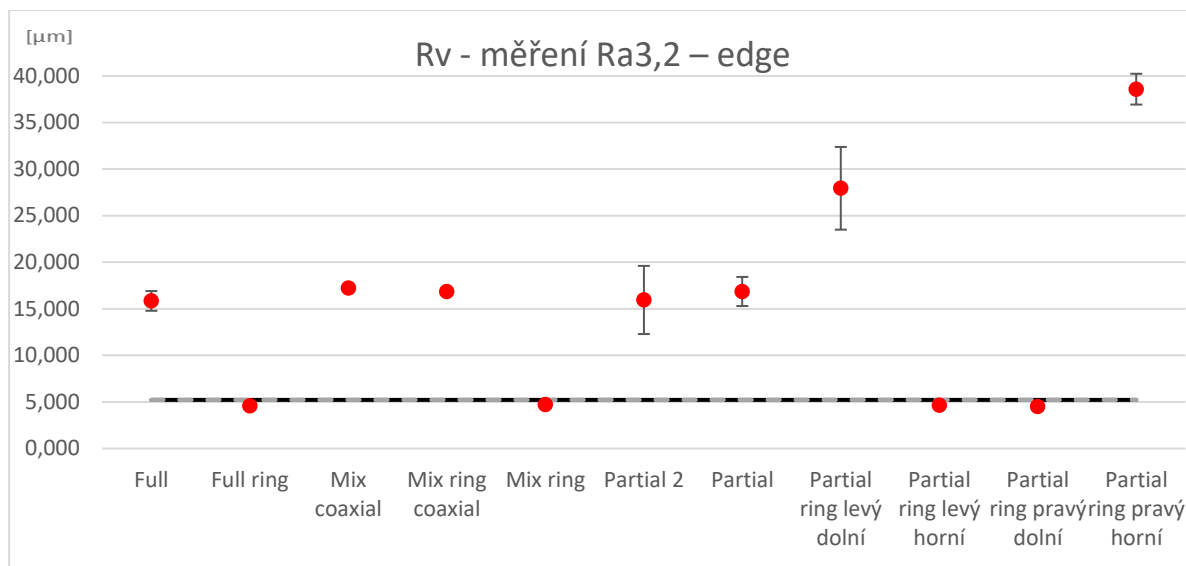












PŘÍLOHA č. 5

Grafy pro porovnávání podle relativní odchylky

Pro experimenty č. 4 a 5

