

Hodnocení jakosti povrchu rotačních dílů

Jiří Loubal

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jiří Loubal
Osobní číslo:	T18201
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Hodnocení jakosti povrchu rotačních dílů

Zásady pro vypracování

- Seznámení se s problematikou hodnocení povrchů rotačních dílců.
- kontrola povrchů pomocí optického mikroskopu, za účelem nalezení charakteristické plochy
- Provedení analýzy na bezkontaktním profiloměru.
- Následně naměřená data drsnosti povrchu budou vyhodnocena pomocí programů Minitab.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
2. ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 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. MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milena Kubišová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením jakosti povrchů rotačních dílů zpracovaných soustružením, broušením a válečkováním. Teoretická část popisuje základní rozdělení technologií obrábění. Rovněž se zabývá popisem norem ČSN EN ISO 4287, 4288 a 25175-2, které se zabývají tímto tématem. V neposlední řadě nahlédne na exploratorní analýzu dat. Praktická část se věnuje měření jednotlivých vzorků a jejich následnému statistickému vyhodnocení.

Klíčová slova: soustružení, broušení, válečkování, drsnost povrchu, rotační, bezkontaktní měření povrchu

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the evaluation of surface quality of rotating parts processed by turning, grinding and rolling. The theoretical part describes the basic division of machining technologies. It also deals with the description of standards ČSN EN ISO 4287, 4288, and 25175-2, which deal with this topic. Last but not least, it looks at exploratory data analysis. The practical part is devoted to the measurement of individual samples and their subsequent statistical evaluation.

Keywords: turning, grinding, rolling, surface roughness, non-contact surface measurement

Rád bych tímto poděkoval své vedoucí bakalářské práce Ing. Mileně Kubišové Ph.D. za její odborné a trpělivé vedení práce, dále za její odborné rady a připomínky, a hlavně její pozitivitu a optimismus.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	11
1.1 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	12
1.1.1 Soustružení	12
1.1.2 Frézování	14
1.1.3 Vrtání, vyhrubování a vystružování kolik	15
1.1.4 Hoblování a obrážení	16
1.1.5 Protahování a protlačování	17
1.1.6 Dokončovací operace	17
1.2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	21
1.2.1 Elektroerozivní obrábění	21
1.2.2 Elektrochemické obrábění	22
1.2.3 Chemické obrábění	23
1.2.4 Obrábění laserovým paprskem	23
1.2.5 Obrábění plazmovým paprskem	24
1.2.6 Obrábění ultrazvukem	25
2 NORMA ČSN EN ISO 4287	26
2.1 OBECNÉ TERMÍNY	26
2.2 NÁZVY GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ	28
2.3 DEFINICE PARAMETRŮ PROFILU POVRCHU	30
2.3.1 Výškové parametry (výstupky a prohlubně)	30
2.3.2 Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)	32
2.3.3 Délkové parametry	33
2.3.4 Tvarové parametry	33
3 NORMA ČSN EN ISO 4288	34
3.1 HODNOCENÍ PARAMETRŮ	34
3.2 PRAVIDLA A POSTUPY PRO KONTROLU DOTYKOVÝMI PŘÍSTROJI	34
3.2.1 Měření parametrů profilu drsnosti	34
4 NORMA ČSN EN ISO 25175-2	37
4.1 TERMÍNY GEOMETRICKÉHO PARAMETRU	37
4.2 DEFINICE PARAMETRU POLE	37
4.2.1 Výškové parametry	37
5 ZÁKLADNÍ STATISTICKÁ ANALÝZA EDA	39
5.1 ČASOVÝ GRAF	39
5.2 KRABICOVÝ GRAF	40
5.3 BODOVÝ GRAF	40

5.4	HISTOGRAM	41
5.5	TEST ODLEHLÝCH HODNOT (GRUBBSŮV TEST).....	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
6	CÍLE PRÁCE	44
7	MĚŘENÉ VZORKY A PŘÍSTROJ	45
7.1	VZORKY	45
7.2	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ	46
7.2.1	Nastavení přístroje	46
7.2.2	Postup měření.....	48
8	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	50
8.1	TABULKOVÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	50
8.2	GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	51
8.2.1	Časové grafy vývoje měření.....	52
8.2.2	Grubbsův test odlehlých hodnot.....	53
8.2.3	Krabicové grafy.....	57
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK.....	68

ÚVOD

Stejně tak jako v běžném životě klademe nároky na kvalitu – ať už jde o vzdělání, lékařskou péči či kvalitu potravin, stejně tak se kladou čím dál tím větší požadavky na přesnost a jakost strojně vyráběných součástí.

S tím jak se zvedají nároky na dodržování přesných rozměrů výrobků a součástí, musí se zvedat nároky na stroje, které slouží ke kontrole kvality povrchů, rozměrové přesnosti a tvarové stálosti vyráběných dílů. Pro takovou kontrolu využíváme 3D měřících strojů, trhaček nebo jakožto v našem případě, pro kontrolu jakosti povrchu bezkontaktního profilometru, jenž pro měření využívá mikroskop.

V této práci se budeme zabývat základními technologiemi obrábění rotačních povrchů, a to jak konvenčních, tak nekonvenčních. Dále se budeme zabývat parametry, které jsou potřebné k posouzení jakosti povrchu popsanych v normách ČSN EN ISO 4287, 4288 a 25175-2. Následně se seznámíme s metodikou EDA sloužící k statistickému analýze naměřených dat.

V praktické části využijeme bezkontaktního profilometru, ke změření parametrů drsnosti povrchu součástí zhotovených konvenčními metodami obrábění a to soustružením, broušením a válečkováním. Naměřená data budou zpracována metodikou EDA v programu Minitab.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Technologie obrábění zabírá ve strojírenství důležité místo. Obrábění tvoří přibližně 40% celkové světové strojírenské výroby. Dovoluje nám, díky mnoha technickým procesům, vytvořit z polotovaru výrobek požadovaného tvaru, rozměrů, přesnosti a jakosti obráběných ploch.

Obrábění je technologický proces, jehož zásluhou jsme schopni vytvořit součásti určitých tvarů, rozměrů a jakosti, a to odebráním částí materiálu pomocí mechanických, elektrických, chemických aj. technologií, případně jejich vzájemnou kombinací. [1]

Metody obrábění můžeme dělit na konvenční a nekonvenční.

Mezi konvenční metody řadíme:

- Soustružení
- Frézování
- Vrtání, vyhrubování a vystružování
- Hoblování a obrážení
- Protahování a protlačování
- Dokončovací operace – broušení, honování, lapování, superfinišování, válečkování a kuličkování

Mezi nekonvenční metody řadíme:

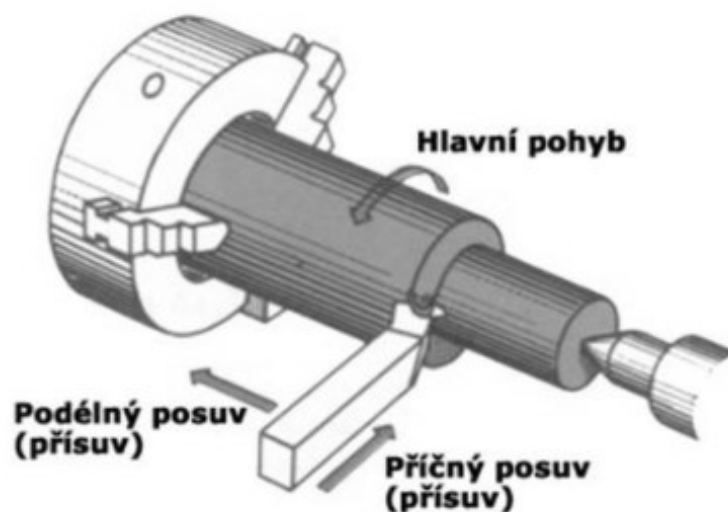
- Obrábění elektroerozivní
- Obrábění elektrochemické
- Obrábění chemické
- Obrábění laserovým paprskem
- Obrábění plazmovým paprskem
- Obrábění ultrazvukem

1.1 Konvenční metody obrábění

Konvenční proces obrábění využívá lidského operátora k řízení a ovládání obráběcích strojů jako jsou např. soustruhy, frézky, vrtačky a další řezné stroje. Operátor je odpovědný za řízení polohy a intenzity kontaktu nástroje s obrobkem pomocí mechanických pák, koleček, anebo tlačítek tak, aby bylo dosaženo zamýšlené geometrie produktu. [2]

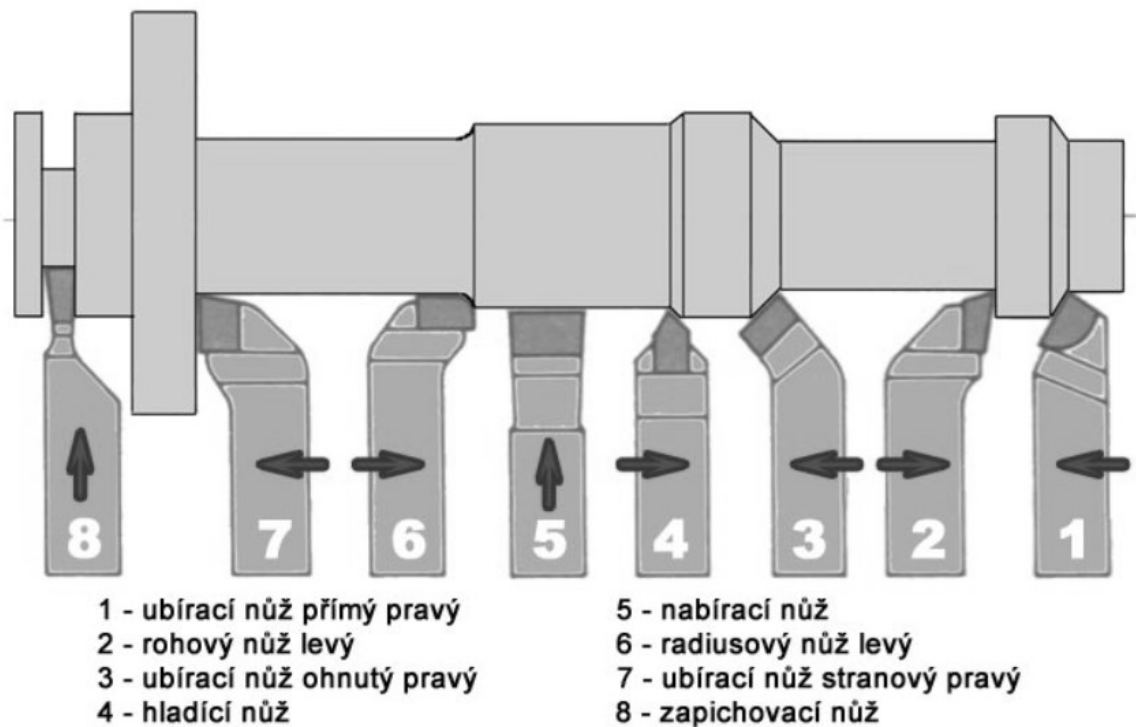
1.1.1 Soustružení

Soustružení je třískové obrábění, které se využívá k výrobě rotačních dílů pomocí jednobřitého nástroje. Jedná se o nejstarší a nejpoužívanější způsob obrábění. Hlavní řezný pohyb je rotační a koná jej obrobek upnutý v čelistech soustruhu. Další dva vedlejší pohyby přířuv a posuv vykonává nástroj neboli soustružnický nůž upnutý do nožové hlavy. Samotný odebíraný materiál odchází ve formě třísky. Soustružení máme dvojího typu. Hrubovací s velkým odběrem třísky a tzv. na čisto, kde je odběr třísky značně menší. Jakost povrchu, rozměr a tvar třísky nám ovlivňují velikost posuvu, hloubka řezu, rychlost otáčení a geometrie nástroje.



Obrázek 1. Řezné pohyby při soustružení [3]

Soustružnické nože jsou různých tvarů, materiálů, geometrie a směru, kterými jde posuv, tedy vlevo a vpravo. Materiály nožů jsou rychlořezná ocel, v tomto případě je z ní vyroben celý nůž nebo můžeme mít nože s vyměnitelnými břitovými destičkami, které jsou vyrobeny ze slinitých karbidů, řezné keramiky, diamantu aj. Nože taky dělíme podle jejich účelu tedy např. ubírací, rádiusový, zapichovací nebo tvarový nůž. [1, 2]



Obrázek 2. Typy soustružnických nožů [3]

SOUSTRUŽENÍ OCELÍ

a) Nelegované oceli

Pro zajištění kontroly a dělení třísek je dobré použít co největší rychlost posuvu a hladících břitových destiček. Abychom předešli tvorbě nárůstku na břitové destičce, který by nám mohl negativně ovlivnit jakost obráběného povrchu, rovněž je dobré použít vysoké řezné rychlosti.

b) Nízkolegované oceli

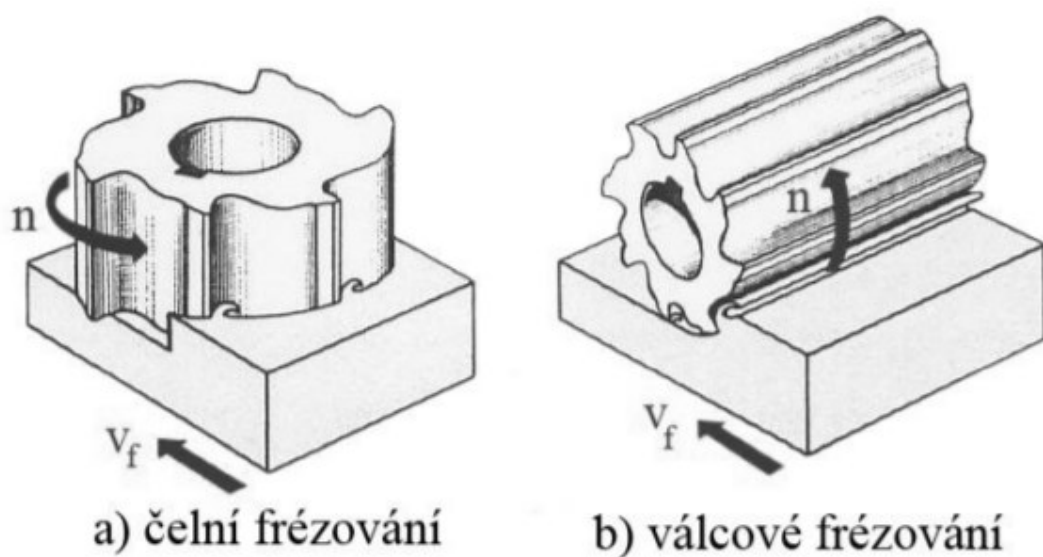
U nízkolegovaných ocelí závisí obrobiteľnosť na obsahu legujících prvků a tvrdosti, tedy tepelném zpracování. Hlavním opotřebením u materiálů z této skupiny je opotřebenění tvaru žlábků a opotřebenění hřebenu. Také mohou vznikat plastické deformace, jelikož při obrábění zušlechťených materiálů vzniká v místě řezu větší teplo. Pro tento typ ocelí v nevytvrzeném stavu je vhodná první řada nástrojových tříd a geometrií pro soustružení oceli. Pro tvrzené materiály je lepší použít tvrdších nástrojových tříd, např. třídy pro obrábění litin nebo řezné keramiky.

c) Vysokolegované oceli

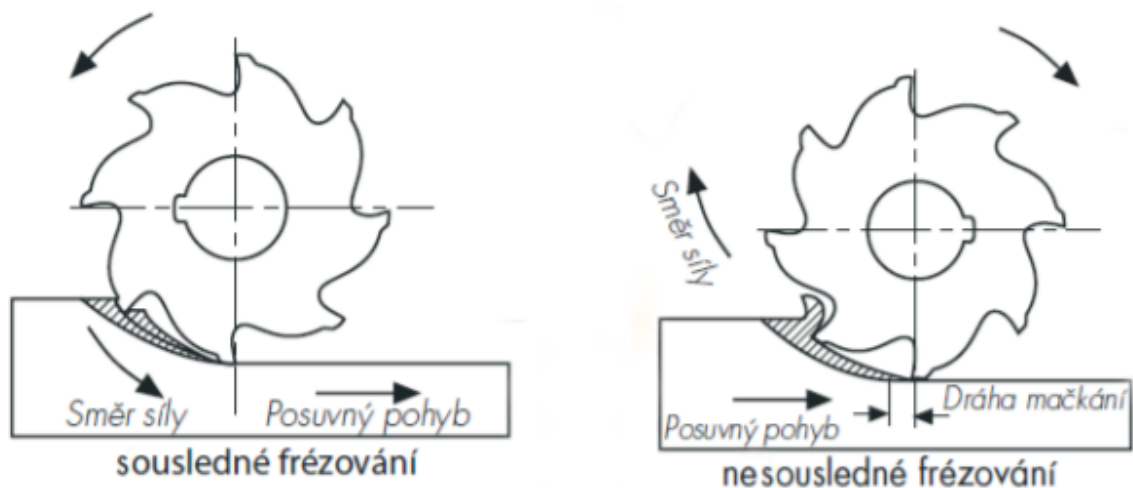
Vysokolegované oceli tedy oceli s procentem legujících prvků větším než 5 %. Vyskytují se zde jak měkké, tak zušlechtnuté materiály. Čím se nám obsah legujících prvků a tvrdosti zvedá, tím nám klesá obrobiteľnosť. Tak jako pro nízkolegované je první možnosť využít nástrojových tříd a geometrie pro soustružení oceli. Pro oceli s více jak 5 % legujících prvků a tvrdostí nad 450 HB, které kladou mimořádné nároky na odolnosť proti plastickým deformacím a pevnosti břitů, je lepší využít tvrdší nástrojové třídy: třídy pro obrábění litin nebo řezné keramiky. [4]

1.1.2 Frézování

Frézování je třískové obrábění, které se využívá k výrobě tvarových dílů pomocí vícebřitého nástroje. Jedná se o jeden z nejběžnějších způsobů obrábění. Hlavní pohyb (rotační) koná nástroj – vícebřitá fréza, vedlejší pohyby - tedy posuvy koná obrobek. Máme dva hlavní typy frézování: čelní a obvodové. Čelním frézováním obrábíme rovinné povrchy obrobků a dutin s plochým dnem. Válcové frézování se využívá k výrobě hlubokých drážek, závitů nebo ozubení. Obráběný materiál může být přiváděn směrem proti rotaci frézy, potom se jedná o nesousledné frézování. Tento způsob je vhodný pro ruční frézky. A pokud je obrobek posouván ve stejném směru jako je rotace frézy, jedná se o sousledné frézování. Tato metoda se preferuje u CNC frézování. Jakost povrchu ovlivňují tyto parametry: řezná rychlost, posuv a hloubka řezu.



Obrázek 3. Schéma čelního a válcového frézování [3]



Obrázek 4. Schéma sousledného a nesousledného frézování [3]

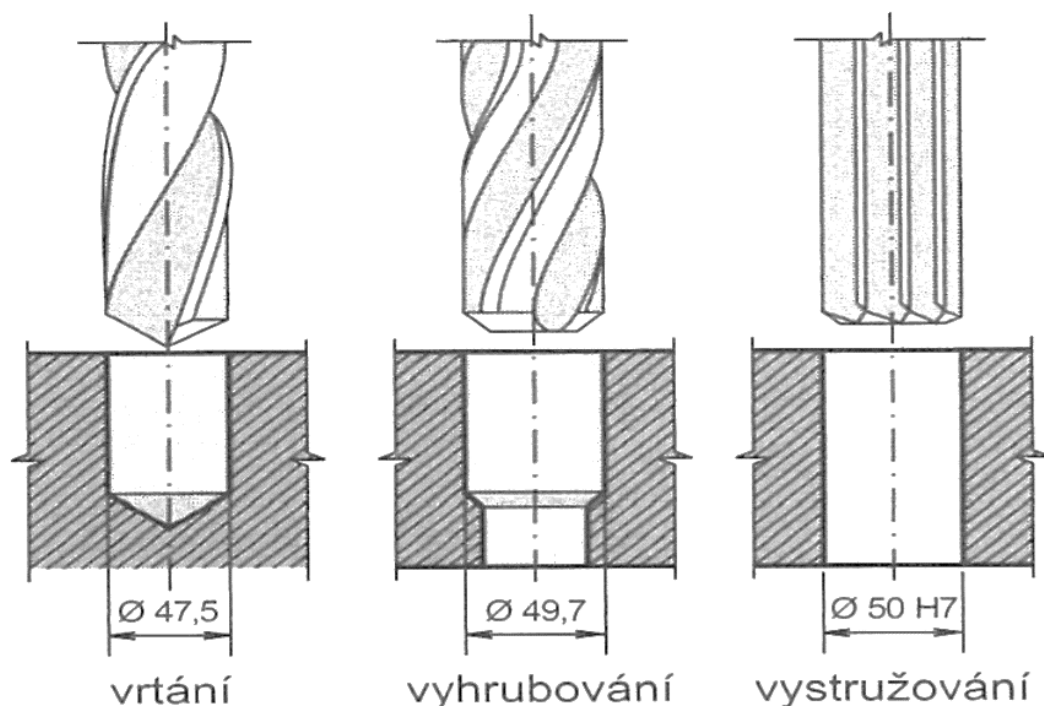
Podle upnutí dělíme frézy na: stopkové a nástrčné Ty pak dále mohou být válcové, drážkové, kopírovací, tvarové a jiné. Mohou být taktéž celistvé nebo s výměnnými břitovými destičkami. Stroje, frézky existují několika typů: konzolové, stolové a rovinné. Podle polohy vřetene dělíme frézky na: horizontální a vertikální. Ale v dnešní době se hlavně využívá CNC obráběcích center. [5, 6, 7]

1.1.3 Vrtání, vyhrubování a vystružování kolik

Vrtání je třískové obrábění, využívané k výrobě otvorů zpravidla dvoubřitým nástrojem. Nástrojem je vrták, který koná hlavní pohyb (rotační) a zároveň i vedlejší pohyb (posuvný). Máme různé druhy vrtáků, např. šroubovité, vrtáky pro středící důlky, dělové, vrtáky pro vrtání velkých průměrů do plechů takzvaně vrtáky korunkové, aj. Vrtačky jsou: stolní, sloupové, stojanové, ruční, aj., rovněž lze vrtat i na soustruhu, avšak zde koná hlavní pohyb obrobek.

Vyhrubování slouží k rozšiřování a zpřesňování už vyvrtané díry. Výhrubník je tří až čtyřbřitý nástroj. Pro menší průměry se používají stopkové výhrubníky, pro ty větší už výhrubníky nástrčné.

Vystružování je řezná operace, která následuje po vyhrubování. Slouží ke zvětšení stávajícího průměru otvoru tak, aby byl vyroben na přesné rozměry a požadovanou jakost. [8, 9]



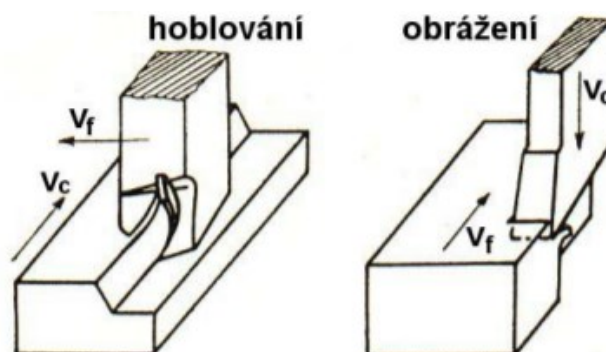
Obrázek 5. Výroba přesné (lícované) díry [3]

1.1.4 Hoblování a obrážení

Hoblování je třískové obrábění jednobřitým nástrojem. Hlavní pohyb koná obrobek upnutý na pracovním stole. Hlavní pohyb má dva kroky: řezný (produktivní) a zpětný (neproduktivní). Vedlejší pohyby přířuv a posuv koná nástroj vždy na konci zpětného pohybu.

Obrážení je třískové obrábění jednobřitým nástrojem. Pohyb nástroje a obrobku je tu přesně opačný než u hoblování, ty hlavní pohyb koná nástroj, a to ve dvou krocích: řezný (produktivní) a zpětný (neproduktivní). Vedlejší pohyby, tedy přířuv a posuv koná obrobek.

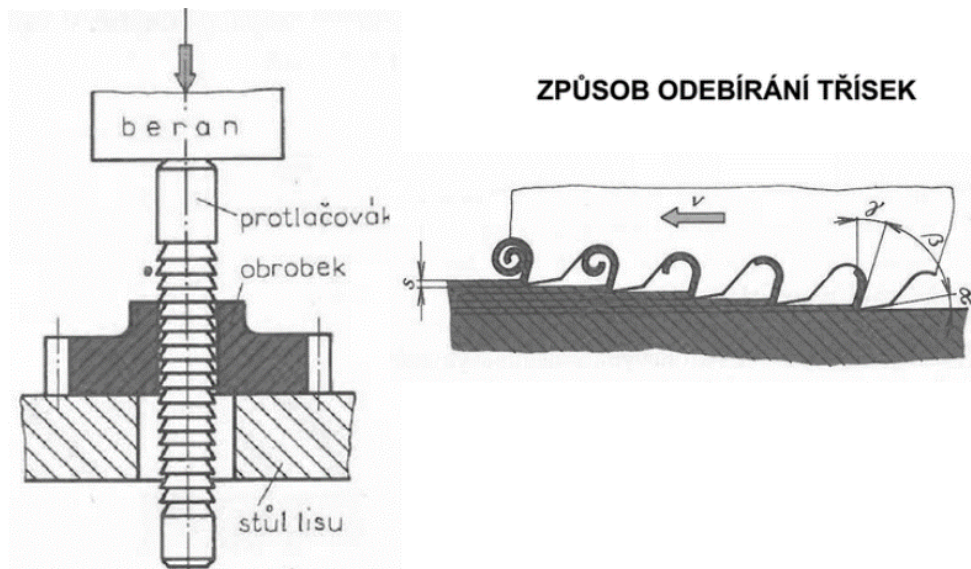
Hoblovací a obrážecí nože jsou podobné svým tvarem a geometrií nožům soustružnickým. Druhy nožů: ubírací, hladící, rohový, zapichovací. [10]



Obrázek 6. Schéma hoblování a obrážení [3]

1.1.5 Protahování a protlačování

Protahování a protlačování jsou metody třískového obrábění několikabřitým nástrojem. Hlavní pohyb je přímočarý. Koná jej nástroj, jež je protahovací (je tažen) nebo protlačovací (je tlačěn) trn. Jedná se o velice produktivní metodu výroby převážně tvarových děr. Jelikož jsou tyto metody hlavně vhodné pro hromadnou a velkosériovou výrobu, bývá cena nástrojů vysoká. Při protlačování je nástroj velmi namáhán, na vzpěr bývá proto zpravidla mnohem kratší než protahovací trn. [11]



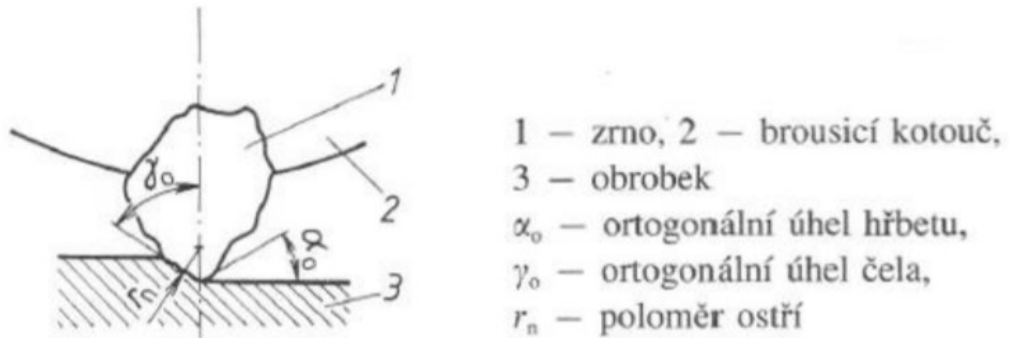
Obrázek 7. Schéma principu protlačování [11]

1.1.6 Dokončovací operace

Dokončovací operace slouží ke zvýšení jakosti obrobeneho povrchu, k zpřesnění rozměrů a tvarů, zlepšení estetických, mechanických a fyzikálních vlastností součástí. Největší využití mají tyto operace pro obrábění strojních součástí. Jde o součásti, na které jsou kladeny velké požadavky na přesnost tvaru, rozměrů a jakost obrobenech ploch. [1]

Broušení

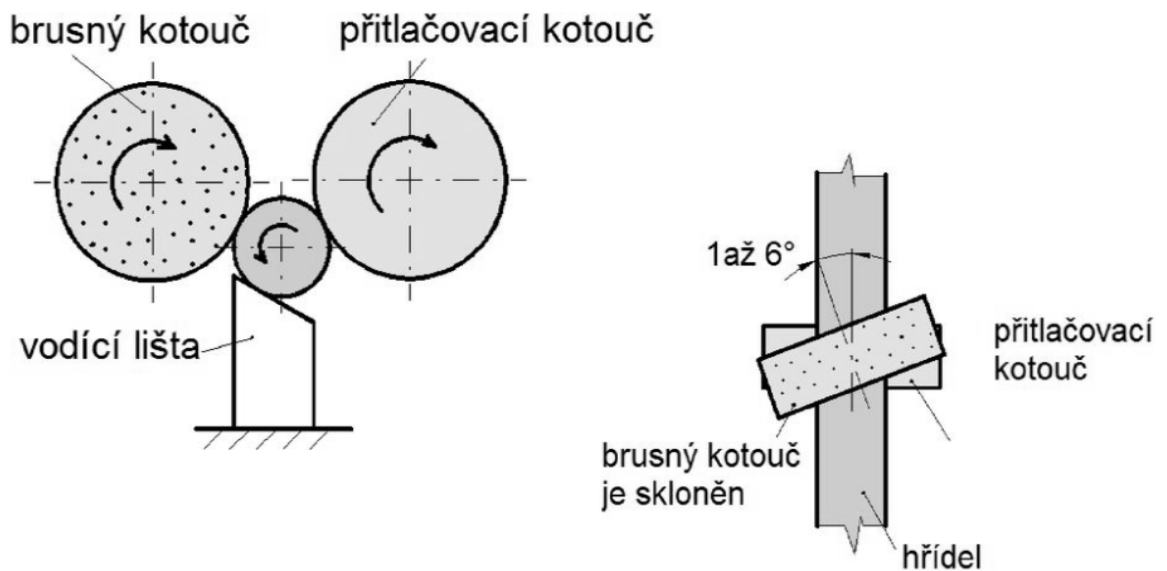
Broušení je dokončovací operace, při které dochází k malému odběru třísky mnohobřitým nástrojem, většinou se jedná o brusným kotoučem. Brusný kotouč se skládá z nerovnoměrně rozmístěných brusných zrn spojených pojivem. Hlavní pohyb koná nástroj (rotační), tedy kotouč. Vedlejší pohyb koná obrobek (posuv a přísuv). Při broušení dosahujeme dobré kvality povrchu hlavně proto, že v jeden okamžik je v záběru velké množství zrn, jež nám odebírají třísku velmi malých rozměrů. [3, 11]



Obrázek 8. Schéma brusného zrna [3]

Rozlišuje broušení:

- Rovinných ploch – obvodem, čelem brusného kotouče
- Rotačních ploch – obvodem brusného kotouče, zápichový způsob, sadou kotoučů, bezhroté broušení
- Vnitřních ploch – rotačních součástí, planetové broušení
- Tvarových ploch – broušení závitů, ozubených kol
- Nástrojů



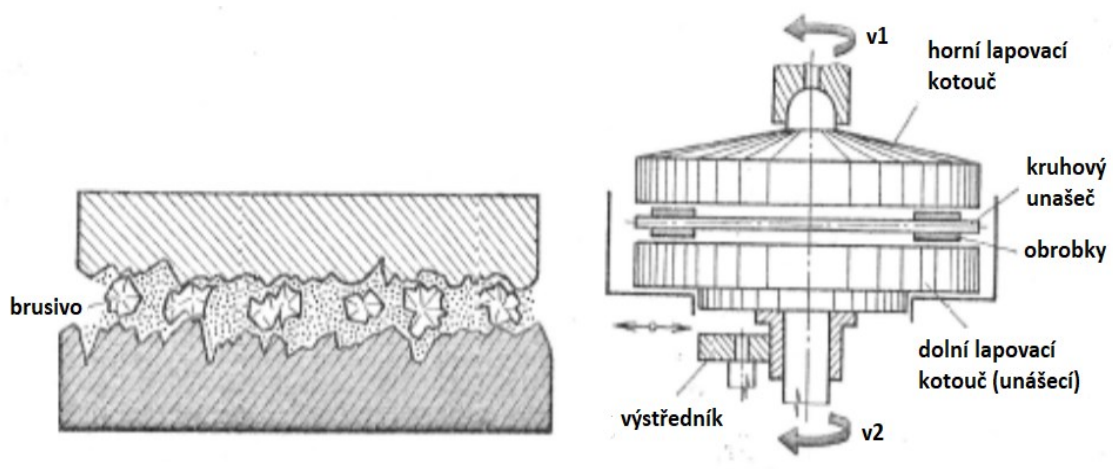
Obrázek 9. Broušení bezhroté průběžné [3]

Honování

Honování je dokončovací operace s minimálním odběrem třísky. Nástrojem je brusivo pojené do honovacích kamenů, které jsou uloženy v honovací hlavě. Konečná úprava se provádí rozpínáním honovacích kamenů vhodné zrnitosti a kvality proti pracovní ploše. Kameny se otáčejí a vratně pohybují v honovací hlavě. Tím vzniká na povrchu součásti pro honování ikonický křížově šrafovaný vzor. Typické honované povrchy jsou díry pro písty spalovacích motorů. [12, 13]

Lapování

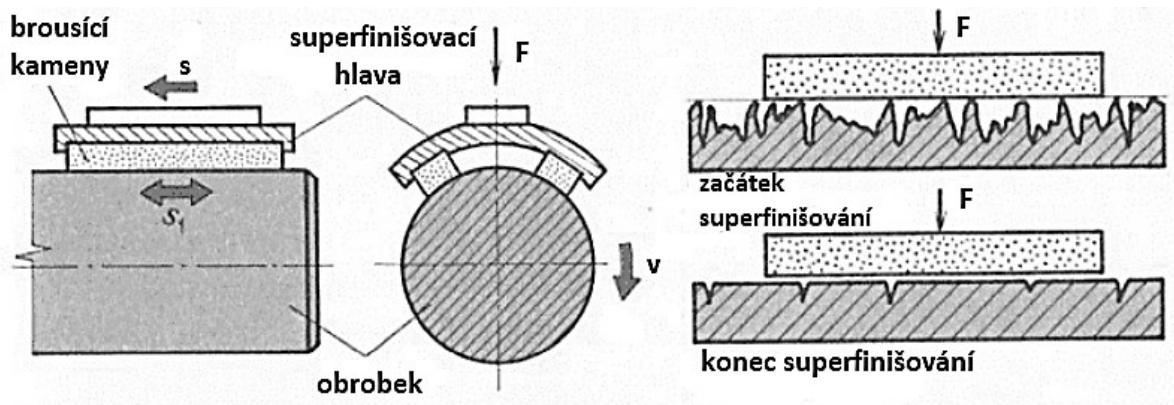
Lapování je dokončovací operace s minimálním odběrem třísky, při které dosahujeme nejvyšší geometrické přesnosti a kvality povrchu. Nástrojem jsou brusná zrna smíchaná s kapalinou na vodní nebo olejové bázi. Řezná směs se poté umístí na lapovací desku a obráběná součást proti ní na kruhový unašeč. Odvalováním brusných zrn mezi deskou a obrobkem poté dochází k odběru materiálu. [14]



Obrázek 10. Schéma lapovacího procesu [3]

Superfinašování

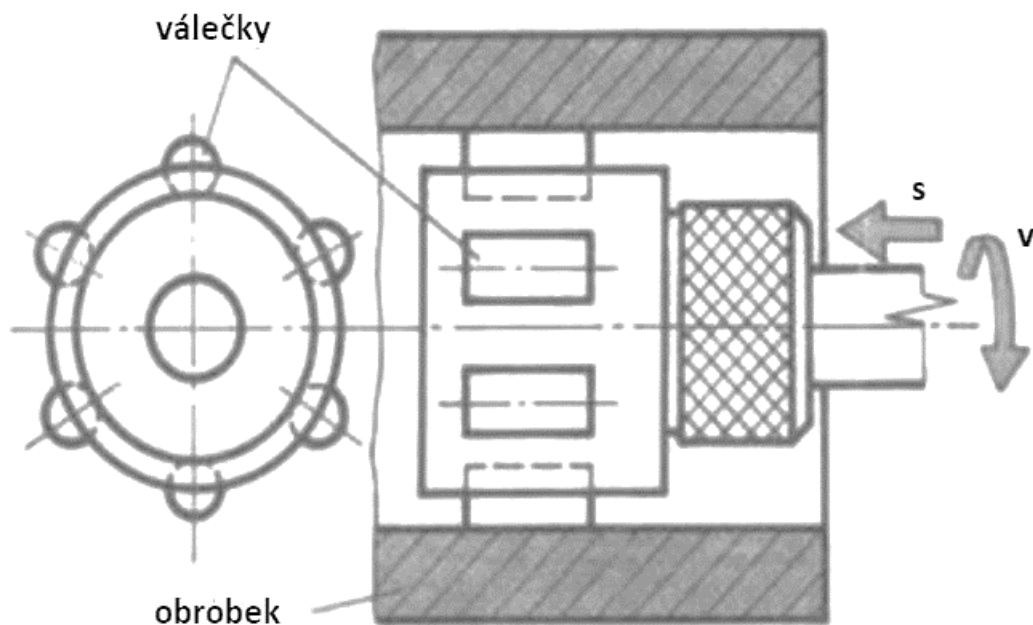
Superfinašování je dokončovací operace s minimálním odběrem třísky. Nástrojem jsou brusné kameny upnuté v superfinašovací hlavě. Hlava koná rychlý kmitavý pohyb a je přitlačována k obrobku, který se současně otáčí (posouvá). Zrna konají oproti obrobku nepravidelná pohyby, kterým dosáhneme kompletního překrytí stop po předešlém obrábění a tím vyhladíme povrch. [15]



Obrázek 11. Schéma superfinašování [3]

Válečkování a kuličkování

Válečkování a kuličkování jsou dokončovací operace, při kterých nedochází k odběru materiálu. Tyto technologie spočívají v tom, že se za studena na povrch součásti přitlačují tvářící tělíska (válečky, kuličky), čímž se povrch tváří. Za působení tlaku se tak zmenšují vrcholky nerovností a zaplňují prohlubně po obrábění. Díky působení tlaku a možnosti ho plynule regulovat, dochází k odstraňování nerovností a vad s velkou přesností a zároveň ke zvýšení pevnosti a tvrdosti obrobku. Válečkovat lze jak vnější, tak vnitřní povrchy rotačních dílů. U vnitřních se poté využívá tzv. válečkovací hlavy, do které jsou válečky vsazeny. [5]



Obrázek 12. Válečkovací hlava [3]

Tabulka 1 Stupně přesnosti a drsnost povrchu při konvenčním obrábění [16]

	Stupně přesnosti IT	Drsnost povrchu R_a [μm]		Stupně přesnosti IT	Drsnost povrchu R_a [μm]
Soustružení	5 až 14	0,2 až 100	Hoblování	7 až 13	0,8 až 100
Frézování	5 až 13	0,4 až 50	Protahování	5 až 9	0,1 až 3,2
Vrtání	9 až 14	3,2 až 50	Broušení	3 až 11	0,025 až 3,2
Vyhrubování	9 až 11	3,2	Honování	3 až 8	0,05 až 0,8
Vystružování	7 až 9	0,8	Lapování	1 až 5	0,012 až 0,8

1.2 Nekonvenční metody obrábění

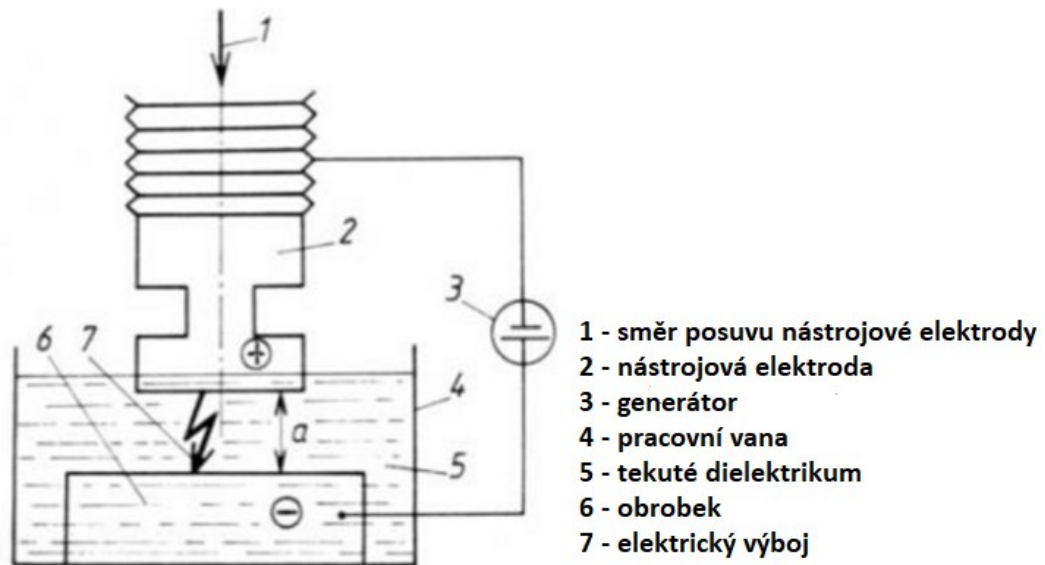
Nekonvenční metody obrábění se používají tam, kde nám nestáčí běžné mechanické metody obrábění, z důvodů obtížné obrobitelnosti materiálu, tvarové složitosti nebo produktivity práce. Tyto metody nevyužívají mechanickou práci jako u třískového obrábění, nýbrž využívají tepelných, elektrických, chemických, ultrazvukových nebo jiných fyzikálních jevů (případně jejich kombinaci).

1.2.1 Elektroerozivní obrábění

Neboli taky electro discharge machining čili **EDM**.

EDM je metoda obrábění využívaná k obrábění různých vodivých materiálů, včetně tvrdých kovů, které jsou obtížně obrobitelné klasickými metodami. EDM můžeme obrábět různé složité dutiny nebo obrysy, a to i v tvrzené oceli, která není předem tepelně zpracovaná. Při EDM dochází k odstraňování materiálu pomocí rychle se opakujících elektrických výbojů, kterým dochází mezi nástrojovou elektrodou (katodou) a elektrodou obrobku (anodou) za přítomnosti elektrického pole. Jak nástroj, tak obrobek musí být ponořeny v dielektriku, což může být např. petrolej nebo demineralizovaná voda. Mezi elektrodami dochází k průniku dielektrika, vzniká tzv. výbojový kanál. Působením tepla dojde k odstranění materiálu. Kolem spálené hmoty vznikají bublinky páry, které při následném ochlazení zanikají, čímž vzniká ráz, který spálený materiál odstraní z prostoru výboje. [17, 18]

Existuje několik metod EDM: hloubící, drátová elektroda, mikroděrování

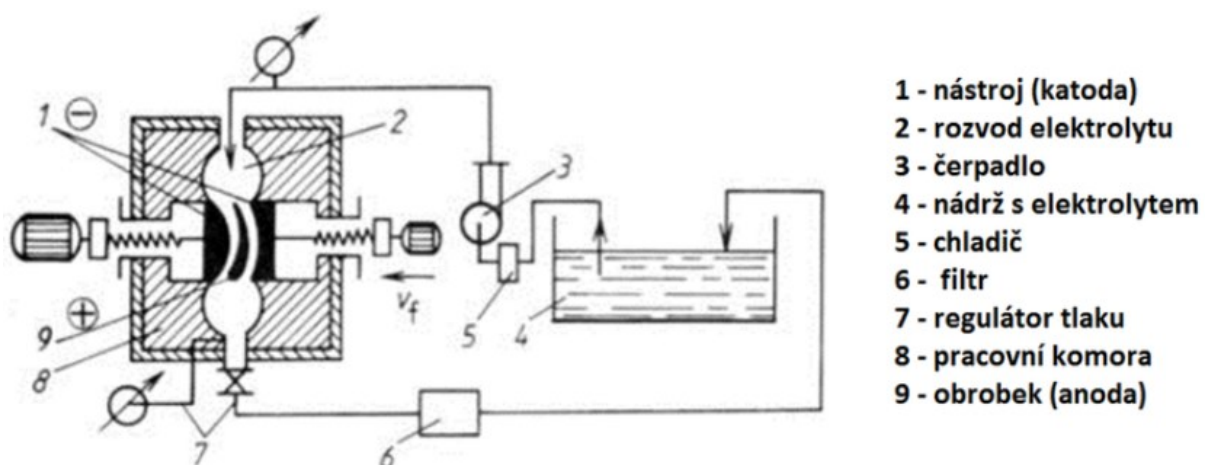


Obrázek 13. Schéma EDM obrábění [19]

1.2.2 Elektrochemické obrábění

Neboli taky Elektrochemical machining čili ECM

ECM je to beztržkové obrábění, založeno na Faradayových zákonech. Principem je řízené rozpouštění (disociace) obráběného materiálu na ionty. Nástrojová elektroda (katoda) a obrobek (anoda) jsou vodivě spojeny na zdroj elektrického proudu a zároveň jsou ponořeny do elektrolytu (např. koncentrovaný solný roztok). Na obrobku ponořeném do elektrolytu poté dochází k reakci, při které se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu na povrchu obrobku a dochází tak k postupnému ubírání materiálu. Obrobek tedy kopíruje tvar nástrojové elektrody. Tak jako EDM je tato metoda použitelná pouze pro vodivé materiály. Naopak mezi špatně elektrochemicky obrobitelné materiály patří např. slitiny s velkým obsahem uhlíku nebo šedá litina ta je téměř neobrobitelná. [20]



Obrázek 14. ECM obrábění vnějších tvarových ploch [19]

1.2.3 Chemické obrábění

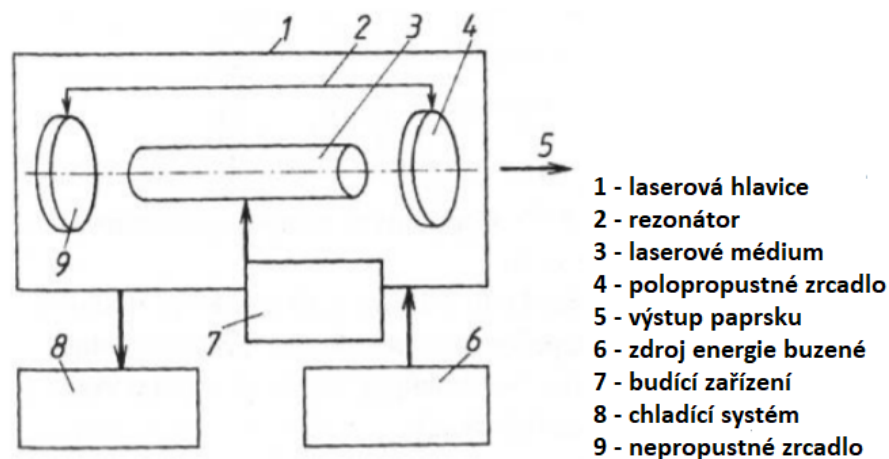
Chemické obrábění neboli leptání, je řízené odstraňování materiálu chemickou reakcí mezi obrobkem a chemickou látkou (kyselina, hydroxid). V současné době se ve strojírenství využívá relativně málo, ale je nahrazeno jinými technologiemi jako jsou: řezání vodním paprskem nebo drátovou elektrodou. Využití má například v elektrotechnice, kde se využívá k řízenému leptání při výrobě plošných spojů, kdy se odleptává vrstvička čisté mědi. [4]

1.2.4 Obrábění laserovým paprskem

Neboli taky laser beam machining čili LBM.

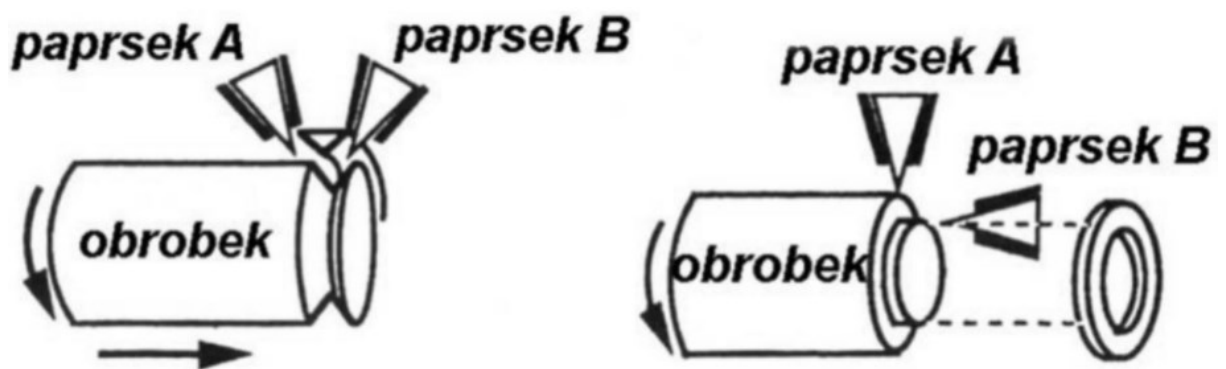
Slovo LASER je zkratkou pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Obrábění laserem se zakládá na změně světelné energie na energii tepelnou. Dochází k tomu při interakci paprsku laseru s materiálem obrobku, přičemž se materiál ohřívá, taje, případně odpařuje. Základním prvkem při výrobě laseru je zesílení světla, dosažené stimulovanou emisí v důsledku dopadajících fotonů a vysoké energie. Laser se skládá ze tří hlavních součástí, a to: laserového média, nástroje pro buzení laserového média do jeho zesilovacího stádia (zdroj laserové energie) a systému optického dodávání zpětné vazby. Důležité taky je chlazení zrcadel a vedení paprsku. Laserové médium může být buď pevná látka (např. rubín, granát nebo Nd:YAG neboli neodymem dopovaný yttrium – hliník – granát), kapalina (barvivo) nebo plyn (CO₂). CO₂ laser má vlnovou délku 10 μm v infračervené oblasti. Má vysoký průměrný výkon paprsku, lepší účinnost a dobrou kvalitu paprsku. To je ideální pro jemné řezání plechů vysokou rychlostí. Nd:YAG laser má nízký výkon paprsku, ale při práci v pulzním režimu dosahuje vysokých výkonů, které mu umožňují obrábět i silnější materiály. [22]



Obrázek 15. Schéma zařízení laseru [23]

Laserem můžeme provádět různé operace jako jsou vrtání, řezání, zapichování, soustružení a frézování. Vrtání laserovým paprskem se stalo hlavně efektivním pro vrtání velkého množství malých děr umístěných těsně u sebe. Řezání laserovým paprskem je vhodné pro děrování, samotné řezání či popisování kovů, plastů nebo keramiky. U soustružení a frézování laserovým paprskem je nutné použít dva laserové paprsky současně, abychom byli schopni získat požadovaný profil obrobku. K zajištění potřebných úhlů paprsků se využívá vláknové optiky. [22]

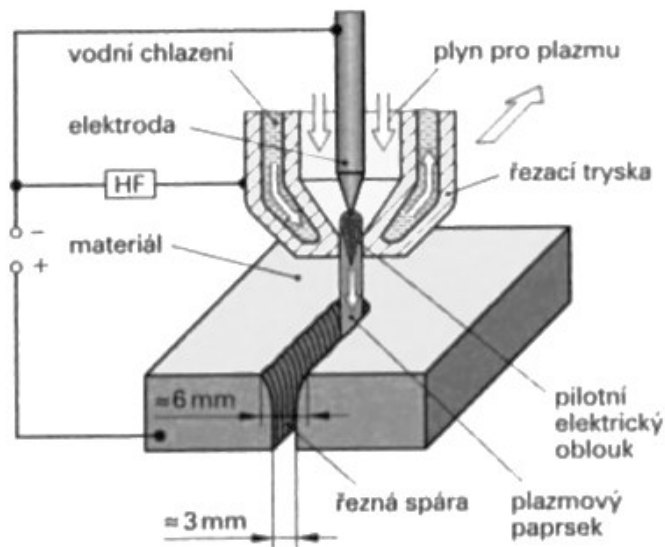


Obrázek 16. Princip soustružení laserovým paprskem [23]

1.2.5 Obrábění plazmovým paprskem

Neboli také plazma arc machining čili PAM

Obrábění plazmovým obloukem je proces odebrání materiálu, který využívá vysokorychlostní proud ionizovaného plynu na obráběný materiál o vysokých teplotních rozsazích v rozmezí 10000 až 32000 °C. Využívá se několika různých plynů jako jsou argon, vodík, kyslík a dusík. Vysokofrekvenční oblouky vznikají mezi wolframovou elektrodou (záporný pól) a měděnou tryskou (kladný pól). Vysokorychlostní elektrony produkuje obloukový náraz s molekulami plynu a jsou ionizovány. Tento náraz způsobuje uvolnění velkého množství tepelné energie, čímž dochází k obrábění. [24]

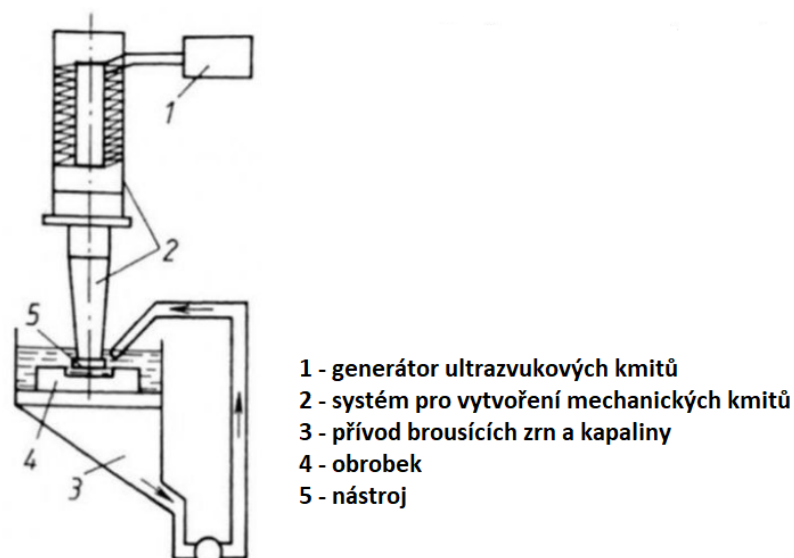


Obrázek 17. Dělení materiálu plazmovým hořákem [23]

1.2.6 Obrábění ultrazvukem

Neboli také ultrasonic machining čili USM.

Obrábění ultrazvukem je založeno na mechanickém účinku abrazivních zrn, která jsou přiváděna mezi obrobek a nástroj ve formě abrazivní suspenze. Nástroj kmitá kolmo na obráběný povrch frekvencí 20–30 kHz, současně nám stálou silou přitlačuje abrazivní suspenzi k povrchu obráběného materiálu, což způsobuje odstranění materiálu mikro štěpením. Abrazivní suspenze se sestává ze směsi abrazivního materiálu např. karbidu křemíku nebo karbidu bóru aj. suspendované ve vodě nebo oleji. Mezi variace této metody patří třeba rotační ultrazvukové obrábění, zde je nástroj buzen a současně i rotuje. [25]



Obrázek 18. Schéma ultrazvukového obrábění [19]

2 NORMA ČSN EN ISO 4287

Celé znění normy “*Geometrické požadavky na výrobky (GPS)*” Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu Podstatou této normy je stanovení termínů, definic a parametrů pro určování struktury povrchu jako jsou (drsnosti, vlnitosti a základní profil) pomocí profilové metody. Dále budou vypsány v přímé citaci[26]

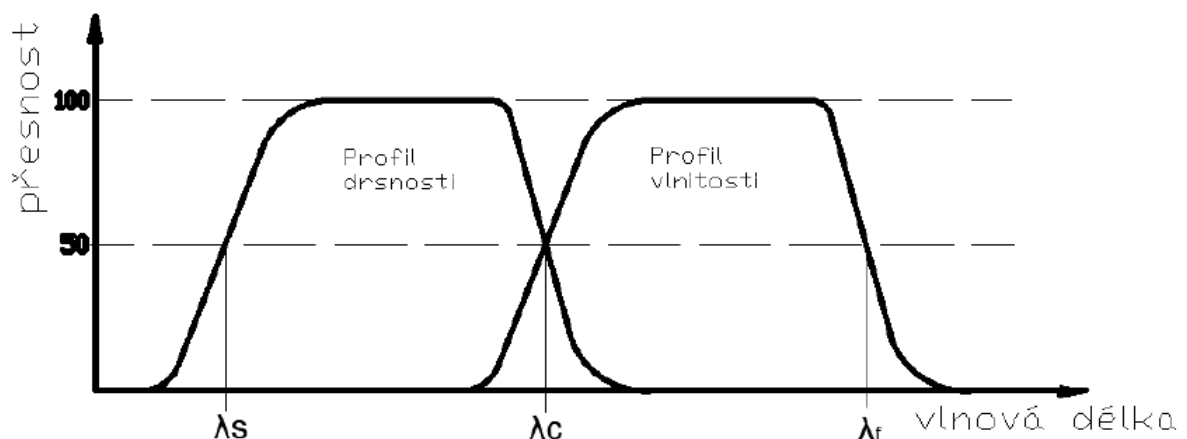
2.1 Obecné termíny

„**Filtr profilu** – dělí profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky“

„ λ_s filtr profilu – definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu“

„ λ_c filtr profilu – definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti“

„ λ_f filtr profilu – definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrch“

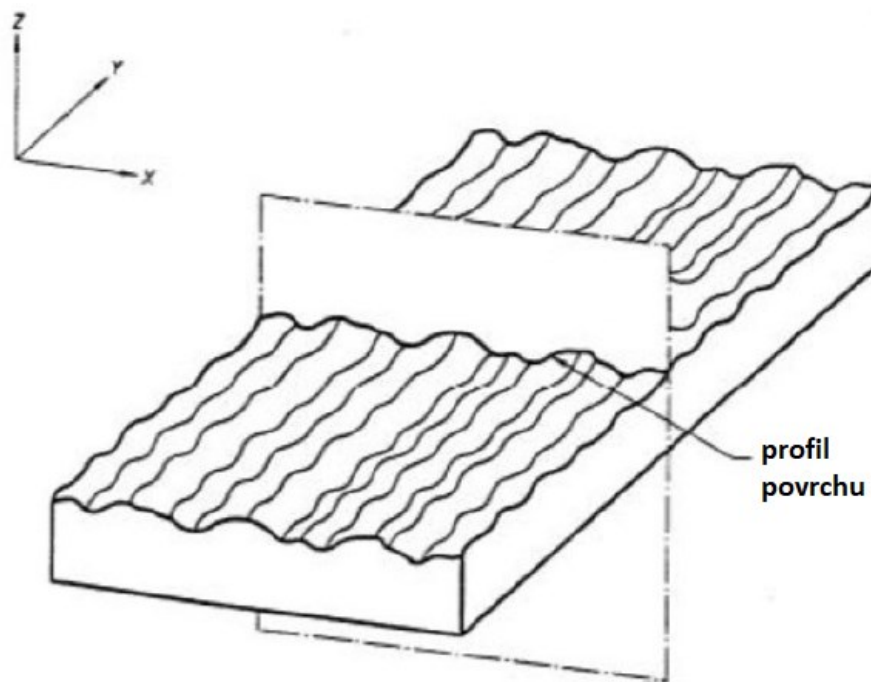


Obrázek 19. Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [26]

„**Souřadnicový systém** – jsou v něm definovány parametry struktury povrchu. Obvykle je využíván pravoúhlý systém kartézských souřadnic, ve kterém osa X je ve směru snímání a je souběžná se středící čarou, osa Y také leží na skutečném povrchu a osa Z směřuje z povrchu do okolí.“

„**Skutečný povrch** – omezuje těleso a odděluje ho od okolního prostředí“

„**Profil povrchu** – vznikne jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny“

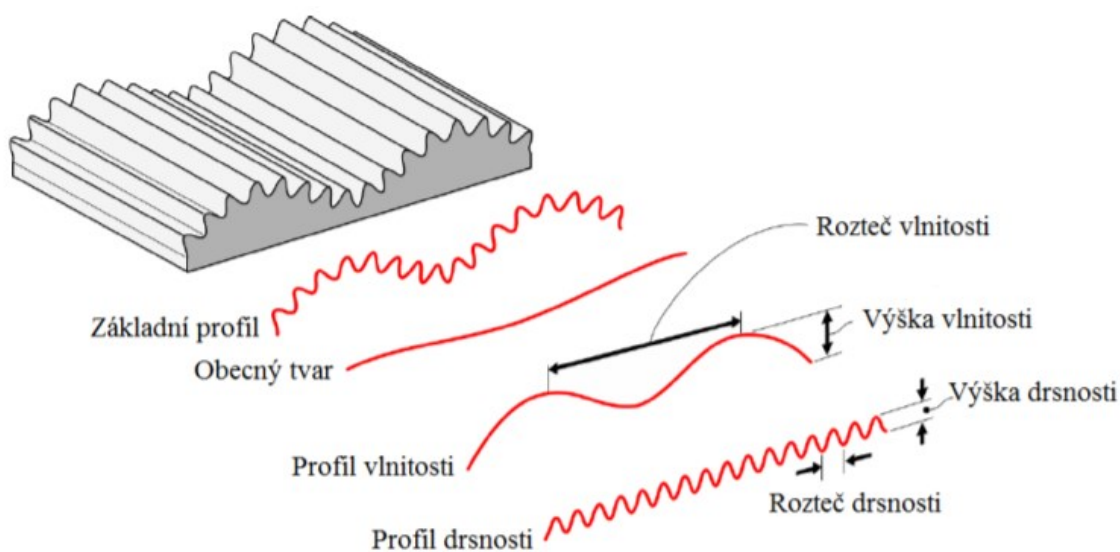


Obrázek 20. Profil povrchu [26]

„**Základní profil** – základ pro hodnocení parametrů základního profilu“

„**Profil drsnosti** – odvodí se ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek λ_c . Přenosové pásmo pro tento profil definují filtry profilu λ_s a λ_c “

„**Profil vlnitosti** – je odvozený postupnou aplikací filtru λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c “



Obrázek 21. Jednotlivé složky textury povrchu [27]

„Střední čáry“

„Střední čára profilu drsnosti – po potlačení filtrem profilu λc čára odpovídá dlouhovlnné složce“

„Střední čára profilu vlnitosti – po potlačení filtrem profilu λf čára odpovídá dlouhovlnné složce“

„Střední čára základního profilu – čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu“

„Základní délka, l_p , l_r , l_w – délka použitá k rozpoznání nerovností, které charakterizují základní profil, ve směru osy X “

„Vyhodnocovaná délka, l_n – délka použitá k posouzení vyhodnocovaného profilu, ve směru osy X “

2.2 Názvy geometrických parametrů

„ P -parametr – vypočítaný ze základního profilu“

„ R -parametr – vypočítaný z profilu drsnosti“

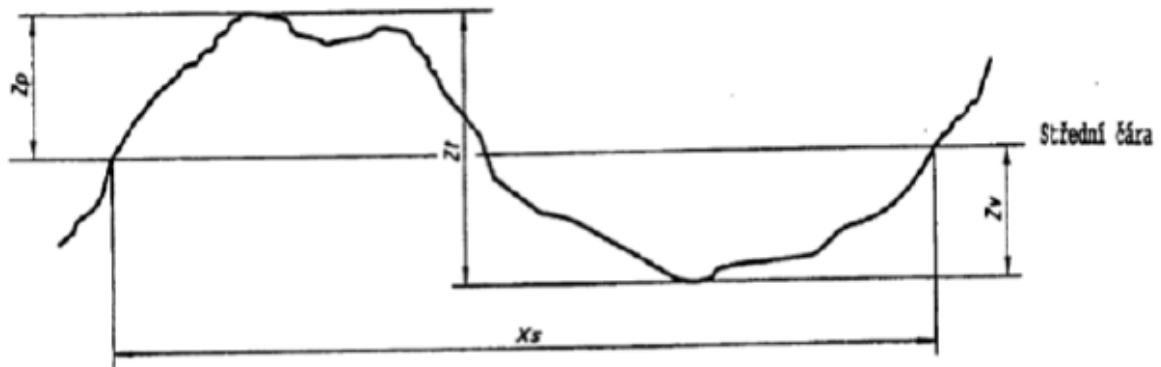
„ W -parametr – vypočítaný z profilu vlnitosti“

„Výstupek profilu – z povrchu pryč směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou X “

„Prohlubeň profilu – do povrchu směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou X “

„Omezení výšky a rozteče – nejmenší výška a rozteč výstupků a prohlubní posuzovaného profilu, které mohou být brány v úvahu“

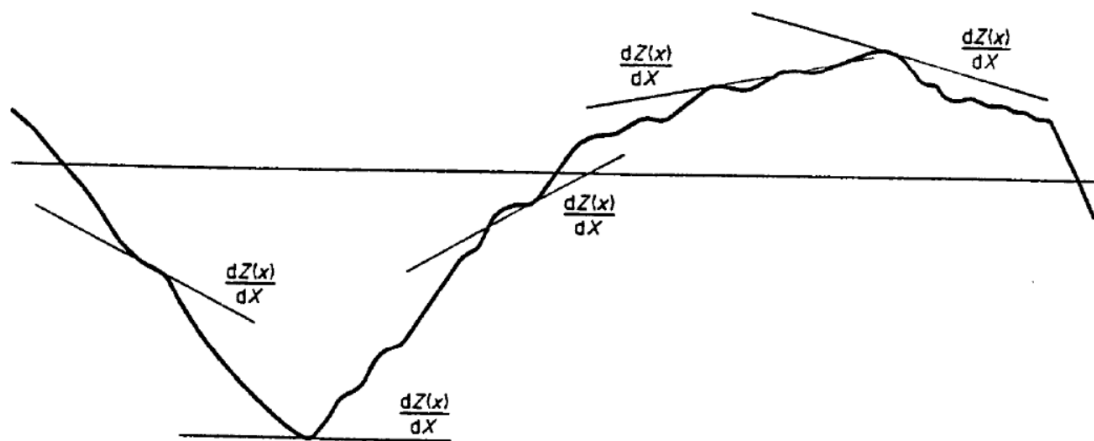
„**Prvek profilu** – výstupek profilu a přilehlá prohlubeň. Ať se jedná o kladnou či zápornou část posuzovaného profilu, na začátku nebo na konci základní délky by měli být vždy považováni za výstupek profilu nebo za prohlubeň profilu.“



Obrázek 22. Prvek profilu [26]

„**Hodnota pořadnice $Z(x)$** – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x “

„**Místní sklon dZ/dX** – sklon posuzovaného profilu v poloze x_i “



Obrázek 23. Místní sklon [26]

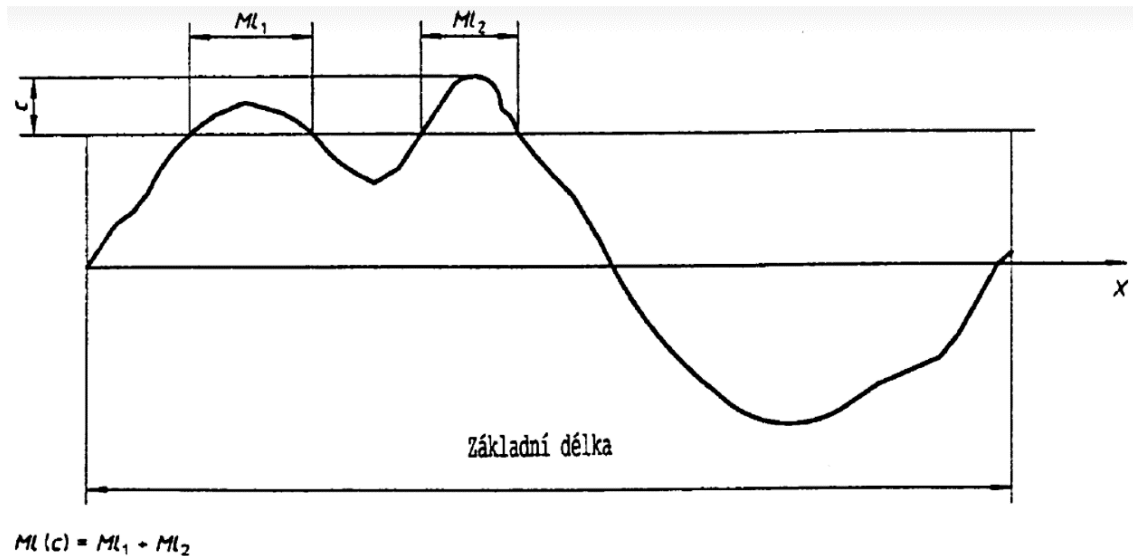
„**Výška výstupku profilu, Z_p** – vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku“

„**Hloubka prohlubně profilu, Z_v** – vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu“

„**Výška prvku profilu, Z_t** , součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu“

„**Šířka prvku profilu, X_s** – délka úseku osy X protínající prvek profilu“

„Materiálová délka profilu na úrovni c , $MI(c)$ – součet délek úseků získaných protnutím prvku profilu čarou rovnoběžnou s osou X v dané úrovni c “

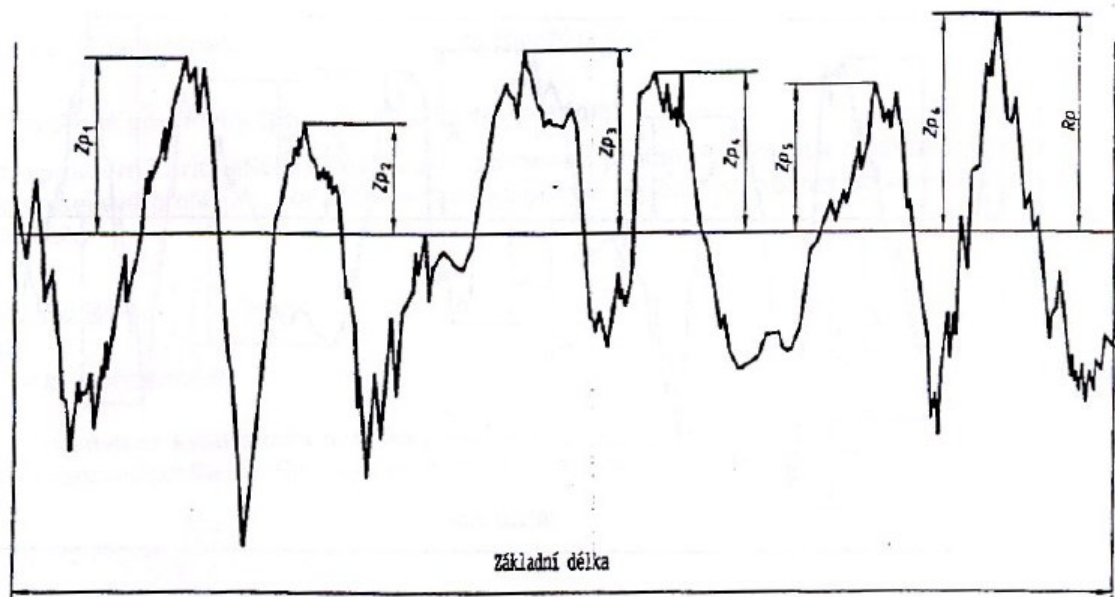


Obrázek 24. Materiálová délka [26]

2.3 Definice parametrů profilu povrchu

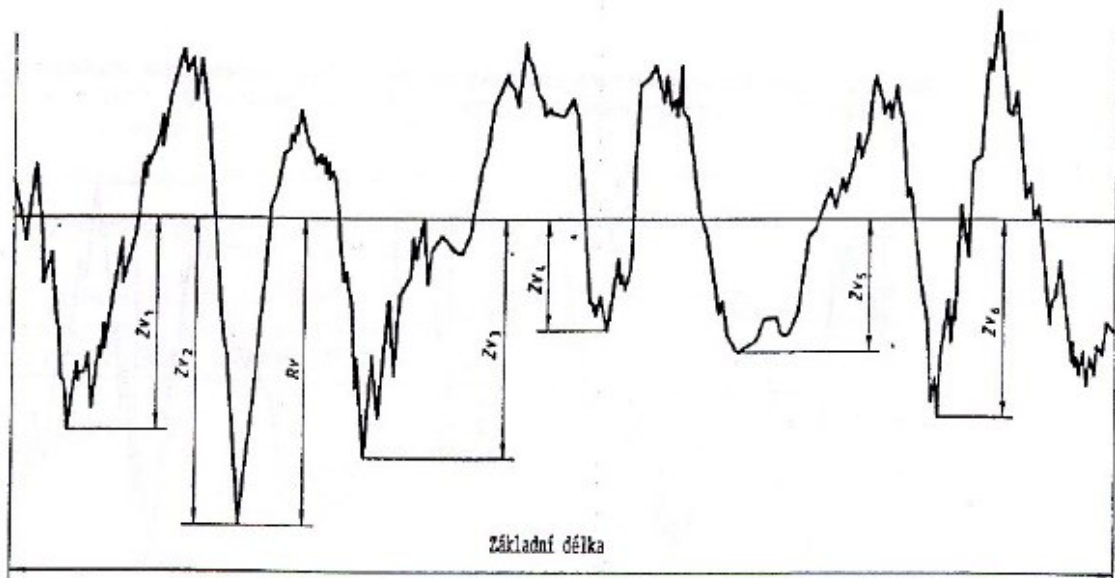
2.3.1 Výškové parametry (výstupky a prohlubně)

„Největší výška výstupku profilu, P_p , R_p , W_p – výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky“



Obrázek 25. Největší výška výstupku profilu [26]

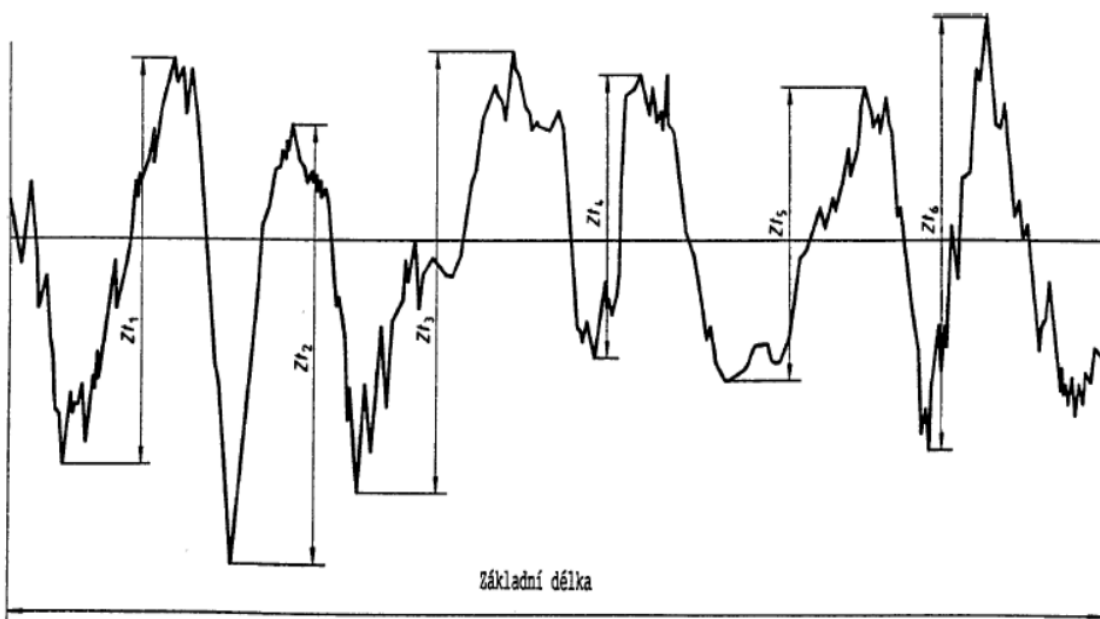
„Největší hloubka prohlubně profilu, P_v, R_v, W_v – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky“



Obrázek 26. Největší hloubka prohlubní profilu [26]

„Největší výška profilu, P_z, R_z, W_z – jedná se o součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně“

„Průměrná výška prvků profilů, P_c, R_c, W_c – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky.“



Obrázek 27. Výška prvků profilů [26]

„**Celková výška profilu**, Pt , Rt , Wt – součet výšky Zp nevyššího výstupku profilu a hloubky Zv nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky“

2.3.2 Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)

„**Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu**, Pa , Ra , Wa – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky“

$$Pa, Ra, Wa = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l [Z(x)] dx} \quad (1)$$

kde $l = lp, lr, lw$

„**Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu**, Pq , Rq , Wq – kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní desky“

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l [Z^2(x)] dx} \quad (2)$$

kde $l = lp, lr, lw$

„**Šikmost posuzovaného profilu**, Psk , Rsk , Wsk – podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Pq , Rq nebo Wq v rozsahu základní délky“

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

„Uvedená rovnice definuje Rsk , Psk a Wsk jsou definovány podobným způsobem. Všechny tyto parametry jsou mírou symetrie a hustoty pravděpodobnosti hodnot pořadnic a jsou silně ovlivňovány ojedinělými výstupky nebo ojedinělými prohlubněmi“

„**Špičatost posuzovaného profilu**, Pku , Rku , Wku – podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocni pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Pq , Rq , nebo Wq v rozsahu základní délky.“

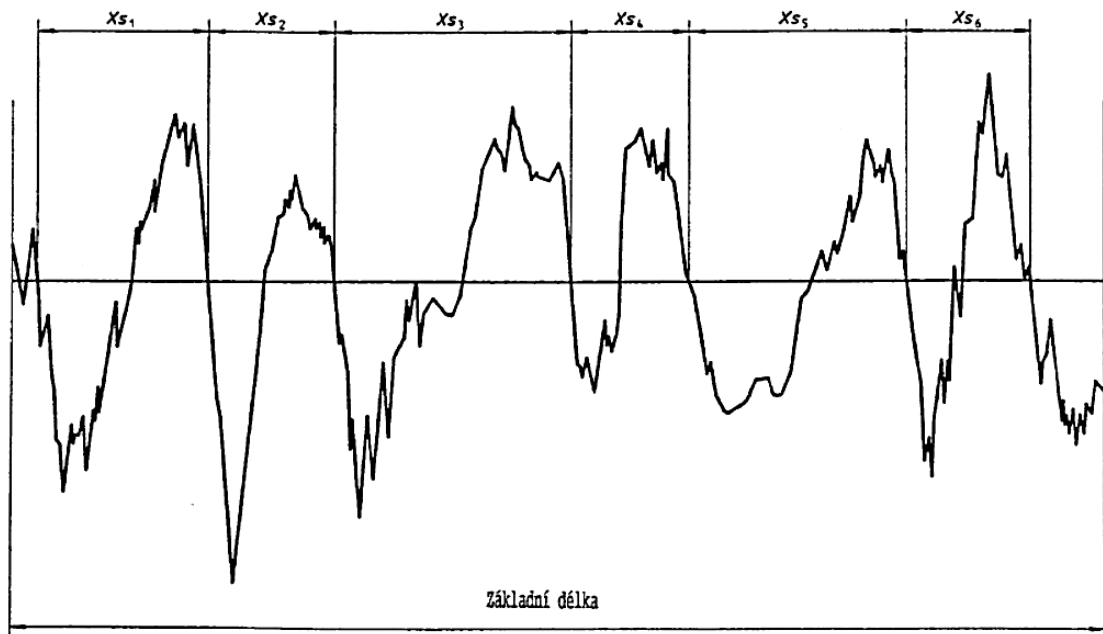
$$Rku = \frac{1}{Rq^2} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4 x| dx \right] \quad (4)$$

„Uvedená rovnice definuje Rku , Pku a Wku jsou definovány podobným způsobem. Všechny tyto parametry jsou mírou špičatosti a hustoty pravděpodobnosti hodnot pořadnic a jsou silně ovlivňovány ojedinělými výstupky nebo ojedinělými prohlubněmi.“

2.3.3 Délkové parametry

„Průměrná šířka prvků profilu, PSm , RSm , WSm – aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.“

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (5)$$



Obrázek 28. Šířka prvků profilu [26]

2.3.4 Tvarové parametry

„Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu, $P\Delta q$, $R\Delta q$, $W\Delta q$ – kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky“

3 NORMA ČSN EN ISO 4288

Celé znění normy „*Geometrické požadavky na výrobky (GPS)*“ struktura povrchu: Profilová metoda – pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Podstatou této normy je stanovení pravidel pro porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu, a rovněž specifikace pravidel pro výběr mezních vlnových délek cut-off λ_c pro parametry profilu drsnosti, měřených pomocí dotykových přístrojů. Dále budou vypsány v přímé citaci[28]

3.1 Hodnocení parametrů

„Pokud popisujeme parametry, které nám určují strukturu povrchu, nevztahují se na ně vady daného povrchu, které na něm mohou vzniknout (rýhy, póry) což vede k tomu, že tyto vady nesmí být při vyhodnocování povrchu brány v potaz.“

„Dostatečný počet měření daného povrchu se nám projeví ve spolehlivosti a správnosti měření.“

3.2 Pravidla a postupy pro kontrolu dotykovými přístroji

3.2.1 Měření parametrů profilu drsnosti

„Není-li určen směr měření jinak, obrobek se umísťuje tak, že směr řezu odpovídá největším hodnotám výšek parametrů drsnosti (R_a , R_z). Tento směr bude kolmý k poloze povrchu. Pro izotropní povrchy může být směr řezu libovolný.“

$$R_a = \frac{1}{l} * \int_0^l |Z(x)| dx \quad (6)$$

$$R_z = R_p + R_v \quad (7)$$

„Měření je provedeno na té části povrchu, na které lze očekávat kritické hodnoty, to může být posuzováno vizuálním porovnáním. Pro získání nezávislých výsledků jsou jednotlivá měření na této části povrchu rozdělena rovnoměrně.“

„Před určováním hodnot parametrů profilu drsnosti je potřeba si nejprve rozhodnout, zda je profil drsnosti periodický nebo neperiodický. Na základě toho, pokud není uvedeno jinak, postupujeme správnou metodou.“

„Postup pro neperiodický profil drsnosti“

- a. *„Nejprve odhadneme pomocí vizuální prohlídky, srovnání pomocí srovnávacích vzorků apod. o jaký parametr profilu drsnosti R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} se jedná.“*
- b. *„Odhadne se základní délka z tabulky 2 nebo 3 pomocí parametru z kroku a)“*
- c. *„Měřicím přístrojem, jehož hodnoty základní délky jsou nastaveny podle kroku b), získáme reprezentativní hodnoty R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} .“*
- d. *„Porovnejí se naměřené hodnoty R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} s rozsahem těchto hodnot v tabulce 2 nebo 3 odpovídající odhadnuté základní délce. Pokud jsou hodnoty mimo rozsah hodnot pro odhadovanou délku, nastaví se přístroj na větší případně menší délku, než je základní délka indikována měřenou hodnotou. Potom se měří reprezentativní hodnota při použití tohoto nastavení základní délky a znovu se porovnává s tabulkovými hodnotami. V tom případě by měla být dosažena kombinace měřené hodnoty a základní délky navrhovaná v tabulce 2 nebo 3.“*
- e. *„Získají se reprezentativní hodnoty R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} pro jednu základní délku nastavenou kratší, není-li tato nastavená kratší základní délka hodnocena v předcházejícím kroku d). Pohledem se zkontroluje, zda výsledná kombinace R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} a základní délky je uvedena v tabulkách 2 nebo 3.“*
- f. *„Jestliže jen závěrečné nastavení podle kroku d) odpovídá tabulce 2 nebo 3, potom nastavená základní délka a hodnoty R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} jsou správné. Jestliže krok e) také předpokládá kombinaci danou v tabulce 2 nebo 3, potom tato nastavená kratší základní délka a odpovídající hodnoty R_a , R_z , R_{z1max} , nebo R_{Sm} jsou správné“*
- g. *„Získá se reprezentativní měření žádaných parametrů použitím hodnoty mezní vlnové délky (základní délky) odhadnuté v předchozích krocích.“*

„Postup pro periodický profil drsnosti“

- a. „Na povrchu s neznámou drsností se graficky odhadne parametr R_{Sm} .“
- b. „Pro odhadnutý parametr R_{Sm} se určí doporučená hodnota mezní vlnové délky cut-off“
- c. „Je-li to nezbytné, tj. ve sporném případě, se změří hodnota R_{Sm} za použití hodnoty mezní vlnové délky cut-off, určené podle b)“
- d. „Jestliže hodnota R_{Sm} z kroku c) odpovídá menší nebo větší hodnotě mezní vlnové délky cut-off, než v kroku b), použije se menší nebo větší hodnota mezní vlnové délky cut-off“
- e. „Získá se reprezentativní měření žádaných parametrů při použití hodnoty mezní vlnové délky (základní délky) odhadnuté v předchozích krocích“

Tabulka 2 Základní délky drsnosti pro měření R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} , $R_{\Delta q}$ křivek a odpovídající parametry pro neperiodické profily (např. broušené profily)

R_a μm	Základní délka drsnosti l_r mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n mm
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Tabulka 3 Základní délky drsnosti pro měření R_z , R_v , R_p , R_c a R_t neperiodických profilů (např. broušených profilů)

$R_z^{1)}$ $R_{z1max.}^{2)}$ μm	Základní délka drsnosti l_r mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n mm
$(0,025) < R_z, R_{z1max.} \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z, R_{z1max.} \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z, R_{z1max.} \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z, R_{z1max.} \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z, R_{z1max.} \leq 200$	8	40

¹⁾ R_z je použito při měření R_z , R_v , R_p , R_c , a R_t
²⁾ $R_{z1max.}$ je použito jen při měření $R_{z1max.}$, $R_{v1max.}$, $R_{p1max.}$ a $R_{c1max.}$

4 NORMA ČSN EN ISO 25175-2

Norma „*Geometrická specifikace produktu (GPS)*“ textura povrchu: Plocha – část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Podstatou této normy specifikovat termíny, definice a parametry pro stanovení povrchové textury pomocí plošných metod. Dále budou vypsány v přímé citaci[29]

4.1 Termíny geometrického parametru

„*Parametr pole* – je stanovený ze všech bodů v omezené stupnici povrchu“

„*Parametr prvku* – je stanovený z podmnožiny předurčených topologických prvků z omezení stupnice povrchu“

„*V – parametr* – objem materiálu nebo zrušený objem pole nebo parametr prvku“

„*S – parametr* – pole nebo parametr prvku, který není V – parametrem“

„*Výška* – vyznačená kolmá vzdálenost z referenčního povrchu k omezení stupnice povrchu. Vzdálenost je stanovena kolmo k referenčnímu povrchu. Výška je záporná, pokud bod leží od referenčního povrchu ve směru materiálu.“

„*Hodnota koordinace* $z(x,y)$ – výškové omezení stupnice povrchu v poloze x, y . Souřadnicový systém je založen na referenčním povrchu.“

4.2 Definice parametru pole

„V níže uvedených terminologických položkách je každý termín vymezen jeho parametrem, a následně jeho značkou. Zatím co zkrácené termíny se mohou skládat z více písmen, značka sestává, pokud je potřeba pouze ze samotného písmena s indexem. Značky jsou použity v rovnicích uvedených v tomto dokumentu. Důvod pro toto odlišení je, aby nedošlo k nesprávnému výkladu sloučených písmen jako je indikace vícevětého počtu násobků mezi veličinami v rovnicích.“

4.2.1 Výškové parametry

„Všechny výškové parametry jsou stanoveny na základě určené plochy“

„*Základní průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu* S_q – vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy“

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy} \quad (8)$$

„**Šikmost omezené stupnice povrchu** S_{sk} – kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle S_q uvnitř určené plochy“

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (9)$$

„**Šikmost omezené stupnice povrchu** S_{ku} – kvocient průměrné čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uvnitř určené plochy“

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (10)$$

„**Maximální výška piku omezené stupnice povrchu** S_p – největší hodnota výšky piku uvnitř určené plochy“

„**Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu** S_v – hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu“

„**Maximální výška omezení stupnice povrchu** S_z – součet maximální hodnoty výšky piku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř určené plochy“

„**Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu** S_a – aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy“

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A z(x, y) dx dy \quad (11)$$

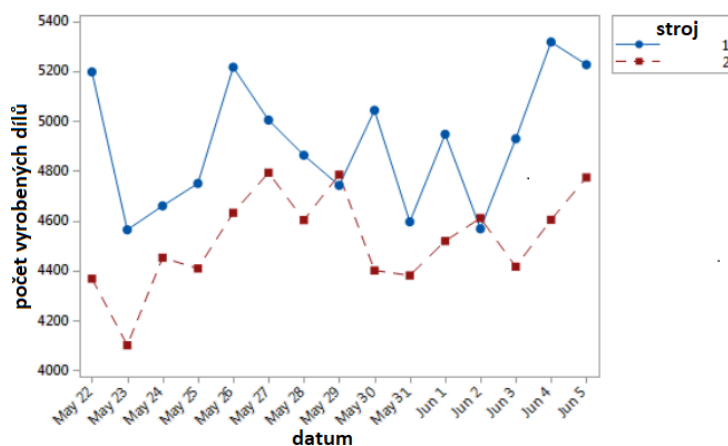
5 ZÁKLADNÍ STATISTICKÁ ANALÝZA EDA

Exploratory data analysis (EDA), v překladu exploratorní analýza dat, se ve statistice používá k prozkoumání souboru dat. Primárním účelem EDA je prozkoumat naměřená data před vytvořením jakýchkoliv závěrů. Můžeme pomocí ní určit stupně symetrie a špičatosti, lokální koncentraci dat, identifikovat zjevné chyby, odhalit odlehlé hodnoty nebo vztahy mezi proměnnými. Při práci s EDA můžeme využít spoustu nástrojů, mezi které můžeme řadit například tyto:

- Časový graf
- Krabicový graf
- Bodový graf
- Histogram
- Test odlehlých hodnot
- A mnoho dalších grafů a testů... [30]

5.1 Časový graf

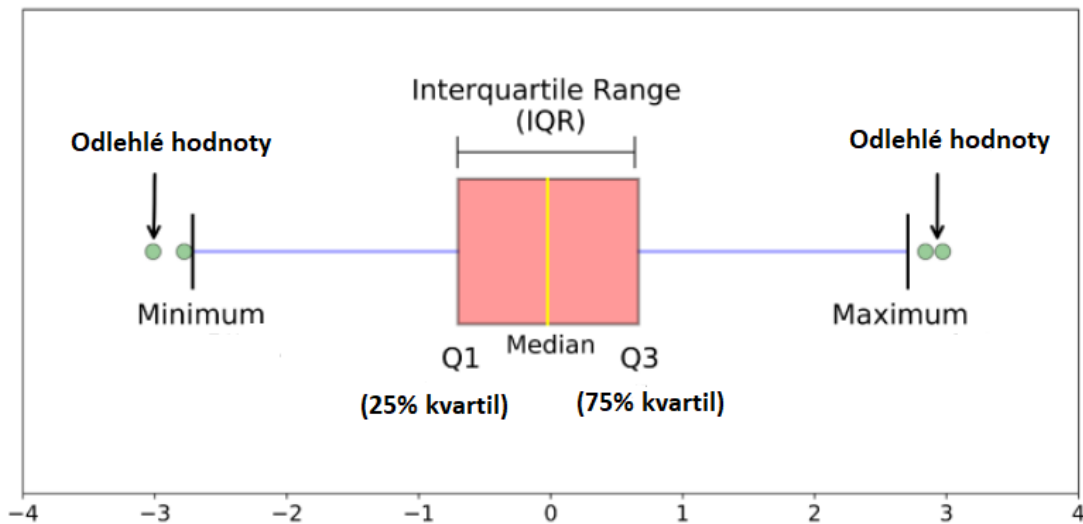
Časový graf zobrazuje data nashromážděná v nějaké časové posloupnosti (každou hodinu, směnu, den, ...) z libovolného procesu. Může se využít jako výchozí bod analýzy k tomu, abychom získali základní pohled na data. Určuje, jak se zkoumaná data vyvíjejí v čase, a zda jsou jednotlivé body náhodné nebo vykazují nějakou pravidelnost. Můžeme z něj vyčíst maxima a minima, a to kdy v čase nastanou, nebo nám může napovědět, zda se v souboru dat vyskytují nějaké odlehlé hodnoty. [31]



Obrázek 29 Příklad časového grafu [32]

5.2 Krabicový graf

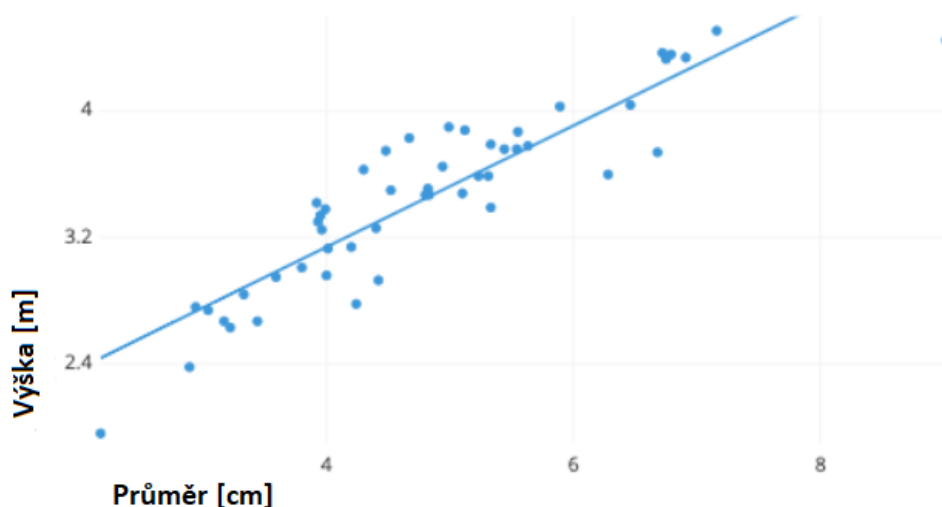
Krabicový graf je další způsob zobrazení distribuce dat, který k tomu primárně využívá pěti čísel – minimum, maximum, první a třetí kvartil a medián. Tento graf nám primárně ukazuje, jak jsou hodnoty v datech rozloženy, dále může pomoci identifikovat odlehlá data a jejich hodnoty, posoudit symetrii okolo kvartilů a u konců rozdělení. [30]



Obrázek 30 Příklad krabicového grafu [33]

5.3 Bodový graf

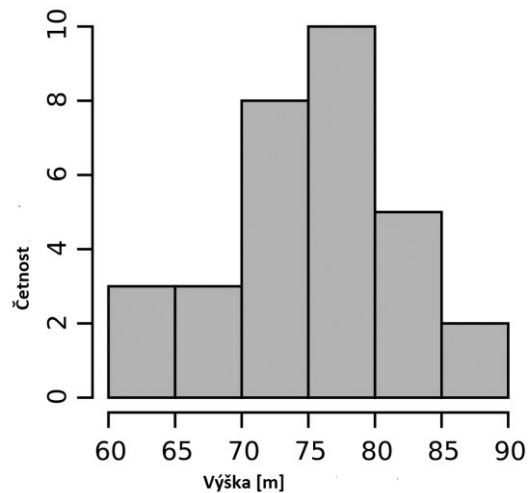
Bodový graf primárně slouží k zobrazení vztahu mezi dvěma proměnnými. Pokud jsou proměnné korelovány, jednotlivé body jsou rozmístěny kolem křivky nebo čáry. Čím lepší korelaci máme, tím blíže jsou body umístěny u křivky či čáry. [34]



Obrázek 31 Příklad bodového grafu [34]

5.4 Histogram

Histogram je svým vzhledem podobný sloupcovému grafu, ale na ose x se nachází jednotlivé třídy, které nám určují šířky sloupců. Na ose y se vyskytuje počet nebo procento obsažené v jednotlivých sloupcích. Histogramy slouží k demonstraci, kolik z určitého typu proměnných se vyskytuje v určitém intervalu. [30]



Obrázek 32 Příklad histogramu [30]

5.5 Test odlehlých hodnot (Grubbsův test)

Grubbsův test je parametrický, lze jej tedy použít pouze pro data s normálním rozdělením, tedy hodnoty, které se symetricky shlukují kolem mediánu souboru a vytváří tak tvar hustoty pravděpodobnosti tzv. Gaussovu křivku. Pro hodnocení míry odlehlosti se využívá její vzdálenost od aritmetického průměru souboru dat, vztaženou ke směrodatné odchylce. [30]

V případě početního řešení Grubbsova testu postupujeme následovně:

- Stanovíme si nulovou hypotézu H_0 , a to tak, že největší, respektive nejmenší hodnota z výběru není odlehlá.
- Určíme alternativní hypotézu H_A , a to tak, že největší, respektive nejmenší hodnota z výběru je odlehlá.
- Zvolíme si hladinu významnosti α , na které chceme hypotézy zkoumat (většinou $\alpha=0,05$).
- V tabulce si pomocí zvolené hladiny významnosti a počtu změřených hodnot najdeme hodnotu kritické hodnoty T_{kr} .

- Vypočítáme testovací kritérium T

$$T = \frac{|x_i - \bar{\mu}|}{S}, \text{ kde } S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{\mu})^2} \quad (12)$$

- Nakonec porovnáme hodnoty T a T_{kr} :

- $T > T_{kr} \rightarrow$ potvrzuje se alternativní hypotéza H_A , hodnota je tedy odlehlá
- $T < T_{kr} \rightarrow$ potvrzuje se nulová hypotéza H_0 , hodnota tedy není odlehlá

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou hodnocení jakosti povrchu rotačních součástí obroběných technologiemi soustružení, broušení a válečkování. Dalším úkolem bylo provést analýzu jednotlivých povrchů pomocí bezkontaktního profilometru. Data získaná měřením, následně bylo třeba podrobit statistické analýze.

7 MĚŘENÉ VZORKY A PŘÍSTROJ

7.1 Vzorke

Pro měření byly firmou dodány 3 sady vzorků, vždy po 15 kusech. Plochy dílů, které jsme podrobili kontrole, byly zhotoveny konvenčními metodami obrábění – soustružením, broušením a válečkováním. Válečky byly vyrobeny z oceli třídy 11 na CNC strojích o rozměrech:

- $l = 33 \text{ mm}$
- $\varnothing = 17,5 \text{ mm}$
- Zamýšlená drsnost povrchu při jednotlivých metodách obrábění viz. Tab. 5

Tabulka 4 Zamýšlené hodnoty drsnosti

Technologie obrábění	Soustružení	Broušení	Válečkování
Sa [μm]	1,6	0,2	0,1

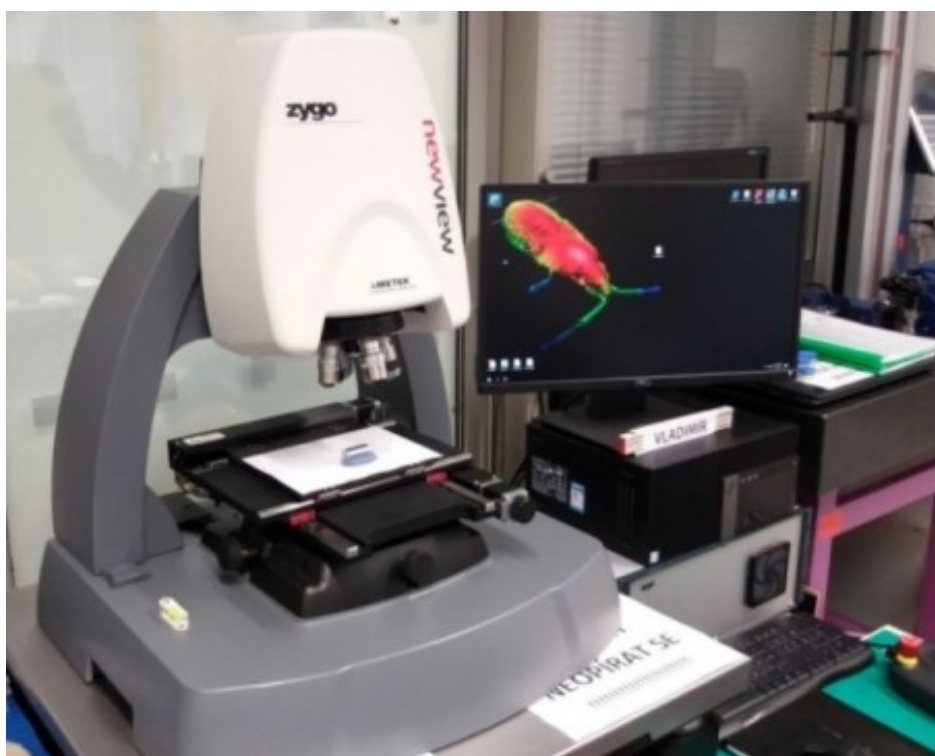
Před prací bylo potřeba vzorky očistit od konzervačního prostředku (petrolej). Následně okartáčovat od utkvělých vláken utěrky či jiných nečistot. Po skončení měření se díly zpátky zakonzervovaly.



Obrázek 33 Příklad vzorku

7.2 Měřicí přístroj

Analýzu povrchu jednotlivých dílů jsme provedli v laboratoři za pomoci bezkontaktního profilometru značky Zygo NewView 8000. Pro udržení konstantních podmínek při měření je laboratoř zařízená tak, aby v ní nedocházelo k proudění vzduchu. Dále se teplota automaticky udržuje pomocí klimatizace nastavené na 22°C. Atmosférický tlak v místnosti byl 994,1 hPa. Samotný profilometr je umístěn na stole, který pneumaticky eliminuje vibrace, což nám rovněž pomůže docílit co nejlepších hodnot měření.



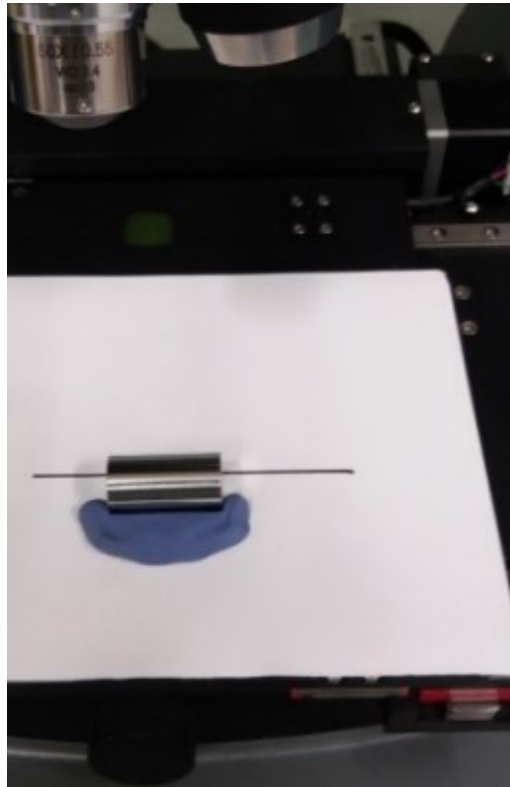
Obrázek 34 Bezkontaktní profilometr Zygo NewView 8000

7.2.1 Nastavení přístroje

Než začneme s měřením, je potřeba připravit a nastavit profilometr fungující na softwaru Zygo Mx. Nastavení profilometru jsme provedli podle následujícího postupu:

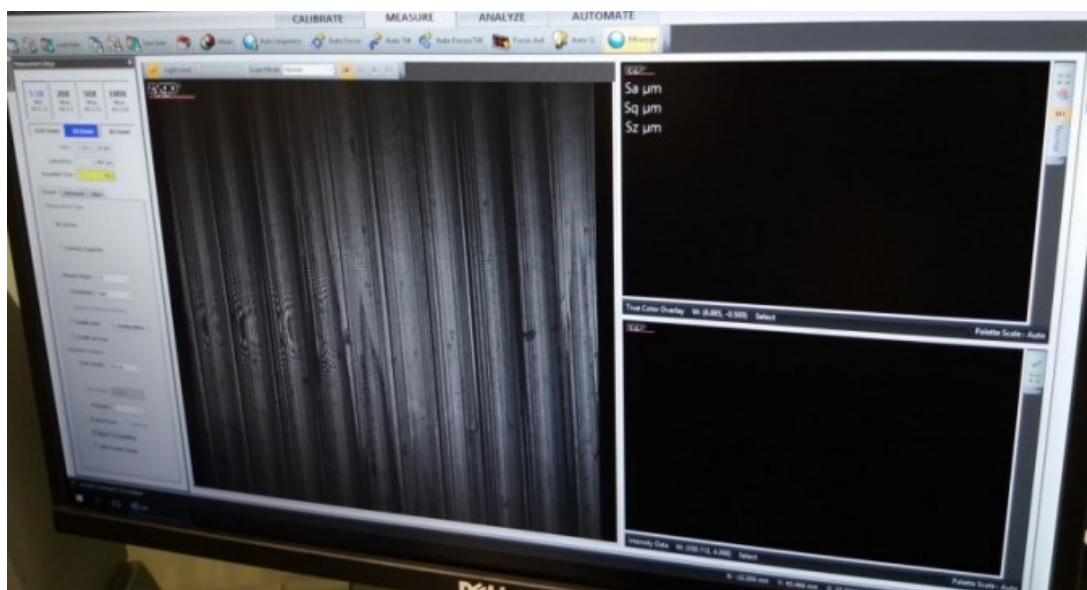
- Nastavit objektiv na revolverové hlavě (v našem případě 5,5 x 0,15)
- Otevřít aplikaci Micro
- Pomocí joysticku umístit stůl do výchozí nulové polohy
- Otevřít filtr do výchozí polohy
- Najet s profilometrem do základní polohy

- Vložit měřený vzorek na stůl



Obrázek 35 Umístění vzorku na stole

- Najet se stolem do místa záběru objektivu
- Zaostrit profilometr
- Zaostrit objektiv pomocí nalezení Youngových interferenčních proužků

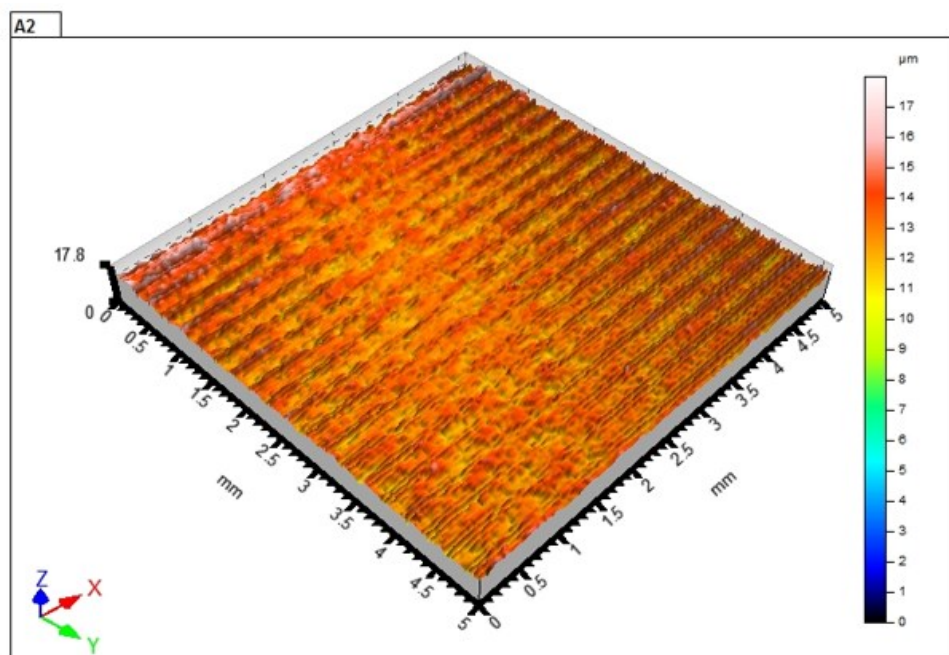


Obrázek 36 Youngovy interferenční proužky

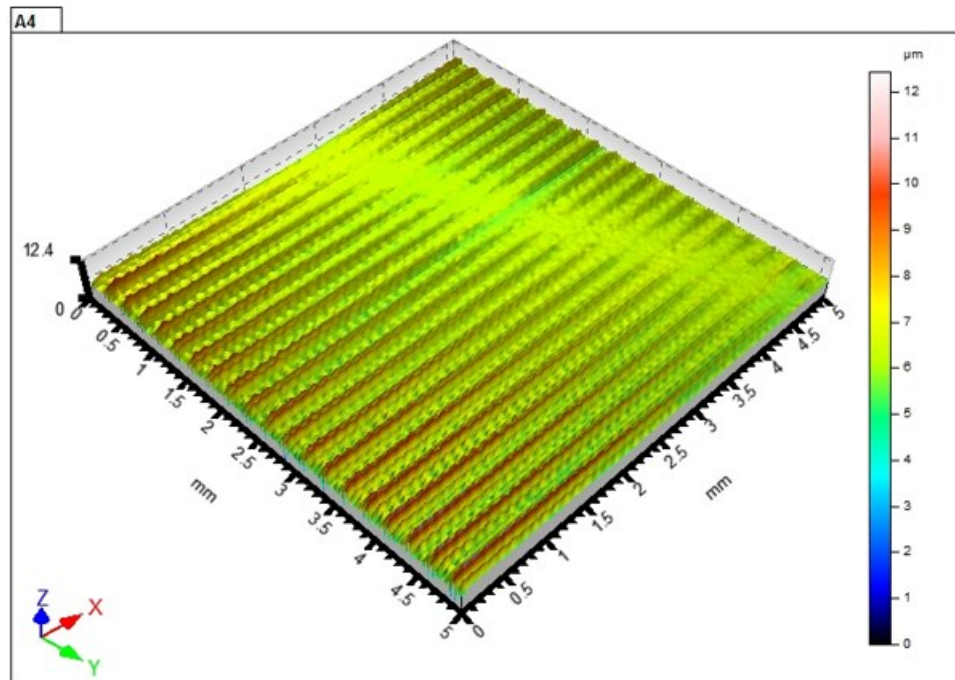
- Softwarově nastavit skenovací výšku objektivu (v našem případě 20 μm)
- Softwarově nastavit zvětšení objektivu na 5,5x a 1x zoom
- Softwarově nastavit požadovaný skenovací rozměr (v našem případě 5 x 5 mm)
- Softwarově doostrit objektiv

7.2.2 Postup měření

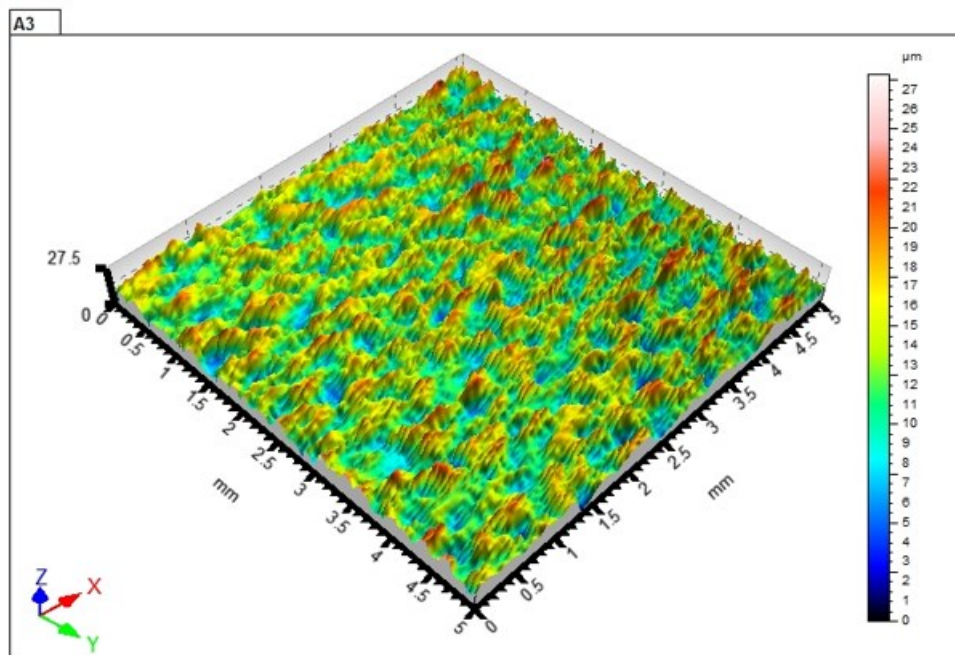
Když máme profilometr nastavený podle postupu, můžeme začít měření. Před měřením je potřeba mít vzorek správně nasvícený. Vyhodnocení, zda je nasvícení dostatečné nebo zda je potřeba úpravy, proběhne automaticky v softwaru Mx. Pokud je díl správně nasvícený můžeme zahájit měření. Přístroj začne skenovat vybranou oblast vzorku. Na čas skenování má vliv několik faktorů: zvolený objektiv, přiblížení a velikost měřeného povrchu. Měření jedné součásti trvalo přibližně dvě minuty. Výsledek měření se nám potom zobrazí na monitoru viz. obr. 37.



Obrázek 37 Grafický výstup pro soustružení



Obrázek 38 Grafický výstup pro broušení



Obrázek 39 Grafický výstup pro válečkování

8 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

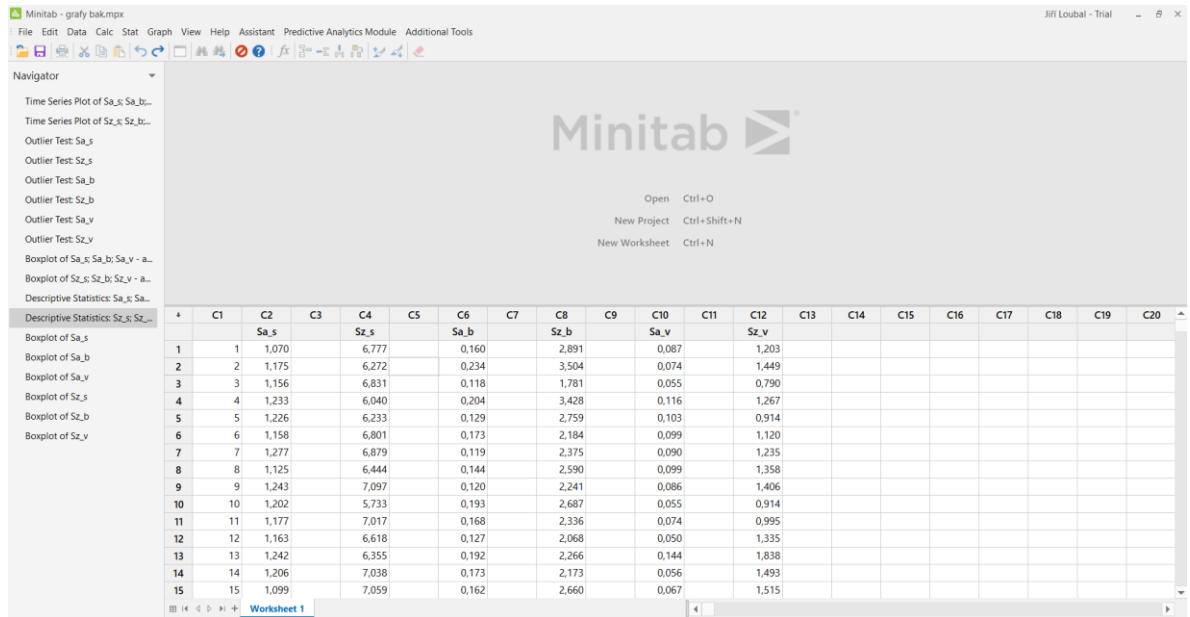
8.1 Tabulkové zpracování naměřených dat

Naměřená data pomocí profilometru Zygo NewView 8000 byla přepracována do tabulkové podoby v programu MS Excel. Následné statistické zpracování dat proběhlo za pomoci programu Minitab 20.

Následující tabulka zobrazuje naměřené hodnoty S_a a S_z pro jednotlivé technologie obrábění, společně s průměrnými hodnotami jednotlivých souborů a jejich směrodatnou odchylkou.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty

Technologie obrábění		Soustružení		Broušení		Válečkování	
Č. měř. vzorku	Parametr	S_a [μm]	S_z [μm]	S_a [μm]	S_z [μm]	S_a [μm]	S_z [μm]
	1		1,070	6,777	0,160	2,891	0,087
2		1,175	6,272	0,234	3,504	0,074	1,449
3		1,156	6,831	0,118	1,781	0,055	0,790
4		1,233	6,040	0,204	3,428	0,116	1,267
5		1,226	6,233	0,129	2,759	0,103	0,914
6		1,158	6,801	0,173	2,184	0,099	1,120
7		1,277	6,879	0,119	2,375	0,090	1,235
8		1,125	6,444	0,144	2,590	0,099	1,358
9		1,243	7,097	0,120	2,241	0,086	1,406
10		1,202	5,733	0,193	2,687	0,055	0,914
11		1,177	7,017	0,168	2,336	0,074	0,995
12		1,163	6,618	0,127	2,068	0,050	1,335
13		1,242	6,355	0,192	2,266	0,144	1,838
14		1,206	7,038	0,173	2,173	0,056	1,493
15		1,099	7,059	0,162	2,660	0,067	1,515
\bar{x}		1,183	6,613	0,161	2,530	0,084	1,255
s		0,057	0,415	0,035	0,480	0,026	0,278



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
		Sa_s		Sz_s		Sa_b		Sz_b		Sa_v		Sz_v								
1	1	1,070		6,777		0,160		2,891		0,087		1,203								
2	2	1,175		6,272		0,234		3,504		0,074		1,449								
3	3	1,156		6,831		0,118		1,781		0,055		0,790								
4	4	1,233		6,040		0,204		3,428		0,116		1,267								
5	5	1,226		6,233		0,129		2,759		0,103		0,914								
6	6	1,158		6,801		0,173		2,184		0,099		1,120								
7	7	1,277		6,879		0,119		2,375		0,090		1,235								
8	8	1,125		6,444		0,144		2,590		0,099		1,358								
9	9	1,243		7,097		0,120		2,241		0,086		1,406								
10	10	1,202		5,733		0,193		2,687		0,055		0,914								
11	11	1,177		7,017		0,168		2,336		0,074		0,995								
12	12	1,163		6,618		0,127		2,068		0,050		1,335								
13	13	1,242		6,355		0,192		2,266		0,144		1,838								
14	14	1,206		7,038		0,173		2,173		0,056		1,493								
15	15	1,099		7,059		0,162		2,660		0,067		1,515								

Obrázek 40 Zobrazení dat v programu Minitab 20

8.2 Grafické zpracování naměřených dat

K vyhodnocení povrchů zpracovaných jednotlivými operacemi byly zvoleny parametry S_a (průměrná aritmetická výška plochy) a S_z (maximální výška plochy).

Pro práci s naměřenými daty byla použita základní statická analýza EDA, díky které můžeme provést základní statistickou analýzu naměřeného souboru dat. Metodika EDA zahrnuje mnoho možností, jak data zpracovat, a to jak matematicky, tak i graficky.

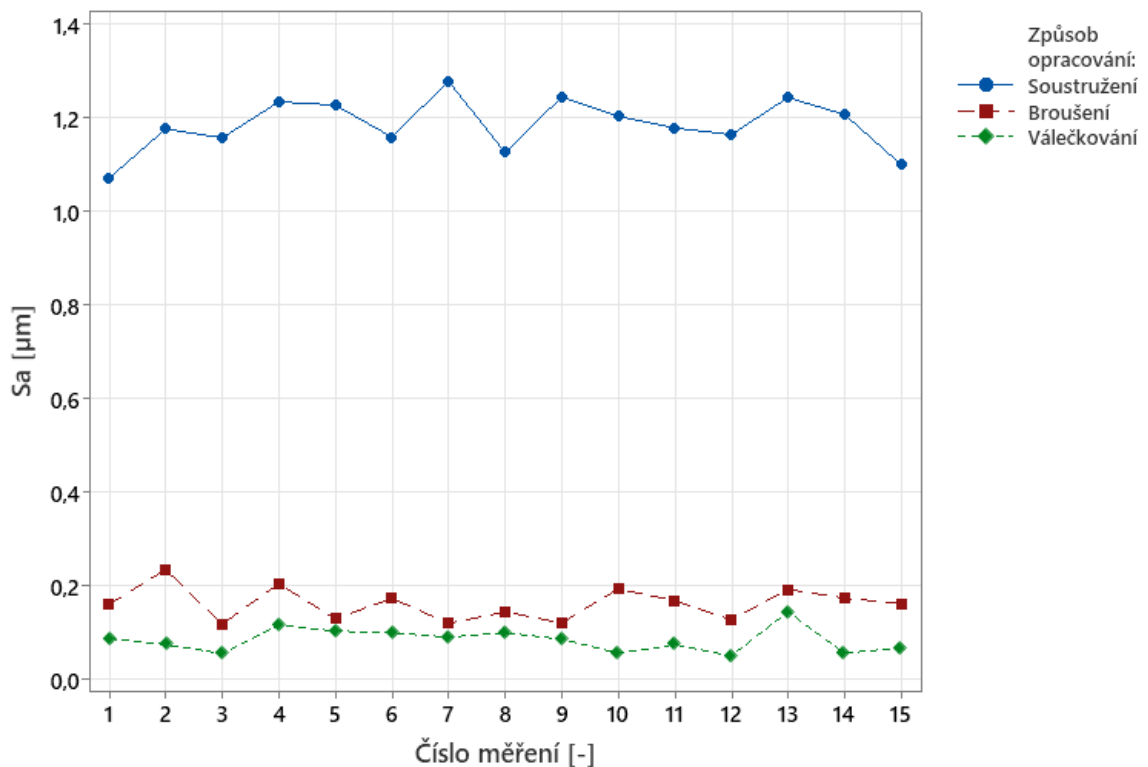
Dále v práci bude využíváno jen grafického hodnocení dat.

8.2.1 Časové grafy vývoje měření

Pro základní orientaci v souboru dat byly vytvořeny časové grafy.

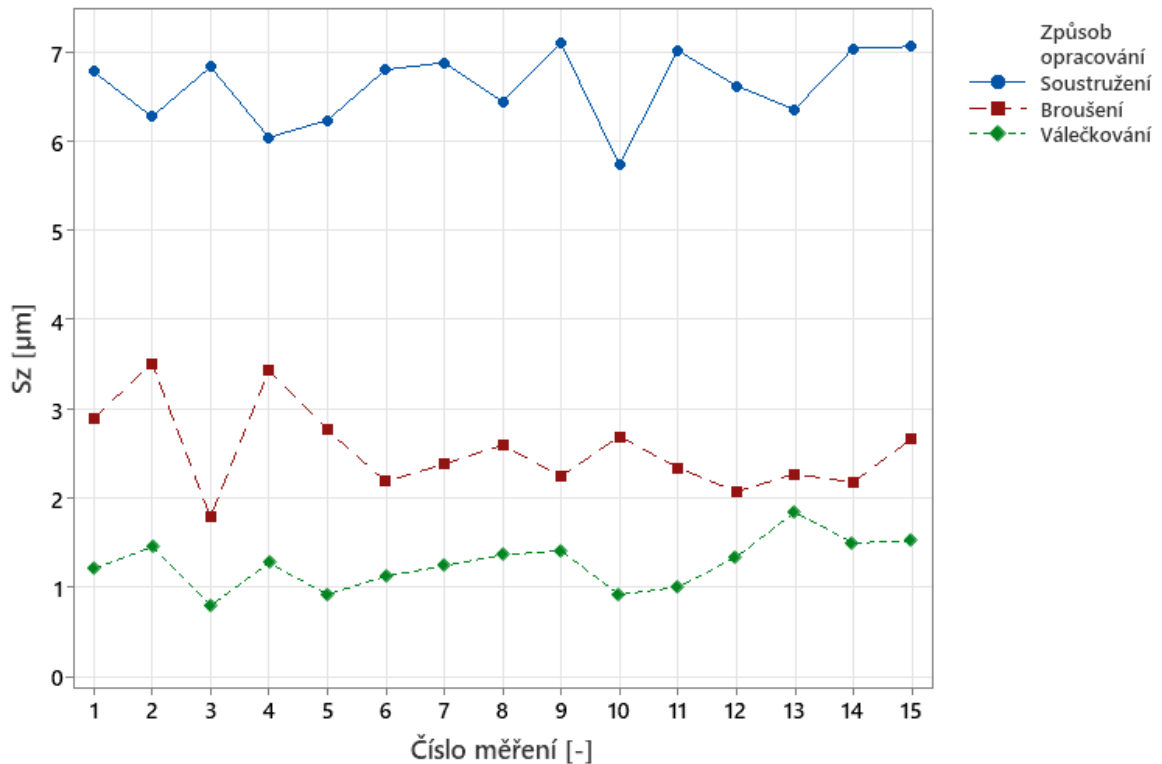
Jak už vyplývá z názvu, graf nám zobrazuje časový vývoj jednotlivých naměřených hodnot. Snadno z něj vyčteme maxima a minima jednotlivých souborů a rovněž nám může napovědět, zda se v datech nevyskytují odlehlé hodnoty.

Následující graf (viz. obr. 41) zobrazuje porovnání parametru S_a pro všechny způsoby opracování, tak jak byly jednotlivé hodnoty postupně změřeny. Z grafu je patrné, že hodnoty drsnosti soustruženého povrchu nabývají nejvyšších hodnot a hodnoty válečkovaného povrchu hodnot nejnižších. Jak se dalo předpokládat, dokončovacími operacemi jsme schopni získat lepší drsnost povrchu než konvenčním soustružením. Dále pak ani u jedné z metod nemůžeme říci, že by se v souboru vyskytovaly nějaké odlehlé hodnoty, nebo že by zde byl patrný nějaký trend.



Obrázek 41 Časový graf hodnoty S_a pro jednotlivé způsoby opracování

Stejně jako u předešlého grafu, tak i pro parametr Sz (viz. obr.42) lze říct, že hodnoty pro soustružení nabývají nejvyšších hodnot a hodnoty válečkovaného povrchu hodnot nejnižších. Dále je z grafu patrné, že rozptyl naměřených hodnot Sz je značně vyšší než u parametru Sa.



Obrázek 42 Časový graf hodnoty Sz pro jednotlivé způsoby opracování

8.2.2 Grubbsův test odlehlých hodnot

Z důvodu kontroly, zda soubory neobsahují odlehlé hodnoty, byl proveden Grubbsův test odlehlých hodnot. Běžně by se Grubbsův test prováděl početně, ale pro naši kontrolu bylo jednodušší využít funkce v programu Minitab 20. Základ je však v obou případech stejný.

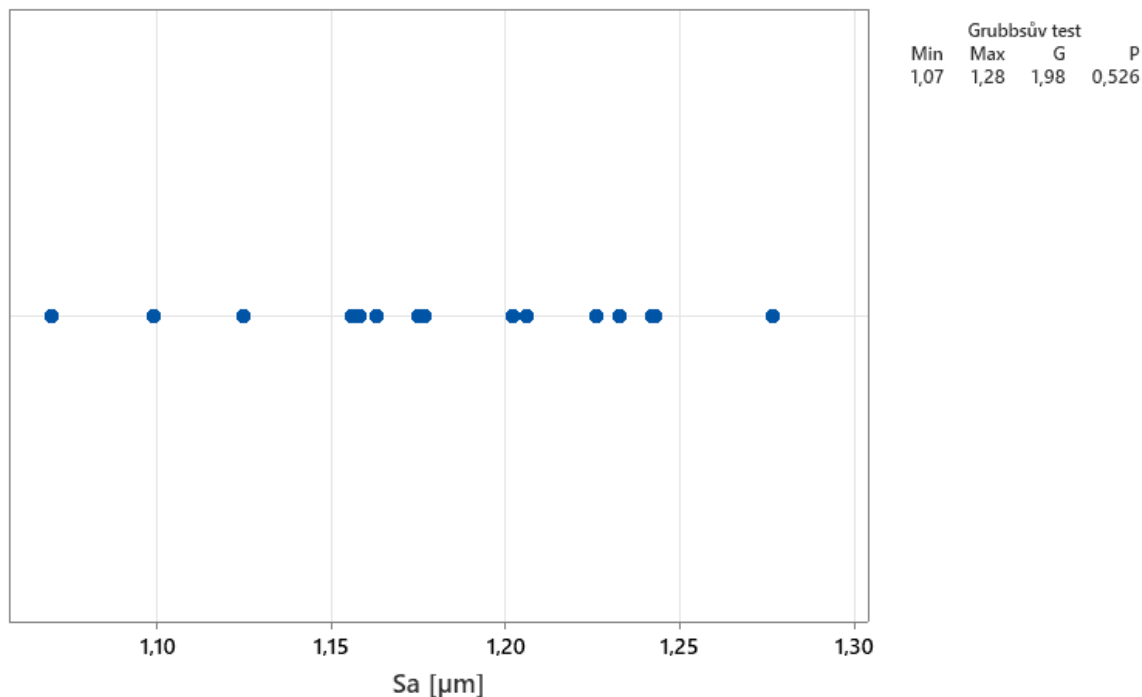
Stanovíme si nulovou a alternativní hypotézu:

- H_0 – největší, respektive nejmenší hodnota výběru není odlehlá
- H_A – největší, respektive nejmenší hodnota výběru je odlehlá

Zvolíme hladinu významnosti α :

- $\alpha = 0,05$

Vytvoříme graf v programu Minitab viz. obr. 43–48



Obrázek 43 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sa soustružení
Následně porovnáme hodnotu p s hladinou významnosti α (příklad pro obr.43)

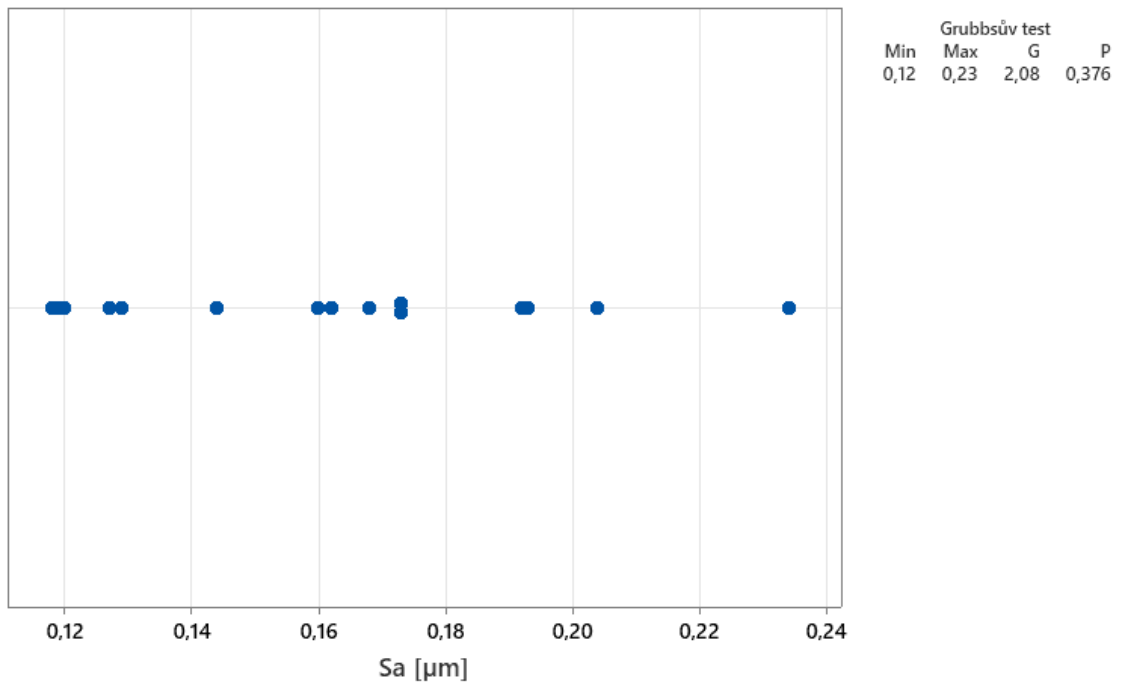
- Hodnota $p > \alpha$
- $0,526 > 0,05$

Pokud, jakožto i v našem případě, je hodnota p větší než hladina významnosti α , z testu vyplývá, že hypotéza H_0 je pravdivá, tedy že v souboru se nevyskytují odlehlé hodnoty. V případě maximální a minimální hodnoty souboru se jedná o extrém, a ne o chybu měření.

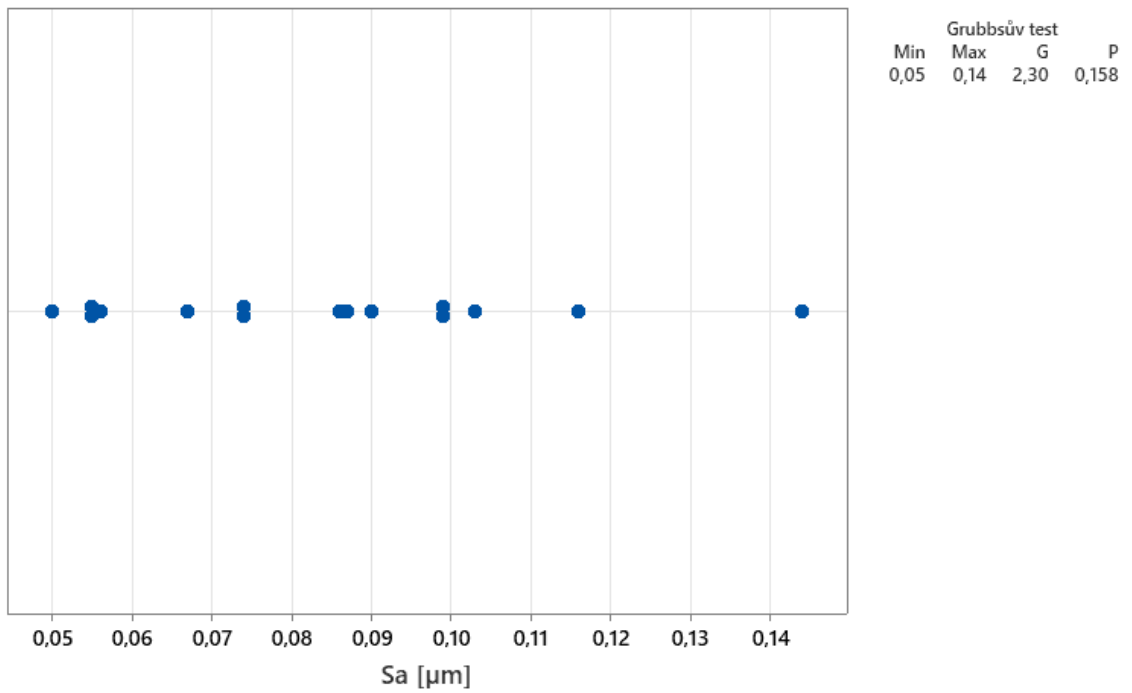
Pro zjednodušení byly výsledky zbylých testů shrnuty do tabulky viz. tab. 7. Z tabulky vyplývá, že hodnoty p pro všechny soubory jsou vyšší než hladina významnosti. Můžeme tedy říct, že se v žádném z naměřených souborů nevyskytují odlehlé hodnoty.

Tabulka 6 Výsledky Grubbsova testu

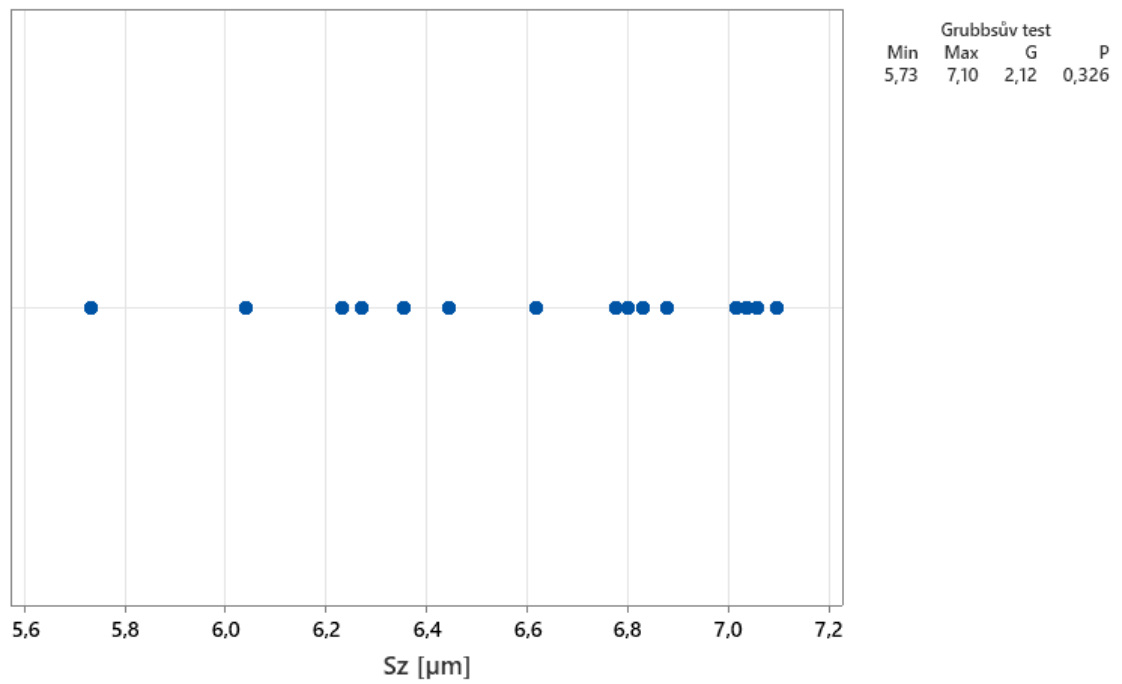
Technologie obrábění	Parametr	hodnota p	Hladina významnosti	Potvrzení hypotézy H_A/H_0
Soustružení	Sa	0,526	0,05	potvrzují H_0
Broušení	Sa	0,376		potvrzují H_0
Válečkování	Sa	0,158		potvrzují H_0
Soustružení	Sz	0,326		potvrzují H_0
Broušení	Sz	0,438		potvrzují H_0
Válečkování	Sz	0,350		potvrzují H_0



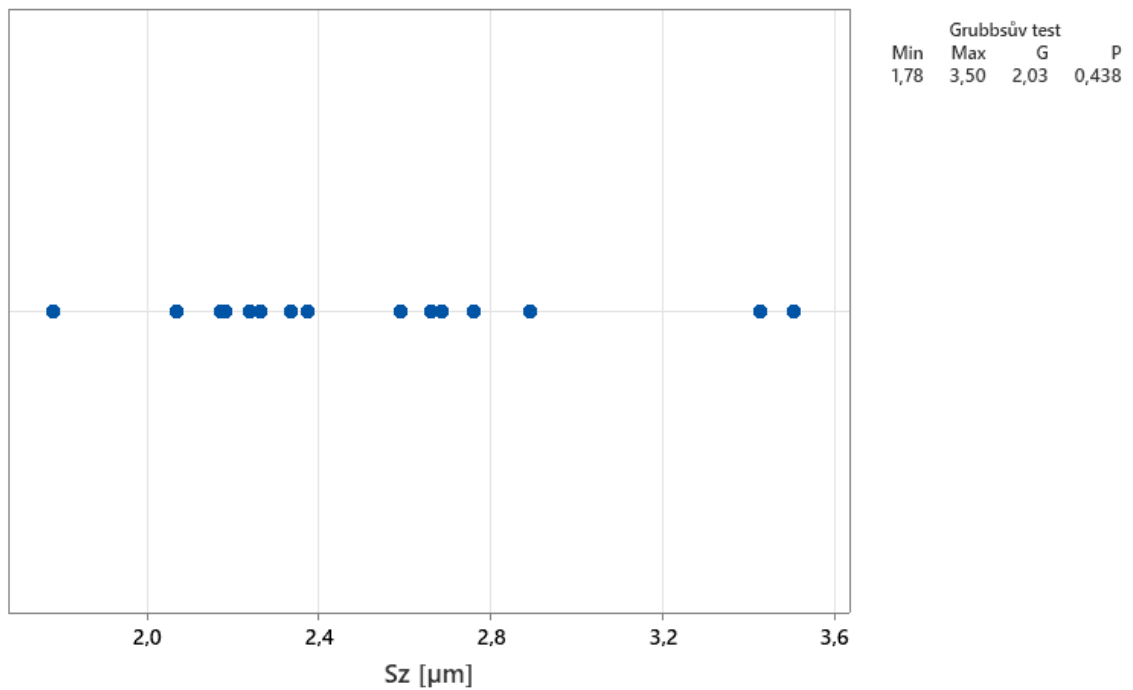
Obrázek 44 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sa broušení



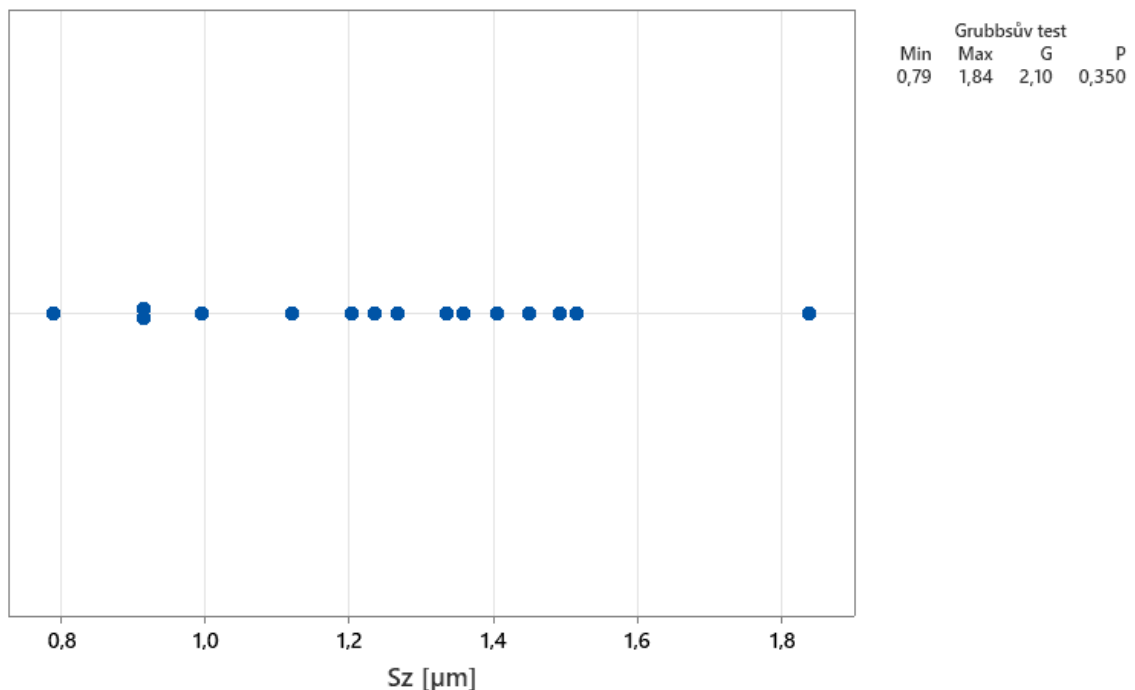
Obrázek 45 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sa válečkování



Obrázek 46 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sz soustružení



Obrázek 47 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sz broušení



Obrázek 48 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sz válečkování

8.2.3 Krabicové grafy

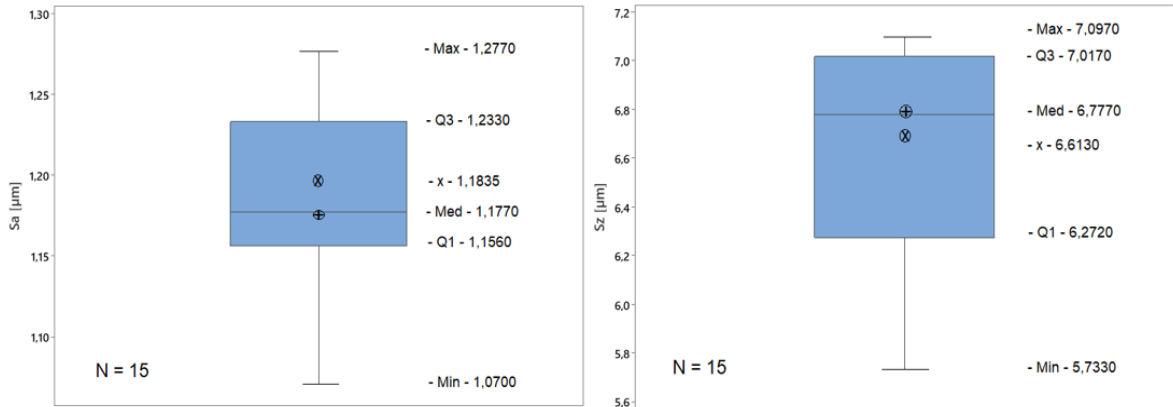
Krabicové grafy slouží k rychlému a jasnému pohledu na soubor dat. Využívají k tomu pět čísel – minimum, maximum, první a třetí kvartil a medián. Umožňují nám identifikovat odlehlé hodnoty, posoudit asymetrii a porovnat rozptyl u více souborů hodnot najednou.

Pro zjednodušenou orientaci v grafech do nich byly vypsány všechny důležité hodnoty spolu s aritmetickým průměrem.

Co se týče odlehlých hodnot, tak jak předcházející Grubbsův test ukázal, ani v jednom souboru dat se žádné odlehlé hodnoty nevyskytují. Nemusíme tedy jejich výskyt kontrolovat.

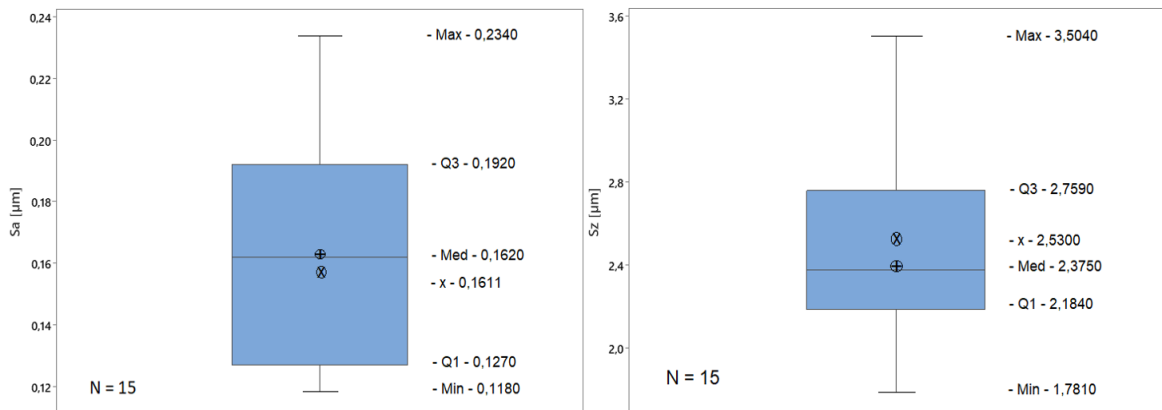
Při porovnání rozptylu jednotlivých operací je jasně patrné, že naměřená data ze soustružených dílů mají oproti broušení a válečkování největší rozptyl. Při válečkování se rozptyl snížil a při válečkování je zcela nejmenší.

Když budeme sledovat asymetrii u obr. 49 pro povrch zhotovený soustružením, zjistíme, že medián pro hodnotu Sa se blíží prvnímu kvartilu. Toto naznačuje, že se jedná o asymetrii, jinými slovy, že data mohou mít jiné rozdělení než normální. Stejně tak můžeme sledovat asymetrii u parametru Sz, Zde se ale medián přibližuje k třetímu kvartilu.



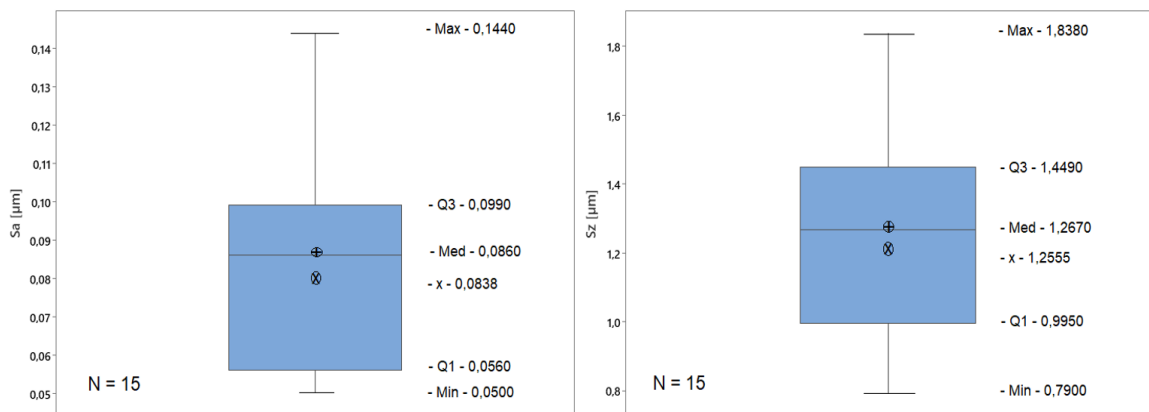
Obrázek 49 Krabicové grafy hodnot Sa a Sz soustružení

U povrchů zhotovených broušením pro parametr Sa je hodnota mediánu blízko středu mezi prvním a druhým kvartilem. Tento soubor hodnot by tak nejlépe mohl odpovídat normálnímu rozdělení. U hodnoty Sz se medián znovu blíží k prvnímu kvartilu, takže se bude jednat o jiné rozdělení.



Obrázek 50 Krabicové grafy hodnot Sa a Sz broušení

Pro válečkový povrch se hodnoty obou mediánů, jak pro hodnotu Sa, tak i Sz, blíží k třetímu kvartilu, což znovu naznačuje, že se jedná o jiné rozdělení než normální.



Obrázek 51 Krabicové grafy hodnot Sa a Sz válečkování

ZÁVĚR

V teoretické části jsme se zabývali možnostmi výroby rotačních dílů, a to jak konvenčními, tak nekonvenčními metodami obrábění. Dále jsme se seznámili s hodnocením drsnosti povrchu rotačních dílů za pomoci norem ČSN EN ISO 4287, 4288 a 25175-2. Rovněž jsme se seznámili se základní statistickou analýzou dat, a to za použití metodiky EDA tedy exploratorní analýzy dat, kterou jsme v praktické části využili ke zpracování naměřených dat.

V druhé části práce jsme se zaměřili na nastavení a práci s bezkontaktním profilometrem Zygo NewView 8000. Pro měření byly zvoleny tři sady vzorků. Jednotlivé díly v sadách byly obrobena konvenčními metodami obrábění a to soustružením, broušením a válečkováním. Každá skupina byla zastoupena 15 válečky. Následně byly vzorky pomocí profilometru bezkontaktně změřeny a pro další zpracování byly zvoleny parametry Sa a Sz.

Naměřené hodnoty byly následně podrobeny statistické analýze za pomoci programu Minitab 20. Pro vyhodnocení dat byla využita metodika EDA. Pro základní pohled na jednotlivé soubory byly vytvořeny časové grafy, díky nimž jsme byli již na začátku schopni říct, že rozptyl parametru Sz je značně vyšší než parametru Sa. Poté byly všechny soubory podrobeny testu odlehlých hodnot (Grubbsův test). Test prokázal, že se ani v jednom ze souborů nenachází odlehlé hodnoty. Pro další zpracování dat bylo využito krabicových grafů. Zjistili jsme, že jednotlivé soubory jsou asymetrické, což naznačuje, že se jedná o jiné než normální rozdělení.

Jak už bylo předem zřejmé, a což i následná měření potvrdila, nejlepší jakosti povrchu z využitých metod obrábění dosáhneme pomocí dokončovací operace válečkování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1
- [2] CNC Machining vs. Conventional Machining. *EMC Precision* [online]. Ohio: Gedridge, 2021 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://emcprecision.com/blog/cnc-machining-vs-conventional-machining/>
- [3] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2. (obrázek: 1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12)
- [4] How to do turning in different materials. *SANDVIK* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general-turning/pages/how-to-do-turning-in-different-materials.aspx>
- [5] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1
- [6] Milling Process. *Learnmech* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://learnmech.com/milling-process-definition-milling-manufacturing-processes/>
- [7] Machining Processes. *Trimantec* [online]. Winston-Salem: TECHNICAL COMMUNICATIONS TEAM, 2020 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://trimantec.com/blogs/t/machining-processes-overview#Milling>
- [8] Drilling vs Boring vs Reaming. *Smlease* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.smlease.com/entries/manufacturing/drilling-vs-boring-vs-reaming-what-is-the-difference/>
- [9] Difference Between Drilling, Boring & Reaming. *Cargister* [online]. Kinsey, 2017 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.cargister.com/difference-drilling-boring-reaming/>
- [10] Difference Between Shaping and Planing. *Difference.minaprem* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <http://www.difference.minaprem.com/machining/difference-between-shaping-and-planing/>
- [11] GRINDING. *Mmsonline* [online]. Cincinnati: Doran, 2021 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/machining-101-what-is-grinding> (obrázek: 7)
- [12] What is Honing? *Lapmaster-wolters* [online]. 2021 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.lapmaster-wolters.com/what-is-honing.html>

- [13] HONING. *Gehring-group* [online]. 2015 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.gehring-group.com/en-ww/article/honing-how-it-works>
- [14] What is Lapping? *Lapmaster-wolter* [online]. 2021 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.lapmaster-wolters.com/what-is-lapping.html>
- [15] What Is Superfinishing? *Metalsupermarkets* [online]. 2020 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.metalsupermarkets.co.uk/what-is-superfinishing/>
- [16] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [17] EDM Technology. *Sodick* [online]. 2021 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.sodick.org/about-sodick/sodicks-technology/articles/edm-technology.html>
- [18] ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING. *Hitekmgf* [online]. 2017 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.hitekmgf.com/electrical-discharge-machining-edm-services.html>
- [19] Strojírenství. *Eluc* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/ucebnice/23/lekce> (obrázek: 13,14,18)
- [20] Electrochemical Machining. *OpenLearn* [online]. 2017 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/electrochemical-machining-ecm>
- [21] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 3. díl. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2
- [22] DUBEY, Avanish Kumar a Vinod YADAVA. Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, **48**(6), 609-628 [cit. 2021-11-01]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017
- [23] Nekonvenční metody obrábění. *Mmspektrum* [online]. 2008 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil> (obrázek: 15,16,17)
- [24] SHAIKSHAVALI, Godala, M. MURALI MOHAN, G. PRAVEEN KUMAR YADAV, S. KRISHNARAJ, L. GIRISHA a Ram SUBBIAH. Analysis of parametric effect on domex steel using plasma arc Machining process. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021 [cit. 2021-11-01]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.01.622

- [25] THOE, T.B., D.K. ASPINWALL a M.L.H. WISE. Review on ultrasonic machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1998, **38**(4), 239-255 [cit. 2021-11-01]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(97)00036-9
- [26] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura po-vrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. (obrázek: 19,20,22,23,24,25,26,27,28)
- [27] *POKROČILÉ METODY VYHODNOCOVÁNÍ TOPOGRAFIE POVRCHU SOUČÁSTI* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192869.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. (obrázek: 21)
- [28] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura po-vrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [29] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura po-vrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [30] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: Academia, 2006, 982 s. ISBN 8020013962. (obrázek: 32)
- [31] Timeseries Plot. *Sigmamagic* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.sigmamagic.com/blogs/time-series-plot/#:~:text=A%20time%20series%20plot%20is,random%20or%20exhibit%20any%20pattern.>
- [32] Create a time series plot of a single Y variable with groups. *Minitab* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/graphs/time-series-plot/create-the-graph/single-y-variable-with-groups/> (obrázek: 29)
- [33] Understanding boxplots. *Towardsdatascience* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51#:~:text=A%20boxplot%20is%20a%20standardized,and%20what%20their%20values%20are.> (obrázek: 30)

[34] A complete guide to scatter plots. *Chartio* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: [https://chartio.com/learn/charts/what-is-a-scatter-plot/#:~:text=A%20scatter%20plot%20\(aka%20scatter,to%20observe%20relationships%20between%20variables.](https://chartio.com/learn/charts/what-is-a-scatter-plot/#:~:text=A%20scatter%20plot%20(aka%20scatter,to%20observe%20relationships%20between%20variables.) (obrázek: 31)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HB	Jednotka tvrdosti podle Brinella (Brinell hardness)
Ø	Průměr
v	Rychlost
F	Síla
IT	Toleranční stupeň přesnosti
EDM	Elektroerozivní obrábění
ECM	Elektrochemické obrábění
LBM	Obrábění laserovým paprskem
Nd:YAG	Neodymem dopovaný yttrium – hliník – granát
PAM	Obrábění plazmovým paprskem
USM	Obrábění ultrazvukem
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
λ	Filtr profilu
l_p, l_r, l_w	Základní délka
l_n	Vyhodnocovaná délka
$Z(x)$	Výška posuzovaného profilu
dZ/dX	Místní sklon
Z_p	Výška výstupku profilu
Z_v	Hloubka prohlubně profilu
Z_t	Výška prvku profilu
X_s	Šířka prvku profilu
MI	Materiálová délka profilu
P_p, R_p, W_p	Největší výška výstupku profilu
P_v, R_v, W_v	Největší hloubka prohlubně profilu
P_z, R_z, W_z	Největší výška profilu
P_c, R_c, W_c	Průměrná výška prvků profilů
P_t, R_t, W_t	Celková výška profilu

Pa, Ra, Wa	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Pq, Rq, Wq	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Psk, Rsk, Wsk	Šikmost posuzovaného profilu
Pku, Rku, Wku	Špičatost posuzovaného profilu
PSm, RSm, WSm	Průměrná šířka prvků profilu
PΔq, RΔq, WΔq	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
μm	Mikrometr
mm	milimetr
ln	Vyhodnocovaná délka drsnosti
Sq	Základní průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
Ssk	Šikmost omezené stupnice povrchu
Sku	Šikmost omezené stupnice povrchu
Sp	Maximální výška piku omezené stupnice povrchu
Sv	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
Sz	Maximální výška omezení stupnice povrchu
Sa	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
EDA	Exploratorní analýza dat
H ₀	Nulová hypotéza
H _A	Alternativní hypotéza
α	Hladina významnosti
T _{kr}	Kritická hodnota
T	Testovací kritérium
°C	Stupně celsia
hPa	Hekto pascal
\bar{x}	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Řezné pohyby při soustružení [3].....	12
Obrázek 2. Typy soustružnických nožů [3].....	13
Obrázek 3. Schéma čelního a válcového frézování [3]	14
Obrázek 4. Schéma sousledného a nesousledného frézování [3]	15
Obrázek 5. Výroba přesné (lícované) díry [3]	16
Obrázek 6. Schéma hoblování a obrážení [3]	16
Obrázek 7. Schéma principu protlačování [11]	17
Obrázek 8. Schéma brusného zrna [3]	18
Obrázek 9. Broušení bezhroté průběžné [3]	18
Obrázek 10. Schéma lapovacího procesu [3].....	19
Obrázek 11. Schéma superfinišování [3]	20
Obrázek 12. Válečková hlava [3].....	20
Obrázek 13. Schéma EDM obrábění [19].....	22
Obrázek 14. ECM obrábění vnějších tvarových ploch [19]	22
Obrázek 15. Schéma zařízení laseru [23]	23
Obrázek 16. Princip soustružení laserovým paprskem [23]	24
Obrázek 17. Dělení materiálu plazmovým hořákem [23].....	25
Obrázek 18. Schéma ultrazvukového obrábění [19].....	25
Obrázek 19. Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [26].....	26
Obrázek 20. Profil povrchu [26]	27
Obrázek 21. Jednotlivé složky textury povrchu [27].....	27
Obrázek 22. Prvek profilu [26]	29
Obrázek 23. Místní sklon [26]	29
Obrázek 24. Materiálová délka [26]	30
Obrázek 25. Největší výška výstupku profilu [26]	30
Obrázek 26. Největší hloubka prohlubní profilu [26].....	31
Obrázek 27. Výška prvků profilů [26].....	31
Obrázek 28. Šířka prvků profilu [26].....	33
Obrázek 29 Příklad časového grafu [32]	39
Obrázek 30 Příklad krabicového grafu [33]	40
Obrázek 31 Příklad bodového grafu [34]	40
Obrázek 32 Příklad histogramu [30].....	41
Obrázek 33 Příklad vzorku	45
Obrázek 34 Bezkontaktní profilometr Zygo NewView 8000.....	46

Obrázek 35 Umístění vzorku na stole.....	47
Obrázek 36 Youngovy interferenční proužky	47
Obrázek 37 Grafický výstup pro soustružení	48
Obrázek 38 Grafický výstup pro broušení.....	49
Obrázek 39 Grafický výstup pro válečkování	49
Obrázek 40 Zobrazení dat v programu Minitab 20.....	51
Obrázek 41 Časový graf hodnoty Sa pro jednotlivé způsoby opracování.....	52
Obrázek 42 Časový graf hodnoty Sz pro jednotlivé způsoby opracování.....	53
Obrázek 43 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sa soustružení.....	54
Obrázek 44 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sa broušení	55
Obrázek 45 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sa válečkování.....	55
Obrázek 46 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sz soustružení.....	56
Obrázek 47 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sz broušení	56
Obrázek 48 Grubbsův test odlehlých hodnot pro hodnoty Sz válečkování.....	57
Obrázek 49 Krabicové grafy hodnot Sa a Sz soustružení.....	58
Obrázek 50 Krabicové grafy hodnot Sa a Sz broušení	58
Obrázek 51 Krabicové grafy hodnot Sa a Sz válečkování.....	58

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Stupně přesnosti a drsnost povrchu při konvenčním obrábění [16]	21
Tabulka 2 Základní délky drsnosti pro měření R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} , $R_{\Delta q}$ křivek a odpovídající parametry pro neperiodické profily (např. broušené profily)	36
Tabulka 3 Základní délky drsnosti pro měření R_z , R_v , R_p , R_c a R_t neperiodických profilů (např. broušených profilů)	36
Tabulka 4 Zamýšlené hodnoty drsnosti	45
Tabulka 5 Naměřené hodnoty	50
Tabulka 6 Výsledky Grubbsova testu	54