

Hodnocení kvality povrchu získaného pomocí technologie High Speed Cutting

Bc. Lukáš Křenek

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Křenek**
Osobní číslo: **T16642**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Hodnocení kvality povrchu získaného pomocí technologie High Speed Cutting**

Zásady pro vypracování:

1. Statistické nalezení a stanovení diferencí mezi vyhodnocováním povrchů ve shodě s ISO 4287, ISO 4288 a dále ISO 25 178
2. Provedení průzkumové analýzy obrobených povrchů s využitím bezkontaktního profiloměru.
3. Statistické vyhodnocení povrchových komparací naměřených dat dle odpovídajících softwarů.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **ČSN EN ISO 25178-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2012.**
2. **BUMBÁLEK,L.- BUMBÁLEK,B.: Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.**
3. **MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-100-4**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milena Kubišová, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 1. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

²¹ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělčně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

²¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce pojednává o vlivu HSC obrábění na výslednou kvalitu drsnosti povrchu. Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá jakostí povrchu a definuje zde tři její důležité normy. Dále jsou zde vysvětleny základy frézování. Praktická část se zabývá samotným měřením drsnosti povrchu daného výrobku s následným statistickým vyhodnocením.

Klíčová slova: HSC, snímání jakosti povrchu, statistické vyhodnocení, drsnost povrchu

ABSTRACT

This submitted master thesis deals with the influence of HSC machining on the final surface roughness quality. The master thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part deals with surface quality and defines three important standards. Furthermore, the basics of milling are explained. The practical part deals with the measurement of surface roughness of the given product with subsequent statistical evaluation.

Keywords: HSC, Measuring of the surface quality, Statistical evaluation, roughness of the surface

Tímto bych chtěl poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Mileně Kubišové Ph.D. za její podporu, cenné připomínky a čas, který mi věnovala při řešení dané problematiky, kterou se zabývá tato diplomová práce. Dále také panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za pomoc a cenné rady při statistickém vyhodnocování naměřených dat.

Děkuji také firmě PWO a.s. za umožnění vypracování tohoto projektu a svým kolegům za výpomoc při realizaci výroby testovacích dílů.

V poslední řadě můj největší dík patří mé rodině za jejich lásku, trpělivost a podporu, kterou mi poskytovala po celou dobu mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

“NON SCHOALE SED VITAE DISCIMUS.”

(Neučíme se pro školu, ale pro život.)

Seneca (4 př. n. l. - 65 n. l.)

“ERRARE HUMANUM EST, IN ERRORE PERSEVERARE STULTUM.”

(Chybovat je lidské, trvat na omylu hloupé.)

Seneca (4 př. n. l. - 65 n. l.)

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 JAKOST POVRCHU	13
1.1 STRUKTURA POVRCHU	13
1.2 NORMY POPISUJÍCÍ JAKOST POVRCHU	13
1.2.1 Základní pojmy	13
1.2.2 Dráha snímání povrchu	15
1.2.3 Parametry profilu povrchu	15
1.2.4 Výškové parametry – výstupky a prohlubně.....	15
1.2.5 Výškové parametry – průměrné hodnoty pořadnic	16
1.2.6 Délkové parametry – šířkové	17
1.2.7 Tvarové parametry	18
1.3 VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ JAKOSTI POVRCHU	18
1.3.1 Neperiodického profilu drsnosti – postup vyhodnocení	18
1.3.2 Periodický profil drsnosti – postup vyhodnocení.....	19
1.3.3 Pravidlo 16-ti %	20
1.3.4 Pravidlo maxima	20
1.4 3D PARAMETRY POVRCHU PLOCHY	20
1.5 POROVNÁNÍ 2D A 3D METODY SNÍMÁNÍ.....	21
2 SNÍMÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU	22
2.1 MĚŘIDLA DOTYKOVÁ	22
2.2 MĚŘIDLA BEZDOTYKOVÁ	23
2.3 POROVNÁNÍ DOTYKOVÝCH A BEZDOTYKOVÝCH MĚŘIDEL.....	24
3 TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ	25
3.1 FRÉZOVÁNÍ	25
3.1.1 Metoda HSC.....	26
3.2 CAM SYSTÉMY	27
4 STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ DAT	28
4.1 PRŮZKUMOVÁ ANALÝZA DAT (EDA)	28
4.2 ANALÝZA ROZPTYLU (ANOVA).....	29
4.3 CHYBY MĚŘENÍ	30
CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
5 VÝROBA TESTOVACÍHO DÍLU	33
5.1 VOLBA MATERIÁLU	33
5.1.1 Ocel 1.0570	33
5.1.2 Ocel 1.2312	33
5.1.3 Ocel TOOLOX 44.....	33
5.1.4 Ocel 1.2379	34

5.2	NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	34
5.3	TECHNOLOGICKÝ POSTUP	35
5.4	CAM PROGRAMOVÁNÍ	36
5.5	OBRÁBĚCÍ STROJ	36
5.6	OBRÁBĚCÍ NÁSTROJ.....	38
5.7	ŘEZNÉ PODMÍNKY	39
5.8	VÝROBEK.....	39
6	MĚŘENÍ TESTOVACÍHO DÍLU	40
6.1	MĚŘICÍ PŘÍSTROJ PRO URČENÍ DRSNOSTI POVRCHU	40
6.2	OBLASTI MĚŘENÍ	41
6.3	NASTAVENÍ PŘÍSTROJE	42
6.4	OCEL TOOLOX44.....	45
6.5	OCEL 1.0570	47
6.6	OCEL 1.2312	49
6.7	OCEL 1.2379	51
6.8	EDA.....	53
6.8.1	Oblast 1	55
6.8.2	Oblast 2	56
6.8.3	Oblast 3	57
6.9	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	58
6.9.1	Ocel Toolox44.....	58
6.9.2	Ocel 1.0570	62
6.9.3	Ocel 1.2312	66
6.9.4	Ocel 1.2379	70
	ZÁVĚR	77
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK.....	85

ÚVOD

Už ve starověku se začaly objevovat první náznaky zavádění kontroly kvality jakosti. Vznikaly kontrolní orgány, které chránily zájmy obchodníků. Jakost povrchu byla na počátku kontrolována pouze vizuálně a to na základě porovnání s kalibrovaným vzorkem. Postupem času se začali používat optické měřicí přístroje. Díky několikanásobným zvětšením oblastí povrchu bylo porovnání s etanoly o něco přesnější. Jak šel vývoj dopředu, tak se od této nepřesné oční metody upustilo a na řadu přišly modernější přístroje. Byly vymyšleny digitální měřicí zařízení, které vykazovaly vysokou přesnost a rychlost měření. Dnes již nejmodernější přístroje snímají měřený povrch bezdotykově za pomoci laseru. Díky tomu je umožněno měřit tvarové plochy, které jsou mnohdy i velice těžko matematicky definovatelné. Snímaný povrch bývá přenášen z přístroje do počítače a pomocí softwaru je dále umožněno nastavovat nejrůznější filtry a další potřebná nastavení parametrů.

V dnešní době se každá strojírenská firma, která chce být konkurenceschopná, snaží o to, aby její náklady na výrobu byly co nejnižší a zároveň, aby kvalita jejich výroby zůstala co nejvyšší a mohla tak uspokojit zákazníkovi potřeby. Obráběcí proces jako frézování patří dnes k jednomu z nejpoužívanějších konvenčních obrábění a téměř každá strojírenská firma disponuje CNC frézovacími stroji. Proto je konkurence na trhu vysoká a je klíčové dokázat s ní udržet krok. Pravidelné inovování a zlepšování výrobních procesů je tudíž nedílnou součástí každé firmy.

Tato diplomová práce má za snahu vyhodnotit kvalitu povrchu, která byla vyrobena za pomoci moderní technologie vysokorychlostního obrábění – HSC. Snaží se porovnat různé typy materiálů a několik nastavení řezných podmínek a vyhodnotit, která z těchto nastavení byla nejvhodnější pro co nejlepší kvalitu povrchu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 JAKOST POVRCHU

Jakost povrchu je souhrnem všech vlastností, které splňují předem stanovené požadavky. Definuje se strukturou obráběného povrchu anebo jeho drsností. Je to důležitý zdroj pro úsporu materiálů a energií, ovlivňuje makroekonomické ukazatele. [13]

1.1 Struktura povrchu

Strukturou povrchu dříve také nazývanou drsností povrchu, se rozumí část geometrických úchylek skutečného povrchu s poměrně malou vzdáleností sousedních nerovností. [1]



Obr. 1 Struktura povrchu v detailu. [1]

1.2 Normy popisující jakost povrchu

Tato diplomová práce vychází z poznatků a pravidel norem ČSN EN ISO 4287, která popisuje termíny, definice a parametry struktury povrchu. Dále normy ČSN EN ISO 4288, která se zabývá postupy pro určení struktury povrchu profilovou metodou a také norma ČSN EN ISO 25178-2, která definuje pojmy a parametry pro plošnou povrchovou texturu.

1.2.1 Základní pojmy

Mezi základní parametry patří tvar, vlnitost a drsnost. Na základě jejich vlnové délky jsou stanoveny hranice mezi parametry. [1]

Tvar zahrnuje nerovnosti, které bývají o vyšších vlnových délkách než vlnitost, jsou tvořeny úmyslně či neúmyslně. Pokud budeme hovořit o bezúmyslném vytvoření nerovnosti, tato nerovnost může být zapříčiněna např. nízkou tuhostí stroje a nástroje při obrábění. [1]



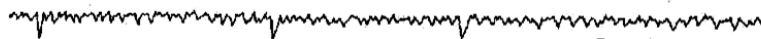
Obr. 2 Obecný tvar povrchu. [4]

Při periodicky opakujících se nerovnostech hovoříme o **vlnitosti**, která vzniká jako důsledek nedostatečné tuhosti stroje nebo také špatně nastavených řezných podmínek obráběcího nástroje. To vše poté může mít za následek vznik vibrací. [1]



Obr. 3 Vlnitost povrchu. [4]

Nejkratší vlnové délky způsobují nejjemnější nerovnosti a tím vzniká **drsnost povrchu**. Nástroj, kterým obrábíme daný povrch, zanechává stopu. Tato závislost mezi drsností povrchu a nástrojem přímo závisí na řezných podmínkách. [1]



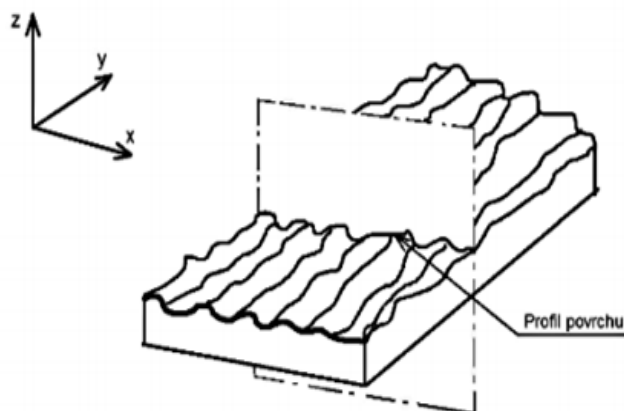
Obr. 4 Drsnost povrchu. [4]

Filtr profilu – rozděluje profily na dvě různé složky a to dlouhovlnné a krátkovlnné. V normě ISO 11 562 jsou definovány tři typy filtrů, které mají stejné přenosové charakteristiky ale rozdílné hodnoty mezní vlnové délky:

- Filtr profilu λ_s – definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln.
- Filtr profilu λ_c – definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí.
- Filtr profilu λ_f – definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln. [1]

Souřadnicový systém – v tomto systému jsou definované parametry struktury povrchu. Jedním z nejčastěji používaných je pravoúhlý souřadnicový systém. Na osách X a Y leží skutečný povrch. Osa Z směřuje z povrchu ven. [1]

Profil povrchu – profil, který vznikne jako průsečnice povrchu a roviny. Rovina je kolmá a rovnoběžná k profilu povrchu. [1]



Obr. 5 Profil povrchu. [1]

1.2.2 Dráha snímání povrchu

Je to pohyb dráhy, který koná měřicí přístroj při měření. Dělíme je na L_r , L_n a L_t .

- L_r - základní délka, které určuje drsnost povrchu.
- L_n - vyhodnocovací délka, která hodnotí celý profil.
- L_t - celková délka, kde součet je spolu s náběhem a přeběhem vyhodnocován dohromady. [1,2]

1.2.3 Parametry profilu povrchu

Parametry profilu povrchu jsou nejčastější používané parametry, které používáme k vyhodnocování struktury snímaného povrchu. Podstatu mají především ve dvourozměrném měření povrchu, kde měření je získáno kontaktním drsnoměrem. [1]

1.2.4 Výškové parametry – výstupky a prohlubně

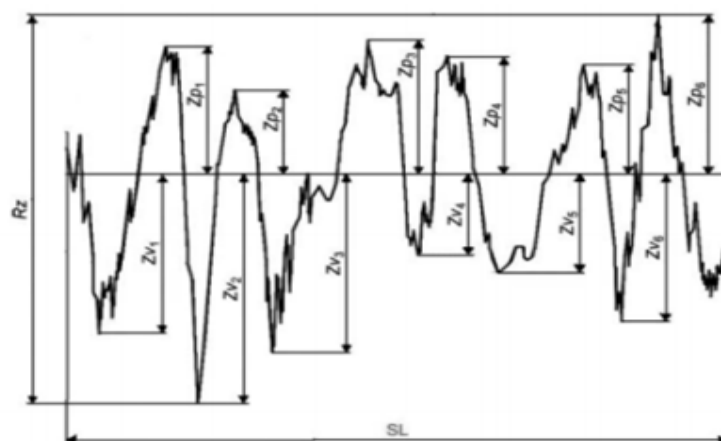
Tyto výškové parametry byly vypsány z normy ČSN EN ISO 4287. Udávají hodnoty výstupků a prohlubní.

Parametr R_p je to největší výška výstupku profilu.

Parametr R_v je největší hloubka prohlubně profilu.

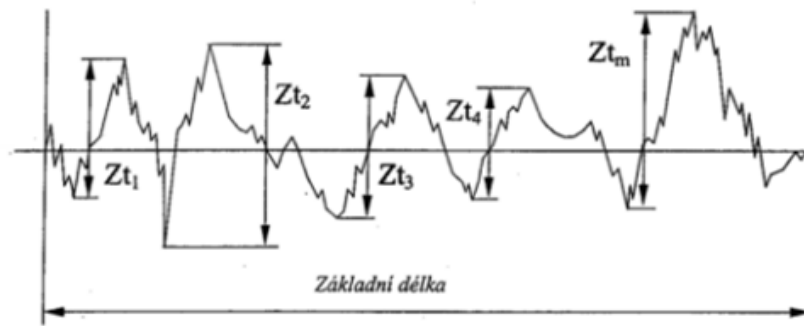
Parametr Z_p je to nejvyšší výstupek profilu, který je v rozsahu základní délky.

Parametr Z_v je to nejnižší prohlubeň, která je v rozsahu základní délky profilu.[1]



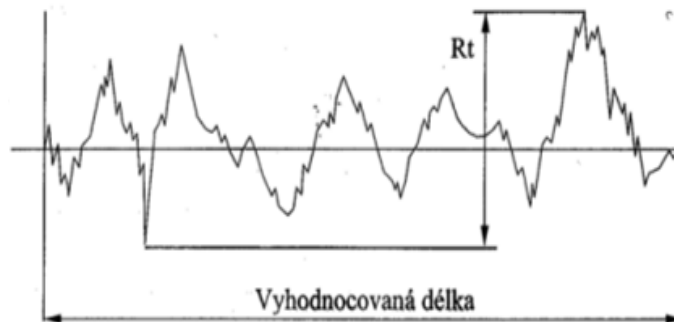
Obr. 6 R_p – největší výška výstupku profilu. [1]

Parametr R_z je to největší výška profilu R_z , která má součet výšky Z_p (nejvyšší výstupek) a hloubky Z_v (nejnižší prohlubeň) v rozsahu základní délky.



Obr. 7 R_c – průměrná výška prvků profilu. [1]

Parametr R_t je to celková výška profilu a je počítaná jako součet výšky Z_p (nejvyšší výstupek profilu) a hloubky Z_v (nejnižší prohlubeň profilu) v rozsahu délky, která se vyhodnocuje. [1]



Obr. 8 R_t – celková výška profilu. [1]

1.2.5 Výškové parametry – průměrné hodnoty pořadnic

Parametr R_a je to drsnost povrchu ve směru výšky. Střední aritmetická úchylka profilu vyplívá z aritmetického průměru absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$, které jsou v rozsahu L_r (základní délky). Tento parametr má nízkou vypovídající schopnost, protože nedokáže citlivě reagovat na extrémní výšky hrotů a hloubky rýh v profilu. [1]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

Obr. 9 Ra – Aritmetická úchylka [1]

Obr. 1

Parametr Rq je to průměrná kvadratická úchylka profilu, která je posuzovaná. Jde o kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$, které jsou v rozsahu Lr (základní délka). [1]

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (3)$$

Parametr Rc je průměrná výška prvku. Jedná se o průměrnou hodnotu výšek Zt a prvků profilu v rozsahu Lr (základní délka). [1]

$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (4)$$

Parametr Rsk se definuje jako šikmost posuzovaného povrchu. Počítá se z podílů průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu Lr (základní délka). [1]

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left| \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right| \quad (5)$$

Parametr Rku se definuje jako špičatost posuzovaného povrchu. Počítá se z podílů průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu Lr (základní délka). [1]

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left| \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right| \quad (6)$$

1.2.6 Délkové parametry – šířkové

Parametr RSm se definuje jako průměrná vzdálenost prvků profilu. Počítá se z průměrných hodnot šířek Xs prvků profilu v rozsahu Lr (základní délka). [1]

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (7)$$

Obr. 10 RSm – Průměrná šířka [1]

1.2.7 Tvarové parametry

Parametr Rdq se definuje jako průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu. Počítá se z kvadratického průměru sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky Lr . [1]

1.3 Vyhodnocení parametrů jakosti povrchu

Pokud nemáme vyspecifikovány směr měření, měřený díl musí být polohován ve směru řezu, který obsahuje největší hodnoty výšek parametru Ra či Rz . Směr musí být kolmý k poloze povrchu, jsou-li povrchy izotropní, může být směr řezu libovolný. [2]

Měření bychom měli provádět na oblasti povrchu, u které můžeme s vysokou pravděpodobností očekávat kritické hodnoty. Tuto oblast povrchu vybíráme na základě vizuálního pozorování. Pro nezávislost výsledků, by měření mělo probíhat na oblasti povrchu, který je rovnoměrně rozdělený. [2]

Pohledem se rozhodneme, zdali profil drsnosti je periodický anebo neperiodický. S ohledem na toto rozhodnutí poté vyhodnotíme parametr drsnosti. [2]

1.3.1 Neperiodického profilu drsnosti – postup vyhodnocení

U povrchu s neperiodickým profilem drsnosti je nezbytné použít tento postup:

- 1) Nejdříve musíme odhadnout parametr profilu drsnosti (tj. Ra , Rz , $RzImax$, RSm), který je neznámý. Využijeme k tomu libovolný způsob. Může to být vizuální prohlídkou nebo za pomoci srovnání, kdy srovnáváme prostřednictvím srovnávacích vzorků. Můžeme taky zvolit grafickou analýzu celkového profilu.
- 2) Prostřednictvím odhadu základní délky z tabulek v normě pro Ra , Rz , RSm , $RzImax$, které byly odhadnuty na základě prvního kroku.

- 3) Reprezentativním naměřením R_a , R_z , $R_z I_{max}$, R_{Sm} , které získáme měřicím přístrojem, musí mít nastaveny hodnoty základní délky z předchozího kroku.
- 4) Naměřené hodnoty R_a , R_z , $R_z I_{max}$ nebo R_{Sm} , porovnáme s rozsahem tabulkových hodnot z normy. Pokud máme hodnoty mimo rozsah hodnot pro odhadnutí základní délky, tak přístroj nastavíme na větší nebo menší základní délku, než jsme určily naměřenou hodnotou. Následně změříme reprezentativní hodnotu a opět ji porovnáme s tabulkovými hodnotami základní délky.
- 5) Po zjištění reprezentativní hodnoty R_a , R_z , $R_z I_{max}$ nebo R_{Sm} pro jednu základní délku, která byla nastavená kratší, není tato nastavená hodnota kratší základní délka hodnocena v předchozím bodě. Pohledem zkontrolujeme a ujistíme se, zda výsledná kombinace R_a , R_z , $R_z I_{max}$ nebo R_{Sm} a základní délka je uvedena v tabulkách hodnot.
- 6) Poslední nastavení dle předchozího bodu již tabulkovým hodnotám odpovídá a tedy základní délky a hodnoty R_a , R_z , $R_z I_{max}$ nebo R_{Sm} jsou již správné.
- 7) Reprezentativní měření získáme za pomoci žádaných parametrů využitím hodnoty mezní vlnové délky, která byla odhadnuta v předchozích krocích. [2]

1.3.2 Periodický profil drsnosti – postup vyhodnocení

U povrchu s periodickým profilem drsnosti je nezbytné použít tento postup:

- 1) Pokud neznáme drsnost povrchu měřeného dílu, graficky odhadneme parametr R_{Sm} .
- 2) Při odhadování R_{Sm} parametru určujeme pomocí tabulek v normě, doporučené hodnoty mezní volné délky cut-off.
- 3) Ve sporném případě, pokud je to nezbytně nutné, tak se hodnota R_{Sm} změří za pomoci využití mezní vlnové délky cut-off, která se určuje dle předchozího bodu.
- 4) Za předpokladu, že je hodnota R_{sm} s tabulkovou hodnotou menší nebo větší mezní vlnové délce cut-off než v bodě 2. Využijeme tuto menší nebo větší hodnotu mezní vlnové délky cut-off.
- 5) Získá se reprezentativní měření žádaných parametrů při použití hodnoty mezní vlnové délky (základní délky - L_r), která byla odhadnuta v přechozím bodu. [2]

1.3.3 Pravidlo 16-ti %

U měřené plochy se hodnocení provádí za pomoci hodnot, které byly získány z přístroje pro měření struktury parametrů povrchu. Dále se také naměřené hodnoty porovnávají s hodnotami, které jsou předepsány přímo ve výrobní dokumentaci daného dílu. Vycházíme z normy ČSN EN ISO 4288. Sledovaný parametr nabývá hodnoty s určitým rozptylem. S tímto již uvedená norma počítá pomocí pravidla 16-ti %. Pomocí normy také provádíme kontrolu homogenity povrchu. Pokud měřený povrch je homogenní, tak naměřené parametry vyhodnotíme dle požadavků ve výkresové dokumentaci na každé oblasti plochy. [1]

1.3.4 Pravidlo maxima

Pokud je měřený povrch dílu složený z několika ploch s různou strukturou. Pak hodnoty parametrů jsou hodnoceny na každé ploše, která je oddělená dle výrobní dokumentace, popř. požadavků ve výkresové dokumentaci. Měří se především oblast plochy, u které lze předpokládat kritické hodnoty. Takovou oblast můžeme posuzovat na základě vizuálního porovnání. Měřená plocha však musí být rozdělena rovnoměrně, aby získané výsledky byly nezávislé. Při použití speciálních postupů měření musí být tyto postupy popsány a také uvedeny v protokolu měření. [2]

1.4 3D parametry povrchu plochy

V dnešní době za stále zvyšujících se požadavků na kvalitu povrchu, jsou vyžadovány stále nové pohledy na měření, to se týká i následného vyhodnocení naměřených hodnot. Dnešní uspěchaná doba lpí na co nejrychlejší a zároveň nejpresnější měření. Okamžité měření kvality se snahou o předpokládané chování materiálů, pak dokáže zavčas odhalit možné nedostatky. [13]

Stále více se směřuje k prostorovému mapování a vyhodnocování povrchu. U tohoto způsobu zobrazení a hodnocení se dávají nejen podrobnější informace o samotném průběhu nerovnosti povrchu, ale také např. doba životnosti anebo údaje jako funkční vlastnosti povrchu. U 3D hodnocení textury povrchu využíváme poznatky z 2D analýzy profilu, které rozšiřujeme o nové poznatky pro charakterizaci profilu plochy. [13]

Sa je aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu. Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy A . [3]

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(y, x)| dx, dy \quad (8)$$

Sq je základ průměrné výšky, která je čtvercem omezené stupnice povrchu Sq . [3]

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |Z(y, x)| dx, dy} \quad (9)$$

Ssk je šikmost omezené stupnice povrchu. Jde o kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a zároveň hodnot krychle Sq uvnitř plochy A . [3]

$$Ssk = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A |Z^3(y, x)| dx, dy \right] \quad (10)$$

Sku je špičatost omezené stupnice povrchu. Jde o kvocient průměrné hodnoty koordinace a dále také hodnoty čtvrté mocniny Sq uvnitř plochy A . [3]

$$Sku = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A |Z^4(y, x)| dx, dy \right] \quad (11)$$

1.5 Porovnání 2D a 3D metody snímání

Pro získání 3D parametru drsnosti či vlnitosti je nezbytné, aby byl povrch vyfiltrován pomocí filtru (operátoru) a teprve poté byly vytyčeny hodnoty 3D parametrů. Tyto 3D parametry jsou vytyčeny pro celou měřenou plochu, ovšem 2D parametry jsou vztaženy na průměrné hodnoty základních délek. [19]

Nedostatečnost v 2D měření, které má souvislost se zavedenou praxí v hodnocení povrchu z hodnot parametru drsnosti. Nejčastější a nejpoužívanější parametry pro určení drsnosti povrchu je parametr Ra (průměrná aritmetická úchylka profilu) a Rz (největší výška profilu drsnosti.) U parametru Ra může být hodnota stejná i při velkém rozdílu profilu povrchu. A z této hodnoty bohužel nelze vždy vyčíst funkční vlastnosti velmi rozdílných povrchů a tedy nelze ani odpovědět na otázky týkající se např. zadržování maziva, rychlosti opotřebení, schopnosti odolávat předpokládanému zatížení a zároveň zjištění náchylnosti ke vzniku trhlin ve stopě po obrábění. [19]

Hodnocení povrchu pomocí 3D metody má mnoho předností, protože v hodně případech může jediná informace zodpovědět ihned mnoho otázek, které mohou souviset s vhodností funkčnosti povrchu plochy předpokládaného zatížení s možnou přítomností vad. U této prostorově vyhodnocovací charakteristiky parametrů povrchu je souhrnnost a spolehlivost vyšší než běžně využívané parametry profilu. Ovšem tyto parametry je nutno stanovit z mnohem většího množství dat než u lineárních parametrů, což je náročnější. [19]

2 SNÍMÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU

Měřicí technika se v posledních letech značně rozvinula a to především z důvodů jako jsou vysoké požadavky na přesnost, rychlost, stabilitu a opakovatelnost měření. Volba měřicího zařízení závisí především na rychlosti snímání, citlivosti a rozsahu měření. Dále to mohou být i vnější vlivy a to především ty ekonomické. [11]

Je důležité, aby při každém měření byla prokázána metrologická návaznost s národní či nadnárodní institucí, které jej vydávají. Měřený výsledek tak může vyjadřovat přímou vazbu na příslušnou základní délku. [11]

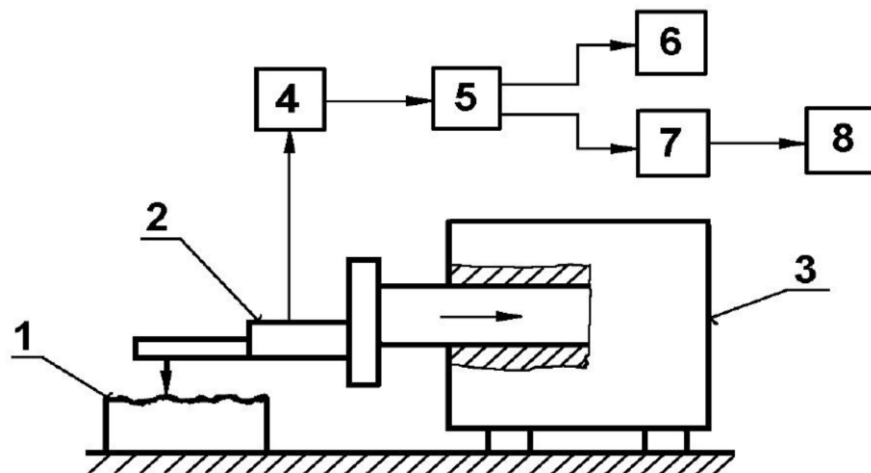
Nejběžnější způsoby měření:

- Absolutní – měří celkové rozměry součástí.
- Komparační – zjišťuje, zda se liší hodnoty úchylek od jmenovitého rozměru.
- Toleranční – zkoumá, zda je či není splněna daná tolerance. [11]

2.1 Měřidla dotyková

U dotykových měřidel se používá ostrého hrotu, který se pohybuje v předem určeném směru. Posouvá se po povrchu a tím získává informace o jeho profilu. Pohyb tohoto snímacího hrotu je velmi přesný, především v přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost pohybu je ovlivněna na základě dynamických vlastností snímacího systému. Vlastnosti tohoto snímacího systému ovlivňují získaný profil. Naměřené výsledky také ovlivňuje poloměr zaoblení u snímacího hrotu, dále jeho vrcholový úhel, měřicí síla a rychlost jeho změny a celkové geometrické uspořádání snímacího systému. Veškeré tyto věci mohou ovlivňovat správnost naměřených výsledků. [9]

Na obrázku níže máme dotykový profilometr, který je složen z mechanické a elektronické části. Mechanickou část tvoří elektromotor, stůl a dále rameno se snímacím hrotem. Elektronická část, ve které dochází k transformaci mechanického signálu na elektrický, je generována snímacím hrotem, kterým je sledována nerovnost povrchu u měřené plochy. [8,9]



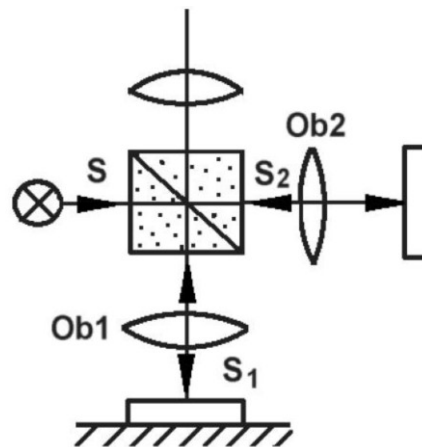
Obr. 11 Dotykový profilometr [10]

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 - měřená součást | 5 - filtr |
| 2 - snímací hlavice s měřícím hrotem | 6 - registrační jednotka |
| 3 - posuvový mechanismus | 7 - jednotka pro měřicí signál |
| 4 - zesilovač | 8 - zobrazovací jednotka |

2.2 Měřidla bezdotyková

Bezdotyková měřidla využívají principu interference světla. Na obrázku je zjednodušeně zobrazen princip této metody u klasického interferenčního mikroskopu. [12]

Paprsek, který vzniká ve zdroji světla, prostupuje přes polopropustné zrcadlo. V polopropustném zrcadle se tento paprsek rozdělí na 2 části. Jedna část paprsku (S1) jde na povrch měřeného objektu a putuje zpátky do okuláru. Druhá část paprsku (S2) putuje na odrazné zrcadlo, kde se zpět odráží do okuláru. V okuláru se tyto rozdělené paprsky opět spojí (neboli interferují) a tím získáváme obraz povrchu. [12]



Obr. 12 Interferenční mikroskop. [12]

2.3 Porovnání dotykových a bezdotykových měřidel

Mezi **výhody kontaktního snímání** povrchu patří:

- Jednoduchá obsluha.
- Měřicímu hrotu nevadí nečistota na měřené oblasti povrchu.
- Naměřené výsledky nejsou ovlivňovány okolním prostředím.
- Možnost měření dílu, který není ve vodorovné poloze.
- Existence jednoznačně definovaných ISO standardů a povrchů. [12]

Mezi **nevýhody kontaktního snímání** povrchu patří:

- Neschopnost měřit všechny typy materiálů (např. elastomery).
- Měření mikro-nerovností je omezoáno diamantovým hrotem.
- Snímací hrot má vysoké riziko možného poškození a také opotřebení. [12]

Mezi **výhody bezkontaktního snímání** povrchu patří:

- Schopnost měřit nejrůznější typy materiálů (měkké, pružné apod.)
- Vysoká rychlost snímání povrchu ve dvou směrech.
- U měřené oblasti objektu nedochází k destrukci povrchu.
- Měřidlo se fyzicky neopotrebovává jako u dotykového snímání. [12]

Mezi **nevýhody bezkontaktního snímání** povrchu patří:

- Okolní prostředí má velký vliv na měření.
- Špatně odražený paprsek může způsobit nepřesnost v naměřených datech
- Před každým měřením se musí měřený povrch důkladně vyčistit. [12]

3 TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ

Třískové obrábění patří do technologického procesu, při kterém se přebytečná část materiálu odděluje za pomoci klínu řezného nástroje ve formě třísek. Obrábění probíhá v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Základem obrábění je teorie vzniku třísky. [17]

Hlavní druhy třískového obrábění:

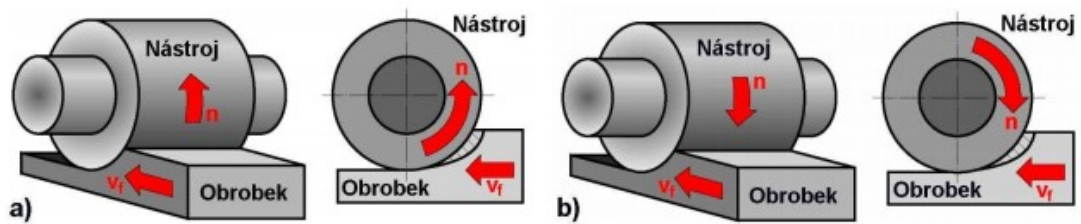
- Soustružení
- Frézování
- Broušení, hoblování, obrážení
- Vrtání
- Protahování, protlačování
- Superfinišování, lapování, honování [17]

3.1 Frézování

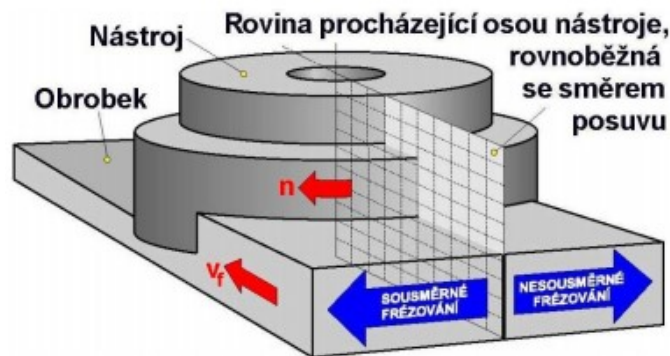
Frézování je jeden ze způsobů obráběcích metod, při kterém se materiál obrobku odebrává břitý rotujícího nástroje. Nejčastěji koná posuv součást a to ve směru, který je kolmý k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné a mohou být realizovány ve všech směrech (víceosé CNC frézky, obráběcí centra). Řezný proces je vždy přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky, které mají proměnnou tloušťku. V závislosti na používaném frézovacím nástroji se z technologického hlediska frézování dělí na válcové a čelní. A od toho se dále odvozují některé další způsoby, jako například frézování okružní či planetové. [5]

Nesousledné obrábění – Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Řezná síla při tomto protisměrném frézování má silovou složku, která působí směrem nahoru, tím se obrobek odtahuje od stolu stroje. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na maximální. Nutno podotknout, že k oddělení třísky nedochází v okamžiku této nulové hodnoty, ale až po určitém skluzu břitu po ploše, kterou vytvořil předcházející zub nástroje. Vzniklé silové a deformační účinky způsobují zvýšené opotřebení břitu. [2]

Sousledné obrábění – Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Řezná síla při tomto stejnosměrném frézování má silovou složku, která působí směrem dolů, proti stolu stroje. Vznik maximální tloušťky třísky vzniká při vniknutí zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. [2]



Obr. 13 Válcové frézování: a) nesousledně, b) sousledně [6]



Obr. 14 Čelní frézování [6]

3.1.1 Metoda HSC

Z anglického výrazu High Speed Cutting – vysokorychlostní obrábění. Tento progresivní typ technologie obrábění se používá především u tzv. 3D obrábění. To jsou technologicky jednoduché, ale také i velmi náročně plochy, které nabývají prostorově nepravidelných tvarů a jsou matematicky obtížně definovatelné. Tato metoda řeší mnohé problémy, které se vyskytují u klasického třískového obrábění. Smysl této technologie je především ve snížení ceny za obrobený výrobek a zároveň současné zvýšení jeho kvality. HSC technologie může přinést snížení výrobní doby a také i snížení nákladů v řádu několika desítek procent. Cíleno je na zvýšení výkonu a životnosti nástroje pomocí vysokých otáček a rychlostí. Díky vysokým rychlostem může být zachována hloubka třísky jako při konvenčním obrábění. Nástroje mají vysokou kvalitu řezné hrany, jsou důmyslně povlakovány. Dokáží vzdorovat abrazivnosti, difúzním procesům a navíc vytváří tepelnou izolaci. [10, 18]

Výsledná kvalita obrobeného povrchu závisí především na tvarové a rozměrové přesnosti, dále také na metalurgických vlastnostech materiálu, jeho zpracování a vlastnostech povrchu. Tyto vlastnosti povrchu určují soubory charakteristik, které nazýváme integritou povrchu. Jedná se především o:

- Topografii povrchu neboli geometrické charakteristiky povrchu.
- Strukturní a fyzikálně-chemické změny v povrchové vrstvě (zbytková pnutí).
- Smysl, velikost a průběh reziduálních pnutí.
- Stupeň, hloubka a charakter zpevnění. [10]

Toto vysokorychlostní obrábění probíhá při teplotě třísky, které je blízká tavné teplotě obráběného materiálu. Proto řezné nástroje musí být mimořádně tvrdé a tepelně odolné. Při vysoké řezné rychlosti dochází k náhlým změnám ve vlastnostech třísky, jedná se o metalurgické, chemické i mechanické vlastnosti. Tříska snižuje svou přitlačnou sílu na čelo nástroje, to platí i v případě kalené ocelové třísky, která také změkne. Třecí síla i celkový řezný odpor klesají, dochází ke zvětšení úhlu stříhu. Ztenčuje se průřez odcházející třísky a zvyšuje se rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny nástroje. Díky snížené ploše kontaktní zóny a omezení sekundárního nárůstu teploty třísky třením v této zóně se do nástroje přenáší minimální množství tepla, poněvadž většina tohoto vygenerovaného tepla odchází ihned s třískou. [10]

Teplota třísky je vyšší než u klasického konvenčního obrábění, ovšem u HSC technologie je to pozitivní faktor a principiální zdroj příznivých efektů. Chlazení v místě dotyku nástroje s obrobkem není zpravidla nutné a mnohdy může být i nežádoucí. Super tvrdé řezné nástroje totiž mají zvýšenou citlivost na teplotní šoky, které právě může způsobit kapalino- vé chlazení. [10]

3.2 CAM systémy

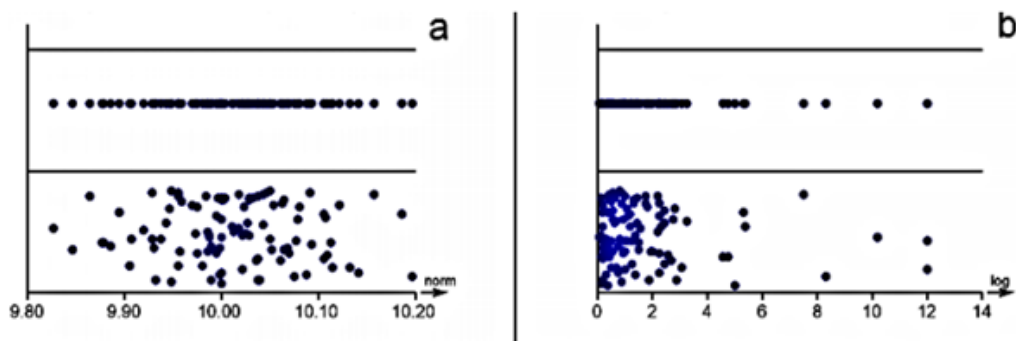
Počítačová podpora výroby neboli CAM (angl. Computer Aided Manufacturing) patří v technické praxi dnešní doby k nenahraditelným systémům při obrábění výrobků. Dokáží odhadnout vhodnou obráběcí strategii i zvolit vhodný nástroj. Díky počítačovým simulacím dokážeme předcházet kolizím. V systému najdeme jak strategie pro 2D obrábění, tak i pro 3D obrábění. Největší smysl tyto systémy nachází ve využití více osového obrábění, hrubování apod. Vypočítané dráhy jsou generovány vždy v co nejefektivnějším a nejnižším možném počtu. CAM systémy jsou vhodné jak pro konvenční, tak i nekonvenční obrábění. Součástí každého CAM systému je i post procesor, který je specifický pro každý obráběcí stroj. Post procesor převádí generované dráhy nástroje ze softwaru do požadovaného tvaru, který poté zpracovává řídicí systém obráběcího stroje. Jedná se o tzv. CNC kód. [20]

4 STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ DAT

4.1 Průzkumová analýza dat (EDA)

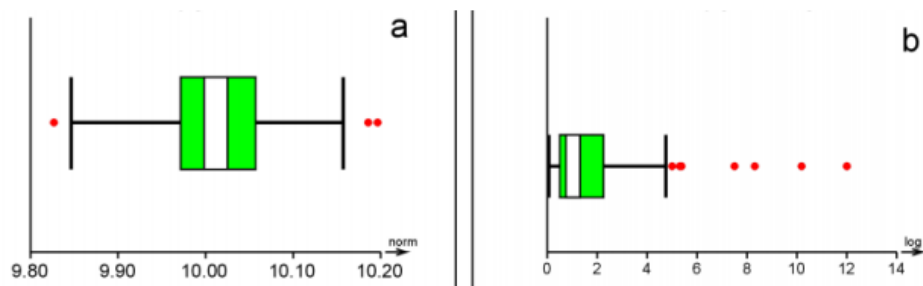
Pomocí průzkumové (explorativní) analýzy dat dokážeme zjistit, o jaký typ rozdělení dat se jedná. Můžeme především odhalit určité statistické zvláštnosti, jako jsou např. stupně symetrie anebo špičatost výběru. [14]

Pokud chceme určit, jaký typ dat máme, musíme znát hodnoty mediánu, průměru, rozptylu, šikmosti a špičatosti. U této analýzy využíváme především rozptylových diagramů.



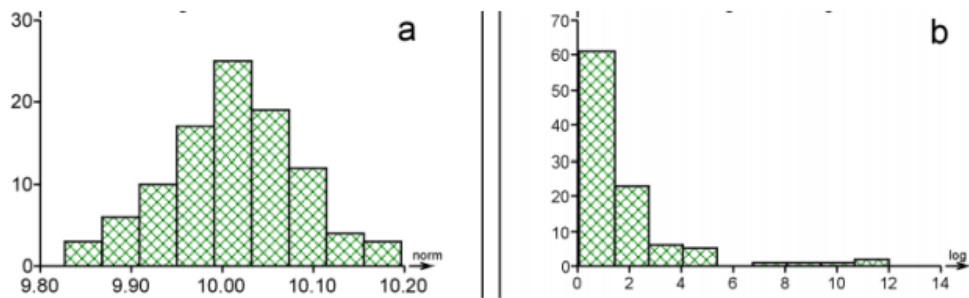
Obr. 15 Diagram rozptylů: a) normální, b) asymetrické [21]

Dále typ dat můžeme určit za pomoci box-plotového diagramu (krabicový graf). Graf znázorňuje odhad polohy mediánu a zároveň i odlehlé hodnoty.



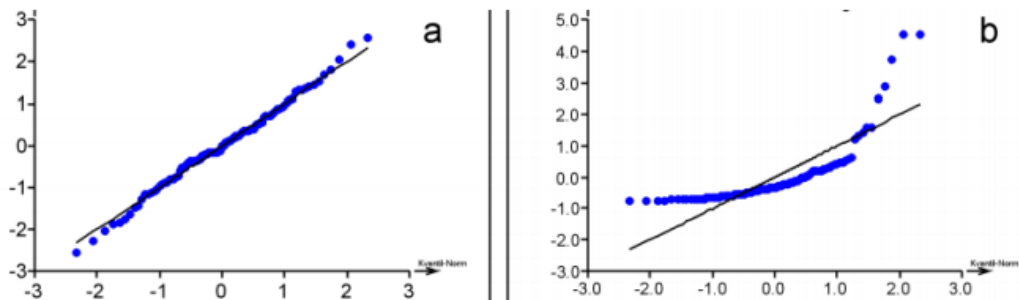
Obr. 16 Box-plotový graf a) symetrické rozdělení, b) asymetrické rozdělení [21]

Lze využít i analýzy za pomoci histogramu, což je sloupcový graf. Výška sloupku vypovídá o empirické hustotě výskytu pravděpodobnosti. Podle histogramu můžeme zjistit symetrie a šikmost dat. Často se histogram využívá s kombinací jádrového odhadu pravděpodobnosti, díky němu můžeme určit hustotu, šikmost a špičatost dat.



Obr. 17 Histogram a) normální rozdělení, b) asymetrické rozdělení [21]

Q-Q grafy jsou citlivé na extrémní hodnoty měření. Kruhové grafy nám zase dokážou vyobrazit symetrické rozdělení dat. Pokud je odchýlení od kružnice, jedná se o jiné nenormální rozdělení. [14]



Obr. 18 Q-Q graf a) normální rozdělení, b) asymetrické rozdělení [21]

4.2 Analýza rozptylu (ANOVA)

ANOVA (z angl. Analysis of variance) patří mezi nejjednodušší analýzy rozptylu jednoduchého třídění, kdy se analyzuje účinek jednoho faktoru na vysvětlovanou proměnnou.

Při použití jedno-faktorové ANOVY se zjišťuje rozdíl průměrů mezi skupinami, za pomoci výpočtu testovacího F kritéria. Snahou je odhalit, zda vytvořené skupiny klasifikačním faktorem jsou si podobné. Pokud na vysvětlovanou proměnnou působí dva a více faktorů, tak se jedná o více faktorovou ANOVU. Zde testujeme rovnosti průměru nezávislých průměr za pomoci nepárového T-testu. [27]

Celková variabilita sledované proměnné pro dvě složky:

- a) **Rozptyl uvnitř skupiny** – tento rozptyl mezi jedinci ve skupině kolem skupinového průměru je způsoben přirozenou variabilitou, která je pro nás neznámou.

b) Rozptyl mezi skupinami – rozptyl skupinových průměru, které jsou kolem společného celkového průměru ze všech skupinových průměrů. Je předpokládáno, že jeho vznik je způsobem pokusným zásahem (faktorem) a přirozenou variabilitou.

Pokud bude rozptyl mezi skupinami větší než rozptyl uvnitř skupiny ($F > F_{\text{krit}}$), konstatujeme, že nulová hypotéza neplatí neboli faktor, který působí, má vliv. Při zamítnutí nulové hypotézy dále postupujeme v hledání rozdílů v průměrech mezi jednotlivými dvojicemi. Výsledkem tohoto testování je zjištění, zdali působící faktor měl statisticky významný rozdíl průměrů mezi skupinami.

Předpokladem k používání ANOVY je nezávislost výběrů (skupin), normální rozdělení dat a homogenní rozptyly uvnitř skupin. Tyto předpoklady ověřujeme za pomoci testů normality, testů homogenity rozptylu (Bartlettův test, Bartlett-Boxův test). [15]

4.3 Chyby měření

O chybě měření lze říci, že je to rozdíl mezi naměřenou hodnotou a výsledkem veličiny. Mezi chyby měření patří systematická, náhodná a hrubá chyba.

a) Systematická chyba - výsledky měření jednosměrně zkresluje. Může být způsobena metodou měření, kvalitou měřicího přístroje anebo také kvalitou provedení měření. Rozdíl je mezi střední hodnotou vznikající z nekonečného počtu měření stejné veličiny za podmínek opakovatelnosti a pravé hodnoty měřené veličiny. Chyba se projevuje při porovnání měření s měřením, které bylo provedeno jinou osobou či přístroji. Pokud je takováto chyba zjištěna, odstraňuje se za pomoci korekcí. [16]

b) Náhodná chyba – tuto chybu nemůžeme korigovat, ovšem můžeme ji zmenšit a to opětovným naměřením. Chyba může být daná jak vnějšími (vlhkost, vibrace, tlak, teplota), tak vnitřními jevy (vlastnosti materiálu), které nejsou kontrolovány. Výsledek měření je odečten od střední hodnoty a vzniká z nekonečného počtu měření stejné veličiny za podmínek opakovatelnosti. Náhodná chyba se může měnit a to náhodným způsobem a to i za stejně měřených podmínek při opakování stejným způsobem. [16]

c) Hrubá chyba – se od ostatních hodnot odlišuje výrazně rozdílnou hodnotou a to i přesto, že je ze stejného souboru měření. Tato chyba převážně vzniká nepozorností, přehlédnutím anebo nedodržením postupu pravidel měření. Chyba je větší než se v závislosti na přesnosti zvoleného měření může připustit. Takováto hodnota se musí vyloučit ze souboru měření. [16]

CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo porovnat kvalitu jakosti frézovaného testovacího dílu z pohledu změny rezných podmínek a změny materiálu.

Byly vybrány 4 druhy oceli. Každý díl byl rozdělen na 3 oblasti, které byly obrobena různými rychlostmi posuvu nástroje.

Při měření byly vybrány z každé oblasti 4 měřené úseky (části), které se poté statisticky vyhodnocovaly.

Měřené tvarové plochy byly vyrobeny na CNC frézovacím stroji Mikron HSM 800, drsnost povrchu byla naměřena na měřícím zařízení Zygo Ametek. Statistické vyhodnocení bylo provedeno v počítačovém softwaru Minitab.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VÝROBA TESTOVACÍHO DÍLU

5.1 Volba materiálu

Byly vybrány čtyři nejčastěji používané materiály ve firmě.

- Ocel **1.5070** s tvrdostí cca. 24 HRC.
- Ocel **1.2312** s tvrdostí cca. 38 HRC.
- Ocel **TOOLOX 44** s tvrdostí cca. 44 HRC.
- Ocel **1. 2379** s tvrdostí cca. 56HRC.

5.1.1 Ocel 1.0570

Starší označení dle ČSN pro tuto ocel je 11 503. Uklidněná nelegovaná ocel, svařitelná, s výjimkou normalizačního žíhání není vhodná k tepelnému zpracování. Používá se pro méně namáhané strojní díly a nosné konstrukce strojů, svařované, šroubované a nýtované konstrukce.

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.0570.

Chemické složení	C	Mn	Si	P max.	S max.
Obsah prvků v %	Max. 0,24	Max. 1,70	Max. 0,60	0,035	0,035

5.1.2 Ocel 1.2312

Starší označení dle ČSN je 19520. Jedná se o zušlechťenou nástrojovou ocel. Používá se jako součástka do strojů a nástrojů s vyšší pevností a houževnatostí.

Tab. 2 Chemické složení oceli 1.2312.

Chemické složení	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
Obsah prvků v %	0,38	1,50	0,30	2,00	0,20	1,10

5.1.3 Ocel TOOLOX 44

Jedná se o ocel s vysokou rázovou houževnatostí a velmi malým zbytkovým pnutím. Zachovává si vysokou pevnost při vyšších teplotách, proto je vhodná pro nástroje na vstřikování plastů, pryže nebo tlakové lití, popř. přípravky na ohýbání a tvarování plechu.

Tab. 3 Chemické složení oceli TOOLOX 44.

Chemické složení	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V
Obsah prvků v %	0,32	0,80	0,60 - 1,10	1,35	0,80	Max. 1,00	0,14

5.1.4 Ocel 1.2379

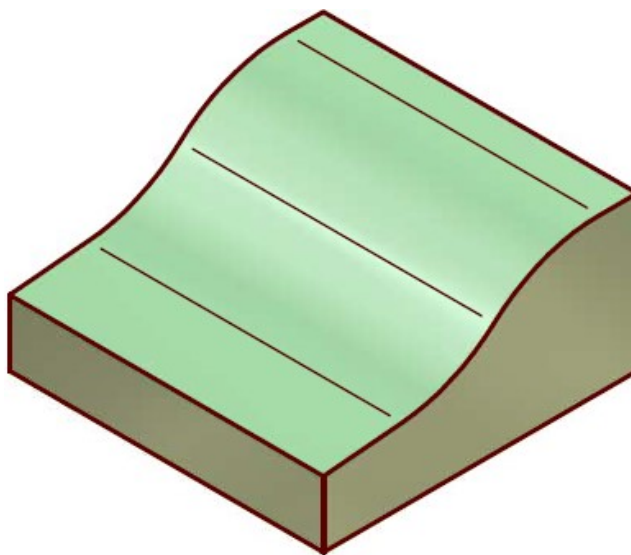
Starší označení dle ČSN pro tuto ocel je 19 573. Výkonná nástrojová ocel pro práci za studena. Vysoká odolnost. Používá se pro vysoce namáhané díly střižných nástrojů.

Tab. 4 Chemické složení oceli 1.2379.

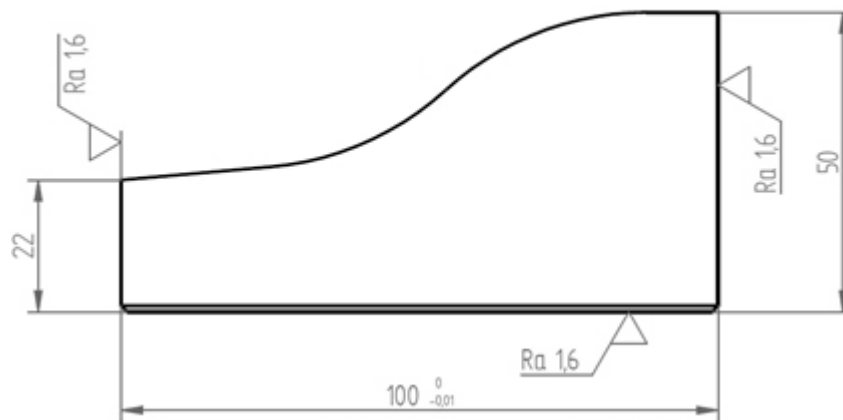
Chemické složení	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	S
Obsah prvků v %	1,55	0,30	0,30	12,0	0,18	0,70	0,18	0,80	0,02

5.2 Návrh konstrukčního řešení

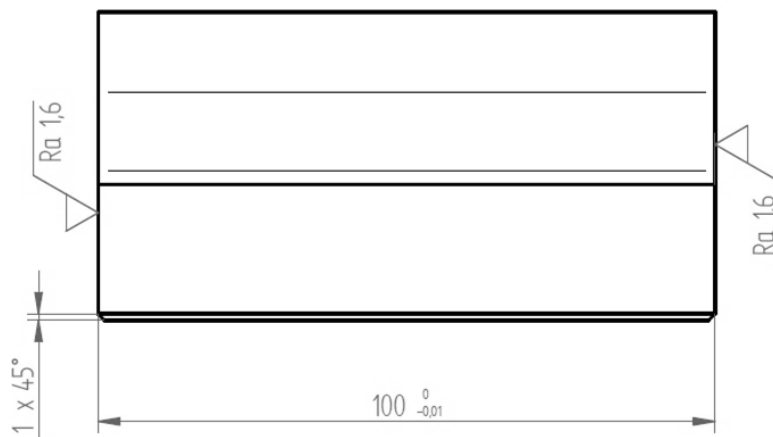
Při návrhu testovacího dílu bylo kvůli bezproblémovému naměření na mikroskopu nezbytné, aby velikost dílu byla maximálně o rozměrech 100 x 100 x 50 mm. Dále s ohledem na použitý nástroj - kulová fréza nebyl obráběný tvar navržen zcela rovinný. Model a výkresová dokumentace byla vytvořena v 3D CAD softwaru Solid Edge.



Obr. 19 Navržený testovací díl



Obr. 20 Výkresová dokumentace – nárysový pohled dílu.



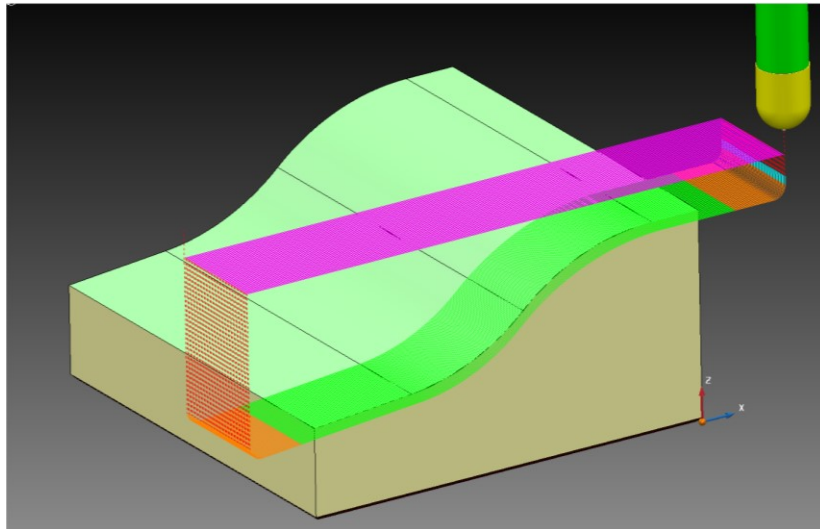
Obr. 21 Výkresová dokumentace – boční pohled dílu.

5.3 Technologický postup

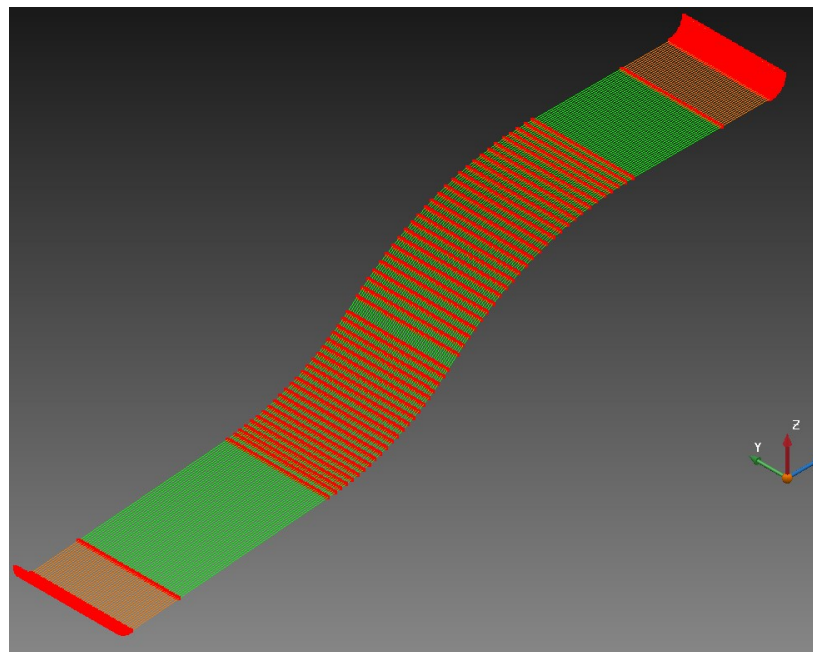
Díl byl vyroben ze čtvercové tyče. Nejprve byl nařezán na pilce, poté byl na CNC frézce vyroben (kromě horního tvaru) na hotovo. Daný tvar byl pouze vyhrubován. U dílu, kde bylo zahrnuto kalení, byl postup trochu odlišný. A to v tom, že na CNC frézce byl celý díl pouze vyhrubován. Z důvodu kalení totiž nebylo možné zaručit tolerované rozměry. Po kalírně proto následovalo dobroušení bočních stěn, které byly potřebné pro správné najetí a vyrovnání na stroji v další operaci. Dále byl už postup stejný pro všechny díly. Poslední operace zahrnovala úplné dokončení dílu, tedy obrobení tvarové plochy na hotovo. Tato operace proběhla na CNC frézce Mikron HSM 800.

5.4 CAM programování

Programování a generování CNC kódu proběhlo v 3D CAM softwaru PowerMill. Obráběcí strategie byla zvolena tak, že nástroj sousledně kopíroval tvar daného dílu.



Obr. 22 Simulace drah v softwaru PowerMill.



Obr. 23 Lineární interpolace křivky.

5.5 Obráběcí stroj

Obrobení proběhlo na vertikálním frézovacím centru Mikron HSM 800. Toto CNC je určeno pro vysoce výkonné a přesné obrábění v kusové i hromadné výrobě.



Obr. 24 Mikron HSM 800. [7]

Stroj je osazen vysokofrekvenčním vřetenem, které je vybaveno hybridními keramickými ložisky. Plášť vřetena je chlazen kapalinou, která stabilizuje teplotu. Vřeteno je mazáno olejovou mlhou. Posuvové pohyby zajišťují střídavé servomotory spárované recirkulačními kuličkovými vřeteny. Stroj dále obsahuje ovládací panel, kabinu, zásobník pro 30 nástrojů a měnič obrobků se 4 paletami. [7]

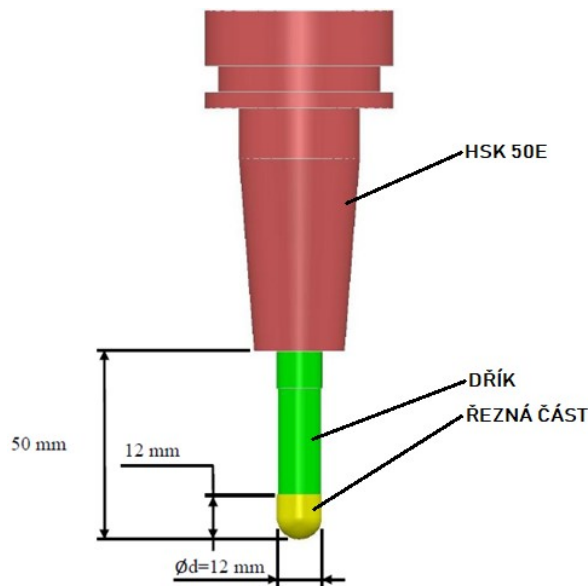
Tab. 5 Specifikace stroje. [7]

Vzdálenosti pojezdu	osa X = 800 mm osa Y = 600 mm osa Z = 500 mm
Rychlost posuvu	0 – 50 m/min
Zrychlení os	1g (10 m/s ²)
Otáčky vřetene	36 000 ot. /min
Výkon vřetene	25 kW
Krouticí moment	20 Nm
Maximální hmotnost obrobku	1000 kg
Řízení (řídící systém)	Heidenhain iTNC 530
Upínací kužel	HSK 50E
Maximální průměr nástroje	25 mm
Doba výměny nástroje	10 s

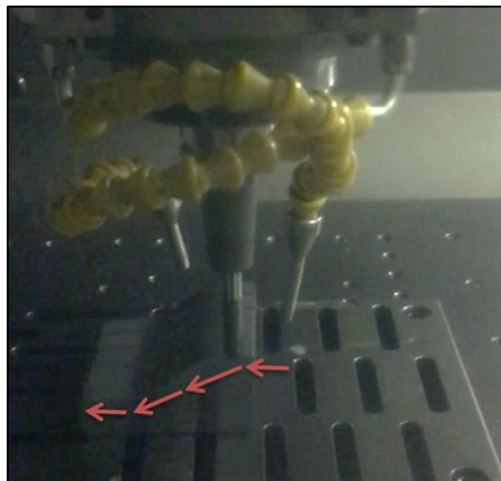
5.6 Obráběcí nástroj

Pro experiment byla použita čtyř zubová kopírovací (kulová) fréza o průměru 12 mm s rádiusem 6 mm. Celková délka nástroje činila 83 mm. Nástroj byl monolitní a byl vyroben ze slinutých karbidů, které byly povlakovány tvrdými povlaky. Geometrie břitu byla negativní. Nástroj byl specializovaný na HSC technologii a obrábění tvrdých materiálů.

Upínání nástroje bylo řešeno pomocí tepelného držáku HSK 50E. Ohřevem ve speciálním zařízení došlo ke zvětšení upínacího otvoru. Do otvoru držáku byl vložen nástroj a následným ochlazením došlo ke smrštění a k upnutí nástroje. Tento způsob tepelného upínání nástrojů nachází ve strojírenství stále větší oblibu a uplatnění. Mezi jeho výhody patří rychlost, přesnost a výrazné snížení nákladů.



Obr. 25 Nástroj kulová fréza s HSK 50E držákem.



Obr. 26 Obrobení na Mikron HSM 800.

5.7 Řezné podmínky

Při volbě řezných podmínek se vycházelo z doporučených hodnot udávaných výrobcem nástroje. Chlazení bylo řešeno olejovou mlhou, která se skládala z Unicut Saw-EP-A4 a vzduchu. Poměr oleje a vzduchu byl 1:500000. V oblasti 1, 2, 3 se měnila rychlost posuvu v_f , úběr materiálu a_p a otáčky n zůstaly konstantní. Mezi jednotlivými oblastmi se lišila rychlost posuvu v_f neboli pohybový posuv. Více popisuje následující tabulka, kde hodnota v_f představuje doporučenou hodnotu udanou výrobcem. Z experimentálních důvodů byly v některých oblastech tyto hodnoty procentuálně sníženy, popř. zvýšeny.

Tab. 6 Řezné podmínky jednotlivých oblastí.

Oblast	v_f [mm·min ⁻¹]	a_p [mm]	n [min ⁻¹]
1	$0,7 \cdot v_f$	konst.	konst.
2	$1,3 \cdot v_f$	konst.	konst.
3	v_f	konst.	konst.

5.8 Výrobek

Byly vyrobeny čtyři tvarově totožné díly, rozdíl byl pouze v použitém materiálu.



Obr. 27 Finální podoba testovacích dílů.

6 MĚŘENÍ TESTOVACÍHO DÍLU

Bylo využito bezkontaktního snímání povrchu. Výhodou této metody je, že se nemusíme bát poškození povrchu materiálů, které jsou citlivé na mechanické poškození. Laserový snímač vysílá paprsek polovodičového laseru, který se odráží od měřeného povrchu do optického systému, který jej přijímá. Paprsek se zaostřuje na CCD (Charge-coupled device) snímacím poli, CCD nám zajišťuje, aby množství světla v bodě paprsku bylo správně rozděleno. Jednotlivé CCD snímané obrazové prvky na ploše paprsku jsou využívány pro určení konkrétní polohy zaměřeného bodu.

6.1 Měřicí přístroj pro určení drsnosti povrchu

Pro naměření a vyhodnocení drsnosti povrchu byl použit přístroj Zygo Ametek. Tento přístroj poskytuje silnou všestrannost při bezkontaktním optickém profilování povrchu. Za pomoci tohoto profilometru je snadné a rychlé měřit nejrůznější typy povrchů. Může se jednat o hladké, hrubé, ale také ploché, šikmé či stupňované povrchy. Povrch byl sledován pomocí měřicí hlavy, která jej zaostřovala, vše bylo řízeno a nastavováno za pomoci programu, ovládání byly intuitivní a rychlé.

Výhody tohoto přístroje:

- Vysoká citlivost snímání.
- Rychlé bezkontaktní měření.
- 3D vizualizace povrchu.



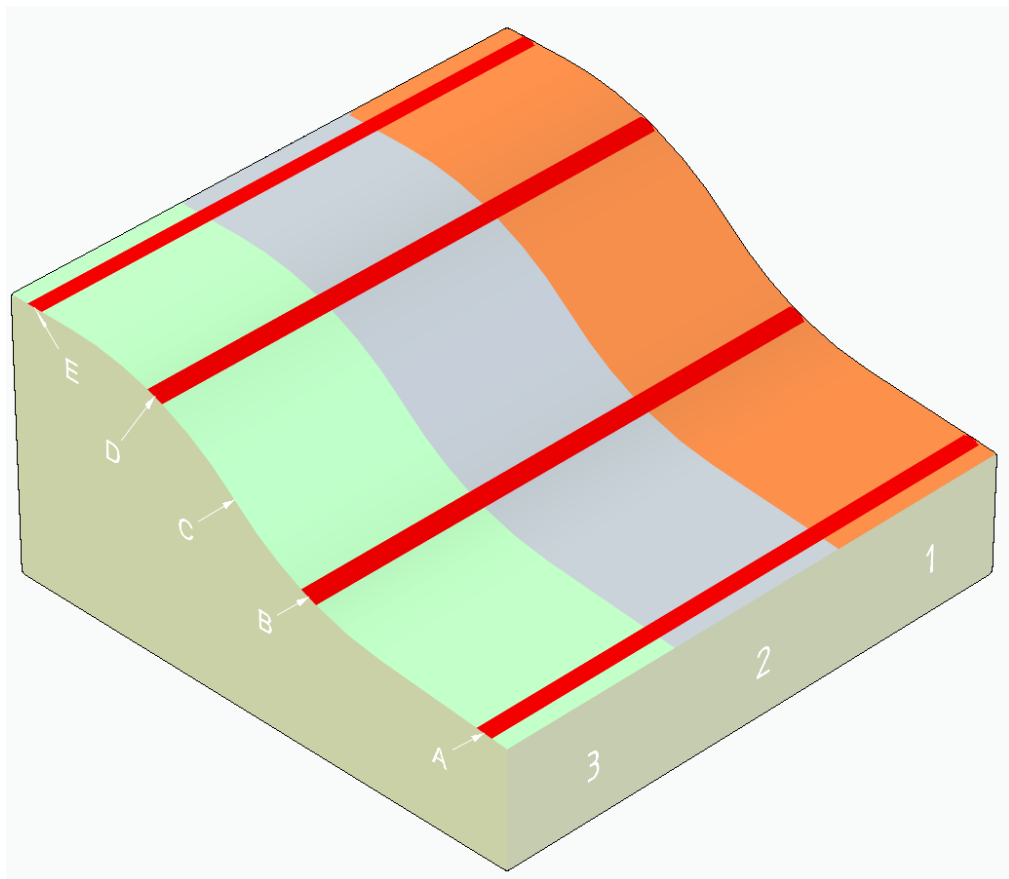
Obr. 28 Měřicí přístroj Zygo Ametek.

6.2 Oblasti měření

Díl byl rozdělen na 12 částí. Každá část se změřila celkově 50x. Měřená část měla plochu 3 mm². Část C byla nakonec zrušena kvůli komplikovanému měření na přístroji. Měřené veličiny byly S_a . Celkem bylo naměřeno 2400 hodnot S_a parametru.

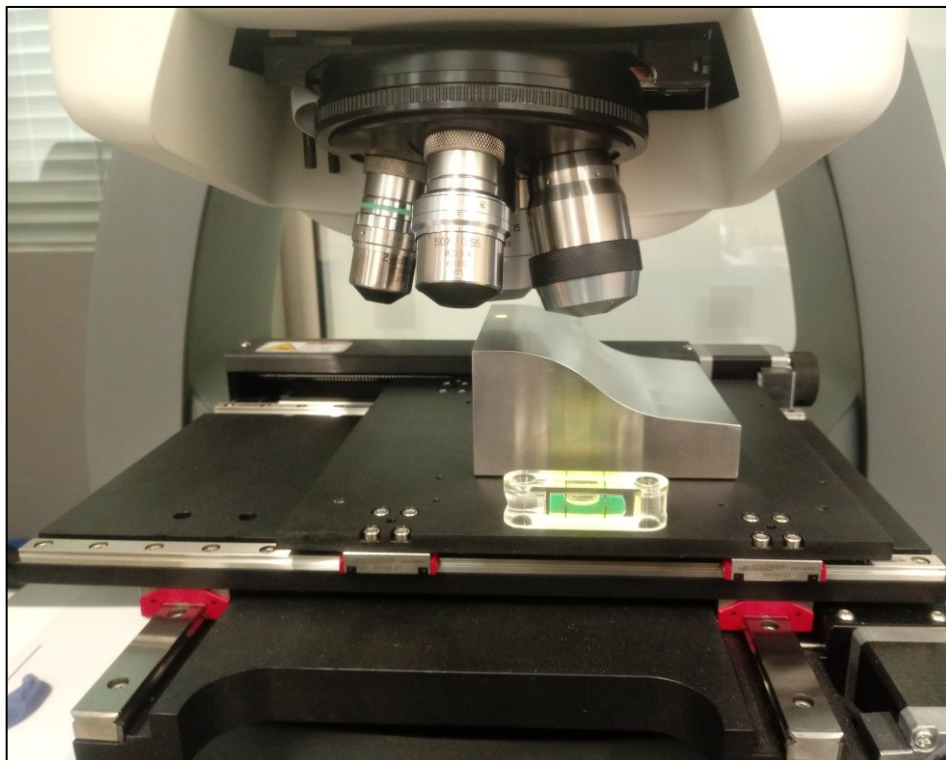
Popis jednotlivých částí:

- Část A – plocha byla namodelována pod úhlem 15°.
- Část B – konkávní část rádiusu.
- Část C – inflexní bod mezi vnějším a vnitřním rádiusem.
- Část D – konvexní část rádiusu.
- Část E – rovinná plocha.

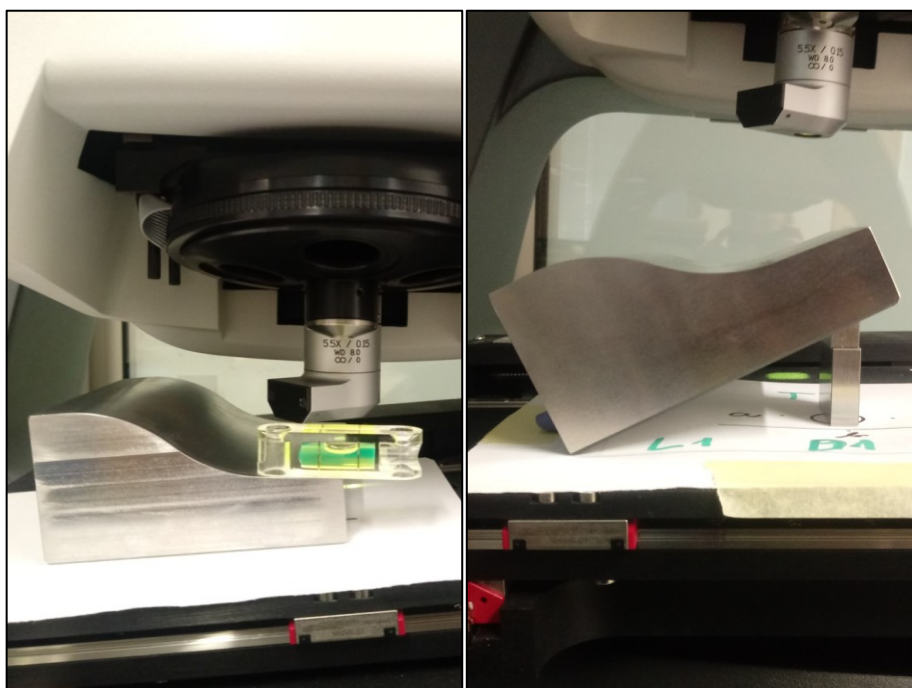


Obr. 29 Jednotlivé oblasti (1, 2, 3) a části (A, B, C, D, E) na měřeném dílu.

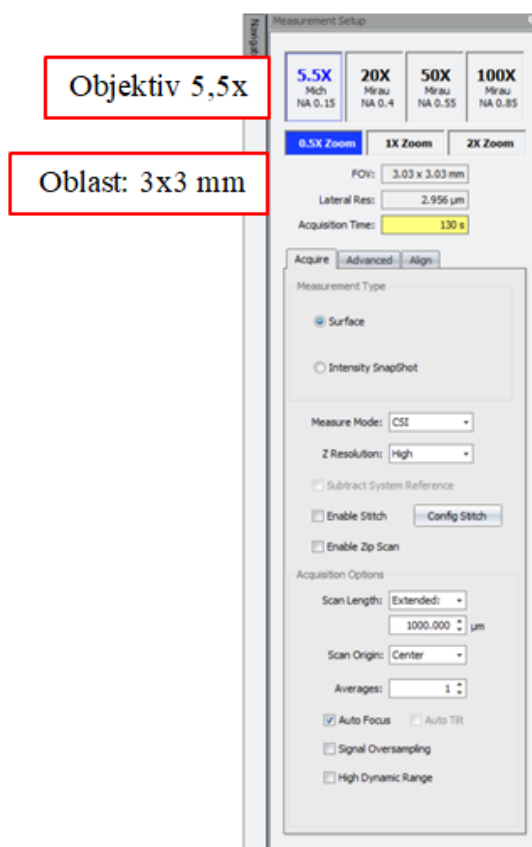
6.3 Nastavení přístroje



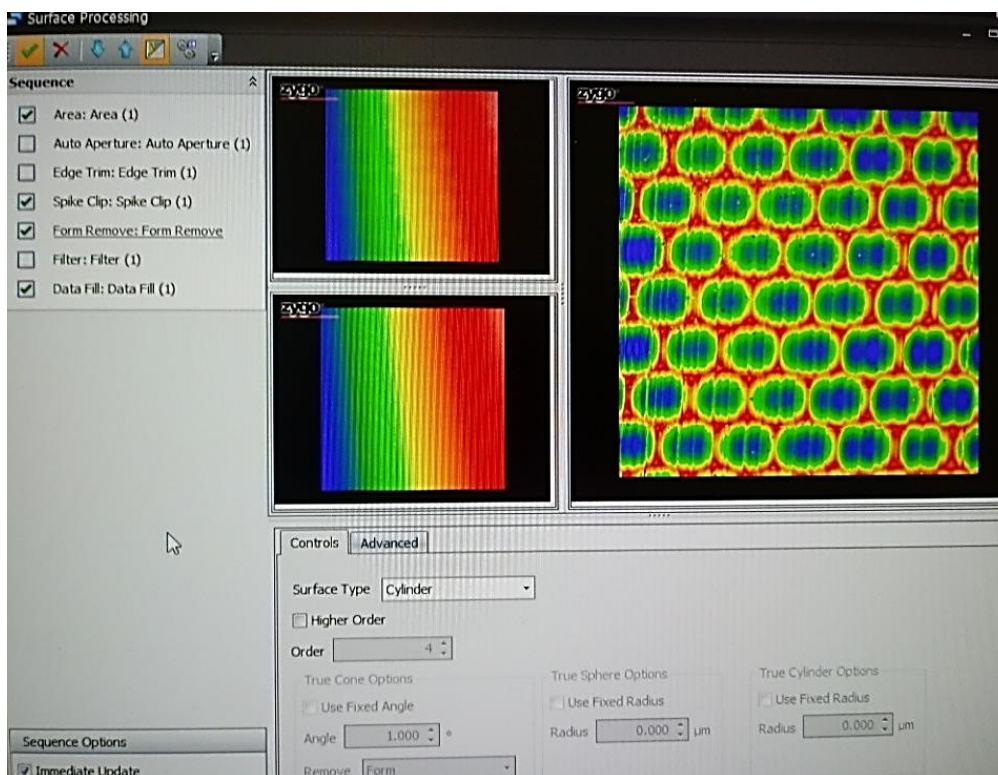
Obr. 30 Příprava dílu na snímání povrchu.



Obr. 31 Naklonění roviny stolu/dílu pro snímání tvarové plochy.

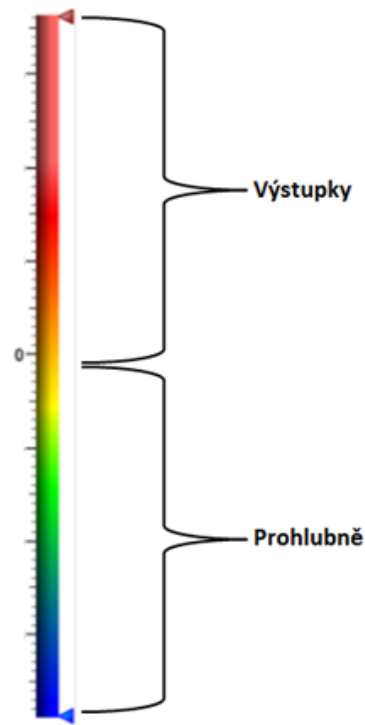


Obr. 32 Nastavení parametrů snímání.

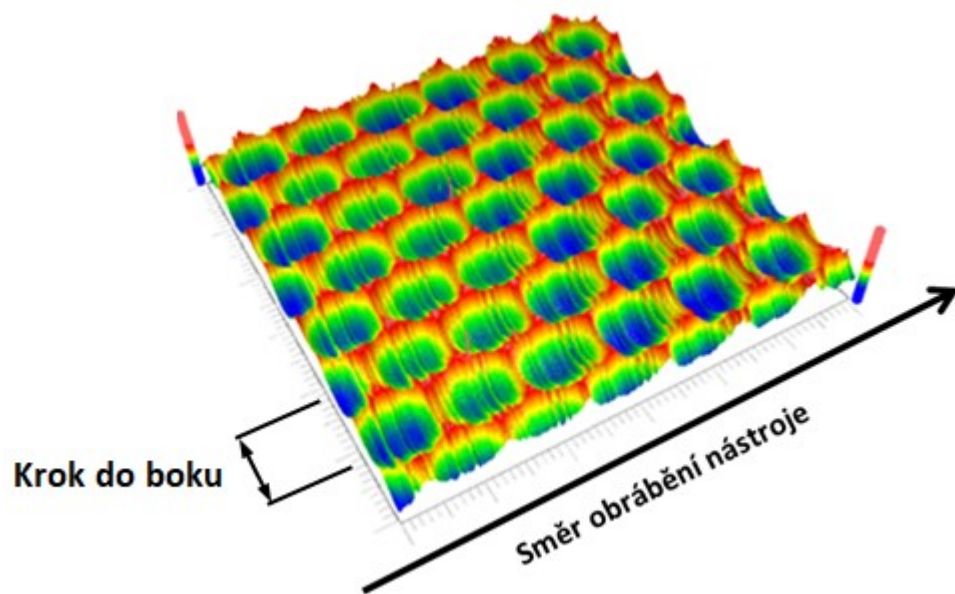


Obr. 33 Odstranění konvexního/konkávního tvaru pomocí funkce – válec.

Pro následující obrázky, které obsahují nasnímaný povrch jednotlivých oblastí a částí, je na úvod důležité vysvětlit a popsat legendu barevného spektra a také definovat směr, kterým daný nástroj obráběl. Spektrum barev pomáhá odlišovat rozdílnost výšky povrchu. Pokud zbarvená část je do červena, jedná se o výstupky, naopak pokud zbarvená část je do modra, jedná se o prohlubně.

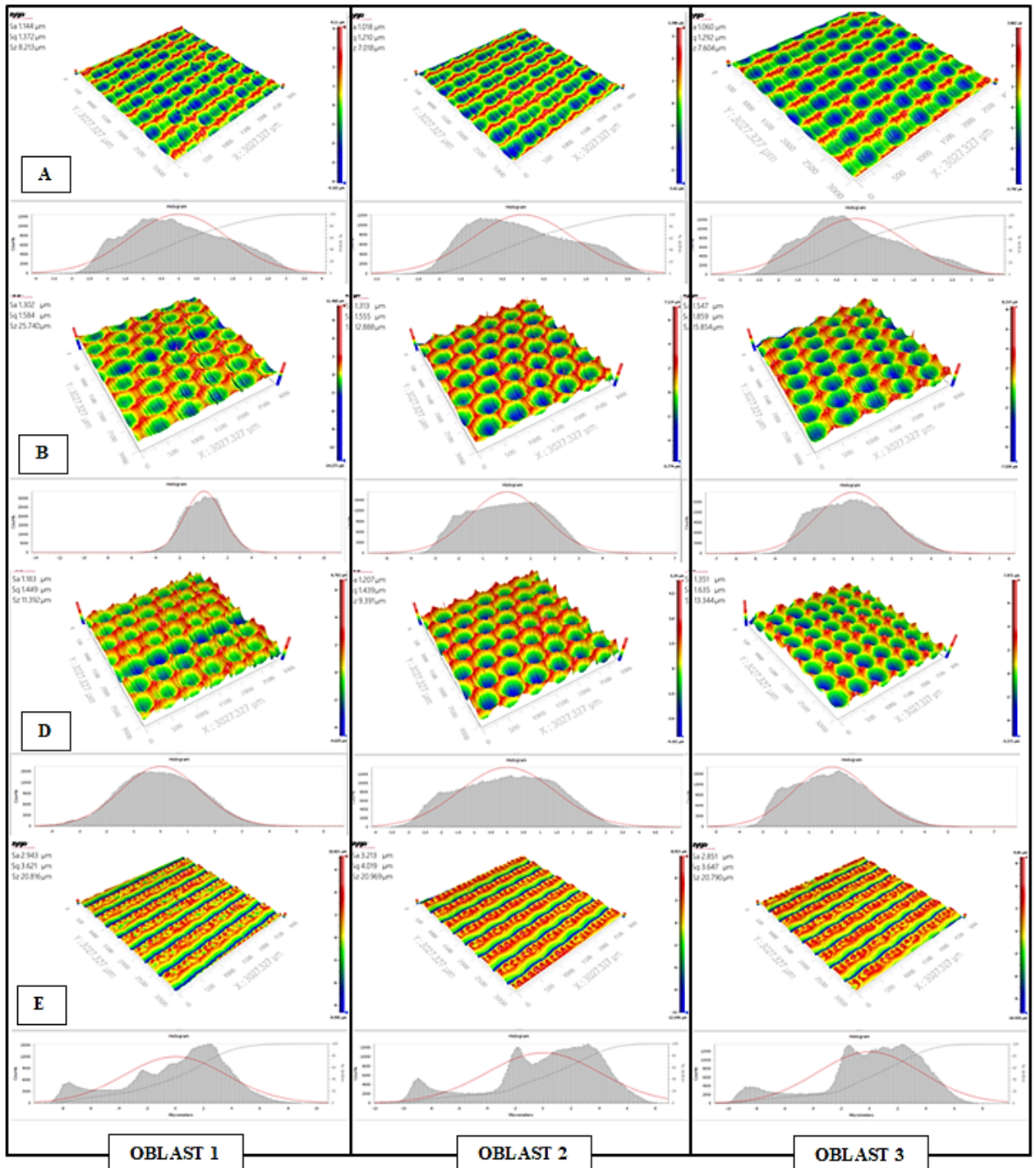


Obr. 34 Legenda povrchu.



Obr. 35 Směr obrábění nástroje.

6.4 Ocel Toolox44



Obr. 36 Naměřený povrch ocele Toolox44.

Komentář k obrázkům naměřené ocele Toolox44

Na první pohled bylo možno vidět, že část E se od ostatních částí výrazně lišila.

Dále na **části A** bylo vidět, že nástroj vibroval. Tak jak rostla či se snižovala rychlost posuvu v jednotlivých oblastech, tak se zvětšovala a zmenšovala vibrace.

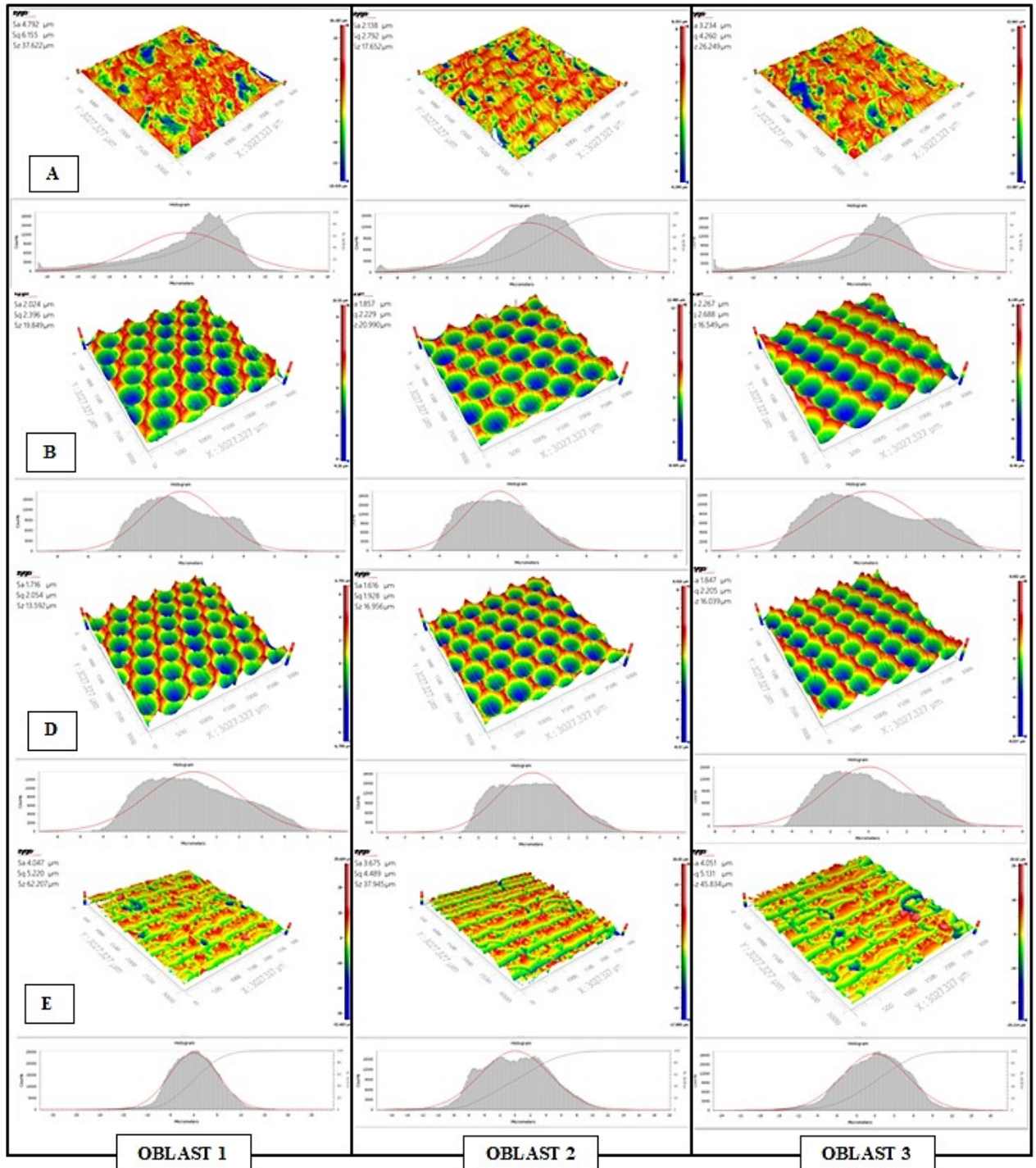
Části B a D představovaly konkávní a konvexní rádiusy. Bylo zajímavé si povšimnout, jak zde nástroj doslova skákal z jedné prohlubně do druhé. Tento jev byl patrně způsoben vlivem nastavení CAM softwaru.

Rovinná plocha E byla pro kulovou frézu nejhorší obráběnou částí. Na obrázcích byly vidět modré čáry (prohlubně), které představovaly dráhu, po které jela špička nástroje.

Shrnutí

Optickým porovnáním všech tří oblastí bylo usouzeno, že pro tento typ plochy by nejméně vyhovovalo nastavení rychlosti posuvu na 130%, tj. oblast 2. Obrobená oblast 1 s nastavením 70% rychlosti posuvu vytvářela menší vibrace, a proto neobsahovala tolik výstupků jako v ostatních oblastech, ačkoliv byly rozdíly minimální, pro lepší kvalitu povrchu vyšla oblast 1 lépe než oblast 3.

6.5 Ocel 1.0570



Obr. 37 Naměřený povrch ocele 1.0570.

Komentář k obrázkům naměřené ocele 1.0570

Na **části A** nebyla téměř vidět dráha nástroje, soudě dle toho, řezné podmínky nevyhovovaly ani v jedné z oblastí pro tuto část povrchu.

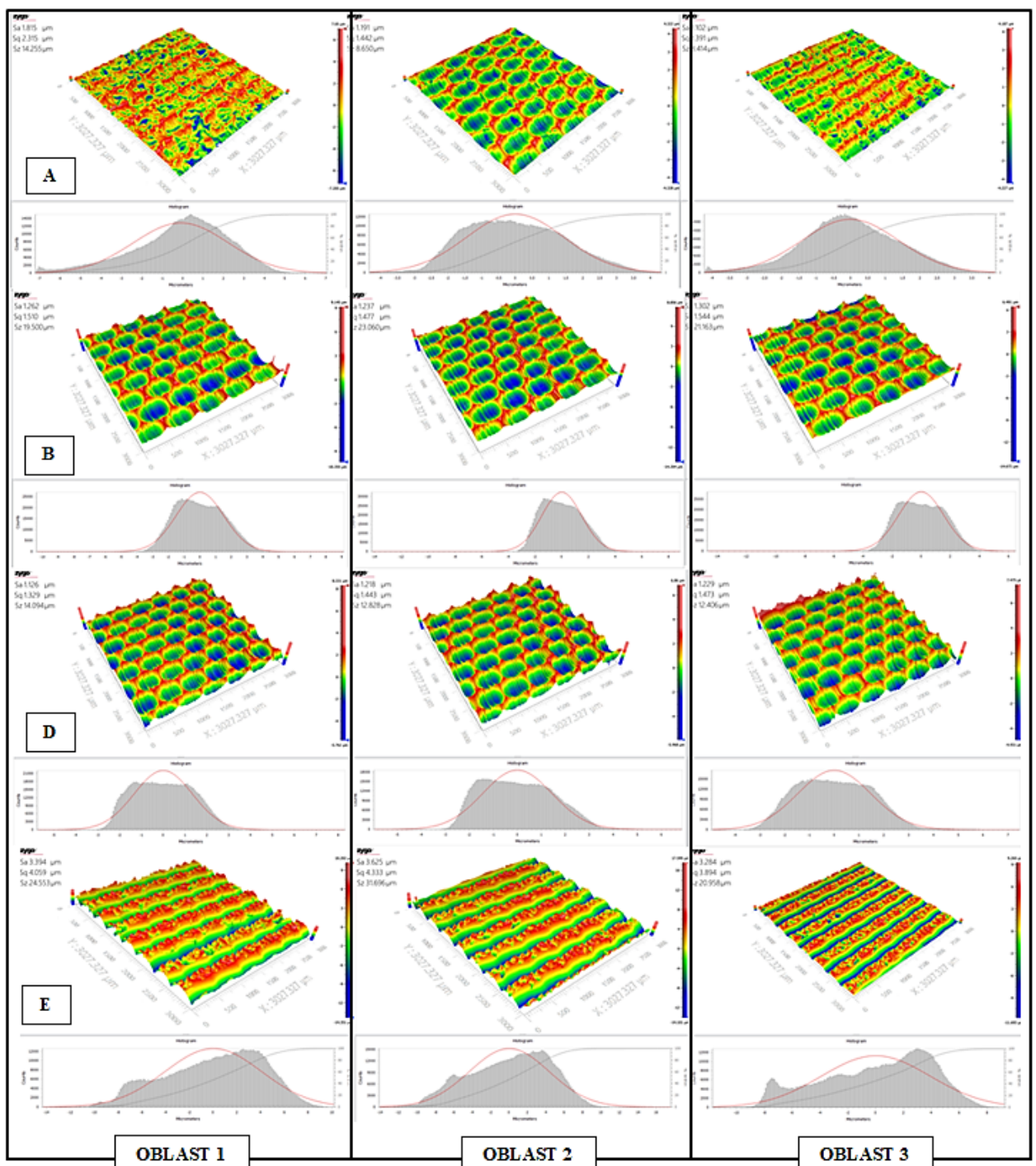
Na **částech B a D** nástroj doslova skákal z jedné prohlubně do druhé. Tento jev byl patrně způsoben vlivem nastavení CAM softwaru.

Rovinná plocha E dopadla obdobně špatně jako část A. Jen už dráha nástroje šla o trochu lépe vidět.

Shrnutí

Celkově nešlo jednoznačně určit, které nastavení řezných podmínek bylo nejvhodnější pro lepší kvalitu povrchu. Více ukázal až box-plotový diagram.

6.6 Ocel 1.2312



Obr. 38 Naměřený povrch ocele 1.2312.

Komentář k obrázkům naměřené ocele 1.2312

Pro **část A** bylo vidět, že pomalá rychlost posuvu nástroje v oblasti 1 a 3 nevyhovovala. V oblasti 2, kde nástroj jel nejrychleji, bylo nejlepší nastavení řezných podmínek.

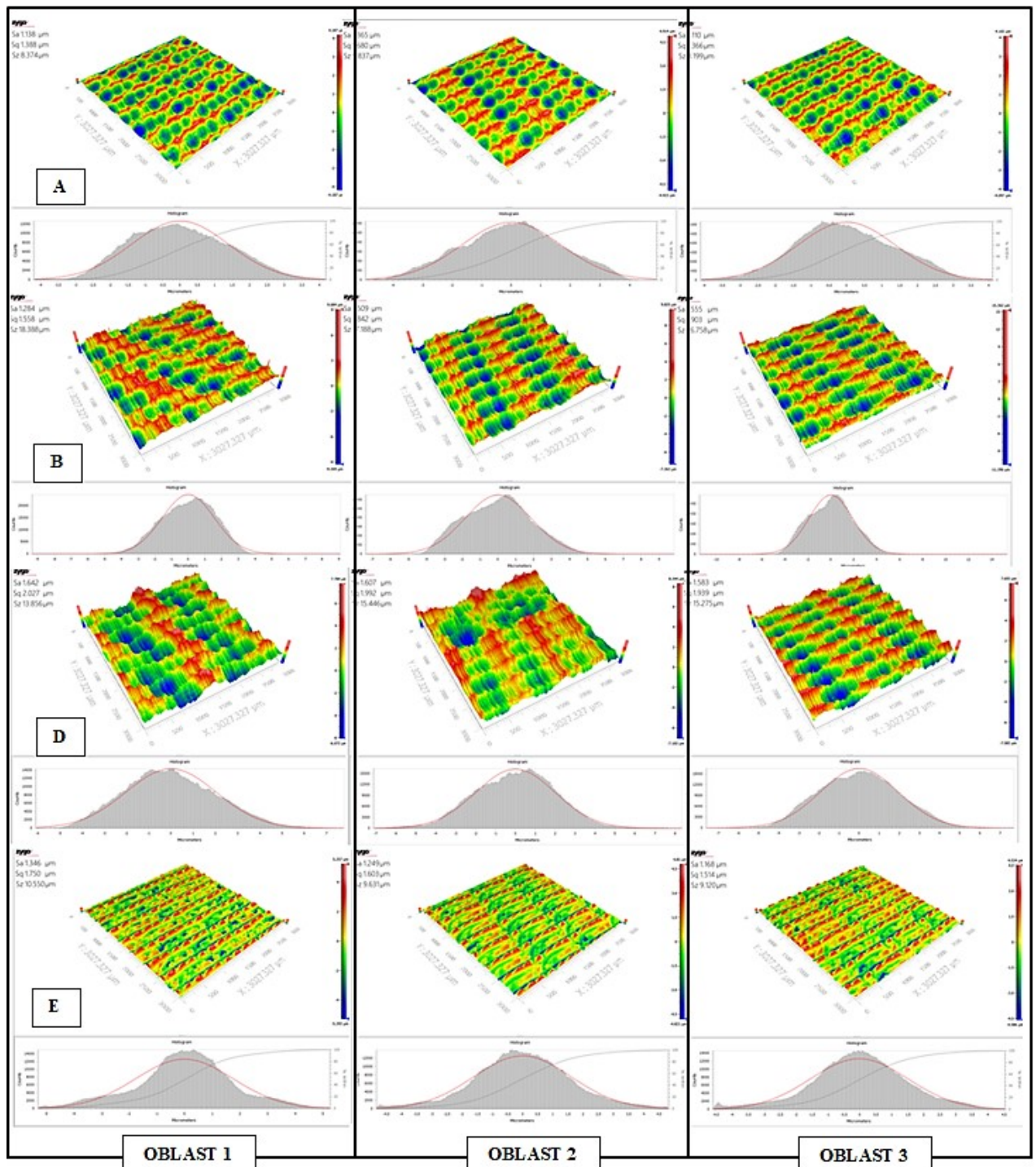
Pro **části B a D**, které představovaly konkávní a konvexní rádiusy se povrchy od sebe příliš nelišily.

Rovinná plocha E opět dopadla nejhůře. Tento typ nástroje není vhodný pro rovinné obrábění.

Shrnutí

Celkově nešlo jednoznačně určit, které nastavení řezných podmínek bylo nejvhodnější pro lepší kvalitu povrchu. Více ukázal až box-plotový diagram.

6.7 Ocel 1.2379



Obr. 39 Naměřený povrch ocele 1.2379.

Komentář k obrázkům naměřené ocele 1.2379

V **části A** bylo možno vidět zvětšující se výstupky v oblasti 2 a 3, tak jak zde rostla posuvová rychlost nástroje, tak více začal nástroj vibrovat. Kvalita jakosti povrchu se proto zhoršovala.

V **částech B a D** nástroj skákal a opticky nešlo zcela určit nejlépe obrobenu oblast.

Rovinná plocha E zde dopadla ze všech druhů materiálů nejlépe. Neobsahovala tolik výstupků a ani prohlubní. Opticky však nešlo zcela určit, která oblast pro ni byla nejlepší.

Shrnutí

Celkově nešlo jednoznačně určit, které nastavení řezných podmínek bylo nejvhodnější pro lepší kvalitu povrchu. Více ukázal až box-plotový diagram.

6.8 EDA

Pomocí explorační analýzy dat byly v softwaru Minitab vypočteny a do tabulky zaneseny aritmetické průměry, směrodatné odchylky, výběrové směrodatné odchylky a minimální a maximální hodnoty, které byly naměřeny v každé z částí jednotlivých oblastí.

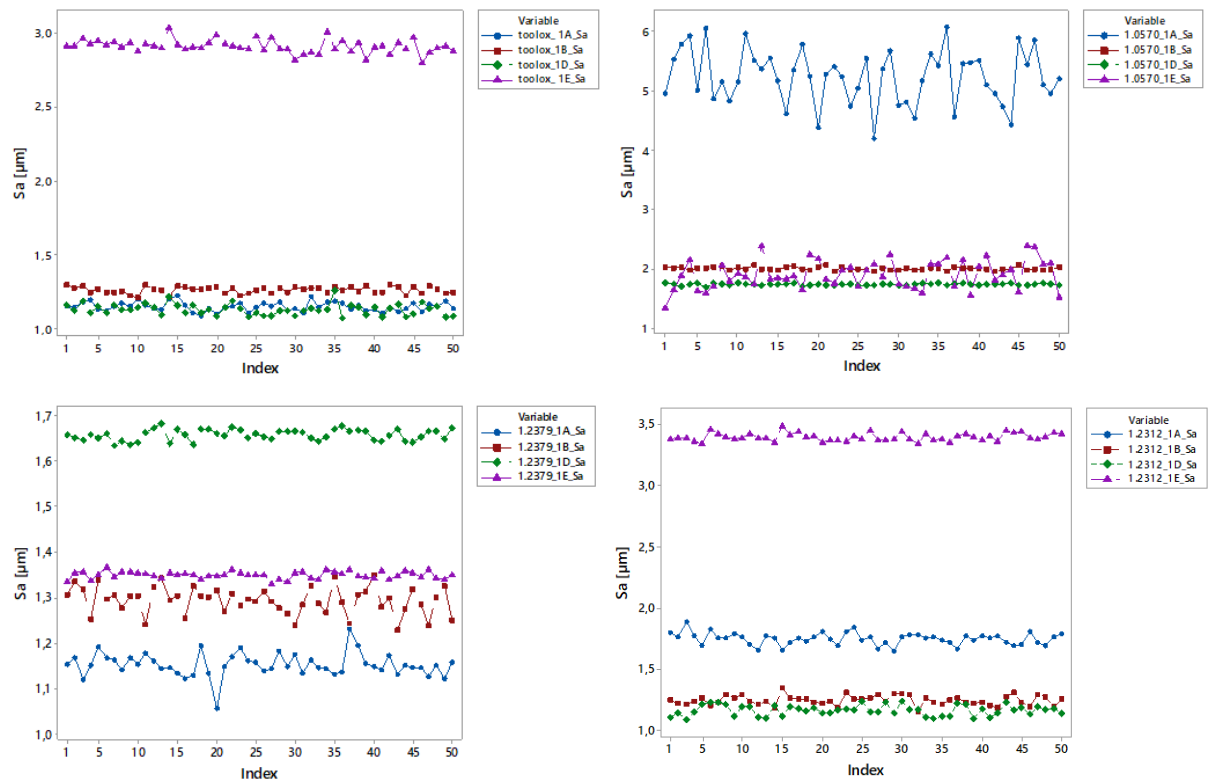
Tab. 7 Hodnoty pro parametr Sa – část 1.

Měřená oblast	\bar{x} [μm]	σ [μm]	s [μm]	x_{min} [μm]	x_{max} [μm]
1.0570 - 1A	5,241	0,0648	0,4585	4,1982	6,0868
1.0570 - 1B	2,0024	0,00406	0,0287	1,946	2,0715
1.0570 - 1D	1,7332	0,00222	0,0157	1,6899	1,7594
1.0570 - 1E	1,9025	0,0347	0,2456	1,3467	2,3873
1.0570 - 2A	2,3782	0,0201	0,1423	2,0691	2,7118
1.0570 - 2B	1,884	0,00329	0,0233	1,8382	1,9375
1.0570 - 2D	1,6202	0,00271	0,0192	1,5698	1,6632
1.0570 - 2E	3,6434	0,00345	0,0244	3,5905	3,7046
1.0570 - 3A	3,1405	0,0351	0,2485	2,5612	3,6463
1.0570 - 3B	2,2543	0,00185	0,0131	2,2266	2,2868
1.0570 - 3D	1,8639	0,00218	0,0154	1,8164	1,8961
1.0570 - 3E	3,6285	0,0348	0,246	3,1257	4,2074
Toolox44 - 1A	1,1494	0,00441	0,0312	1,0837	1,2223
Toolox44 - 1B	1,2613	0,00321	0,0227	1,2072	1,2975
Toolox44 - 1D	1,1291	0,00544	0,0385	1,0719	1,2577
Toolox44 - 1E	2,9109	0,00646	0,0457	2,8	3,0362
Toolox44 - 2A	1,05	0,00673	0,0476	0,9659	1,1496
Toolox44 - 2B	1,32	0,00079	0,00559	1,3095	1,3338
Toolox44 - 2D	1,2026	0,00173	0,0123	1,1679	1,2263
Toolox44 - 2E	3,2949	0,00922	0,0652	3,1447	3,4287
Toolox44 - 3A	1,0499	0,00153	0,0108	1,0249	1,0722
Toolox44 - 3B	1,5244	0,00182	0,0129	1,4914	1,5527
Toolox44 - 3D	1,3407	0,00208	0,0147	1,3045	1,3788
Toolox44 - 3E	2,9104	0,00602	0,0425	2,8116	3,0581

Tab. 8 Hodnoty pro parametr Sa – část 2.

Měřená oblast	\bar{x} [μm]	σ [μm]	s [μm]	x_{min} [μm]	x_{max} [μm]
1.2312 - 1A	1,7467	0,00694	0,049	1,6428	1,8872
1.2312 - 1B	1,2449	0,00555	0,0392	1,1456	1,3457
1.2312 - 1D	1,1609	0,0062	0,0438	1,0872	1,2406
1.2312 - 1E	3,4009	0,00460	0,0325	3,3518	3,4892
1.2312 - 2A	1,1846	0,0034	0,024	1,1344	1,2409
1.2312 - 2B	1,2447	0,00114	0,00803	1,2268	1,26
1.2312 - 2D	1,2117	0,00721	0,0510	1,0950	1,2934
1.2312 - 2E	3,4997	0,0163	0,1154	3,2448	3,7642
1.2312 - 3A	1,1311	0,00505	0,0357	1,0427	1,1918
1.2312 - 3B	1,2948	0,00207	0,0147	1,2622	1,3235
1.2312 - 3D	1,1649	0,00413	0,0292	1,0963	1,2356
1.2312 - 3E	3,3278	0,00721	0,051	3,2172	3,4423
1.2379 - 1A	1,152	0,0037	0,0261	1,055	1,2309
1.2379 - 1B	1,2939	0,00423	0,0299	1,2295	1,3501
1.2379 - 1D	1,6583	0,00174	0,0123	1,6347	1,6847
1.2379 - 1E	1,35	0,00114	0,00808	1,3294	1,366
1.2379 - 2A	1,3692	0,0332	0,2347	0,7517	1,9815
1.2379 - 2B	1,524	0,0015	0,0106	1,502	1,5496
1.2379 - 2D	1,4626	0,017	0,1205	1,1905	1,7253
1.2379 - 2E	1,2764	0,00415	0,0293	1,2299	1,3469
1.2379 - 3A	1,1387	0,0021	0,0148	1,0978	1,1716
1.2379 - 3B	1,5545	0,00151	0,0107	1,53	1,5753
1.2379 - 3D	1,6163	0,00237	0,0168	1,5877	1,6649
1.2379 - 3E	1,195	0,0034	0,024	1,1493	1,2405

6.8.1 Oblast 1

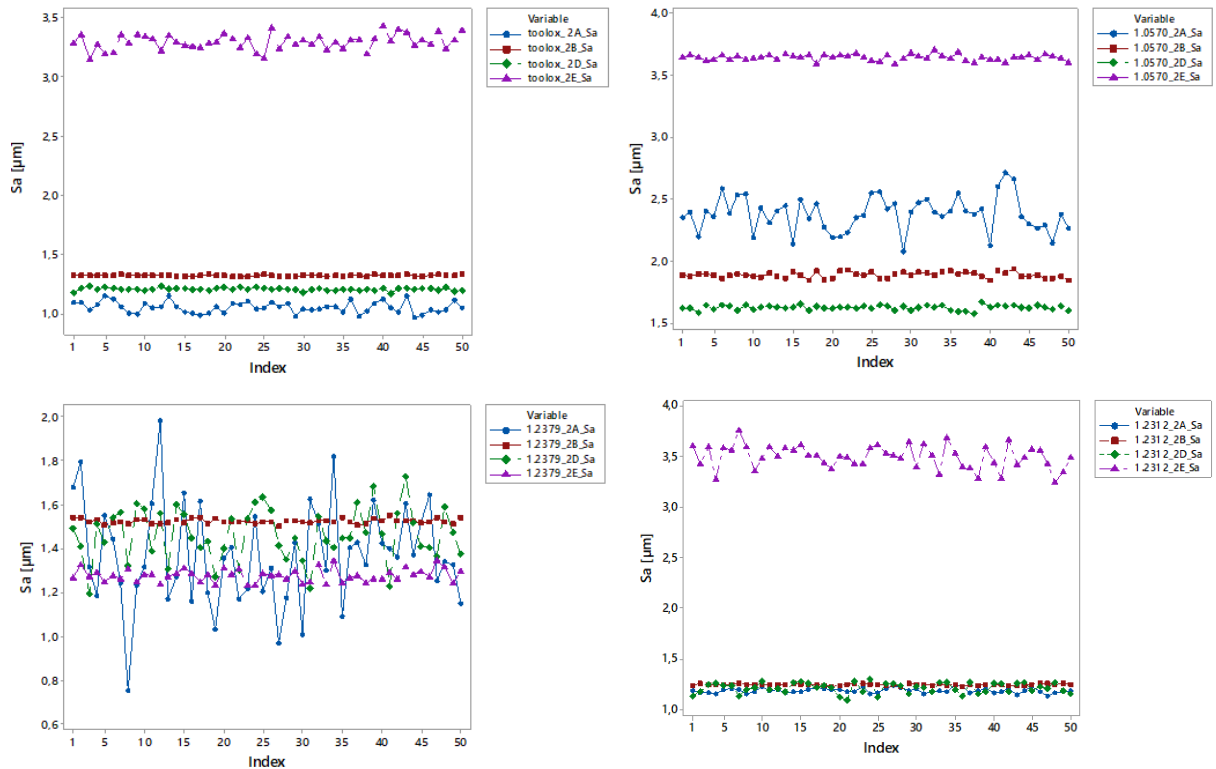


Obr. 40 Oblast 1 pro všechny materiály.

Shrnutí

Pro oblast 1 byla nejhorší kvalita povrchu naměřena na materiálu 1.0570 a to ve všech částech. Nejhuře obrobitelná oblast byla pro nástroj rovinná plocha, tedy část E. Kvalita povrchu v části E byla pro 1.2312, Toolox44, 1.0570 téměř 3x horší než v ostatních částech. Pouze kalený materiál 1.2379 zde dosáhl nejmenších rozdílů pro něj naměřených částí. Pro materiál 1.0570 v částech A, E nebyly tyto podmínky obrábění vhodné, vznikaly vady povrchu, které měly velký rozptyl a vysokou drsnost povrchu v porovnání s ostatními částmi.

6.8.2 Oblast 2

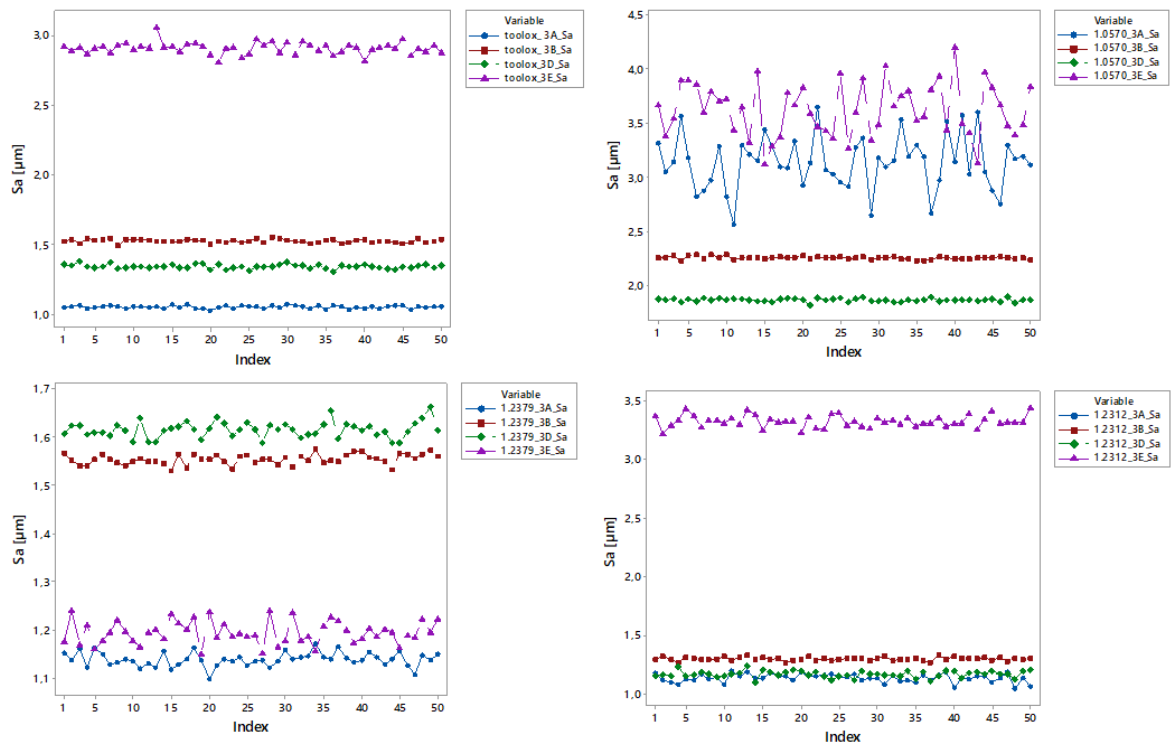


Obr. 41 Oblast 2 pro všechny materiály.

Shrnutí

Pro oblast 2 byla nejhorší kvalita povrchu naměřena na materiálu 1.0570 a to ve všech částech. Pro rovinnou plochu, tedy část E se dosáhlo nejlepšího povrchu na kaleném materiálu 1.2379. Ovšem na ostatních částech tento materiál vykazoval druhý nejhorší výsledek.

6.8.3 Oblast 3



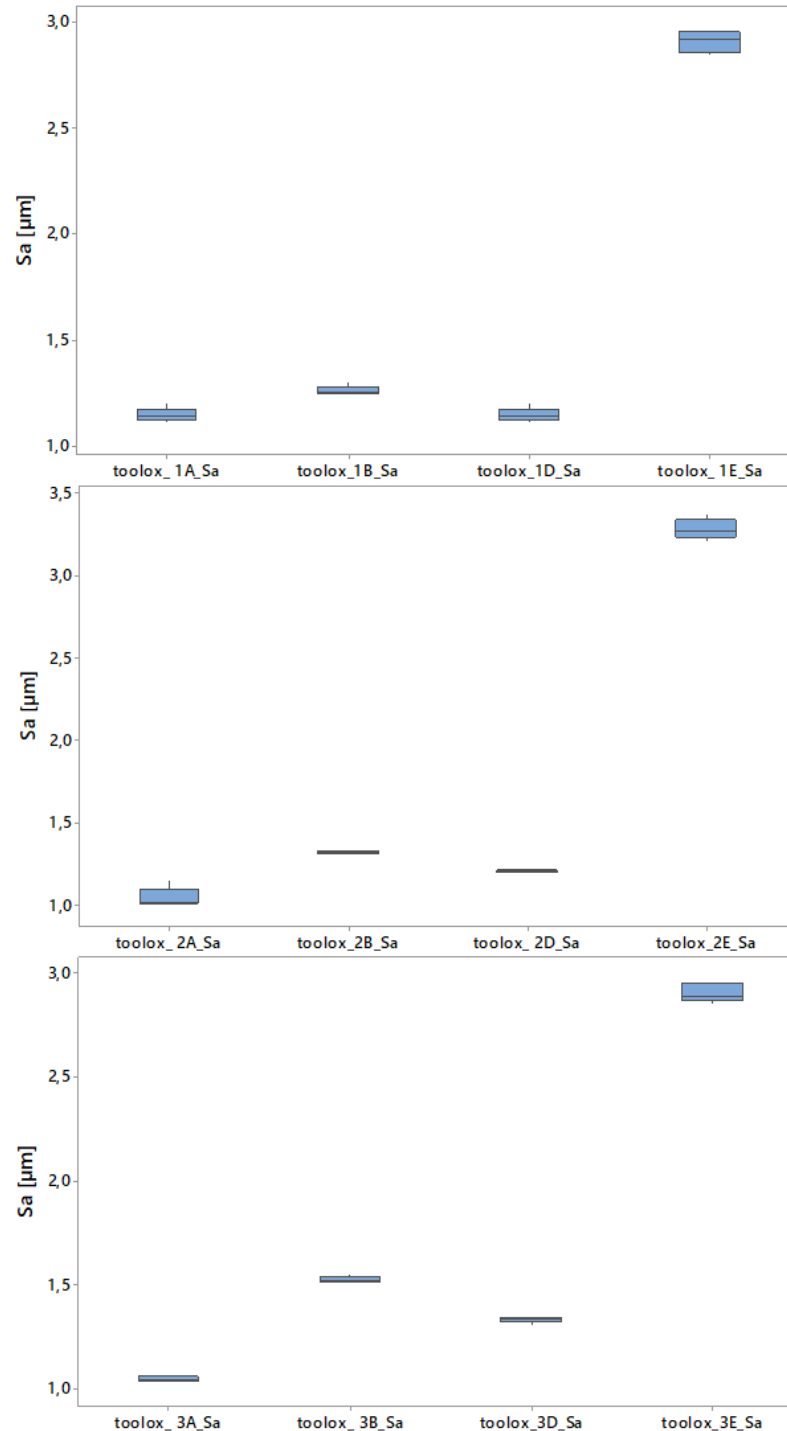
Obr. 42 Oblast 3 pro všechny materiály.

Shrnutí

Pro oblast 3 byla nejhorší kvalita povrchu naměřena na materiálu 1.0570 a to ve všech částech. Pro rovinnou plochu, tedy část E se dosáhlo nejlepšího povrchu na kaleném materiálu 1.2379.

6.9 Statistické vyhodnocení

6.9.1 Ocel Toolox44



Obr. 43 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu Toolox44.

Box-plotovým diagramem bylo prokázáno, že nejhorší kvalita povrchu spolu s největším rozptylem byla naměřena na rovinné ploše v části E. Na ostatních částech (A, B, D) bylo vidět, že rozptyl naměřených dat byl minimální a parametr S_a zde příliš nekolísá.

Pro zjištění, zda rozptyly parametru Sa byly či nebyly stejné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%. Poté byla pomocí Bartlettova testu testována rovnost rozptylu.

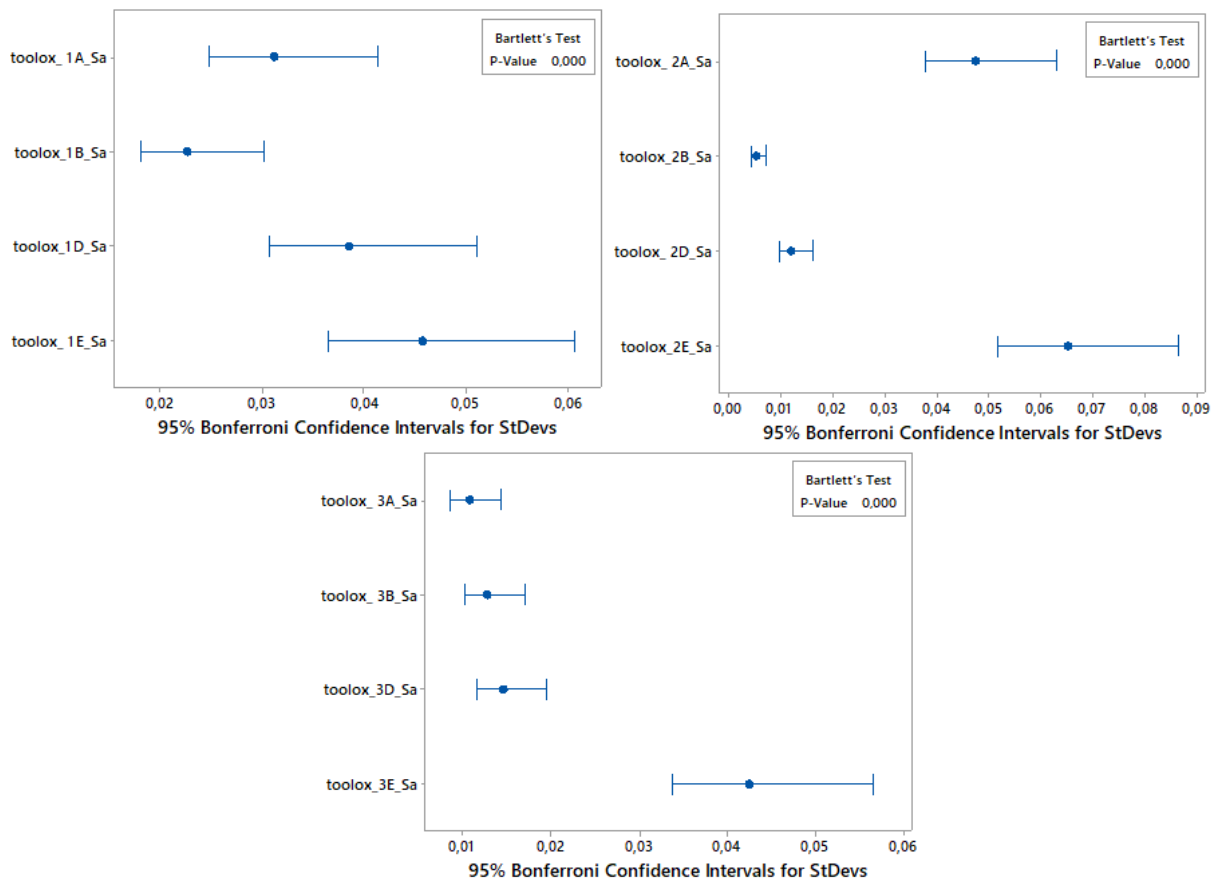
$$H_0: \sigma_{Sa_{1A}}^2 = \sigma_{Sa_{1B}}^2 = \sigma_{Sa_{1D}}^2 = \sigma_{Sa_{1E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{2A}}^2 = \sigma_{Sa_{2B}}^2 = \sigma_{Sa_{2D}}^2 = \sigma_{Sa_{2E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{3A}}^2 = \sigma_{Sa_{3B}}^2 = \sigma_{Sa_{3D}}^2 = \sigma_{Sa_{3E}}^2$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 44 Test rovnosti rozptylů pro všechny oblasti materiálu Toolox44.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti rozptylů byla zamítnuta. Rozptyly parametru Sa u materiálu Toolox44 byly na různých tvarových plochách s 95% pravděpodobností rozdílné. Bylo tedy dokázáno, že každá oblast (1, 2, 3) byla obráběna jinými reznými podmínkami.

Pro zjištění, zda aritmetické průměry parametru Sa byly či nebyly stejné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%.

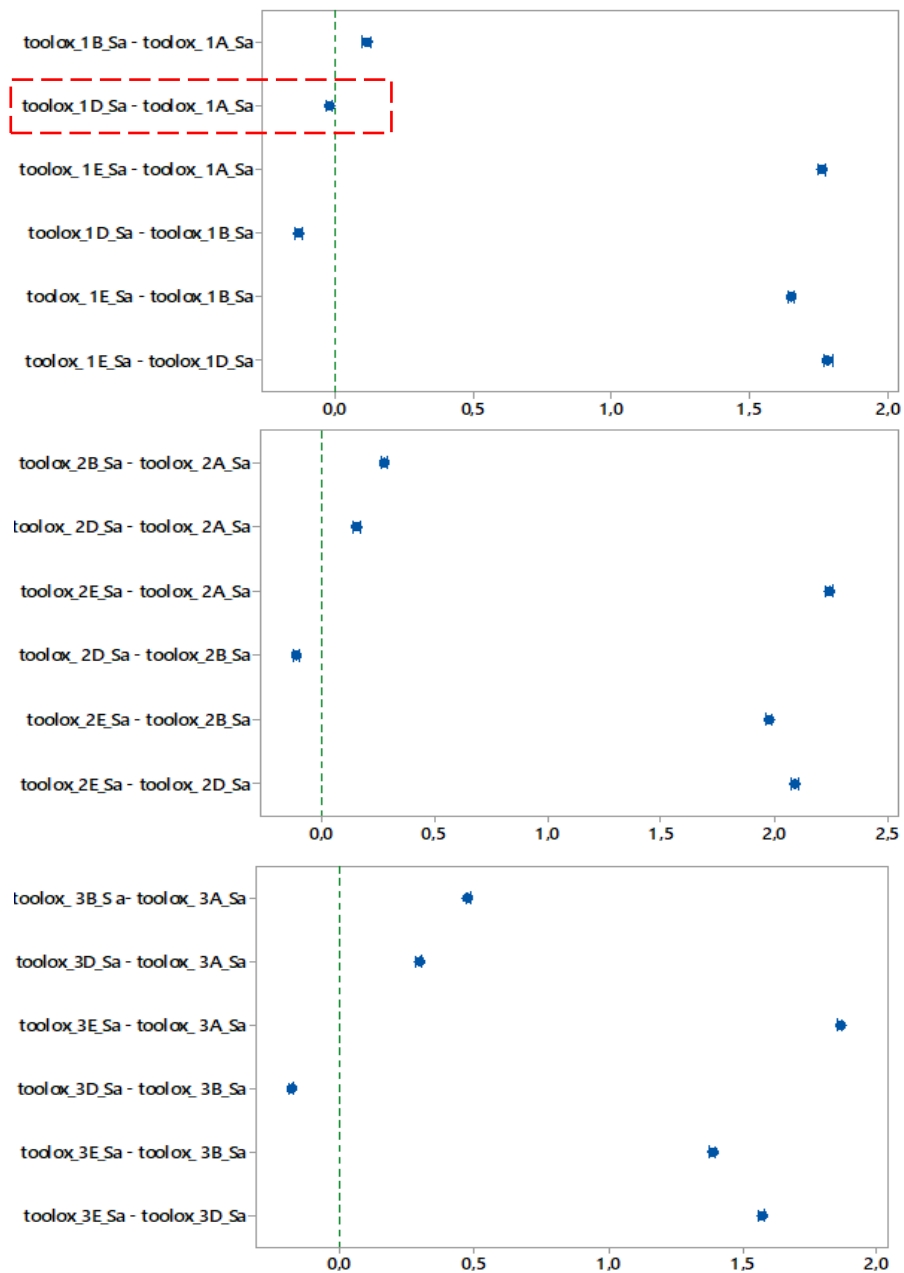
$$H_0: \bar{x}_{Sa_{1A}} = \bar{x}_{Sa_{1B}} = \bar{x}_{Sa_{1D}} = \bar{x}_{Sa_{1E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{2A}} = \bar{x}_{Sa_{2B}} = \bar{x}_{Sa_{2D}} = \bar{x}_{Sa_{2E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{3A}} = \bar{x}_{Sa_{3B}} = \bar{x}_{Sa_{3D}} = \bar{x}_{Sa_{3E}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 45 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu Toolox44.

Oblast 1

Z grafu bylo zjištěno, že aritmetické průměry částí 1A (plocha pod 15° úhlem) a 1D (konvexní plocha) byly statisticky podobné. Tato podobnost byla způsobena vlivem nastavení rychlosti posuvu na 70%.

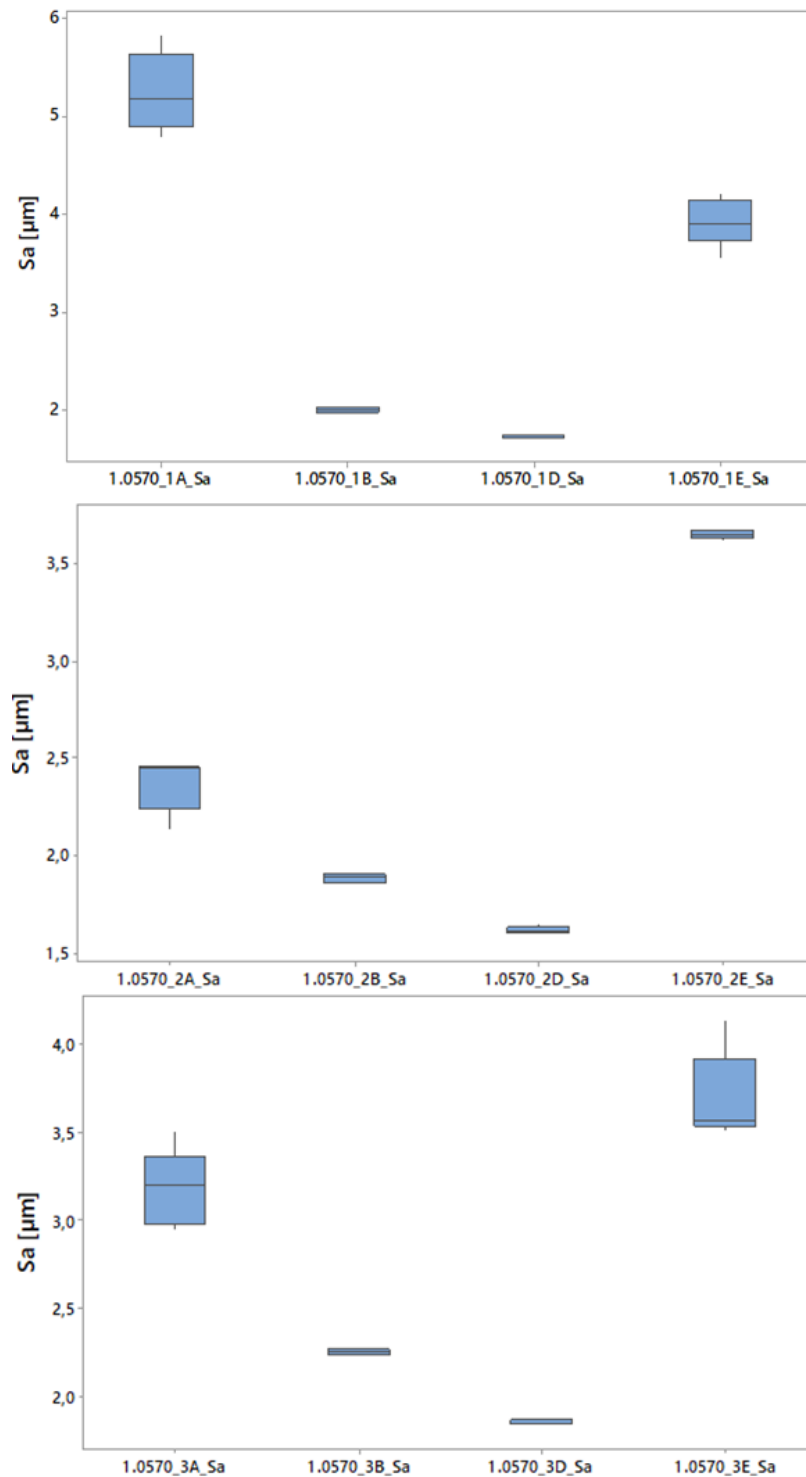
Oblast 2 a 3

Z grafu bylo zjištěno, že aritmetické průměry nebyly statisticky podobné. Nastavení 70%, 100% a 130% rychlosti posuvu nemělo vliv na podobnost.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti aritmetických průměrů byla zamítnuta. Aritmetické průměry parametru Sa u materiálu To-olox44 byly na tvarových plochách s 95% pravděpodobností statisticky významné. Bylo tedy dokázáno, že tvar plochy měl významný vliv na parametr Sa .

6.9.2 Ocel 1.0570



Obr. 46 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu 1.0570.

Box-plotovým diagramem se ukázalo, že největší rozptyl hodnot parametru S_a byl na částech A (plocha s 15° úhlem) a E (rovinná plocha). Části B a D vykazovaly obdobné hodnoty a minimální rozptyly ve všech třech oblastech.

Pro zjištění, zda rozptyly parametru Sa byly či nebyly rozdílné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%. Poté byla pomocí Bartlettova testu testována rovnost rozptylu.

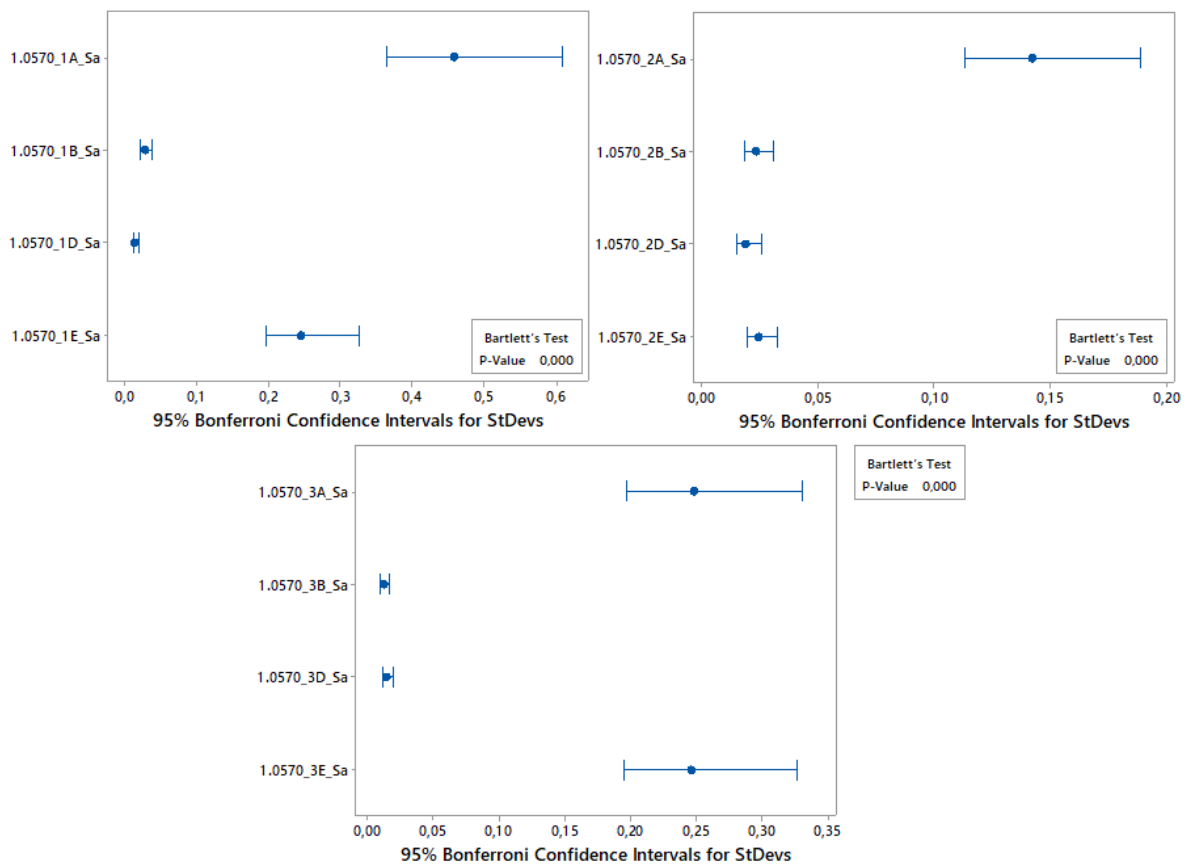
$$H_0: \sigma_{Sa_{1A}}^2 = \sigma_{Sa_{1B}}^2 = \sigma_{Sa_{1D}}^2 = \sigma_{Sa_{1E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{2A}}^2 = \sigma_{Sa_{2B}}^2 = \sigma_{Sa_{2D}}^2 = \sigma_{Sa_{2E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{3A}}^2 = \sigma_{Sa_{3B}}^2 = \sigma_{Sa_{3D}}^2 = \sigma_{Sa_{3E}}^2$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 47 Test rovnosti rozptylu pro všechny oblasti materiálu 1.0570.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti rozptylů byla zamítnuta. Rozptyly parametru Sa u materiálu 1.0570 byly na různých tvarových plochách s 95% pravděpodobností rozdílné.

Pro zjištění, zda aritmetické průměry parametru Sa byly či nebyly stejné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%.

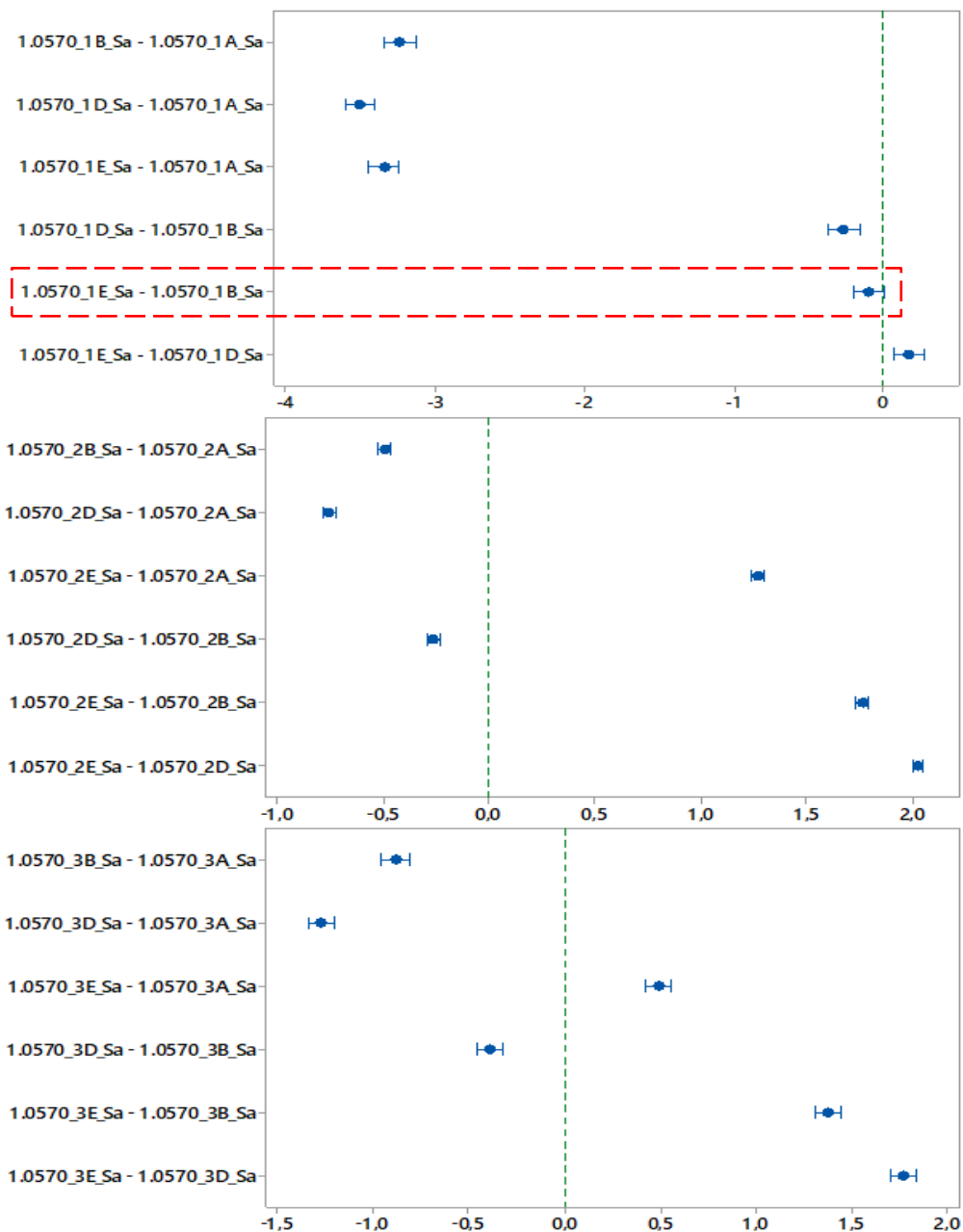
$$H_0: \bar{x}_{Sa_{1A}} = \bar{x}_{Sa_{1B}} = \bar{x}_{Sa_{1D}} = \bar{x}_{Sa_{1E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{2A}} = \bar{x}_{Sa_{2B}} = \bar{x}_{Sa_{2D}} = \bar{x}_{Sa_{2E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{3A}} = \bar{x}_{Sa_{3B}} = \bar{x}_{Sa_{3D}} = \bar{x}_{Sa_{3E}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 48 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu 1.0570.

Oblast 1

Z grafu bylo zjištěno, že aritmetické průměry částí 1B (konkávní plocha) a 1E (rovinná plocha) byly statisticky podobné. Tato podobnost byla způsobena vlivem nastavení rychlosti posuvu na 70%.

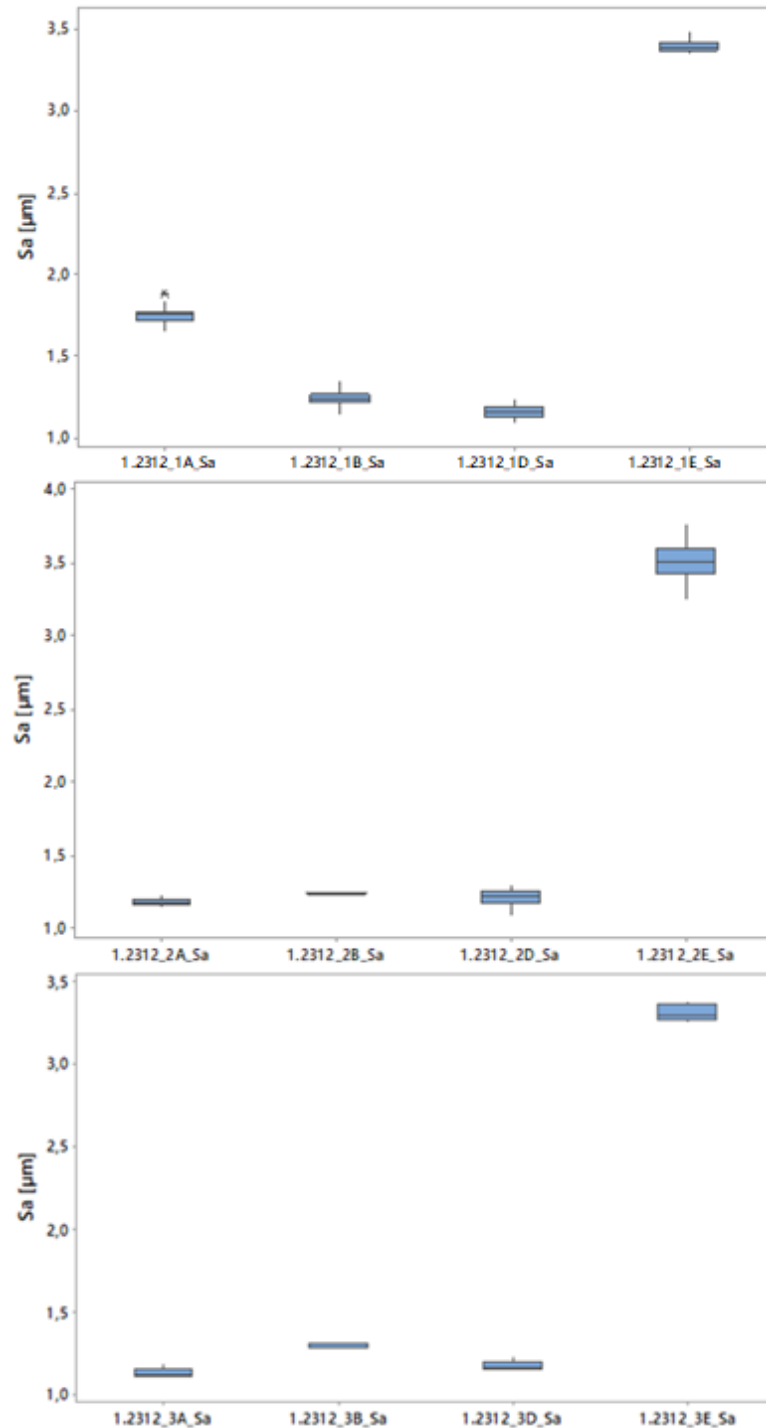
Oblast 2 a 3

Z grafu bylo zjištěno, že aritmetické průměry nebyly statisticky podobné. Nastavení 70%, 100% a 130% rychlosti posuvu nemělo vliv na podobnost.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti aritmetických průměrů byla zamítnuta. Aritmetické průměry parametru Sa u materiálu 1.0570 byly na tvarových plochách s 95% pravděpodobností statisticky významné. Bylo tedy dokázáno, že tvar plochy má významný vliv na parametr Sa .

6.9.3 Ocel 1.2312



Obr. 49 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu 1.2312.

Box-plotovým diagramem bylo prokázáno, že nejhorší kvalita povrchu spolu s největším rozptylem byla naměřena na rovinné ploše E. Nástroj v části 2E kvůli 130% rychlosti posuvu vibroval nejvíce a proto zde parametr S_a kolísal nejvíce. Na ostatních částech (A, B, D) bylo vidět, že rozptyl naměřených dat byl minimální a parametr S_a zde příliš nekolísal.

Pro zjištění, zda rozptyly parametru Sa byly či nebyly rozdílné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%. Poté byla pomocí Bartlettova testu testována rovnost rozptylu.

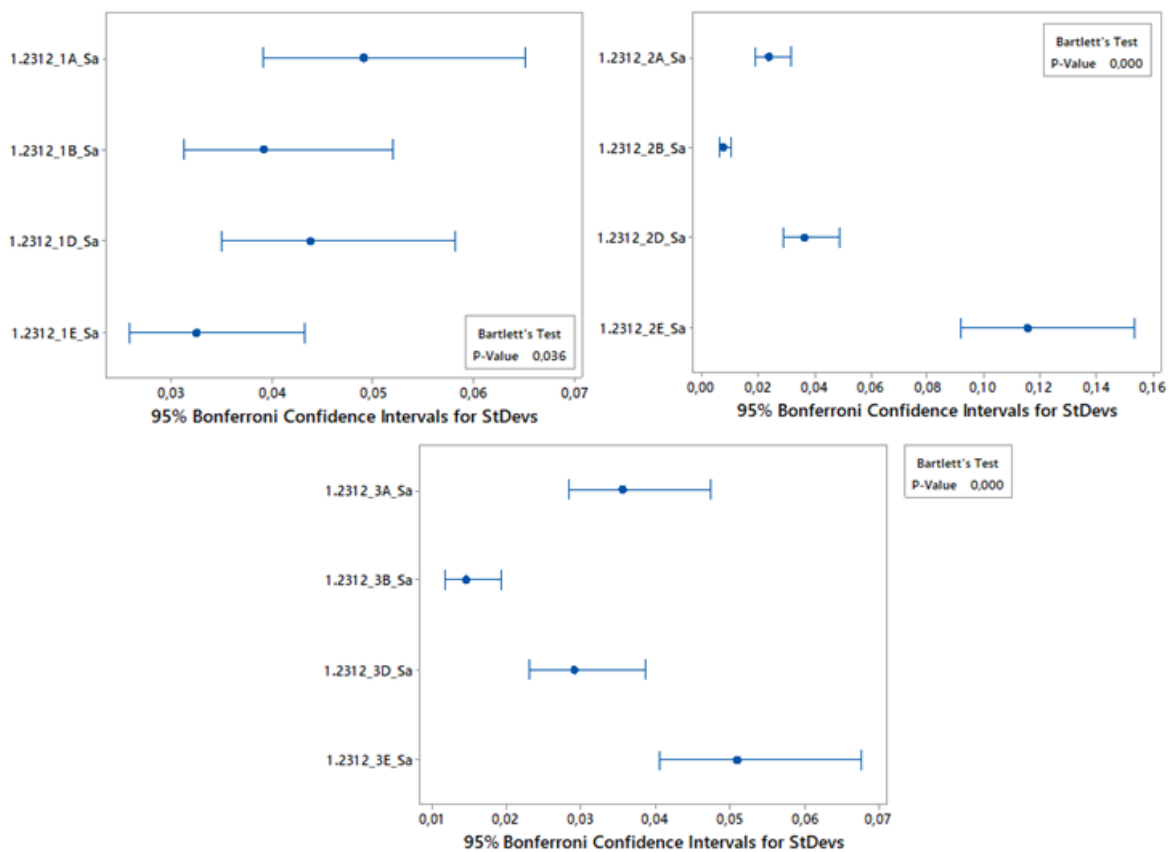
$$H_0: \sigma_{Sa_{1A}}^2 = \sigma_{Sa_{1B}}^2 = \sigma_{Sa_{1D}}^2 = \sigma_{Sa_{1E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{2A}}^2 = \sigma_{Sa_{2B}}^2 = \sigma_{Sa_{2D}}^2 = \sigma_{Sa_{2E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{3A}}^2 = \sigma_{Sa_{3B}}^2 = \sigma_{Sa_{3D}}^2 = \sigma_{Sa_{3E}}^2$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 50 Test rovnosti rozptylu pro všechny oblasti materiálu 1.2312.

$$P = 0,036 < \alpha = 0,05$$

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti rozptylů byla zamítnuta. Rozptyly parametru Sa u materiálu 1.2312 byly na různých tvarových plochách s 95% pravděpodobností rozdílné. Bylo tedy dokázáno, že každá oblast (1, 2, 3) byla obráběna jinými reznými podmínkami.

Pro zjištění, zda aritmetické průměry parametru Sa byly či nebyly stejné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%.

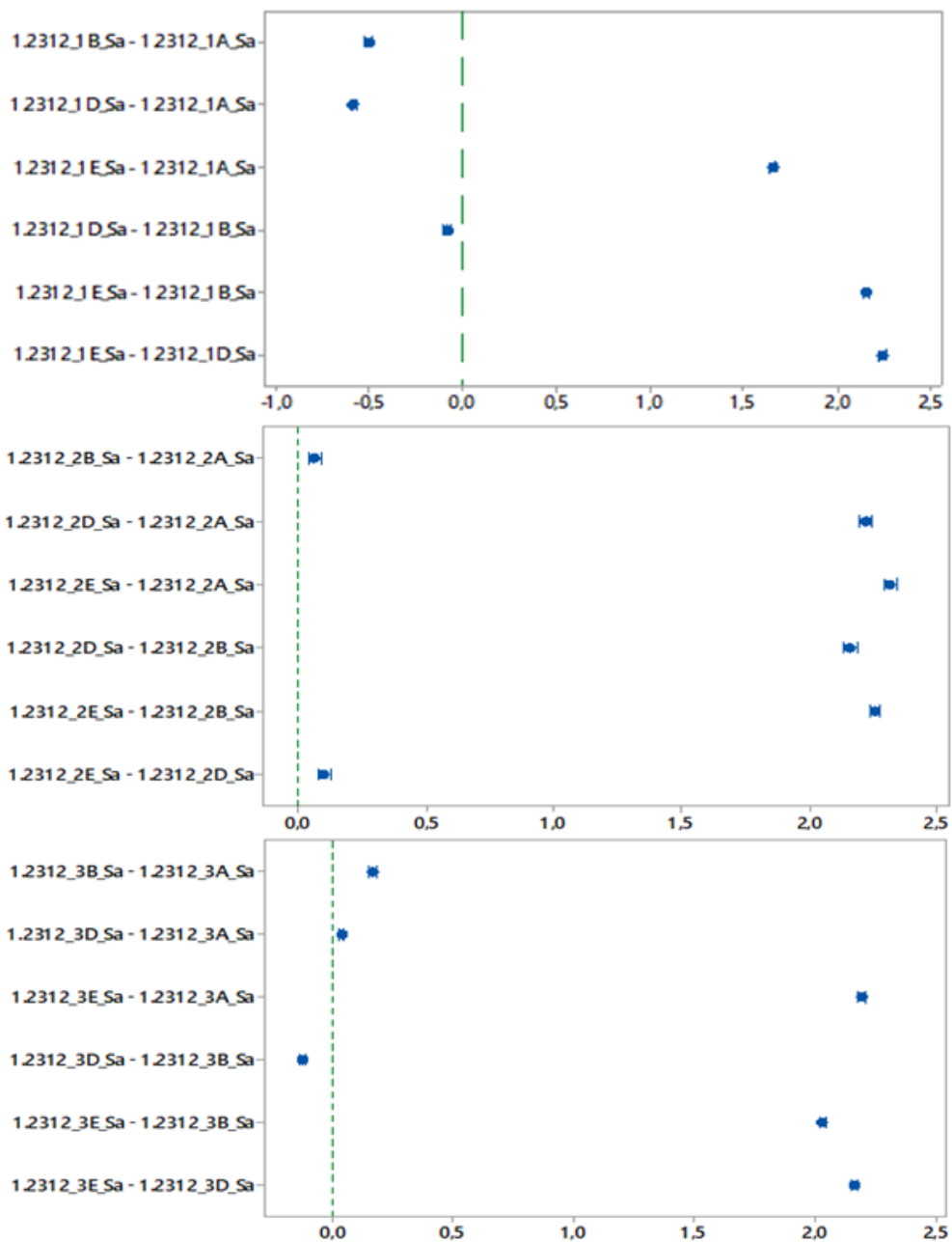
$$H_0: \bar{x}_{Sa_{1A}} = \bar{x}_{Sa_{1B}} = \bar{x}_{Sa_{1D}} = \bar{x}_{Sa_{1E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{2A}} = \bar{x}_{Sa_{2B}} = \bar{x}_{Sa_{2D}} = \bar{x}_{Sa_{2E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{3A}} = \bar{x}_{Sa_{3B}} = \bar{x}_{Sa_{3D}} = \bar{x}_{Sa_{3E}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 51 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu 1.2312.

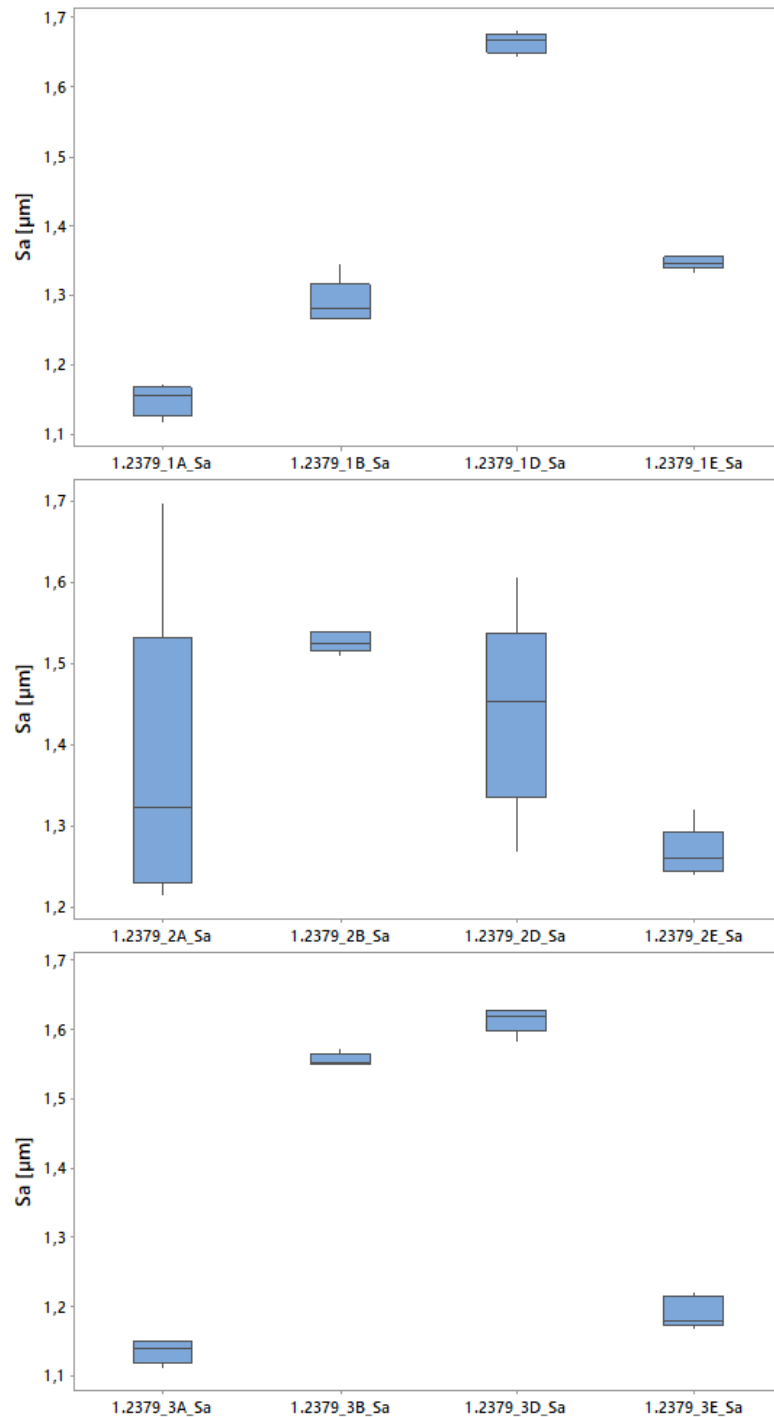
Oblast 1, 2, 3

Z grafu bylo zjištěno, že aritmetické průměry si nebyly statisticky podobné. Nastavení 70%, 100% a 130% rychlosti posuvu nemělo vliv na podobnost.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti aritmetických průměrů byla zamítnuta. Aritmetické průměry parametru Sa u materiálu 1.0570 byly na tvarových plochách s 95% pravděpodobností statisticky významné. Bylo tedy dokázáno, že tvar plochy má významný vliv na parametr Sa .

6.9.4 Ocel 1.2379



Obr. 52 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu 1.2379.

Box-plotový diagram ukázal, že největší rozptyl hodnot parametru Sa byl v oblasti 2, tedy v místě, kde rychlost posuvu byla nastavena na 130%. Příliš vysoká rychlost zapříčinila větší vibrace nástroje a tím i větší rozkolísání parametru Sa . Ostatní oblasti dopadly lépe, díky nižší rychlosti posuvu byly vibrace nástroje menší a tím pádem i rozptyly. Optickým porovnáním grafu bylo usouzeno, že oblast 1 dopadla nejlépe.

Pro zjištění, zda rozptyly parametru Sa byly či nebyly rozdílné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%. Poté byla pomocí Bartlettova testu testována rovnost rozptylu.

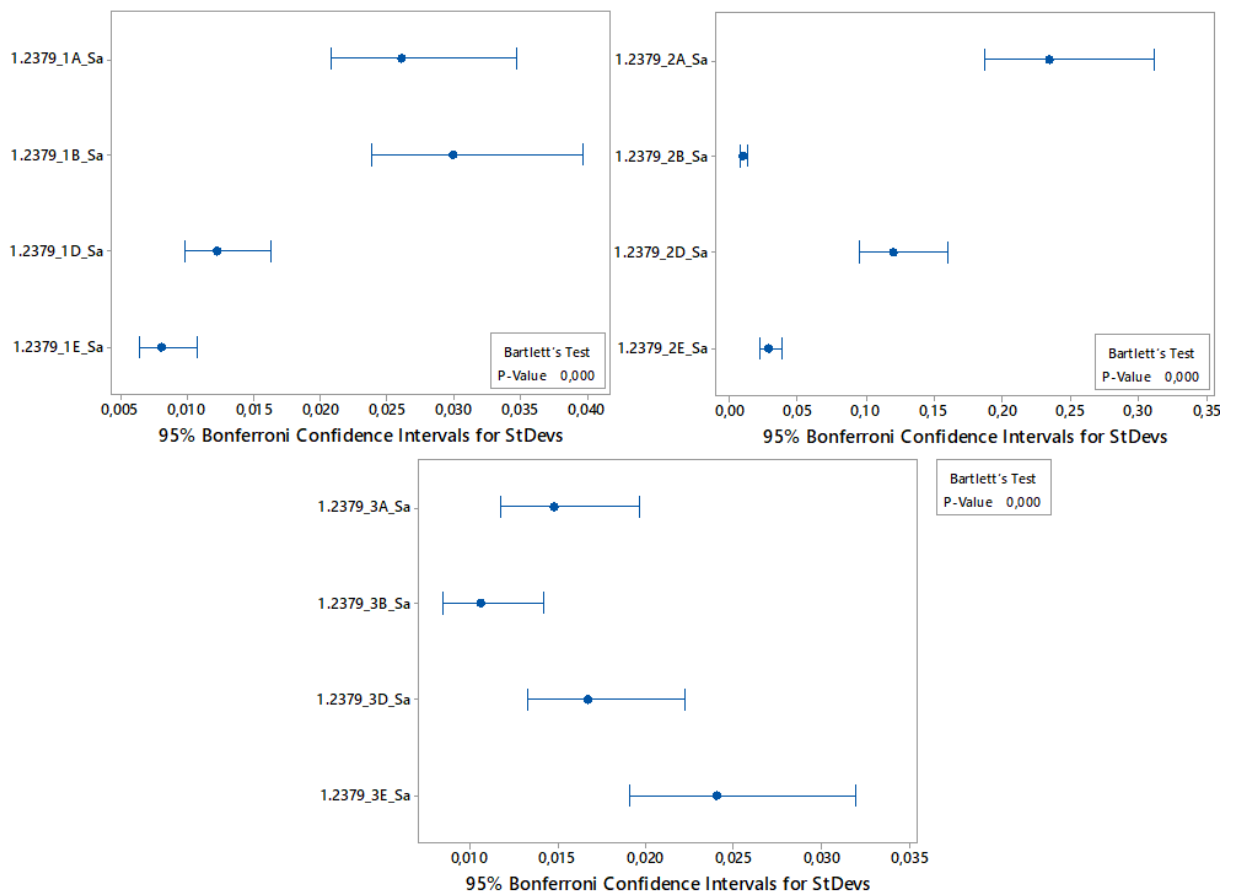
$$H_0: \sigma_{Sa_{1A}}^2 = \sigma_{Sa_{1B}}^2 = \sigma_{Sa_{1D}}^2 = \sigma_{Sa_{1E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{2A}}^2 = \sigma_{Sa_{2B}}^2 = \sigma_{Sa_{2D}}^2 = \sigma_{Sa_{2E}}^2$$

$$H_0: \sigma_{Sa_{3A}}^2 = \sigma_{Sa_{3B}}^2 = \sigma_{Sa_{3D}}^2 = \sigma_{Sa_{3E}}^2$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 53 Test rovnosti rozptylu pro všechny oblasti materiálu 1.2379.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti rozptylů byla zamítnuta. Rozptyly parametru Sa u materiálu 1.2379 byly na tvarových plochách s 95% pravděpodobností rozdílné.

Pro zjištění, zda aritmetické průměry parametru Sa byly či nebyly stejné, jsme stanovili nulovou hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_A s konfidenční úrovní 95%.

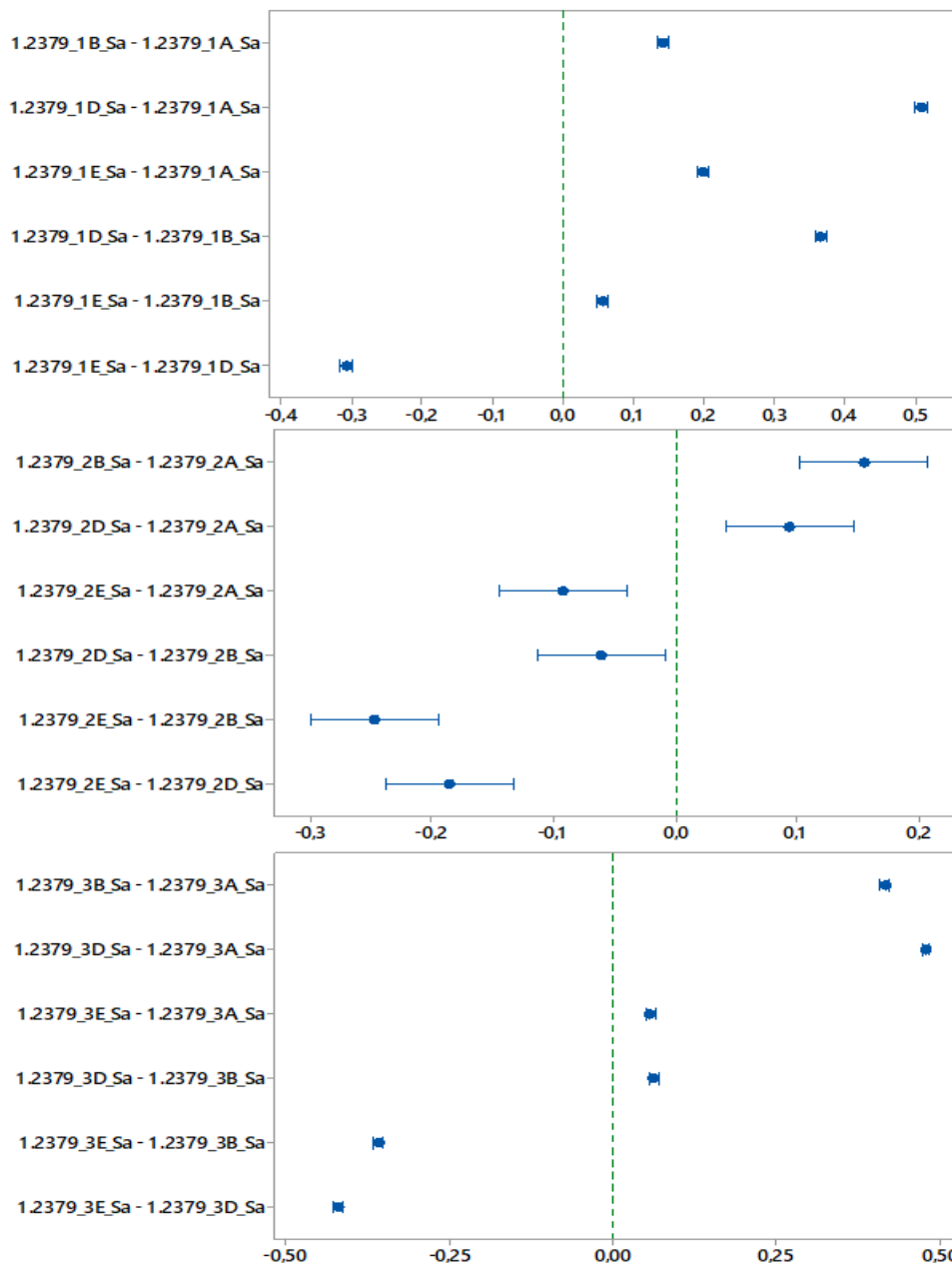
$$H_0: \bar{x}_{Sa_{1A}} = \bar{x}_{Sa_{1B}} = \bar{x}_{Sa_{1D}} = \bar{x}_{Sa_{1E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{2A}} = \bar{x}_{Sa_{2B}} = \bar{x}_{Sa_{2D}} = \bar{x}_{Sa_{2E}}$$

$$H_0: \bar{x}_{Sa_{3A}} = \bar{x}_{Sa_{3B}} = \bar{x}_{Sa_{3D}} = \bar{x}_{Sa_{3E}}$$

$$H_A: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$



Obr. 54 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu 1.2379.

Oblast 1, 2, 3

Z grafu bylo zjištěno, že aritmetické průměry si nebyly statisticky podobné. Nastavení 70%, 100% a 130% rychlosti posuvu nemělo vliv na podobnost.

$$P = 0,000 < \alpha = 0,05$$

Protože P hodnota byla menší než α bylo konstatováno, že nulová hypotéza o rovnosti aritmetických průměrů byla zamítnuta. Aritmetické průměry parametru Sa u materiálu 1.2379 byly na tvarových plochách s 95% pravděpodobností statisticky významné. Bylo tedy dokázáno, že tvar plochy má významný vliv na parametr Sa .

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Ocel Toolox44

Nulové hypotézy o rovnosti rozptylu parametru Sa byly zamítnuty. Tím bylo potvrzeno, že s 95% pravděpodobností byly oblasti 1, 2, 3 obráběny jinými reznými podmínkami.

Dále nulové hypotézy o rovnosti aritmetických průměrů parametru Sa byly také zamítnuty. Tímto zase bylo s 95% pravděpodobností prokázáno, že tvar plochy měl významný vliv na parametr Sa .

U oblasti 1 bylo z grafu zjištěno, že aritmetické průměry částí 1A (plocha pod 15° úhlem) a 1D (konvexní plocha) byly statisticky podobné. Tato podobnost byla způsobena vlivem nastavení rychlosti posuvu na 70%. U oblasti 2 a 3 bylo z grafu zjištěno, že aritmetické průměry nebyly statisticky podobné. Nastavení 70%, 100% a 130% rychlosti posuvu nemělo vliv na tuto podobnost.

U materiálu bylo prokázáno, že nejhorší kvalita povrchu spolu s největším rozptylem byla naměřena na rovinné ploše v části E. Na ostatních částech (A, B, D) bylo vidět, že rozptyl naměřených dat byl minimální a parametr Sa zde příliš nekolísá.

Optickým porovnáním všech tří oblastí bylo usouzeno, že pro tento typ plochy by z pohledu kvality povrchu nejméně vyhovovalo nastavení rychlosti posuvu na 130%, tj. oblast 2. Obrobená oblast 1 s nastavením 70% rychlosti posuvu vytvářela menší vibrace, a proto neobsahovala tolik výstupků jako v ostatních oblastech, ačkoliv byly rozdíly minimální, pro lepší kvalitu povrchu vyšla oblast 1 lépe než oblast 3.

Ocel 1.0570

Nulové hypotézy o rovnosti rozptylu parametru Sa byly zamítnuty. Tím bylo potvrzeno, že s 95% pravděpodobností byly oblasti 1, 2, 3 obráběny jinými reznými podmínkami.

Dále nulové hypotézy o rovnosti aritmetických průměrů parametru Sa byly také zamítnuty. Tímto zase bylo s 95% pravděpodobností prokázáno, že tvar plochy měl významný vliv na parametr Sa .

V oblasti 1 bylo z grafu zjištěno, že aritmetické průměry částí 1B (konkávní plocha) a 1E (rovinná plocha) byly statisticky podobné. Tato podobnost byla způsobena vlivem nastavení rychlosti posuvu na 70%. U oblasti 2 a 3 bylo z grafu zjištěno, že aritmetické průměry

nebyly statisticky podobné. Nastavení 70%, 100% a 130% rychlosti posuvu nemělo vliv na podobnost.

Box-plotovým diagramem se ukázalo, že největší rozptyl hodnot parametru Sa byl na částech A (plocha s 15° úhlem) a E (rovinná plocha). Části B a D vykazovaly obdobné hodnoty a minimální rozptyly ve všech třech oblastech.

Konečným porovnáním všech tří oblastí materiálu 1.0570 bylo usouzeno, že pro danou tvarovou plochu by z pohledu kvality povrchu nejvíce vyhovovalo nastavení rychlosti posuvu pro oblast 2. Tedy vyšší rychlost posuvu než je doporučovaná výrobcem nástroje.

Ocel 1.2312

Nulové hypotézy o rovnosti rozptylu parametru Sa byly zamítnuty. Tím bylo potvrzeno, že s 95% pravděpodobností byly oblasti 1, 2, 3 obráběny jinými řeznými podmínkami.

Dále nulové hypotézy o rovnosti aritmetických průměrů parametru Sa byly také zamítnuty. Tímto zase bylo s 95% pravděpodobností prokázáno, že tvar plochy měl významný vliv na parametr Sa .

Box-plotovým diagramem bylo prokázáno, že nejhorší kvalita povrchu spolu s největším rozptylem byla naměřena na rovinné ploše E. Nástroj v části 2E kvůli vysoké rychlosti posuvu vibroval nejvíce a proto zde parametr Sa kolísal také nejvíce. Na ostatních částech (A, B, D) bylo vidět, že rozptyl naměřených dat byl minimální a parametr Sa zde příliš nekolísal.

Konečným porovnáním všech tří oblastí materiálu 1.2312 bylo usouzeno, že pro danou tvarovou plochu by z pohledu kvality povrchu nejvíce vyhovovalo nastavení rychlosti posuvu pro oblast 3. Tedy rychlost posuvu doporučovaná výrobcem nástroje.

Ocel 1.2379

Nulové hypotézy o rovnosti rozptylu parametru Sa byly zamítnuty. Tím bylo potvrzeno, že s 95% pravděpodobností byly oblasti 1, 2, 3 obráběny jinými řeznými podmínkami.

Dále nulové hypotézy o rovnosti aritmetických průměrů parametru Sa byly také zamítnuty. Tímto zase bylo s 95% pravděpodobností prokázáno, že tvar plochy měl významný vliv na parametr Sa .

Box-plotový diagram ukázal, že největší rozptyl hodnot parametru Sa byl v oblasti 2, tedy v místě, kde rychlost posuvu byla nastavena na 130%. Příliš vysoká rychlost zapříčinila

větší vibrace nástroje a tím i větší rozkolísání parametru Sa . Ostatní oblasti dopadly lépe, díky nižší rychlosti posuvu byly vibrace nástroje menší a tím pádem i rozptyly. Optickým porovnáním grafu bylo usouzeno, že oblast 1 dopadla nejlépe.

Konečným porovnáním všech tří oblastí materiálu 1.2379 bylo usouzeno, že pro danou tvarovou plochu by z pohledu kvality povrchu nejvíce vyhovovalo nastavení rychlosti posuvu pro oblast 1. Tedy nižší rychlost než byla doporučovaná výrobcem nástroje.

Shrnutí:

Nejlepší kvalita povrchu z pohledu rychlosti posuvu nástroje byla naměřena pro ocel Toolox44 v oblasti 1 (rychlost posuvu snižená o 30 %), pro ocel 1.0570 v oblasti 2 (rychlost posuvu zvýšená o 30 %), ocel 1.2312 v oblasti 3 (rychlost posuvu doporučená výrobcem) a ocel 1.2379 v oblasti 1 (rychlost posuvu snižená o 30 %).

Nejlepší kvalita povrchu z pohledu zvoleného materiálu byla naměřena na oceli Toolox44, dále na oceli 1.2379, poté na oceli 1.2312. Nejhorší kvalita povrchu byla naměřena na oceli 1.0570.

Z těchto výsledků bylo možno konstatovat, že tvrdost materiálu hrála důležitou roli při obrábění.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit kvalitu povrchu získaného pomocí obráběcí technologie HSC. Teoretická část práce rozebírala tři stěžejní normy pro hodnocení 2D a 3D povrchu. Dále také popisovala typy měřících zařízení pro analýzy jakosti povrchu a základy frézování. V poslední části byly popsány základní statistické metody.

Posléze už bylo přistoupeno k samotnému experimentu. Z vybraných ocelí, kterými byly 1.0570, 1.2312, Toolox44, 1.2379 se navrhly a vyrobily zkušební díly. Obrábění proběhlo na CNC frézce Mikron HSM 800, která disponovala vysokorychlostním vřetenem. Bylo tak umožněno dosáhnout vysokých otáček a rychlostí nástroje a obrábět HSC technologií. K obrobění daného tvaru byla použita kulová fréza ze slinutých karbidů o průměru 12 mm s rádiusem 6 mm. Tato fréza byla specializovaná na HSC obrábění a tvrdé materiály. Obráběná 3D plocha byla pomyslně rozdělena na tři stejné oblasti a v každé z těchto oblastí se měnila rychlost posuvu v_f . Oblast 1 byla obráběna se snížením rychlosti posuvu o 30% od doporučených hodnot uvedené výrobcem nástroje, naopak oblast 2 byla obráběna se zvýšením rychlosti posuvu o 30%. Oblast 3 byla obráběna doporučenou rychlostí posuvu. Takto byly obroběny všechny čtyři zkušební díly.

Po výrobě dílů následovalo měření parametru Sa na měřícím zařízení Zygo Ametek. Každá měřená oblast zde byla ještě rozdělena na menší měřící úseky (části), tyto úseky byly měřeny na ploše o rozměrech 3x3 mm. Měřila se plocha pod úhlem 15° (část A), konkávní část rádiusu (část B), konvexní část rádiusu (část D) a rovinná plocha (část E). Každá část byla změřena 50x. Jednalo se o naměření dvanácti úseků na jednom druhu materiálu. Celkově tedy ze 48 měřených částí bylo naměřeno 2400 hodnot.

Po dokončení měření přišlo na řadu statistické vyhodnocení. Explorační analýza dat (EDA) ukázala základní statistickou charakteristiku jednotlivých částí parametru Sa , jako byl aritmetický průměr, směrodatná odchylka atd. Poté byly graficky vyhodnoceny jednotlivé oblasti. Už z těchto grafů bylo možné opticky odvodit, že nejhůře obrobitelný materiál byl 1.0570 a naopak nejlépe obrobitelný byl materiál Toolox44. Potvrdilo se tedy, že použitý nástroj, který byl specializován na obrábění tvrdých materiálů, byl nevhodný pro materiály měkké. Dále bylo také možné odvodit, že rovinná plocha (část E) byla pro všechny materiály nejhůře obrobitelnou částí. Špička kulové frézy, která obráběla tuto rovinu, totiž zde dosahovala téměř nulové řezné rychlosti a materiál zde byl spíše tlačěn před sebe než odřezáván. Na konkávních a konvexních rádiusech (části B a D) se u všech materiálů projevilo

tzv. skákání nástrojem. To bylo z největší pravděpodobnosti zapříčiněno CAM softwarem, který generoval CNC kód. Daný tvar křivky, po které jel nástroj, byl vygenerován lineární interpolací. Software tímto zjednodušil výpočet a také počet řádků CNC kódu. Toto opatření bylo z důvodu, že by nadměrné množství bodů a tedy vyšší počet řádků CNC kódu totiž mohlo způsobit, že by si CNC stroj nedokázal zachovat vysokou a hlavně konstantní rychlost posuvu v místech, kde se obrábělo ve více osách zároveň.

Pro každý materiál zvlášť byl vytvořen box-plotový diagram, test rovnosti rozptylů a analýza rozptylu aritmetických průměrů. Díky zamítnutým nulovým hypotézám bylo potvrzeno, že jednotlivé oblasti byly opravdu obrobena vždy s jiným nastavením rychlosti posuvu a že parametr Sa na nich závisel.

Závěrečné vyřčené výsledky této diplomové práce hodnotily pouze a jenom výstupní kvalitu měřeného povrchu po HSC obrábění z pohledu nastavení rychlosti posuvu a z pohledu vybraného druhu materiálu. Tyto výsledky nezahrnovaly hospodárnost obrábění jako např. časové úspory, trvanlivost nebo typ nástroje dle tvrdosti materiálu. Proto by v technické praxi nemusela být volba těchto ocelí při uvedených testovaných posuvových rychlostech vždy vhodná.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu* 1999. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [3] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [4] PATA, Vladimír. *Metrologie pro inženýry jakosti*. Přednášky 2016
- [5] KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80–214–1996–2.
- [6] MRÁZ, P., TALÁCKO, J. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. 1. vyd. PRAHA: Nakladatelství ČVUT, 2006. 226 s. ISBN 80–01–03540–9.
- [7] MIKRON AG. *Návod k obsluze rychloběžného stroje HSM 600/HSM 800*. Nidau, 2001.
- [8] ČEP, R. *Technologie II - 1. díl* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf>
- [9] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie* [online]. Ostrava, 2004. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <<http://www.fs.vsb.cz/books/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>>
- [10] BRYCHTA, J. a kol. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. 256Ss. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [11] JIANG, XIANG and WHITEHOUSE, D. J. *Technological shifts in surface metrology*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61 (2).pp. 815-836. 2012. ISSN 0007-8506.
- [12] JURENA, Pavel. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem: laserový snímač*. Zlín, 2011.
- [13] EVANS, C. J., BRYAN, J. A.: Structured textured or engineered surfaces, *Annals of CIRP*, 1999, Vol. 48/2, 541-556
- [14] MELOUN, Milan a Jiří MILITSKÝ. *Interaktivní statistická analýza dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 9788024621739.
- [15] *ANOVA* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>
- [16] BUMBÁLEK, L. a kol. *Kontrola a měření*. Praha: Informatorium, spol., 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.

- [17] HLUCHÝ, M. a kol. *Strojírenská technologie*. První vydání., SNTL Praha 1979
- [18] ŠTUPLA M., 2006: *CNC obráběcí stroje*. 1. vydání, Praha: BEN, 128 s., ISBN 80-7300-2027-8
- [19] KUBIŠOVÁ, Milena, Vladimír PATA, Libuše SÝKOROVÁ a Jana KNEDLOVÁ, 2017. *Influence of laser beam on polymer material. Manufacturing Technology*. Univerzita J. E. Purkyne, 17(5), 742-746. ISSN 12132489. (article)
- [20] TRČKA, Vojtěch. *Aplikace CAD/CAM softwaru Edgecam při obrábění*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Ústav strojírenské technologie v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [21] KUBIŠOVÁ, Milena. *Hodnocení jakosti povrchu polymerních dílu nenormativním způsobem*. Zlín, 2018. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	Střední aritmetická drsnost
Rmr	Materiálový poměr profilu
Rp	Největší výška výstupku profilu
Rq	střední kvadratická úchylka profilu
Rt	celková výška profilu
Rv	největší hloubka prohlubně profilu
Rz	největší výška profilu
Sa	aritmetický průměr výšky omezené stupnice
Sq	základ průměrné výšky povrchu
Ssk	šikmost omezené stupnice povrchu
Sku	špičatost omezené stupnice povrchu
2D	dvourozměrný prostor
3D	třírozměrný prostor
μm	mikrometr
v_f	rychlost posuvu
a_p	hloubka řezu
n	rychlost otáček
H_0	nulová hypotéza
H_A	alternativní hypotéza
α	hladina významnosti
CAM	computer aided manufacturing
CAD	computer aided design
\bar{x}	aritmetický průměr

s výběrová směrodatná odchylka

x_{min} minimální hodnota

x_{max} maximální hodnota

CCD Charge-coupled device

HSC High Speed Cutting

σ směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Struktura povrchu v detailu. [1].....	13
Obr. 2 Obecný tvar povrchu. [4].....	13
Obr. 3 Vlnitost povrchu. [4].....	14
Obr. 4 Drsnost povrchu. [4].....	14
Obr. 5 Profil povrchu. [1]	14
Obr. 6 Rp – největší výška výstupku profilu. [1].....	15
Obr. 7 Rc – průměrná výška prvků profilu. [1]	16
Obr. 8 Rt – celková výška profilu. [1]	16
Obr. 9 Ra – Aritmetická úchylna [1]	17
Obr. 10 RSm – Průměrná šířka [1]	18
Obr. 11 Dotykový profilometr [10]	23
Obr. 12 Interferenční mikroskop. [12].....	24
Obr. 13 Válcové frézování: a) nesousledně, b) sousledně [6]	26
Obr. 14 Čelní frézování [6].....	26
Obr. 15 Diagram rozptylů: a) normální, b) asymetrické [21].....	28
Obr. 16 Box-plotový graf a) symetrické rozdělení, b) asymetrické rozdělení [21].....	28
Obr. 17 Histogram a) normální rozdělení, b) asymetrické rozdělení [21].....	29
Obr. 18 Q-Q graf a) normální rozdělení, b) asymetrické rozdělení [21]	29
Obr. 19 Navržený testovací díl	34
Obr. 20 Výkresová dokumentace – nárysový pohled dílu.....	35
Obr. 21 Výkresová dokumentace – boční pohled dílu.....	35
Obr. 22 Simulace drah v softwaru PowerMill.	36
Obr. 23 Lineární interpolace křivky.	36
Obr. 24 Mikron HSM 800. [7].....	37
Obr. 25 Nástroj kulová fréza s HSK 50E držákem.....	38
Obr. 26 Obrobení na Mikron HSM 800.....	38
Obr. 27 Finální podoba testovacích dílů.....	39
Obr. 28 Měřicí přístroj Zygo Ametek.....	40
Obr. 29 Jednotlivé oblasti (1, 2, 3) a části (A, B, C, D, E) na měřeném dílu.	41
Obr. 30 Příprava dílu na snímání povrchu.....	42
Obr. 31 Naklonění roviny stolu/dílu pro snímání tvarové plochy.	42
Obr. 32 Nastavení parametrů snímání.	43

Obr. 33 Odstranění konvexního/konkávního tvaru pomocí funkce – válec.	43
Obr. 34 Legenda povrchu.	44
Obr. 35 Směr obrábění nástroje.	44
Obr. 36 Naměřený povrch ocele Toolox44.	45
Obr. 37 Naměřený povrch ocele 1.0570.	47
Obr. 38 Naměřený povrch ocele 1.2312.	49
Obr. 39 Naměřený povrch ocele 1.2379.	51
Obr. 40 Oblast 1 pro všechny materiály.	55
Obr. 41 Oblast 2 pro všechny materiály.	56
Obr. 42 Oblast 3 pro všechny materiály.	57
Obr. 43 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu Toolox44.	58
Obr. 44 Test rovnosti rozptylů pro všechny oblasti materiálu Toolox44.	59
Obr. 45 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu Toolox44.	60
Obr. 46 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu 1.0570.	62
Obr. 47 Test rovnosti rozptylu pro všechny oblasti materiálu 1.0570.	63
Obr. 48 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu 1.0570.	64
Obr. 49 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu 1.2312.	66
Obr. 50 Test rovnosti rozptylu pro všechny oblasti materiálu 1.2312.	67
Obr. 51 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu 1.2312.	68
Obr. 52 Box-plotový diagram pro všechny oblasti materiálu 1.2379.	70
Obr. 53 Test rovnosti rozptylu pro všechny oblasti materiálu 1.2379.	71
Obr. 54 Analýza rozptylu aritmetických průměrů pro všechny oblasti materiálu 1.2379.	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení oceli 1.0570.....	33
Tab. 2 Chemické složení oceli 1.2312.....	33
Tab. 3 Chemické složení oceli TOOLOX 44.	34
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.2379.....	34
Tab. 5 Specifikace stroje. [7].....	37
Tab. 6 Řezné podmínky jednotlivých oblastí.	39
Tab. 7 Hodnoty pro parametr Sa – část 1.	53
Tab. 8 Hodnoty pro parametr Sa – část 2.	54