

Komparace Povrchů Polymerních Výrobků

Bc. Petr Melka

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Petr Melka
Osobní číslo:	T24386
Studijní program:	N0788A270007 Řízení jakosti
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Komparace povrchů polymerních výrobků

Zásady pro vypracování

- Vypracování rešerše na zadané téma.
- Proměření jakosti zadaných vzorků.
- Nalezení vhodné statistické hodnotící metody.

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené 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. MELOUN, Milan, Jiří MILITKÝ a Martin HILL. *Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech*. Praha: Academia, 2012. Gerstner. ISBN 978-80-200-2071-0
3. WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.

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

Datum zadání diplomové práce: 2. ledna 2025
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2025

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 4. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou 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 mohu užít své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Použití PMMA jako primárního materiálu pro výrobu optických komponent v automobilovém průmyslu se začíná stávat nedostatečným, pro jeho omezené fyzikální vlastnosti. Proto se stále častěji začíná používat LSR – tekutý silikonový kaučuk, který dále posouvá hranice optických vlastností dílů díky jeho zvýšené tvarovatelnosti, ovšem jeho tvarovatelnost se stále častěji ukazuje jako výzva během měření. Současné standardizované metody měření v automobilovém průmyslu pro měření větších sérií jsou založeny na kontaktním měření, převážně CMM. Tato práce uvádí, že zatímco kontaktní metody měření jsou vhodné pro měření termoplastů, tyto metody jsou nepřesné pro elastomery, protože kontaktní sonda vyvíjí tlak, který deformuje geometrie součástí. Naše analýza je založena na výsledcích měření 27 různých geometrických tvarů na 160 různých dílech, z 6 různých kavit, následně jsme výsledky přímo porovnali s 3D daty uvedených součástí. Navíc byly součásti měřeny pomocí laserové topografie. Výsledky topografie byly srovnatelné s 3D skenováním. Naše výsledky naznačují, že změna materiálu používaného pro optické součásti vyžaduje změnu měřících metod, aby byly zachovány standardy kvality ve výrobě.

Klíčová slova: LSR, Laserová topografie, termoplasty, Statistika, EDA, Anova

ABSTRACT

The use of PMMA as the primary material for optical components in the automotive industry is becoming insufficient due to its physical properties. Therefore, the introduction of LSR as a replacement material, with increased optical properties and better shapability during molding, has introduced a challenge for measurement. Current standardized methods of measurement in the automotive industry for series production are based on contact measurement, especially CMM. This thesis presents that while contact measurement methods are suitable for measuring thermoplastics, these methods are inaccurate for elastomers, as the contact probe applies pressure that deforms the component geometry. Our analysis is based on the measurement results of 27 different geometries on 160 different parts, each from 6 different cavities followed by a direct comparison with 3D data of the mentioned components. Additionally, the components were measured using laser topography. The results of the topography were on par with 3D scanning. Our results indicate that the shift in the material used for optical components necessitates a shift in measurement methods to maintain quality standards in production.

Keywords: LSR, Laser topography, thermoplastics, Statistics, EDA, Anova

Děkuji za podporu a skvělé vedení práce Ing. Mileně Kubišové Ph.D., bez které by práce byla.. možná ani nebyla a také svým nejbližším, že poslední týdny a měsíce se mnou přetrpěli

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	15
1.1 PMMA - POLYMETHYLMETHAKRYLÁT	15
1.1.1 Materiálové vlastnosti PMMA	15
1.1.2 Využití PMMA v automobilovém průmyslu	17
1.2 LSR – TEKUTÝ SILIKONOVÝ KAUČUK	18
1.2.1 Materiálové vlastnosti LSR:.....	18
1.2.2 Využití LSR v automobilovém průmyslu	19
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	21
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	21
2.2 PRŮBĚH TLAKŮ PŘI VSTŘIKOVÁNÍ	22
2.3 PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ	24
2.4 VSTŘIKOVÁNÍ LSR.....	24
2.5 BĚŽNÉ VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ	25
3 MĚŘENÍ.....	27
3.1 OBECNÉ ROZDĚLENÍ 3D SKENERŮ	27
3.1.1 Kontaktní 3D skenery	27
3.1.2 Bezkontaktní 3D skenery	28
3.2 BEZKONTAKTNÍ 3D SKENOVÁNÍ.....	29
3.3 DĚLENÍ BEZKONTAKTNÍHO 3D SKENOVÁNÍ	31
3.4 OPTICKÉ METODY BEZKONTAKTNÍHO 3D SKENOVÁNÍ.....	31
3.5 NOVINKY V 3D SKENOVÁNÍ	32
3.6 OPTICKÁ PROFILOMETRIE:.....	32
3.6.1 Konfokální profilometry	33
3.6.2 Interferometrické profilometry.....	33
3.6.3 Chromatické profilometry	33
3.6.4 Laserové profilometry	34
3.6.5 Bílé světlo interferometrické profilometry (WLI)	34
3.6.6 Fázově posunová interferometrie (PSI)	34
3.6.7 Použití Optických profilometrů.....	34
4 STATISTICKÉ METODY	36
4.1 EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA (EDA).....	36
4.2 TYPY GRAFICKÉHO ZNÁZORNĚNÍ DAT	36
4.3 OVĚŘENÍ PŘEDPOKLADU O DATECH.....	39
4.3.1 Postup ověřování předpokladů.....	40
4.3.2 Postup testování statistické hypotézy	40

4.3.3	Testy střední hodnoty	41
4.3.4	Test shody středních hodnot.....	41
4.3.5	Postup testu shodnosti středních hodnot dvou souborů.....	41
4.4	ANALÝZA ROZPTYLU ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE)	42
4.4.1	Jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA).....	43
4.4.2	Postup jednofaktorové analýzy rozptylu	44
4.5	MANAGEMENT KVALITY	44
4.5.1	KLASICKÉ NÁSTROJE KVALITY	45
4.5.2	Vývojové diagramy	45
4.5.3	Kontrolní tabulky	46
4.5.4	Histogramy	46
4.5.5	Išikawův diagram	47
4.5.6	Pareto diagram.....	47
4.5.7	Korelační diagram	47
4.5.8	Regulační diagram.....	48
4.6	VDA - VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE	48
4.6.1	VDA 1 - Dokumentované informace a jejich uchování	48
4.6.2	VDA 2 - Zajišťování kvality před sériovou výrobou	48
4.6.3	VDA 4 - Zajištění kvality v oblasti procesů.....	48
4.6.4	VDA 5 - Procesy měření a zkoušení	49
4.6.5	VDA 6.3 - Procesní audit	49
4.6.6	VDA 6.5 - Audit výrobku.....	49
4.6.7	Hlavní oblasti působnosti VDA	49
4.6.8	Přínosy členství ve VDA	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	52
6	MĚŘENÉ VZORKY	53
6.1	PRIMÁRNÍ OPTIKY	53
6.2	SEPARÁTOR (LPP RÁM).....	53
7	MĚŘENÍ VZORKŮ A METODY MĚŘENÍ.....	54
7.1	MĚŘÍCÍ BODY	54
7.2	MĚŘENÍ 3D SKENEREM.....	54
7.3	STANDARDNÍ MĚŘENÍ POMOCÍ CMM.....	55
7.4	MĚŘENÍ TOPOGRAFICKÝM LASEREM LJ-X8080.....	55
7.5	PARAMETRY LASERU LJ-X8080	56
8	NAMĚŘENÉ HODNOTY A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	57
8.1	EDA.....	57
8.1.1	Box-Plot Analýza kavit 5-8	57
8.2	STATISTICAL PROCESS CONTROL	60
8.2.1	Příklad Způsobnost procesu různých kavit pro Pin 1	61
8.2.2	Výsledky způsobnosti pro Pin 1	63

8.2.3	Souhrnné výsledky způsobilosti jednotlivých kavit.....	63
8.2.4	Výsledky způsobilosti procesu jednotlivých kavit.....	65
8.3	ANOVA.....	65
8.3.1	Výsledek jednocestné Anovy.....	66
8.4	CO NA TO UMĚLÁ INTELIGENCE	67
9	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM TABULEK.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78

ÚVOD

Tekutý silikonový kaučuk (LSR) je vysokovýkonný elastomer široce využívaný v moderní výrobě pro svoji vynikající odolnost vůči extrémním teplotám, ohebnost a tepelnou stabilitu. Díky excelentní biokompatibilitě a chemické inertnosti nachází uplatnění v medicíně, automobilovém průmyslu, elektronice i spotřebním zboží. Povrchové charakteristiky těchto dílů, zejména drsnost a textury, mají zásadní vliv na jejich funkci a kvalitu – ovlivňují tření, odolnost proti opotřebení a těsnicí schopnosti. Vysoká kvalita povrchu tak přispívá k dlouhé životnosti a spolehlivosti polymerních komponent. Pro měření a hodnocení povrchových parametrů se tradičně používají styčné sondy souřadnicových měřicích strojů (CMM). Tyto stroje sbírají diskrétní body z povrchu součásti a na jejich model a tvar dílu. Naopak moderní bezkontaktní 3D optické skenery dokáží laserovým nebo bílým světlem pořídit desítky až stovky milionů bodů najednou, což umožňuje velmi detailní digitalizaci i složitých tvarů a materiálů. U polymerních a elastomerových povrchů je však nezbytné vzít v úvahu optické vlastnosti materiálu. Laserový paprsek může pronikat do syntetického materiálu, kde se setkává s absorpcí, rozptylem, částečnou či úplnou reflexí a dalším difrakčními jevy, které zkreslují naměřenou vzdálenost. To vede k dodatečným měřicím chybám nezávislým na běžných přesnostních parametrech přístroje.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

V případě této diplomové práce se jedná o specifickou aplikaci materiálů na optické komponenty využívané v automobilovém průmyslu jako jsou:

1.1 PMMA - Polymethylmethakrylát

Polymethylmethakrylát (PMMA), známý také jako akryl nebo akrylové sklo, je syntetický polymer, který se vyrábí polymerací methylmethakrylátu. Tento průhledný termoplast je známý svou vynikající optickou čistotou, odolností vůči UV záření a povětrnostním vlivům, a také svou pevností a lehkostí. Díky těmto vlastnostem je PMMA široce používán v automobilovém průmyslu a dalších odvětvích. Zde je podrobný přehled vlastností a využití PMMA v automobilovém sektoru.[1]

1.1.1 Materiálové vlastnosti PMMA

1. Fyzikální vlastnosti

Hustota: PMMA má hustotu 1,17 - 1,20 g/cm³, což je nižší než hustota skla, což z něj činí lehčí alternativu pro řadu aplikací. [1,2]

Absorpce vody: PMMA absorbuje pouze 0,2 - 0,3 % své hmotnosti vody za den, což znamená, že je odolný vůči vlhkosti a zůstává stabilní v různých prostředích. [1,2]

Optická čistota: PMMA má vynikající optickou čistotu, propustnost světla až 92 %, což je téměř stejně jako u optického skla. [1,2]

Povrchová tvrdost: PMMA je tvrdý a odolný materiál, který je méně náchylný k poškrábání než jiné transparentní polymery. [1,2]

2. Mechanické vlastnosti

Pevnost v tahu: PMMA má pevnost v tahu 54 - 73 MPa, což z něj činí pevný materiál vhodný pro různé konstrukční aplikace. [1,2]

Pevnost v tlaku: Pevnost v tlaku PMMA se pohybuje mezi 72 a 124 MPa, což je dostatečné pro odolnost vůči mechanickým zatížením. [1,2]

Modul pružnosti v tahu: PMMA má modul pružnosti v tahu 3,036 GPa, což znamená, že je relativně tuhé a odolné vůči deformacím. [1,2]

Modul pružnosti v ohybu: Modul pružnosti v ohybu se pohybuje mezi 2,24 a 3,17 GPa, což zajišťuje jeho pevnost při ohýbání. [1,2]

Prodloužení při přetržení: PMMA má prodloužení při přetržení mezi 2,5 a 4 %, což znamená, že je relativně křehké a má omezenou schopnost deformace před prasknutím. [2]

Tvrдость podle Rockwella (M): PMMA dosahuje hodnoty tvrdosti podle Rockwella mezi 92 a 100. [2]

3. Tepelné Vlastnosti

Teplota tání: PMMA se taví při teplotě kolem 45 °C. [2]

Tepelná vodivost: Tepelná vodivost PMMA je 0,17 - 0,19 W/m·K, což znamená, že je relativně tepelně izolující. [2]

Specifická tepelná kapacita: PMMA má specifickou tepelnou kapacitu 1450 J/kg·K, což znamená, že dokáže akumulovat teplo. [2]

Koeficient tepelné roztažnosti: PMMA má koeficient tepelné roztažnosti $3,4 \times 10^{-5}$ - $7,7 \times 10^{-5}$ 1/°C, což zajišťuje stabilitu při teplotních změnách. [2]

Teplota skelného přechodu: PMMA má teplotu skelného přechodu kolem 105 °C, což znamená, že při vyšších teplotách měkne a stává se tvárným. [2]

4. Elektrické Vlastnosti

Relativní permitivita (1 MHz): PMMA má relativní permitivitu 2,76, což znamená, že je elektricky izolující. [1]

Elektrická rezistivita: PMMA má vysokou elektrickou rezistivitu $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, což z něj činí vynikající izolační materiál. [1]

Dielektrická pevnost: PMMA má dielektrickou pevnost 150 kV/cm, což znamená, že dokáže odolat vysokým elektrickým napětím. [1]

5. Optické vlastnosti

Index lomu (589nm): PMMA má index lomu 1,49, což zajišťuje vynikající optické vlastnosti. [1]

Propustnost světla: PMMA dosahuje propustnosti světla až 92 %, což z něj činí ideální materiál pro optické aplikace. [1]



Obrázek 1. – Příklad výrobku z PMMA [2]

1.1.2 Využití PMMA v automobilovém průmyslu

1. Čelní skla a okna

PMMA se často používá jako alternativa ke sklu pro čelní skla a okna automobilů. Díky své lehkosti (o 40-50 % lehčí než sklo) a dvojnásobné odolnosti proti nárazu nabízí PMMA výhody v podobě snížení hmotnosti vozidel a zvýšené bezpečnosti. Navíc jeho vysoká průhlednost zajišťuje vynikající viditelnost. [3]

2. Vnější osvětlení

PMMA je ideální materiál pro výrobu vnějšího osvětlení automobilů, včetně světlometů, mlhovek, směrovek a brzdových světel. Jeho vysoká propustnost světla a odolnost vůči UV záření zajišťují dlouhou životnost a stálost barev. [3]

3. Vnitřní osvětlení

Vnitřní osvětlení automobilů, jako jsou stropní světla a úložná světla, často využívá PMMA díky jeho optickým vlastnostem a ekonomické výhodnosti oproti sklu. PMMA poskytuje jasné a rovnoměrné osvětlení interiéru vozidla. [3]

4. Aerodynamické prvky

Lehkost a pevnost PMMA ho činí vhodným materiálem pro výrobu aerodynamických prvků, jako jsou spoilery a kryty zrcátek. Tyto prvky přispívají k lepším aerodynamickým vlastnostem vozidel a snižují spotřebu paliva. [3]

5. Dekorativní prvky

PMMA se také používá pro výrobu dekorativních prvků interiéru automobilů, jako jsou panely, ozdobné lišty a kryty displejů. Díky své estetické přitažlivosti a možnosti snadného tvarování nabízí PMMA široké možnosti designu. [3]

6. Další aplikace PMMA v automobilovém průmyslu:

Instrumentální panely: PMMA se používá pro výrobu průhledných krytů instrumentálních panelů, což zajišťuje jasný a čitelný displej. [3]

Difuzory světla: PMMA se využívá pro difuzory světla v zadních světlometech a interiérových osvětleních, což zajišťuje rovnoměrné rozložení světla. [3]

Ochranné kryty: PMMA se používá pro výrobu ochranných krytů různých komponent automobilu, což zajišťuje ochranu před poškozením a prodloužení životnosti komponent. [3]

1.2 LSR – Tekutý silikonový kaučuk

LSR (Liquid Silicone Rubber) je tekutý silikonový kaučuk, který se vyznačuje vynikajícími mechanickými a chemickými vlastnostmi. Tento materiál je široce používán v automobilovém průmyslu díky své odolnosti vůči extrémním teplotám, chemikáliím a povětrnostním vlivům. Zde je podrobný přehled vlastností a využití LSR v automobilovém sektoru. [4,5]

1.2.1 Materiálové vlastnosti LSR:

1. Fyzikální vlastnosti:

Hustota: 1,1 - 1,2 g/cm³.

Tvrdost: LSR může mít tvrdost od 10 do 80 Shore A, což umožňuje širokou škálu aplikací. [4,5]

Teplotná odolnost: LSR je odolný vůči teplotám od -60 °C do +200 °C, což z něj činí ideální materiál pro aplikace vystavené extrémním teplotám. [4,5]

Odolnost vůči UV záření a ozónu: LSR je vysoce odolný vůči UV záření a ozónu, což zajišťuje dlouhou životnost materiálu i při vystavení povětrnostním vlivům. [4,5]

2. Mechanické vlastnosti:

Pevnost v tahu: LSR má pevnost v tahu 5 - 10 MPa. [4,5]

Prodloužení při přetržení: LSR může dosáhnout prodloužení při přetržení až 700 %, což zajišťuje vysokou pružnost a odolnost vůči deformacím. [4,5]

Odolnost vůči roztržení: LSR má vynikající odolnost vůči roztržení, což zajišťuje dlouhou životnost a spolehlivost v náročných podmínkách. [4,5]

3. Chemické vlastnosti

Odolnost vůči chemikáliím: LSR je odolný vůči mnoha chemikáliím, včetně olejů, tuků, kyselin a zásad. [4,5]

Biokompatibilita: LSR je biokompatibilní materiál, což znamená, že je bezpečný pro použití v aplikacích, které přicházejí do styku s lidským tělem. [4,5]

4. Elektrické vlastnosti

Izolační vlastnosti: LSR má vynikající elektrické izolační vlastnosti, což z něj činí ideální materiál pro elektrické a elektronické aplikace. [4,5]

Dielektrická pevnost: LSR má vysokou dielektrickou pevnost, což zajišťuje bezpečnost a spolehlivost v elektrických aplikacích. [4]

1.2.2 Využití LSR v automobilovém průmyslu

1. Těsnění a těsnicí prvky:

LSR se široce používá pro výrobu těsnění a těsnicích prvků v automobilovém průmyslu. Díky své odolnosti vůči extrémním teplotám a chemikáliím zajišťuje LSR spolehlivé těsnění v motorových a převodových systémech. [4]

2. Ochranné kryty a pouzdra:

LSR se používá pro výrobu ochranných krytů a pouzder pro elektrické a elektronické komponenty v automobilech. Jeho vynikající izolační vlastnosti a odolnost vůči povětrnostním vlivům zajišťují dlouhou životnost a spolehlivost těchto komponent. [4]

3. Optické čočky:

LSR se používá pro výrobu optických čoček, které vyžadují vysokou průhlednost a přesnost. Díky své schopnosti přenášet světlo s minimálními ztrátami a odolnosti vůči žloutnutí a degradaci pod UV zářením je LSR ideální pro optické aplikace. [4]

4. Světelné vodiče a světelné trubice:

LSR se používá pro výrobu světelných vodičů a trubic, které zajišťují efektivní přenos a distribuci světla. Tyto komponenty se často používají v automobilových displejích a osvětlovacích systémech. [4]

5. LED osvětlení:

LSR se používá pro výrobu čoček a krytů pro LED osvětlení. Díky své vysoké průhlednosti a odolnosti vůči teplotním změnám zajišťuje LSR efektivní směrování a zaostření světla, což zvyšuje energetickou účinnost a kvalitu osvětlení. [4]



Obrázek 2. – Příklad výrobku z LSR [6]

6. Displeje a dotykové obrazovky:

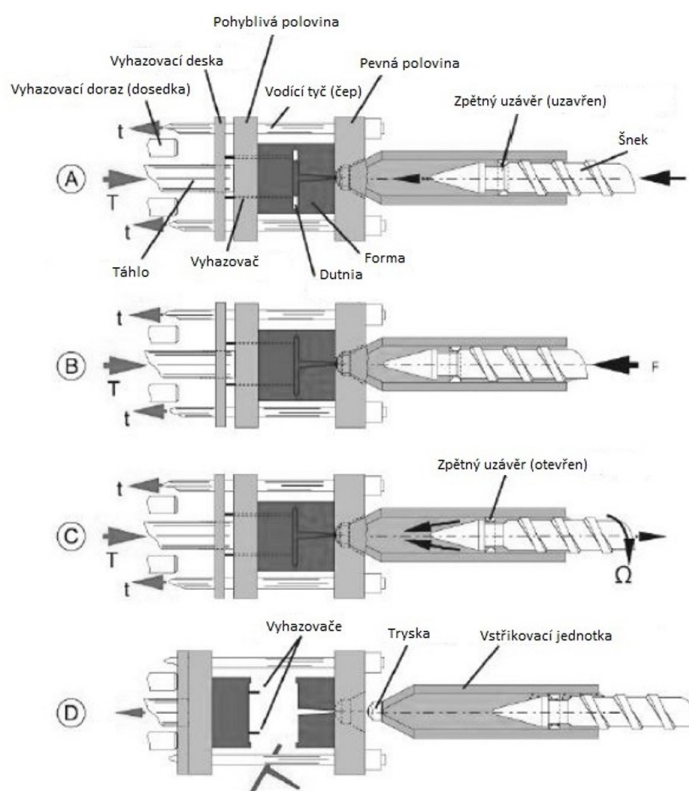
LSR se používá v displejových technologiích, kde jeho vynikající optické vlastnosti umožňují výrobu vysokorozlišovacích displejů s vylepšenou barevnou přesností a kontrastem. LSR se také používá v dotykových obrazovkách, kde poskytuje hladké a citlivé interakce. [6]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování představuje zásadní technologii při výrobě plastových komponentů, zejména u termoplastových produktů. Pro jeho provoz je nezbytné rozsáhlé vybavení, včetně vstřikovacího stroje s řídicí jednotkou, pevně uchycené formy s jednou nebo více dutinami určujícími tvar dílu, temperančního zařízení pro udržení konstantní teploty formy, a různých periferních zařízení zajišťujících hladký průběh celého procesu. [13]

2.1 Vstřikovací cyklus

Proces výroby plastové součásti vstřikováním probíhá v několika fázích, jak je znázorněno na přiloženém obrázku. Nejprve se forma uzavře, načež do její dutiny vstříkne polymerní tavenina. Po úplném zaplnění dutiny následuje dotlaková fáze, při níž se materiál udržuje pod tlakem, aby se minimalizovalo jeho smrštění. Poté se plastikační jednotka odjíždí a připravuje se další dávka materiálu prostřednictvím plastikace. Jakmile je výrobek dostatečně ochlazen, forma se otevře a hotový díl je vyhozen pomocí vyhazovačů. [13]



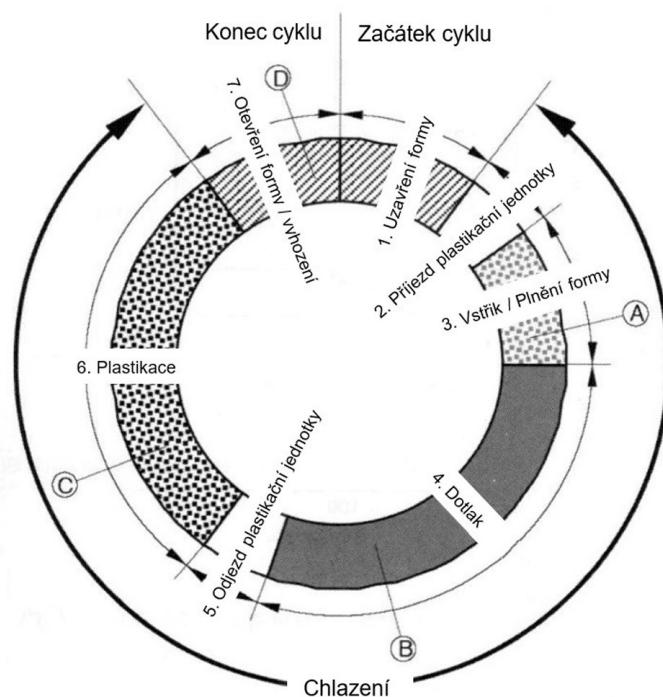
Obrázek 3. – Děje během vstřikovacího cyklu [13]

Vzhledem k tomu, že se jedná o opakující se proces, jeho průběh lze přehledně znázornit pomocí schématu na následujícím obrázku (Obrázek 6). Z něj je patrné, že největší

část cyklu zabírá chlazení součásti uvnitř dutiny formy. Fáze otevření formy, vyhození výrobku na konci cyklu a její následné uzavření na začátku nového cyklu mohou trvat od zlomku sekundy až po několik sekund. Celková doba vstřikovacího cyklu se pak stanovuje pomocí výpočtu. [13]

$$t_{\text{cyklu}} = t_{\text{uzavření}} + t_{\text{chlazení}} + t_{\text{otevření/vyhození}} \quad (1)$$

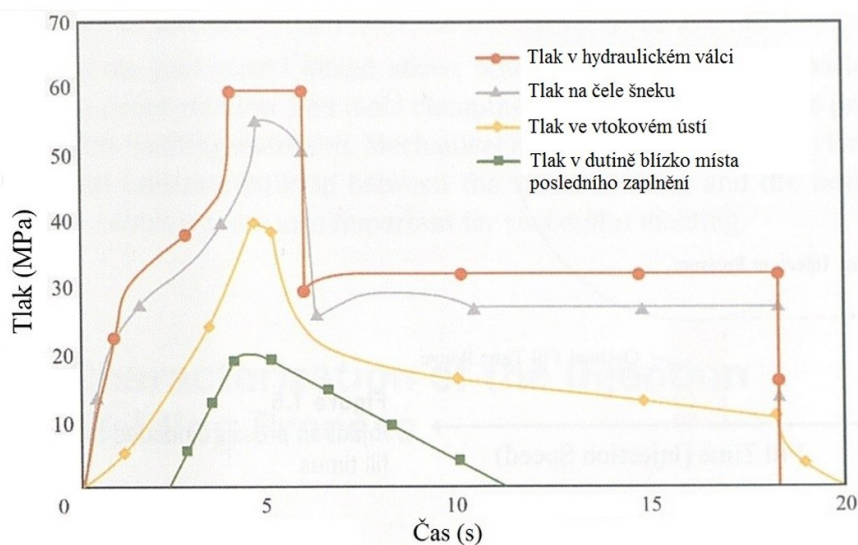
Čas chlazení však v naprosté většině případů zůstává dominantním časem a poskytuje nám již orientační údaj ohledně celkového času vstřikovacího cyklu. [14]



Obrázek 4. – Průběh vstřikovacího cyklu [13]

2.2 Průběh tlaků při vstřikování

Vstřikovací cyklus lze analyzovat také z hlediska tlakových změn v jednotlivých částech výrobního zařízení. To umožňuje sledovat, jak se tlak vyvíjí v průběhu času během cyklu. Můžeme například měřit tlak v hydraulickém válci u uzavírací jednotky, na čele šneku, ve vtokovém ústí nebo v dutině formy poblíž oblasti, která se zaplňuje jako poslední. Průběh těchto čtyř tlakových hodnot v závislosti na čase vstřikovacího cyklu je znázorněn na následujícím obrázku. [14]



Obrázek 5. – Průběh vstřikovacího tlaku v různých místech vstřikovacího stroje a dutiny formy [13]

V průběhu vstřikovacího procesu lze pozorovat zpoždění tlaku mezi hydraulickým válcem a vstřikovací jednotkou (konkrétně na čele šneku). Toto zpoždění je žádoucí a závisí především na nastavení ventilů hydraulického válce. Jinak mají oba tlakové průběhy podobný profil, přičemž rozdíly v jejich tvaru jsou způsobeny různým třením mezi šnekem, materiálem a válcem, a také mezi hydraulickým válcem a pístem. Tlakové ztráty se obvykle pohybují v rozmezí 3 až 10 %, přičemž vyšší tlak znamená menší ztráty.

Tlak na čele šneku není standardně dostupný v datech vstřikovacího stroje, pokud šnek není vybaven tlakovým čidlem. Často se však tyto hodnoty odhadují pomocí simulačních programů (CAE). Síla působící na šneku bývá 10–14krát větší než síla v hydraulickém válci, což vychází z poměru průřezu obou komponent.

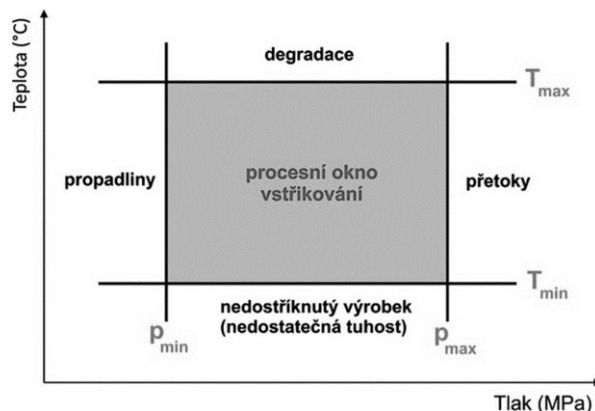
Při analýze tlaků v dutině formy lze nalézt jen malou souvislost s tlakovým profilem na čele šneku. Tento jev je způsoben především geometrií dutiny a charakterem proudění taveniny, která se pohybuje v relativně tenkostěnné oblasti. Maximální hodnoty tlaku na čele šneku se vyskytují při přechodu z plnění do dotlaku. Jakmile tavenina ztuhne a nelze dále působit dotlakem, tlak prudce klesá. Velikost a doba působení dotlaku mají zásadní vliv na rozměrovou přesnost a vzhledové vlastnosti konečného výrobku [14]

2.3 Parametry vstřikování

Teplota a tlak patří mezi klíčové parametry vstřikovacího procesu, které je nutné pečlivě regulovat. Na základě těchto veličin se stanovuje zpracovatelské okno následujícím postupem:

1. Na základě materiálových vlastností daného vstřikovaného polymeru se určuje maximální teplota taveniny, při níž nedochází k degradaci materiálu. Tato teplota se označuje jako $T_{\max}$. [13]
2. Dále se zjišťuje nejnižší teplota, při které je tavenina stále schopná dokonale zaplnit celou dutinu formy. Tato hodnota je označována jako $T_{\min}$. [13]
3. Po určení teplotního rozmezí $T_{\max} - T_{\min}$ se stanovují minimální tlaky, které jsou nezbytné pro úplné vyplnění dutiny formy taveninou. [13]
4. Podobně se určují i maximální tlaky, přičemž se zohledňuje maximální tuhost formy, uzavírací síla vstřikovacího stroje a hybnost taveniny. Hybnost je dána součinem vstřikovací rychlosti a vstřikovacího tlaku. [13]

Celková regulace těchto parametrů je zásadní pro kvalitní výrobu plastových komponentů. [13]

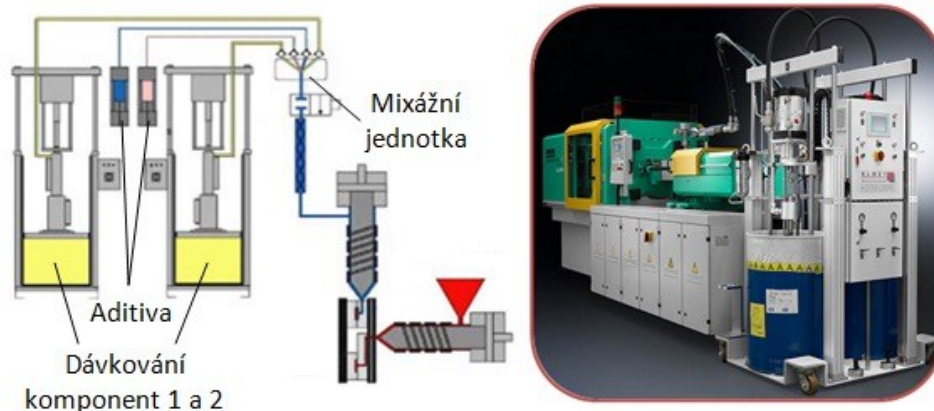


Obrázek 6. – Procesní okno vstřikování [13]

2.4 Vstřikování LSR

Vstřikování tekutého silikonového kaučuku (LSR) a běžné vstřikování plastů jsou dva odlišné procesy, které se liší v mnoha ohledech, včetně materiálových vlastností, procesních parametrů a aplikací. Zde je podrobný přehled rozdílů mezi těmito dvěma procesy. [15,4]

1. Příprava materiálu: LSR je dodáván ve dvou složkách (A a B), které jsou smíchány těsně před vstřikováním. Směs může obsahovat také pigmenty a další přísady. [15,4]
2. Plastifikace: Směs LSR je plastifikována a připravena k vstřikování. Tento proces zahrnuje intenzivní míchání, aby se zajistila homogenní směs. [15,4]
3. Vstřikování: Roztavený LSR je vstřikován do formy při nižším tlaku než termoplasty. Forma je udržována při zvýšené teplotě, aby se zajistilo rychlé vytvrzení materiálu. [15,4]
4. Vulkanizace: LSR vulkanizuje (tvrdne) ve formě při zvýšené teplotě. Tento proces vytváří chemické vazby mezi molekulami, což zajišťuje konečné mechanické vlastnosti materiálu. [15,4]



Obrázek 7. – Schéma vstřikování LPR [4]

5. Chlazení a vyhazování: Po ztuhnutí materiálu ve formě je hotový díl vyhozen pomocí vyhazovacích kolíků nebo jiných mechanismů. [15,4]

2.5 Běžné vstřikování plastů

Příprava materiálu: Plastové pelety musí být před vstřikováním vysušeny, aby se zabránilo problémům souvisejícím s vlhkostí. Optimální podmínky pro vysoušení závisí na druhu materiálu. [15,4]

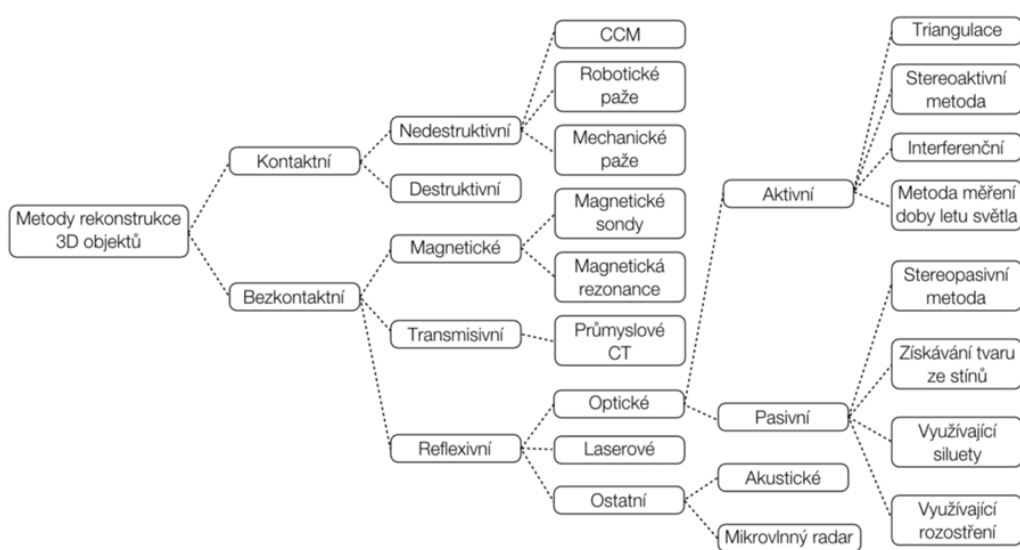
1. Plastifikace: Pelety jsou zavedeny do plastifikačního válce vstřikovacího stroje a postupně zahřívány, dokud nedosáhnou viskózní kapalné formy. [15]
2. Vstřikování: Roztavený plast je vstřikován do formy při vysokém tlaku. Forma obsahuje dutinu, která odpovídá tvaru finálního dílu. [15]

3. Chlazení: Forma je vybavena chladicími kanály, kterými proudí chladicí médium (obvykle voda). Chlazení zajišťuje, že materiál rychle a rovnoměrně tuhne. [15]
4. Vyhození dílu: Po ztuhnutí materiálu ve formě jsou díly vyhozeny pomocí vyhazovacích kolíků nebo jiných mechanismů [15]

3 MĚŘENÍ

3.1 Obecné rozdělení 3D skenerů

Hlavním účelem získávání 3D dat je sběr a záznam informací o sledovaném objektu, které se týkají tvaru a rozměrů pomocí dotykových sond (v případě kontaktních systémů) či optických systémů (v případě bezkontaktních metod snímání). V případě kontaktní metody snímání povrchu se sonda přímo dotýká povrchu měřeného objektu, zatímco u metody bezkontaktního snímání nedochází k fyzickému kontaktu s povrchem předmětu. [6]



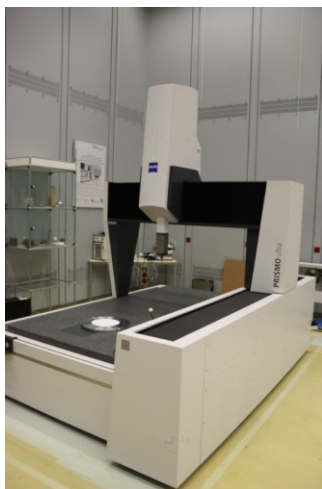
Obrázek 8. – Obecné rozdělení 3D skenerů [8]

3.1.1 Kontaktní 3D skenery

Do skupiny dotykových či kontaktních 3D skenerů spadají všechny skenery, jejichž podstata snímání je založena na fyzickém doteku snímaného objektu pomocí určitého senzoru či snímače. Největší zastoupení této skupiny tvoří souřadnicové měřicí stroje CMM (Coordinate Measurement Machine). Častým využitím těchto strojů bývá ve výrobních podnicích za účelem kontroly vyráběných dílů. S touto metodou je spojeno několik nevýhod, např. v podobě nuceného kontaktu snímače s měřeným objektem, kdy může docházet k ovlivnění výsledků vlivem deformace dílů. Objekty, které nedisponují rovnou plochou vhodnou ke stabilní poloze při měření, je nutné podepřít a pevně upnout pomocí měřicího přípravku. Mechanismus takového skeneru může mít různé podoby. Prvním z nich představuje systém vozíků s pevnými rameny pevně držnými ve skříni. Tyto systémy jsou

s výhodou využívány při měření ploch profilů případně jednoduchých konvexních zakřivených ploch. [7]

Další možnou sestavou je za pomoci kloubového ramene s tuhými kostmi s přesnými úhlovými senzory. Tuto sestavu lze využívat nejčastěji pro měření štěrbin vnitřních prostor s malým vstupním otvorem. Výsledky měření jsou získávány pomocí složitých matematických výsledků získaných z polohy konce paže měřicího přístroje. Lze však také použít kombinaci metod, kdy se jedná např. o kloubové rameno zavěšené na pojízdném vozíku, které je často využíváno pro snímání velkých objektů s vnitřními dutinami. [7]



Obrázek 9.- CMM ZEISS PRISMO [29]

3.1.2 Bezkontaktní 3D skenery

Bezkontaktní 3D skenery představují jednu ze dvou hlavních kategorií 3D skenovacích technologií a dělí se na aktivní a pasivní skenery. Aktivní skenery fungují na principu vysílání specifického záření, jehož odraz je následně detekován k analýze objektu či prostředí. Nejčastěji se využívá světelný paprsek, ultrazvuk nebo rentgenové záření. Pasivní skenery naopak žádné záření neemitují, pracují s odraženým okolním zářením, přičemž nejběžnějším typem je infračervené záření.[6]

Bezkontaktní 3D skener je digitální zařízení, které umožňuje přesné zachycení tvaru objektů bez jejich fyzického kontaktu. K tomu využívá specifický typ světla, díky němuž přenáší tvarové informace do počítačového prostředí. Během skenování vzniká bodové mračno v definovaném souřadném systému, což umožňuje věrné zobrazení velikosti a geometrie snímaného objektu. [8]



Obrázek 10. – Vizualizace 3D skenování [9]

Hlavním úkolem 3D skeneru je vytvořit bodové mračno na povrchu snímaného objektu, přičemž každý bod je definován svými souřadnicemi (x , y , z) a slouží k přesné rekonstrukci tvaru předmětu. Pokud se zároveň zaznamenávají informace o barvě, lze využít barevnou stupnici R-G-B (Red-Green-Blue) k realistickému zobrazení povrchu objektu. [8]

Funkčně je 3D skener podobný fotoaparátu – oba mají kuželové zorné pole a dokážou zaznamenat pouze povrchy, které nejsou zakryté. Zatímco fotoaparát zachycuje barevné informace v rámci svého zorného pole, 3D skener zaznamenává údaje o vzdálenosti povrchů. Výsledný obraz skeneru tedy poskytuje přesný popis vzdálenosti jednotlivých bodů objektu. [8]

3.2 Bezkontaktní 3D skenování

Bezkontaktní 3D skenování je efektivní metoda převodu fyzických objektů do digitální podoby, která umožňuje jejich přesnou rekonstrukci na základě prostorových souřadnic. Díky této technologii lze plně využívat, zobrazovat a upravovat CAD data a provádět precizní měření. Rychlý sběr dat s vysokou přesností přispívá k výrazné produktivitě a časové úspoře, což je klíčové pro dosažení optimálních výsledků.[9]

3D skener je klíčovým nástrojem pro digitalizaci fyzických objektů v trojrozměrném prostoru. Umožňuje přesné snímání tvaru objektu a jeho následné využití v návrhu, vývoji, analýze či kontrole. Výsledný digitální model lze exportovat do různých formátů, například STL (Standard Triangulate Language), což umožňuje výrobu prototypů pomocí 3D tisku.

Tato technologie se často používá k digitalizaci neznámých dílců, které nemají k dispozici 2D výkresy nebo 3D data. [6]

Moderní 3D skenery umožňují digitalizaci objektů nejrůznějších tvarů a velikostí, od drobných mikroskopických struktur až po rozsáhlé konstrukce. Rychlost snímání datových bodů se pohybuje od několika bodů za sekundu až po více než milion bodů za sekundu. Dalším důležitým faktorem je způsob obsluhy skeneru – může se jednat o manuální, poloautomatické nebo plně automatické zařízení. Přesnost měření se pak odvíjí nejen od typu použitého skeneru, ale také od zkušeností operátora, což ovlivňuje kvalitu získaných dat. [10]

Různé systémy 3D skenování se liší rozlišením, které lze definovat jako vzdálenost mezi jednotlivými zaznamenanými body při dané vzdálenosti skenování. To znamená, že detaily menší než samotné rozlišení skeneru nejsou zachyceny. Vývoj této technologie vedl k využití různých typů skenerů s odlišnou přesností a rozlišením. Mezi nejběžnější patří laserové a optické skenery využívající triangulaci nebo strukturované světlo. Metoda strukturovaného světla obecně poskytuje nejvyšší rozlišení a přesnost, často překonávající laserové skenování. [9]

3D zobrazovací senzory fungují na principu detekce energie, kterou buď aktivně vysílají na objekt a následně zaznamenávají její odraz, nebo pasivně přijímají energii odraženou z objektu. Reflexní snímače pro zachycení tvaru lze rozdělit na optické a neoptické. Mezi neoptické metody patří akustické snímače (např. ultrazvukové, seismické) a elektromagnetické snímače (např. infračervené, ultrafialové, mikrovlnné radarové). Tyto technologie obvykle určují vzdálenost k objektu na základě času potřebného k odrazu impulsu.

Optické reflexní snímání využívá světlo jako nositele informací a lze jej rozdělit na aktivní a pasivní metody. Aktivní techniky zahrnují optickou triangulaci, časové zpoždění a monokulární snímky, přičemž využívají specifické světelné zdroje. Pasivní metody naopak pracují s odrazivostí objektu a osvětlením scény, což eliminuje potřebu aktivního zařízení.

Další rozdělení se týká způsobu měření – přímé techniky poskytují data o vzdálenosti mezi senzorem a povrchem objektu, zatímco nepřímé metody odvozují informace z

monokulárních snímků a předchozích znalostí o vlastnostech cíle. Výsledkem jsou údaje o vzdálenosti nebo orientaci povrchu.. [7]

Výstupem 3D skeneru je digitální obraz části povrchu objektu, který se skládá z jednotlivých 3D snímků uspořádaných do sítě trojúhelníků nebo mnohoúhelníků. Tato polygonová síť věrně kopíruje geometrii skenovaného předmětu až do nejmenších detailů. Výhodou této metody je snížení počtu prototypových iterací potřebných k dosažení optimálního tvaru a rozměru výrobku. Díky ukládání 3D obrazu objektu je možné snadno porovnávat různé verze prototypu a analyzovat jejich rozdíly. [6,9]

3.3 Dělení bezkontaktního 3D skenování

V technické praxi existuje několik metod získávání informací při bezdotykovém skenování, které se liší podle způsobu interakce se snímaným objektem. Pokud je na objekt vysíláno vlnění nebo světelný paprsek, lze tyto metody rozdělit na magnetické, transmisivní a reflexivní skenování.

Magnetické skenery zahrnují zařízení s magnetickou sondou a skenery využívající princip magnetické rezonance. Transmisivní skenery pracují s technologií počítačové tomografie, která umožňuje detailní analýzu vnitřní struktury objektu. Reflexivní skenery pak zahrnují laserové a optické systémy, stejně jako akustické a mikrovlnné snímače. Ve výrobním procesu se pro kontrolu dílců nejčastěji používají optické nebo laserové skenery, které poskytují vysokou přesnost a detailní zobrazení povrchu objektu..[10]

3.4 Optické metody bezkontaktního 3D skenování

Optické metody bezkontaktního 3D skenování se dělí na aktivní a pasivní, přičemž hlavní rozdíl spočívá ve způsobu získávání informací o snímaném objektu. Aktivní metody využívají vyzáření energie, například viditelného světla nebo elektromagnetického záření, které je namířeno na objekt a následně odraženo zpět do snímače. Naproti tomu pasivní metody žádnou energii neemitují – digitální obraz objektu vzniká postupným skenováním z různých úhlů a následným porovnáním snímků, což umožňuje získání souřadnic jednotlivých bodů objektu. [9]

3.5 Novinky v 3D skenování

3D skenování je dynamicky se rozvíjející technologie, která neustále přináší nové inovace a vylepšení. Zde jsou některé z nejnovějších trendů a novinek v oblasti 3D skenování: [26,27]

1. Bezdrátové 3D skenery

Nové 3D skenery, jako jsou ty od společnosti Shining 3D, dokážou pracovat bezdrátově i v terénu. To znamená větší flexibilitu a mobilitu při skenování objektů mimo laboratoř nebo výrobní prostředí. [26,27]

2. Multifunkční 3D skenery

Shining 3D FreeScan Trio je prvním laserovým 3D skenerem, který umožňuje skenování bez použití značek. Tento skener nabízí tři různé režimy laserového skenování a je vybaven i fotogrammetrií, což zajišťuje vysokou přesnost a efektivitu. [26,27]

3. Pokročilé softwarové nástroje

Nové softwarové nástroje pro 3D skenování, jako je UltiMaker Cura, přinášejí vylepšené funkce a podporu pro širokou řadu 3D tiskáren. Tyto nástroje umožňují rychlejší a efektivnější přípravu dat pro 3D tisk. [26,27]

4. Velkoformátové 3D skenování

Velkoformátové 3D skenery, jako je Einstar VEGA, umožňují skenování velkých objektů s vysokou přesností. Tyto skenery jsou ideální pro průmyslové aplikace, kde je potřeba skenovat velké díly nebo celé konstrukce. [26,27]

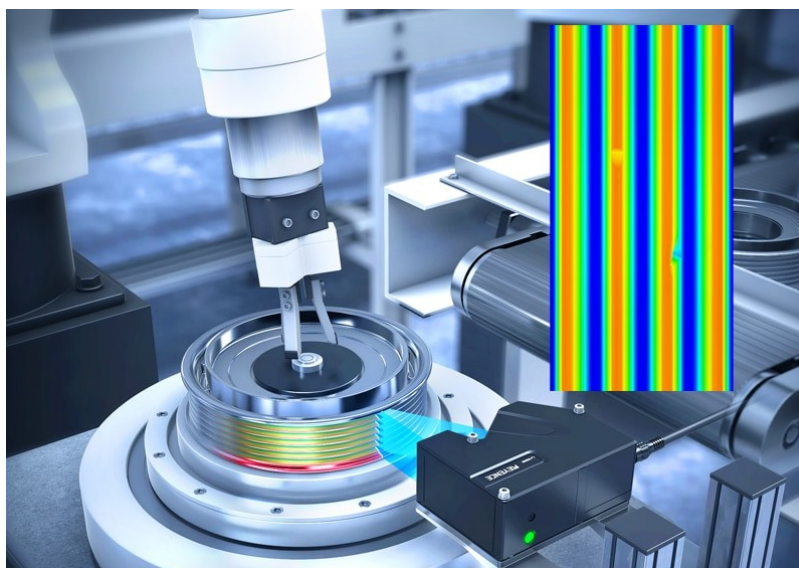
5. Integrace s dalšími technologiemi

3D skenování se stále více integruje s dalšími technologiemi, jako jsou drony a robotika. Tato integrace umožňuje automatizované skenování velkých oblastí a objektů, což zvyšuje efektivitu a přesnost měření

3.6 Optická profilometrie:

Optická profilometrie je pokročilá technologie používaná k měření a analýze povrchových vlastností materiálů. Tato metoda využívá světlo k bezkontaktnímu měření povrchových nerovností a vytváření detailních 3D modelů povrchů. Optická profilometrie

je široce používána v různých průmyslových odvětvích, včetně výroby, výzkumu a vývoje, a kontroly kvality. [12]



Obrázek 11 Laser LJ-X8080[28]

3.6.1 Konfokální profilometry

Princip: Využívají bodové osvětlení a detekci, což umožňuje získat obraz pouze z jednoho ohniskového bodu. Tento proces eliminuje rozmazání způsobené světlem mimo ohnisko a poskytuje vysoké rozlišení a kontrast. [10]

Výhody: Vysoké rozlišení, schopnost měřit transparentní vrstvy a složité povrchy. [10]

Aplikace: Mikroelektronika, biomedicína, materiálový výzkum. [10]

3.6.2 Interferometrické profilometry

Princip: Využívají interferenci světelných vln k měření povrchových nerovností. Světlo je rozděleno na dvě části: jedna část se odráží od referenčního zrcadla a druhá od povrchu vzorku. Interference těchto dvou paprsků poskytuje informace o povrchové topografii. [10]

Výhody: Vysoká přesnost, schopnost měřit hladké i drsné povrchy. [10]

Aplikace: Výroba, kontrola kvality, výzkum materiálů. [10]

3.6.3 Chromatické profilometry

Princip: Využívají chromatickou aberaci čočky, která způsobuje, že světlo různých vlnových délek se zaostřuje v různých vzdálenostech. Senzor vyhodnocuje profil vzorku na základě vlnové délky zpětně odražených paprsků. [10]

Výhody: Schopnost měřit povrchy s vysokým rozlišením a přesností. [10]

Aplikace: Optika, mikroelektronika, materiálový výzkum. [10]

3.6.4 Laserové profilometry

Princip: Využívají laserový paprsek k měření vzdáleností mezi skenerem a povrchem objektu. Laserový paprsek se odráží od povrchu objektu a vrací se zpět do skeneru, kde se měří doba potřebná k návratu paprsku (letový čas). [10]

Výhody: Vysoká přesnost a rychlost skenování, vhodné pro velké a složité objekty. [10]

Aplikace: Výroba, kontrola kvality, výzkum materiálů. [10]

3.6.5 Bílé světlo interferometrické profilometry (WLI)

Princip: Využívají bílé světlo k měření povrchových nerovností pomocí interferometrie. Světlo je rozděleno na dvě části: jedna část se odráží od referenčního zrcadla a druhá od povrchu vzorku. Interference těchto dvou paprsků poskytuje informace o povrchové topografii. [10]

Výhody: Vysoká přesnost, schopnost měřit širokou škálu povrchů. [10]

Aplikace: Výroba, kontrola kvality, výzkum materiálů. [10]

3.6.6 Fázově posunová interferometrie (PSI)

Princip: Využívají fázový posun světelných vln k měření povrchových nerovností. Světlo je rozděleno na dvě části: jedna část se odráží od referenčního zrcadla a druhá od povrchu vzorku. Interference těchto dvou paprsků poskytuje informace o povrchové topografii. [10]

Výhody: Vysoká přesnost, schopnost měřit širokou škálu povrchů. [10]

Aplikace: Výroba, kontrola kvality, výzkum materiálů. Aplikace optické profilometrie

3.6.7 Použití Optických profilometrů

1. Výzkum a vývoj:

Ve výzkumu a vývoji se optická profilometrie používá k analýze povrchových vlastností materiálů a vývoji nových materiálů a technologií. Tato technologie umožňuje

detailní analýzu povrchových struktur a vlastností, což je klíčové pro inovace a zlepšování výrobků. [11]

2. Mikroelektronika:

V mikroelektronice se optická profilometrie používá k měření a analýze povrchových vlastností polovodičových zařízení a integrovaných obvodů. Tato technologie umožňuje přesné měření povrchových nerovností a defektů, což je klíčové pro zajištění výkonu a spolehlivosti elektronických zařízení. [11]

3. Biomedicína:

V biomedicině se optická profilometrie používá k analýze povrchových vlastností biomateriálů a lékařských implantátů. Tato technologie umožňuje detailní analýzu povrchových struktur a vlastností, což je klíčové pro zajištění biokompatibility a výkonu lékařských zařízení. [11]

4 STATISTICKÉ METODY

4.1 Exploratorní Datová Analýza (EDA)

Exploratorní analýza dat (EDA) je klíčovým nástrojem datových vědců pro zkoumání a analýzu datových souborů. Jejím cílem je identifikovat a shrnout hlavní charakteristiky dat, často s využitím vizualizačních metod. Pomáhá optimalizovat práci s datovými zdroji tak, aby bylo možné získat relevantní odpovědi, zároveň usnadňuje odhalování vzorců, identifikaci anomálií, testování hypotéz a ověřování předpokladů. [16]

Exploratorní analýza dat (EDA) slouží k hlubšímu porozumění datovým souborům nad rámec běžného modelování či testování hypotéz. Pomáhá identifikovat klíčové charakteristiky proměnných a jejich vzájemné vztahy, čímž umožňuje efektivnější manipulaci s daty. EDA také ověřuje vhodnost statistických metod pro analýzu dat a pomáhá odhalit chyby, vzorce, odlehlé hodnoty či anomální jevy. Tento přístup umožňuje lepší interpretaci dat ještě před formulací prvotních předpokladů, což vede k přesnějším analytickým závěrům.. [16]

Exploratorní analýza dat (EDA) umožňuje ověřit, zda získané výsledky jsou relevantní a použitelné pro všechny požadované obchodní cíle. Pomáhá zúčastněným stranám formulovat správné otázky a poskytuje odpovědi na klíčové statistické aspekty, jako jsou směrodatné odchylky, kategorické proměnné a intervaly spolehlivosti. Po dokončení EDA lze její poznatky využít k pokročilé analýze dat nebo modelování, včetně aplikací ve strojovém učení. [16]

4.2 Typy grafického znázornění dat

1. Rozptylový diagram

Jednorozměrná projekce kvantilového grafu je znázorněna na ose x a často se využívá díky své jednoduchosti. Přesto umožňuje identifikaci nejen lokálních koncentrací dat, ale také odlehlých či podezřelých měření. Na osu x se zaznamenávají hodnoty x_i , zatímco na osu y lze umístit libovolnou úroveň, například $y = 0$. Tento typ grafu je užitečný při exploratorní analýze dat, kde pomáhá vizuálně odhalit vzorce a anomálie v datovém souboru. [16,25]

2. Rozmítnutý diagram rozptýlení

Tento typ grafu představuje variantu kvantilového grafu, avšak s lepším rozmístěním bodů pro snazší vizualizaci. Na ose x jsou zaznamenány hodnoty x , zatímco na ose y se nacházejí intervaly náhodných čísel [16,25]

3. Diagram percentilů

Slouží k zobrazení vybraných percentilů, které jsou obvykle rozděleny do intervalů, například: 0–2, 2–5, 5–10, 10–15, 15–25, 25–35, ..., 75–85, 85–90, 90–95, 95–99, 99–100. Na ose x je zaznamenána proměnná, zatímco na ose y odpovídající percentily. Tento graf pomáhá určit tvar a symetrii rozdělení dat. [16,18]

4. Houslový diagram

Jedná se o kombinaci dvou vertikálních grafů hustoty, které jsou zrcadlově umístěny vůči sobě, doplněné o krabicový graf. Tento diagram vizuálně znázorňuje údolí a píky podobně jako graf hustoty pravděpodobnosti – jeden roste doleva, druhý doprava. Při normálním rozdělení vytváří symetrický tvar připomínající housle, což dalo diagramu jeho název. Na ose x jsou uvedeny označení výběru proměnné, zatímco na ose y percentily nebo hodnoty proměnné. [17]

5. Kvantilový graf

Používá se k přehlednému zobrazení dat a rozpoznání tvaru rozdělení, včetně symetrie či zešíkvení směrem k nižším nebo vyšším hodnotám. Na ose x je zaznamenána pořadová pravděpodobnost P_i , zatímco na ose y pořádková statistika $x_{(i)}$ [17]

6. Box-plot graf

Varianta krabicového grafu, která umožňuje posouzení variability mediánu. Na ose x jsou zaznamenány hodnoty x_i , zatímco na ose y interval úměrný hodnotě $\sqrt{n}$. [16]

7. Vrubový box-plot graf

jde o obdobu krabicového grafu, přičemž se od sebe liší v možnosti posouzení variability mediánu. Osa x je úměrná hodnotám x_i , zatímco osa y znázorňuje interval úměrný hodnotě $\sqrt{n}$.

8. Graf symetrie

Symetrická rozdělení lze charakterizovat rovnicí $y=M$. U asymetrických rozdělení se v grafu objevuje směrnice, která slouží jako odhad parametru šikmosti, namísto přímky s

nulovou směrnici. Body v takovém grafu nejsou uspořádány lineárně, ale sledují trend určité křivky. Na ose x se zaznamenává rozdíl $M - x_{(i)}$, zatímco na ose y hodnoty $Z_i = x_{(n+1-i)} - M$. [24,25]

9. Graf polosum

Horizontální přímka s rovnicí $y=M$ symetricky rozděluje graf polosum. Charakteristickým rysem tohoto grafu je oscilace bodů kolem této přímky, přičemž vytvářejí náhodný shluk. Měřítko osy y je velmi detailní. V případě asymetrického rozdělení se zde projevuje nenáhodný trend, což ovlivňuje pohyb bodů i měřítko osy y . Na ose x jsou zaznamenány pořádkové statistiky $x_{(i)}$, zatímco na ose y hodnoty $Z_i = 0,5(x_{(n+1-i)} + x_{(i)})$ [17]

10. Graf špičatosti

Normální rozdělení je v tomto grafu reprezentováno horizontální přímkou, na níž většina bodů leží. Pokud body vykazují nenáhodný trend, směrnice této přímky odpovídá parametru špičatosti. Na ose x platí $uP_i = 2/2$ pro $P_i = i/(n+1)$, zatímco na ose y se zaznamenává $\ln(x_{(n+1-i)} - 2uP_i)$. [18]

11. Graf šikmosti

V případě symetrického rozdělení se zde projevuje přímková závislost s nulovým úsekem a jednotkovou směrnici, což znamená, že body leží těsně na této přímce. Pokud je rozdělení asymetrické, body se od této přímky odchylují a mají odlišnou směrnici. Na ose x platí $uP_i = 2/2$ pro $P_i = i/(n+1)$, zatímco na ose y hodnoty $Z_i = 0,5(x_{(n+1-i)} + x_{(i)})$. [17,18]

12. Graf rozptýlení s kvantily

Spojením bodů $\{x_{(i)}, P_i\}$ lineárními úseky lze získat odhad kvantilové funkce výběru, která je klíčová pro sestavení tohoto grafu. Sigmoidální tvar kvantilové funkce je typický pro symetrická rozdělení. Rozdělení zešikmená k nižším hodnotám mají konkávně rostoucí tvar, zatímco rozdělení zešikmená k vyšším hodnotám mají konvexně rostoucí tvar. Na ose x jsou zaznamenány hodnoty P_i , zatímco na ose y hodnoty $x_{(i)}$. [17,18]

13. Histogram

Histogram svou strukturou kopíruje sloupcový graf. Na ose x jsou jednotlivé třídy, které definují šířku sloupců, zatímco empirické hustoty pravděpodobnosti určují jejich výšku. Kvalitu histogramu ovlivňuje zejména volba počtu tříd. Na ose x jsou zaznamenány proměnné x , zatímco na ose y odpovídající hustoty pravděpodobnosti. [17,18]

14. Q–Q Graf (kvantilově-kvantilový)

Slouží k porovnání výběrového rozdělení s teoretickým rozdělením pomocí kvantilových funkcí $QE(P)$ a $QT(P)$. Pokud jsou rozdělení shodná, těsnost odpovídá korelačnímu koeficientu r_{xy} , který určuje proložení přímky při identifikaci neznámého rozdělení. Na ose x se zaznamenává $QT(P_i)$, zatímco na ose y hodnoty $x_{(i)}$. [17,18]

15. Rankitový graf

Porovnává normální rozdělení s výběrovým rozdělením a umožňuje orientační klasifikaci na základě délky konců, šikmosti nebo špičatosti. Na ose x je zaznamenán kvantil normovaného Gaussova rozdělení uP_i , zatímco na ose y hodnoty $x_{(i)}$. [17,18]

16. P–P graf (pravděpodobnostní)

Alternativa Q–Q grafu, která porovnává standardizovanou distribuční funkci teoretického rozdělení s distribuční funkcí výběru vyjádřenou pořadovou pravděpodobností. Pokud jsou rozdělení shodná, graf má lineární podobu s jednotkovou směrnici a nulovým úsekem. Pro jeho konstrukci je nutná znalost teoretického rozdělení i hodnot všech parametrů. Na ose x se zaznamenává P_i , zatímco na ose y hodnoty $FT(S_{(i)})$. [17,18]

17. Kruhový graf

Používá se k vizuálnímu ověřování hypotéz, přičemž podmínkou je symetrické rozdělení, nejčastěji Gaussovo. Graf má podobu regulárního konvexního polygonu, který se blíží kružnici. Odchyly od kruhového tvaru naznačují odlišné rozdělení výběru oproti symetrickému. [17,18]

4.3 Ověření předpokladu o datech

V datové analýze se často předpokládá, že data tvoří reprezentativní náhodný výběr, jehož vlastnosti závisí na třech klíčových předpokladech. Ty je nutné ověřit před samotnou analýzou: [20]

1. Nezávislost prvků výběru – jednotlivé hodnoty x_i nesmí být vzájemně závislé, což znamená, že žádná hodnota neovlivňuje jinou.

2. Homogenita výběru – data musí pocházet ze stejného statistického souboru, tedy mít jednotné vlastnosti.

3. Normální rozdělení výběru – data by měla odpovídat normálnímu rozdělení, což umožňuje aplikaci běžných statistických metod.

4.3.1 Postup ověřování předpokladů

Tyto statistické metody jsou klíčové pro analýzu dat a jejich správnou interpretaci:

1. **Odhady klasických parametrů** – zahrnují výpočet základních statistických charakteristik, jako je průměr, rozptyl nebo směrodatná odchylka, které pomáhají popsat vlastnosti datového souboru. [20]

2. **Test normality** – slouží k ověření, zda data odpovídají normálnímu rozdělení, což je důležité pro použití mnoha statistických metod.

3. **Test nezávislosti** – umožňuje zjistit, zda mezi proměnnými existuje závislost, například pomocí korelačních testů nebo chí-kvadrát testu. [20]

4. **Detekce odlehlých bodů** – identifikuje hodnoty, které se výrazně odlišují od ostatních dat, což může naznačovat chyby v měření nebo specifické vzorce v datech. [20]

5. **Statistická analýza jednorozměrných dat** – zahrnuje metody pro zkoumání rozdělení dat, jejich variability a dalších charakteristik, které pomáhají lépe porozumět datovému souboru. [20]

4.3.2 Postup testování statistické hypotézy

Obecný postup testování statistické hypotézy zahrnuje několik klíčových kroků:

1. Formulace hypotéz – stanoví se nulová hypotéza H_0 , která obvykle představuje výchozí předpoklad, a alternativní hypotéza H_A , která se snaží tento předpoklad vyvrátit. [20]

2. α – určuje pravděpodobnost chybného zamítnutí nulové hypotézy, běžně se volí hodnoty 0,05 nebo 0,01. [20]

3. Volba testační statistiky – například t-test, chí-kvadrát test nebo ANOVA, v závislosti na povaze dat a hypotézy. [20]

4. Stanovení kritického oboru – určuje se oblast hodnot testovací statistiky, při jejímž dosažení se nulová hypotéza zamítá. [20]

5. Výpočet testovací statistiky a kvantilů – na základě dat se vypočítá hodnota testovací statistiky a porovná se s kritickými hodnotami. [20]

6. Rozhodnutí o hypotéze – pokud vypočtená testovací statistika spadá do kritického oboru, nulová hypotéza H_0 se zamítá a přijímá se alternativní hypotéza H_A . [20]

4.3.3 Testy střední hodnoty

Testy správnosti se používají k ověření střední hodnoty datového souboru dvěma hlavními způsoby:

1. Interval spolehlivosti – vypočítává se intervalový odhad parametru μ , který reprezentuje polohu nebo rozptyl dat. Pokud zadaná hodnota μ_0 spadá do tohoto intervalu, nulová hypotéza H_0 se nezamítá ($\mu=\mu_0$). Pokud však μ_0 do intervalu nezapadá, nulová hypotéza H_0 se zamítá. [20].
2. Studentův t-test – začíná výběrem náhodného souboru o rozsahu n ze základního souboru s normálním rozdělením $N(\mu, \sigma^2)$. Poté se vypočítá výběrový průměr a směrodatná odchylka s . Testovací statistika se volí podle charakteru dat a hypotézy. [20]

4.3.4 Test shody středních hodnot

Testy shodnosti se používají k porovnání dvou výběrů $\{x_i\}, i=1, \dots, n_1$ a $\{y_j\}, j=1, \dots, n_2$. V některých případech lze tuto metodu aplikovat i na jeden výběr, pokud mezi jeho prvky existuje logická vazba. Obecně umožňují testy shodnosti ověřit, zda mají oba výběry stejné rozdělení pravděpodobnosti, a také zjistit, zda se liší v parametrech rozptýlení a polohy.

Jedním z běžně používaných testů je F-test, který ověřuje, zda dva výběrové soubory pocházejí z rozdělení se stejným rozptylem. Další metodou je Studentův t-test, který porovnává střední hodnoty dvou nezávislých výběrů. Pokud se jedná o více než dva výběry, lze použít ANOVA (analýzu rozptylu), která umožňuje testovat rozdíly mezi skupinami. [20]

4.3.5 Postup testu shodnosti středních hodnot dvou souborů

1. zahrnuje testy a statistické diagnostiky k ověření předpokladů o výběru, například Shapirův-Wilkův test nebo Kolmogorov-Smirnovův test [20]

2. Test shody rozptylů – slouží k porovnání variability dvou souborů:

Fisherův-Snedecorův F-test – klasická metoda pro ověření shody rozptylů.

Modifikovaný Fisherův–Snedecorův F-test – upravená verze pro specifické podmínky.

3. Test shody středních hodnot dvou souborů – umožňuje porovnání průměrů:

Studentův t-test T1 – pro data s homogenním rozptylem.

Studentův t-test T2 – pro data s heterogenním rozptylem.

Modifikovaný Studentův t-test T3 – pro výběry odchýlené od normálního rozdělení

Robustní test jackknife polohy T4 – pro data s homogenním rozptylem.

Robustní test jackknife polohy T5 – pro data s heterogenním rozptylem. [20]

4.4 Analýza rozptylu ANOVA (Analysis of Variance)

Analýza rozptylu (ANOVA) je statistická metoda používaná k identifikaci faktorů, které významně ovlivňují pozorované veličiny. V praktických aplikacích se využívá buď samostatně, nebo jako nástroj pro analýzu zdrojů variability v lineárních statistických modelech. Hlavním cílem ANOVA je rozdělit celkový rozptyl dat na dvě složky:

Objasněnou variabilitu, která je způsobena známými faktory,

Neobjasněnou variabilitu, která je považována za náhodnou.

Tato metoda umožňuje určit, zda kvantitativní nebo kvalitativní faktory mají statisticky významný vliv na sledované veličiny, bez ohledu na způsob jejich působení. [20]

Postup analýzy rozptylu (ANOVA) lze rozdělit do pěti klíčových kroků:

1. Odhad parametrů základního modelu ANOVA – zahrnuje stanovení základních statistických charakteristik modelu, které pomáhají popsat variabilitu dat. [20]
2. Testování významnosti a konstrukce různých modelů – ověřuje se, zda faktory v modelu mají statisticky významný vliv na sledované veličiny, případně se testují alternativní modely. [20]
3. Vyjádření složek rozptylů a testování jejich významnosti – celkový rozptyl dat se rozkládá na objasněnou a neobjasněnou složku, přičemž se testuje jejich statistická významnost. [20]
4. Ověření předpokladu normality a identifikace silně vybočujících hodnot – kontroluje se, zda data odpovídají normálnímu rozdělení, což je důležité pro správnou interpretaci výsledků. [20]

5. Interpretace výsledků s ohledem na zadání dat a jejich případné úpravy – na základě získaných poznatků se provádí finální analýza a případné úpravy datového modelu. [20]

4.4.1 Jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA)

Analýza rozptylu (ANOVA) nabízí širokou škálu nástrojů pro porovnání a hodnocení dat, které se běžně využívají v statistických studiích. Mezi klíčové metody patří:

Formulace modelu – stanovení základních parametrů analýzy.

Jednofaktorová analýza rozptylu – ověřování vlivu jednoho faktoru na variabilitu dat. [20,16]

Kruskalův-Wallisův test – neparametrická alternativa ANOVA pro porovnání více skupin. [20,16]

Omezení a testování – identifikace podmínek, které mohou ovlivnit výsledky analýzy. [20,16]

Vícenásobné porovnávání – metody pro srovnání více skupin dat. [20,16]

Metody MCP (Multiple Comparison Procedures) – zahrnují různé přístupy k porovnávání datových sad. [20,16]

Bonferroniho porovnání všech párů – metoda pro kontrolu chyb při vícenásobném testování. [20,16]

Bonferroniho porovnání sloupců vůči kontrolnímu – specifická varianta Bonferroniho testu. [20,16]

Standardní porovnání – základní metody pro analýzu rozdílů mezi skupinami. [20,16]

Kruskalovo-Wallisovo porovnání Z-skóre – testování rozdílů mezi skupinami na základě Z-skóre. [20,16]

Scheffého porovnání – metoda pro identifikaci rozdílů mezi skupinami s kontrolou chyb.

Tyto nástroje umožňují důkladnou analýzu dat a pomáhají identifikovat klíčové faktory ovlivňující výsledky. [20,16]

4.4.2 Postup jednofaktorové analýzy rozptylu

1. **Příprava dat** – klíčový krok, který může výrazně ovlivnit konečné výsledky. Zahrnuje zajištění shodnosti velikosti výběru s četnostmi ve sloupcích, minimalizaci chybějících hodnot, potvrzení spojitosti dat a identifikaci odlehlých hodnot pomocí exploratorní analýzy dat (EDA). [20,16]
2. **Ověření výběrových předpokladů** – data musí splňovat podmínky náhodnosti, nezávislosti, normality a homoskedasticity, což je zásadní pro správnou interpretaci výsledků. [20,16]
3. **Průměry a efekty úrovně** – hodnotí se na základě identifikace vlivných bodů, které mohou ovlivnit celkovou analýzu. [20,16]
4. **Volba statistických testů významnosti faktoru A** – zahrnuje validaci vhodných výběrových předpokladů a následný výběr odpovídajících testů. [20,16]
5. **Vícenásobné porovnávání sloupcových průměrů (MCP)** – existují čtyři typy porovnávání: plánované všechny možné páry, neplánované všechny možné páry, každý versus kontrolní sloupec, vybrané a plánované sloupce. [20,16]
6. **Grafy a diagramy** – nejprve se sestavuje rankitový graf reziduí jackknife, následně transformační graf závislosti, které pomáhají vizualizovat vztahy mezi daty. [20,16]

4.5 MANAGEMENT KVALITY

Řízení kvality (management kvality) zahrnuje koordinované činnosti zaměřené na zajištění a zlepšování jakosti v podniku. Tyto aktivity zahrnují plánování, řízení a neustálé zdokonalování procesů, které vedou k dosažení stanovených cílů. Kvalitu lze

aplikovat nejen na finální produkty či služby, ale také na samotné výrobní procesy, což podtrhuje její komplexní charakter. [20,16]

Aby byl podnikový management efektivní, je nezbytné důsledně dodržovat zásady řízení kvality. Jejich správná implementace pomáhá minimalizovat reklamace a zvyšovat efektivitu interních procesů. Mezi klíčové principy účinných systémů jakosti patří: [20,16]

Princip prevence – zaměřuje se na předcházení problémům namísto jejich dodatečného řešení.

Princip všeobsažnosti – kvalita musí být zohledněna ve všech fázích výroby.

Princip zpětné vazby – umožňuje neustálé zlepšování na základě získaných dat.

Princip orientace na zákazníka – klade důraz na splnění očekávání zákazníků.

Princip matematické podpory – využívá statistické metody pro řízení kvality.

Princip transparentnosti – zajišťuje jasnou komunikaci a dostupnost informací.

Princip efektivnosti – optimalizuje procesy pro maximální výkon.

Princip měřitelnosti výsledků – umožňuje objektivní hodnocení kvality.

Princip týmové spolupráce – podporuje koordinaci mezi jednotlivými

Princip neustálého zlepšování – zajišťuje dlouhodobý rozvoj kvality. [20,16]

4.5.1 KLASICKÉ NÁSTROJE KVALITY

Nástroje kvality se primárně využívají k řízení a zlepšování kvality, přičemž jejich uspořádání může být různé. Nejčastěji se řadí podle posloupnosti identifikace problému a jeho následného řešení. Mezi základní nástroje patří například Ishikawův diagram, Paretův diagram, histogram, bodový diagram, vývojový diagram a regulační diagram. Tyto metody pomáhají analyzovat příčiny problémů, vizualizovat data a optimalizovat procesy. [20,19]

4.5.2 Vývojové diagramy

Flow charts, neboli vývojové diagramy, jsou skvělým nástrojem pro vizualizaci procesů. Pomocí jednotlivých kroků rozkládají proces na jasně definované části, což

usnadňuje pochopení propojení všech zahrnutých činností. Jsou široce využívány v různých oblastech, od řízení projektů po optimalizaci pracovních postupů.

Vývojové diagramy používají standardizované symboly, jako jsou:

Ovál – označuje začátek nebo konec procesu.

Obdélník – představuje konkrétní úkol nebo akci.

Diamant – značí rozhodovací bod s více možnými cestami.

Paralelogram – slouží k označení vstupních nebo výstupních dat. [17]

4.5.3 Kontrolní tabulky

Kontrolní formuláře, známé také jako záznamníky dat, jsou klíčovým nástrojem pro sběr kvantitativních údajů, které slouží jako podklad pro analýzy a hodnocení kvality. Jejich správné použití pomáhá zajistit přesnost a spolehlivost dat, což je zásadní pro efektivní rozhodování. [17]

Aby byla kontrolní data relevantní, je důležité eliminovat neúplné, opožděné nebo zkreslené informace. Toho lze dosáhnout například pomocí automatizovaných systémů sběru dat, pravidelných kontrol kvality nebo metod statistické analýzy. [17]

4.5.4 Histogramy

Histogramy jsou užitečným nástrojem pro vizualizaci distribuce četností v datech. Podmínkou jejich správného použití je, aby údaje byly číselné. Šířka intervalu sledovaného znaku se v histogramu odráží v šířce jednotlivých sloupců. [17]

Dle tvaru histogramu lze identifikovat různé charakteristiky dat, například:

Symetrické rozdělení – naznačuje normální distribuci dat.

Asymetrické rozdělení – může ukazovat na zkreslení dat směrem k nižším nebo vyšším hodnotám.

Výskyt náhodných chyb – nepravidelnosti v histogramu mohou signalizovat chyby v měření nebo zpracování dat.

Nedodržení výrobního postupu – odchylky od očekávaného tvaru histogramu mohou naznačovat problémy v procesu výroby. [17]

4.5.5 Ishikawův diagram

Diagram příčin a následků, známý také jako Ishikawův diagram nebo diagram rybí kosti, je vizuální nástroj používaný k identifikaci pravděpodobných příčin problému a jejich následků. Jeho grafická struktura připomíná kostru ryby, kde hlavní „páteř“ představuje problém a jednotlivé „kosti“ označují oblasti, ve kterých se mohou nacházet příčiny.

Tento diagram se často využívá při brainstormingu, protože umožňuje systematické rozdělení problému do různých kategorií, jako jsou lidé, procesy, technologie, materiály nebo prostředí. Pomáhá nejen při hledání hlavních příčin, ale také při identifikaci vedlejších faktorů, které mohou problém ovlivňovat.. [17,18]

4.5.6 Pareto diagram

Pareto analýza je metoda založená na Paretově principu 80/20, který říká, že 80 % následků je způsobeno pouze 20 % příčin. Tento přístup umožňuje efektivně identifikovat klíčové faktory ovlivňující kvalitu produktu a zaměřit se na jejich odstranění, což vede ke snížení nákladů a zlepšení výsledků.

Grafické znázornění Pareto analýzy je založeno na kumulativní četnosti údajů, což pomáhá vizualizovat nejvýznamnější problémy a jejich dopad. V praxi se používá například k optimalizaci výrobních procesů, řízení kvality nebo analýze zákaznických stížností. [18,25,30]

4.5.7 Korelační diagram

Bodový diagram, známý také jako korelační diagram nebo scatter plot, slouží k vizuálnímu znázornění vztahu mezi dvěma náhodnými proměnnými. S rostoucím počtem dat se zvyšuje věrohodnost výsledků, což umožňuje přesnější analýzu závislostí.

Mezi proměnnými mohou nastat čtyři typy vztahů:

Kladný vztah – hodnoty obou proměnných rostou současně.

Záporný vztah – jedna proměnná roste, zatímco druhá klesá.

Bez lineární závislosti – mezi proměnnými není žádný patrný vztah.

Proměnná závislost – vztah mezi proměnnými může být nelineární nebo složitější.

Tento typ grafu je užitečný při analýze dat, protože umožňuje rychle identifikovat vzorce a trendy. [19,30]

4.5.8 Regulační diagram

Regulační diagramy jsou klíčovým nástrojem statistického řízení procesů (SPC), které umožňují předvídat chování výrobního procesu na základě získaných dat. Pomocí těchto diagramů lze sledovat střední hodnotu (CL), horní regulační mez (UCL), dolní regulační mez (LCL) a případně akční meze, což pomáhá identifikovat odchylky od standardního průběhu výroby. [17,24]

Hlavním cílem SPC je zajistit kontrolovaný, efektivní a spolehlivý výrobní proces, který minimalizuje výskyt vadných produktů. Regulační diagramy umožňují včasné odhalení problémů a jejich následnou korekci, což vede ke snížení nákladů a zvýšení kvality výroby. [17,24,31]

4.6 VDA - Verband der Automobilindustrie

Je německé sdružení automobilového průmyslu, které zastupuje zájmy německých výrobců automobilů, dodavatelů a dalších souvisejících společností. VDA je známá svými standardy a směrnicemi, které pomáhají zajišťovat kvalitu a bezpečnost automobilových komponent a procesů

4.6.1 VDA 1 - Dokumentované informace a jejich uchování

Tato příručka se zaměřuje na způsoby zacházení s informacemi a dokumentací v rámci životního cyklu produktu. Zohledňuje doporučení pro klasifikaci informací od fáze získávání zakázky, přes návrh a vývoj produktů, výrobu a použití u zákazníka až po zajištění náhradních dílů a likvidaci odpadu. [20,21,22]

4.6.2 VDA 2 - Zajišťování kvality před sériovou výrobou

Tato příručka upřesňuje požadavky na zajištění kvality před sériovou výrobou. Obsahuje důležité novinky validace procesu a stupně předložení "0". Zahrnuje také propracované formuláře pro vzorkování. [20,21,22]

4.6.3 VDA 4 - Zajištění kvality v oblasti procesů

Tato příručka se zaměřuje na systematickou podporu vývojových prací v průběhu návrhu produktu a procesu. Obsahuje analýzy rizik, metody a modely postupů Design for Six Sigma. [20,21,22]

4.6.4 VDA 5 - Procesy měření a zkoušení

Tato příručka řeší vhodnost měřicích systémů a procesů měření pro případ, kdy je pro měřený znak předepsaná tolerance. Základem pro výpočet vhodnosti je nejistota měření, která je následně zohledněna při prokazování shody se specifikovanými požadavky. [20,21,22]

4.6.5 VDA 6.3 - Procesní audit

Tato příručka poskytuje směrnice pro provádění procesních auditů v automobilovém průmyslu. Zaměřuje se na hodnocení procesů a jejich schopnost splňovat požadavky na kvalitu a efektivitu. [20,21,22]

4.6.6 VDA 6.5 - Audit výrobku

Tato příručka se zaměřuje na provádění auditů výrobků, které hodnotí shodu výrobků s požadavky na kvalitu. Obsahuje postupy a metody pro provádění auditů a hodnocení výsledků. [20,21,22]

4.6.7 Hlavní oblasti působnosti VDA

1. **Normy a směrnice:** VDA vypracovává a vydává normy a směrnice, které se týkají různých aspektů výroby automobilů, včetně kvality, bezpečnosti, logistiky a životního prostředí. [20,21,22]
2. **Kvalita a certifikace:** VDA poskytuje pokyny pro zajištění kvality v automobilovém průmyslu a podporuje certifikaci podle mezinárodních standardů, jako je ISO/TS 16949. [20,21,22]
3. **Zastoupení a lobbování:** VDA zastupuje zájmy svých členů na národní i mezinárodní úrovni. Spolupracuje s vládami a regulačními orgány na tvorbě politik a regulací. [20,21,22]
4. **Výzkum a inovace:** VDA podporuje výzkum a inovace v automobilovém průmyslu prostřednictvím různých projektů a iniciativ. [20,21,22]
5. **Ekologie a udržitelnost:** VDA se snaží snižovat ekologický dopad automobilového průmyslu a podporuje udržitelné výrobní postupy. [20,21,22]

4.6.8 Přínosy členství ve VDA

Členové mají přístup k síti profesionálů a odborníků v automobilovém průmyslu. Členové jsou pravidelně informováni o novinkách, legislativních změnách a trendech v automobilovém průmyslu. VDA poskytuje podporu svým členům při zavádění nových standardů a technologií, zajišťování kvality a zlepšování procesů. [20,21,22]

II PRAKTICKÁ ČÁST

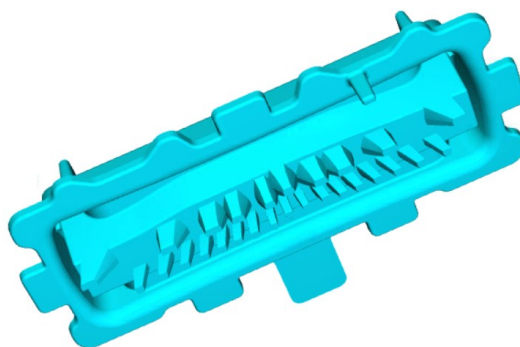
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo nejdříve vypracovat rešerši na téma komparace povrchů polymerních výrobků. Následně proměřit jakost zadaných vzorků, v našem případě optické díly pro automotive z materiálu typu LSR. Posledním bodem této práce je nalézt vhodnou statistickou hodnotící metodu. Na základě rešerše pak byla zvolená metoda EDA a následně SPC a ANOVA.

6 MĚŘENÉ VZORKY

6.1 Primární optiky

Konkrétními vzorky pro které bylo potřeba najít koncept vyhodnocení a měření jsou primární optiky, optické komponenty pro automobilový průmysl z LSR materiálu, který oproti běžně používanému PPMA se vyznačuje lepšími optickými vlastnostmi a větší odolností proti UV degradaci, avšak jeho nevýhodou je vyšší elasticita. Její nevýhoda bude dále rozebrána během samotného měření. Vzorky nebyly nijak dodatečně upravovány. Byly měřeny několik hodin po vystříknutí. Nástroj je osminásobný. Pro účely měření bylo vybráno 160 dílů z kavit 5,6,7,8. Tak, aby se verifikovala i aplikovatelnost pro využití jako 100% měření během sériové výroby.



Obrázek 12. – jeden z měřených vzorků

6.2 Separátor (LPP rám)

Pro účely měření byl také použit protikus z materiálu UP-GF do kterého byly primární optiky během měření zasazovány. Tento kus byl nejdříve změřen pomocí 3D skeneru, abychom vyloučili možný negativní vliv na výsledky měření samotných primárních optik a nevnesly do výsledků systematickou chybu.

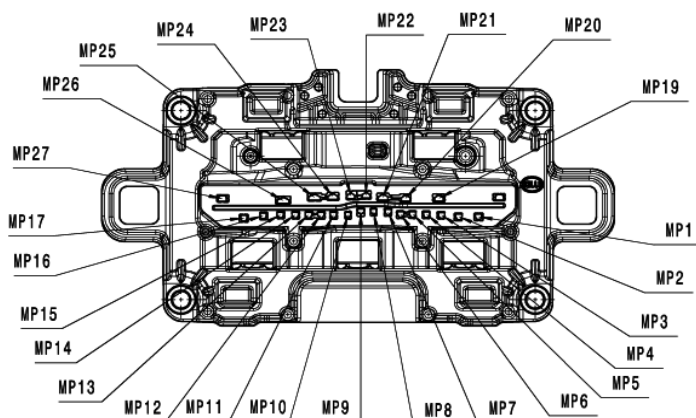


Obrázek 13. – Separátor použitý k měření

7 MĚŘENÍ VZORKŮ A METODY MĚŘENÍ

7.1 Měřicí body

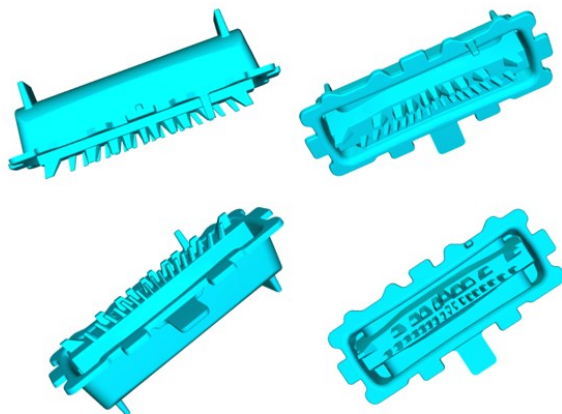
Předtím, než budou popsány konkrétní způsoby měření je nutné stanovit, co je nutné na jednotlivých dílech měřit. V případě primárních optik se jedná o 24 „prstů“, které přenáší paprsek světla z LED diody na čočku, která je součástí geometrie tohoto dílu. Tolerance pro všech 24 měřících bodů je $\pm 0,25$ mm.



Obrázek 14. – měřené geometrie na díle

7.2 Měření 3D skenerem

Měření 3D skenerem nám poskytlo exaktní data ohledně rozměrů dílů, ale vzhledem k destrukční povaze měření, nanášení neprůhledné vrstvy na průhledný komponent, není tato metoda vhodná pro 100 % sériovou verifikaci. Nicméně data získaná touto metodou jsou velice přesná a posloužila jako nominální základna pro verifikaci zbylých dvou metod.



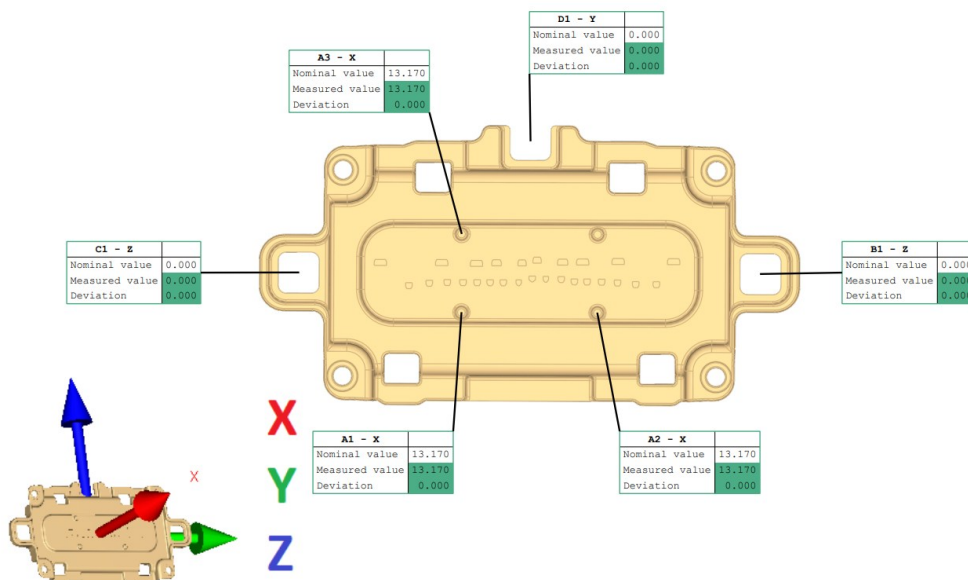
Obrázek 15. – 3D data primární optiky

7.3 Standardní Měření pomocí CMM

Jak je již zmíněno v teoretické části, měření pomocí CMM měřících zařízení je v automobilovém průmyslu standard. I proto proběhl pokus měřit zmíněné díly i tímto způsobem, konkrétně na zařízení ZEISS PRISMO. Ovšem kvůli vysoké elasticitě dílů nebylo možné dostat relevantní výsledky i přes pokusy měřit díl jak v přípravku, tak v protikusu, tak ve volném stavu. Vždy došlo k náhodnému zkreslení rozměrů „prstů“ z důvodu změny polohy měřicího bodu kvůli působení síly ze strany dotekové sondy. Tato deformace byla překážkou v opakovatelnosti měření a tím pádem bránila kredibilitě výsledků měření. Vždy došlo k několika měřením jednoho dílů a následně k porovnání s 3D skenem daného dílu pro vyloučení opakovatelnosti.

7.4 Měření Topografickým Laserem LJ-X8080

Až měření pomocí topografického záznamu pořízeného laserovým měřičem LJ-X8080 splnilo podmínky opakovatelnosti a zajistilo věrohodné výsledky za krátký čas, okolo šesti vteřin na díl. Pro Topografický záznam byla každá primární optika sestavená do kalibrovaného protikusu, separátoru, a následně byla zaznamenána hloubka průniku

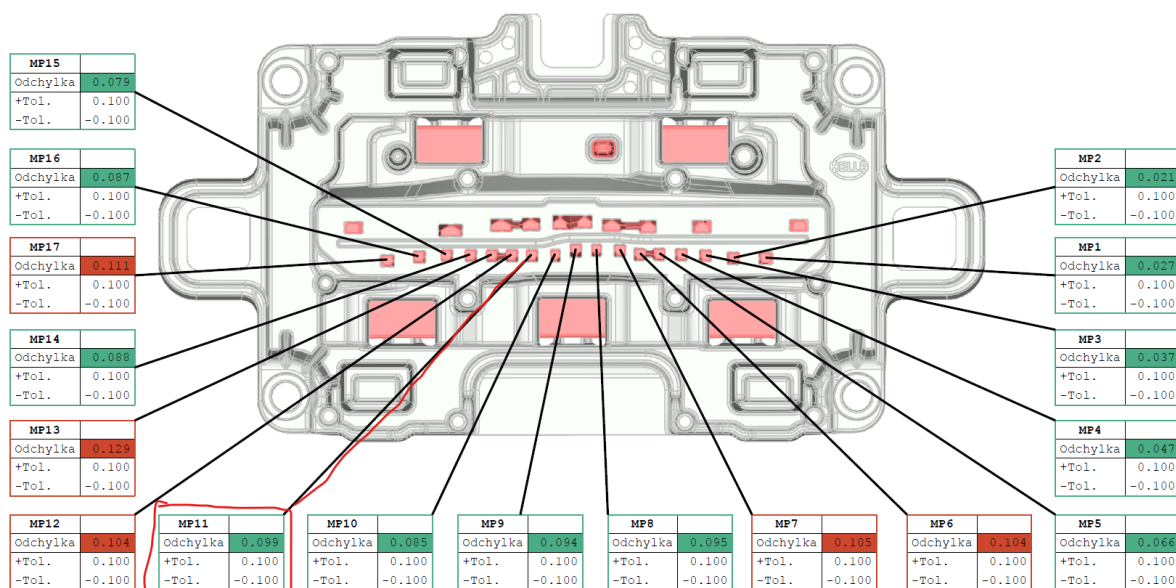


Obrázek 16 – příklad „kalibrovaného“ separátoru

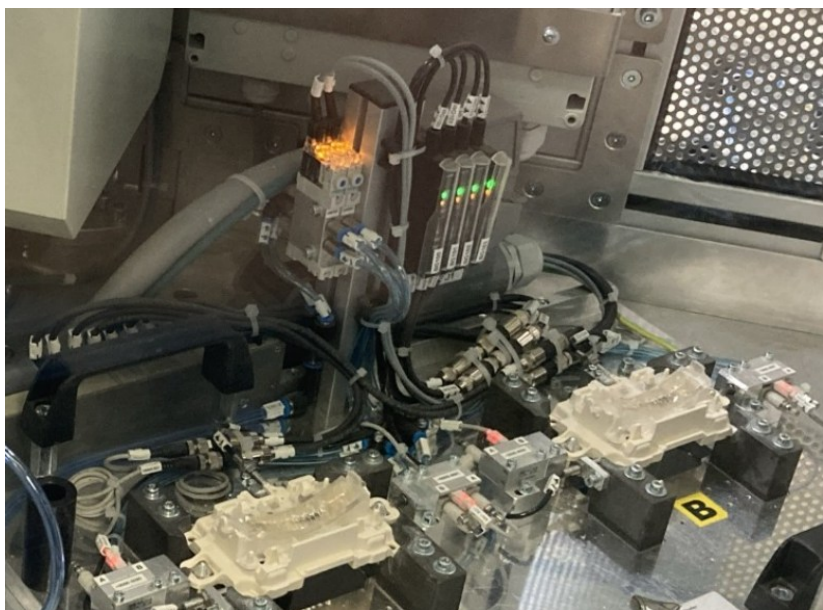
jednotlivých prstů skrze otvory separátoru, navíc nedestruktivně a bezkontaktně. Díky tomu mohou být změřeny celé výrobní dávky dílů z LSR s minimálním vnějším vlivem na výsledky měření.

7.5 Parametry Laseru LJ-X8080

Pokud bychom měli zmínit specifické parametry použitého zařízení LJ-X8080, tak ohnisková vzdálenost od měřeného předmětu je 73 mm. Rozsah měření v jednotlivých osách je pro Z = 41 mm, pro X = 30 mm. Světelným zdrojem je modrý polovodičový laser o vlnové délce 405 nm. Co se opakovatelnosti týká, výrobce garantuje opakovatelnost pro osu Z = 0,5 μm , pro osu X = 1,0 μm , a pro osu Z = $\pm 0,03\%$ z plného rozsahu. ($\pm 0,004\%$) [28]



Obrázek 18. – Naměřené výsledky zobrazené softwarem Calipso



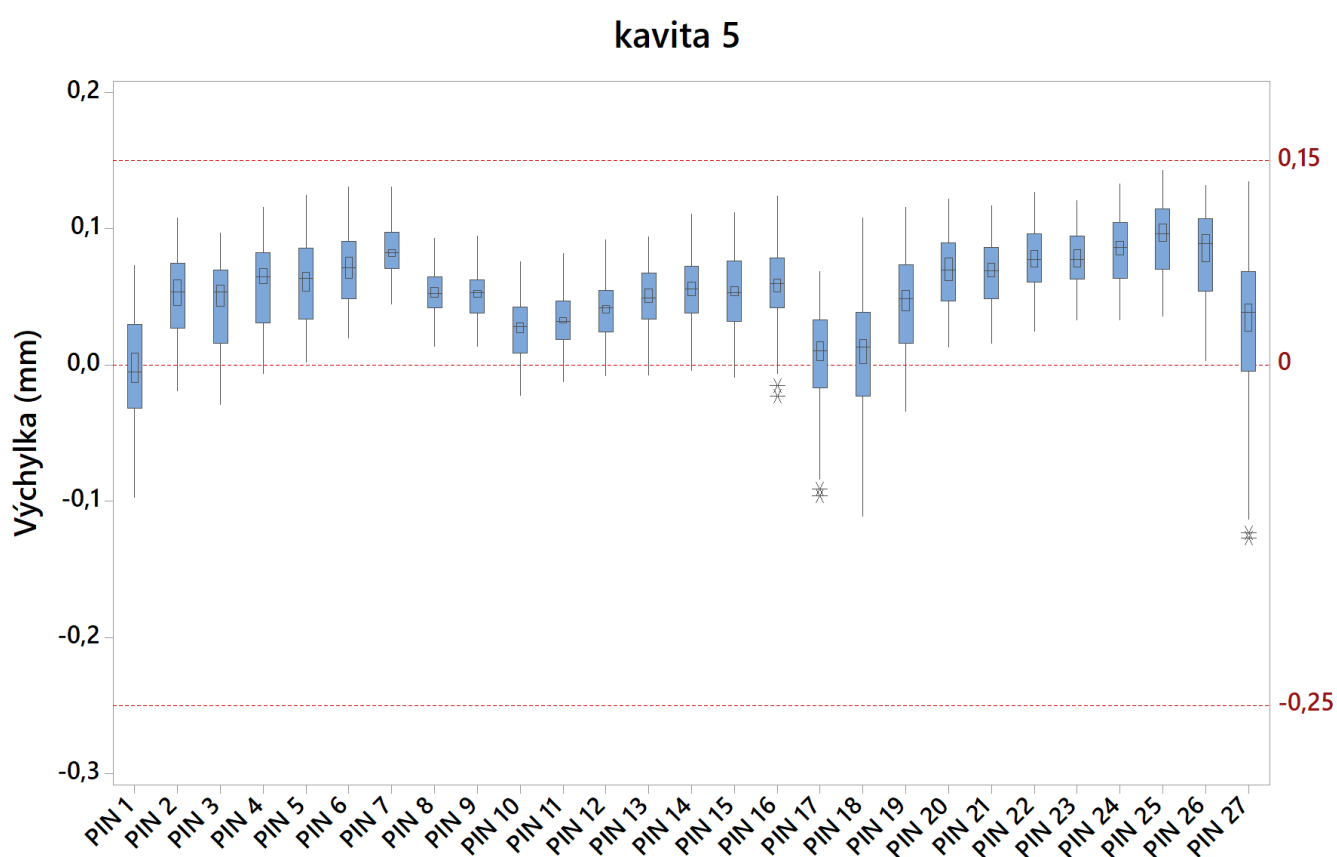
Obrázek 19. – reálný kus na měření

8 NAMĚŘENÉ HODNOTY A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

8.1 EDA

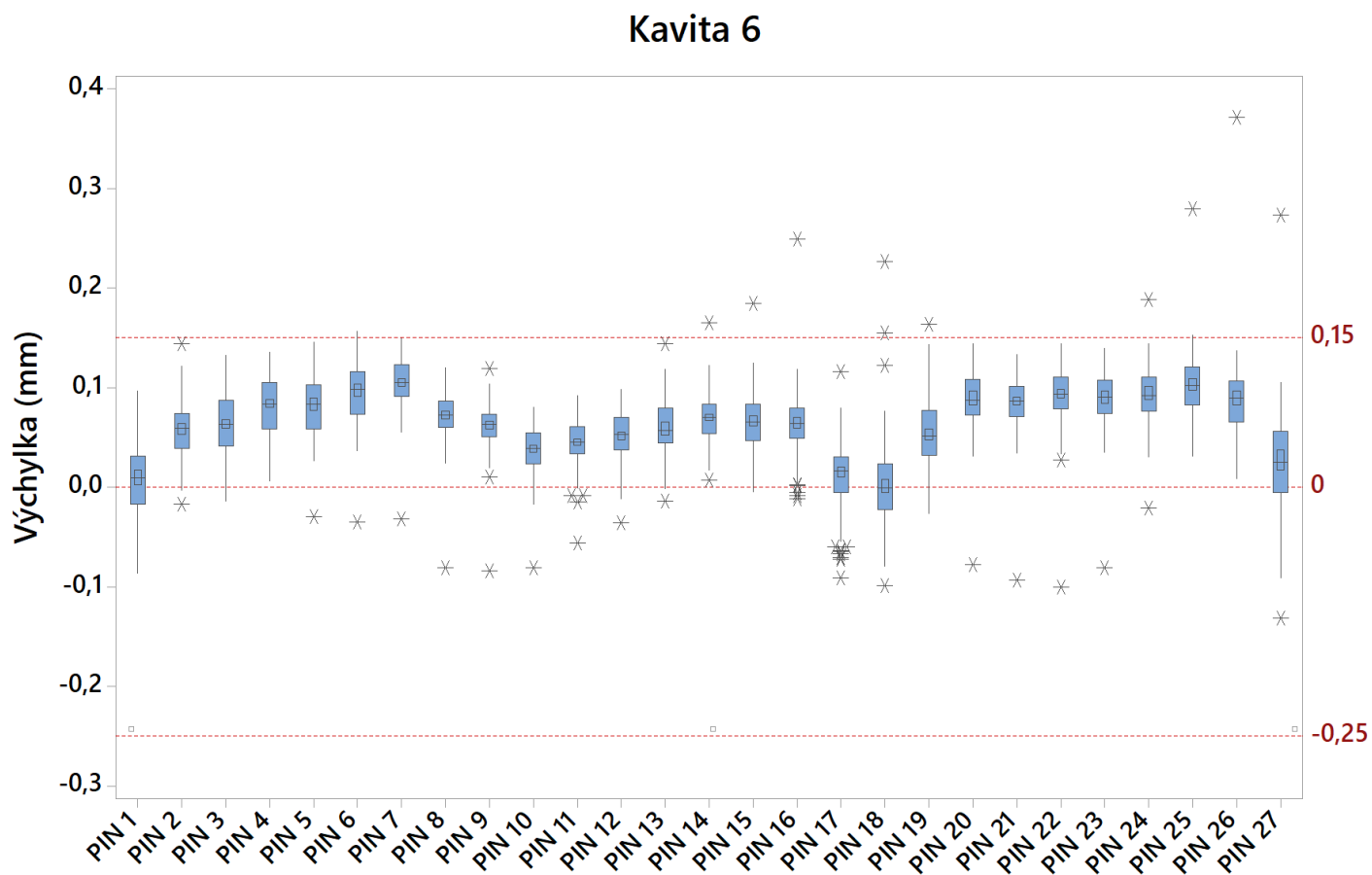
Metoda EDA je alfou – omegou jakéhokoli statistického šetření. V případě této práce byly touto metodikou nejdříve prověřeny výsledky pro všechny piny a kavity zvlášť, abychom zjistili, jestli data nebudou na ovlivněny nějakou chybou, popřípadě jestli nemáme v souboru „zmetky“ mimo toleranci. Pro tento účel volíme Box Plot z programu MiniTab

8.1.1 Box-Plot Analýza kavit 5-8



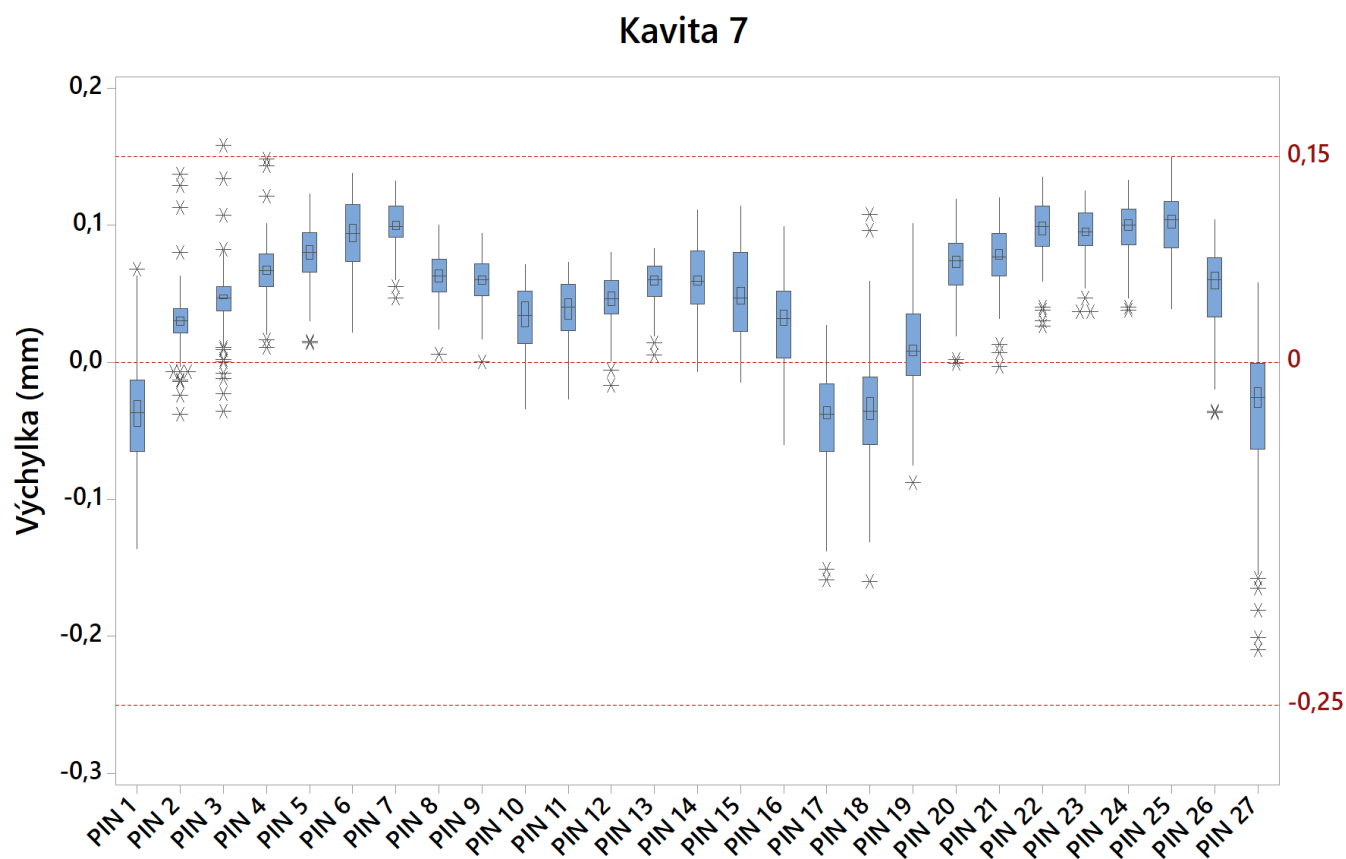
Obrázek 20. – Box-Plot pro kavitu 5

Po prvotní analýze box plotu pro kavitu 5 vidíme, že žádný díl není zmetek, protože jsou všechny jak ve spodní, tak v horní toleranci, co se týče rozptylu hodnot, nejhůře vychází pin 27



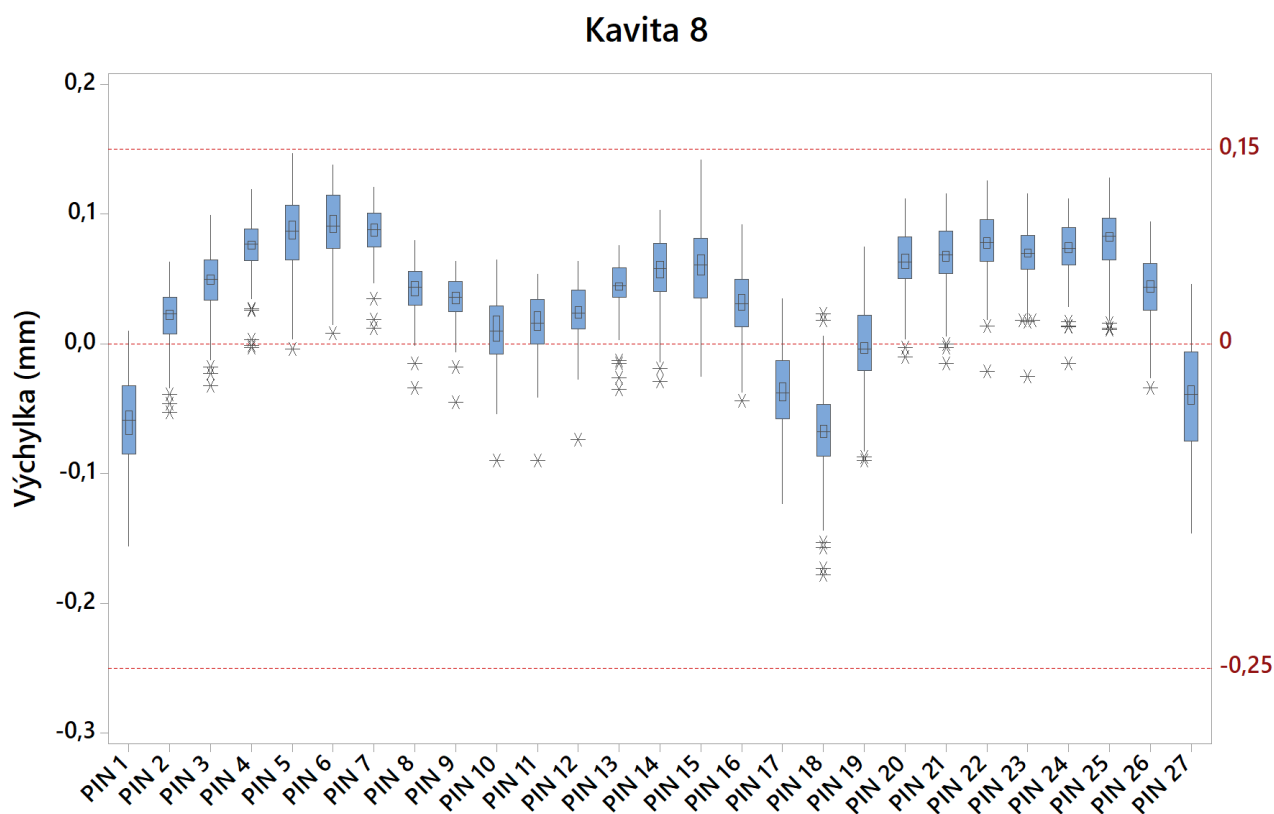
Obrázek 21. – Box-Plot pro kavitu 6

Kavita 6 po prvotní analýze vychází ze všech nejhůře. Nad horní hranicí tolerance má hned 10 různých pinů, avšak z tohoto grafu nevíme, zda se jedná o jeden, či více dílů. To by se dalo zjistit pouhým náhledem do naměřených hodnot, zda se jedná o jeden či více dílů.



Obrázek 22. – Box plot pro Kavitu 7

Pouze jeden díl z kavity 7 byl vyhodnocen jako zmetek. Další díly Dosahují hraničních hodnot na čtvrtém pinu



Obrázek 23. – Box Plot Pro kavitu 8

Kavita 8, podobně jako kavita 5 prošla s nulovou zmetkovitostí

8.2 Statistical Process Control

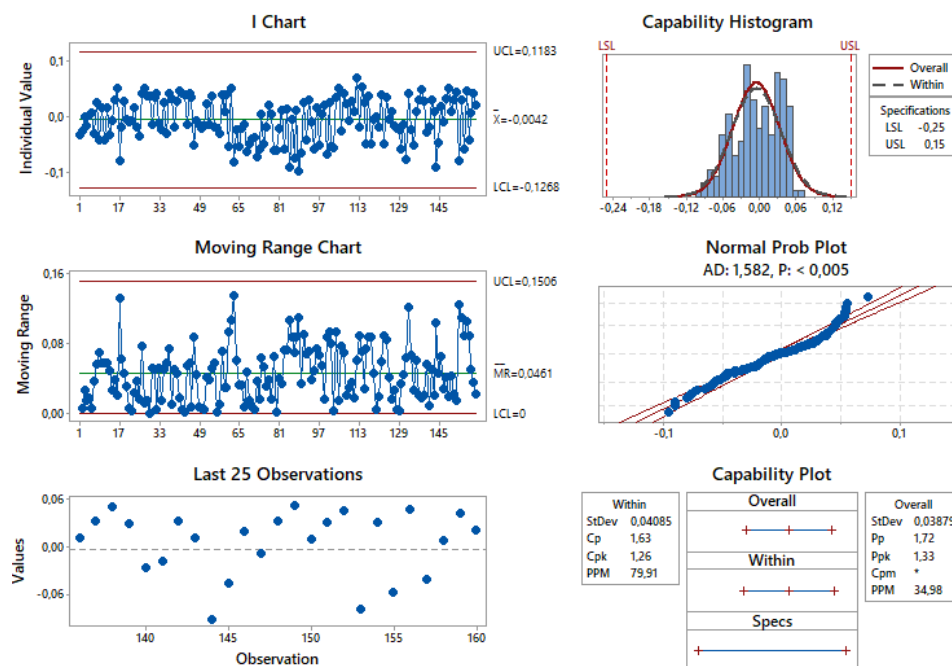
Druhou statistickou metodou, která byla využita k verifikaci vzorků a jejich výroby je SPC – Statistická regulace procesu. Díky této statistické metodě zjistíme jak stabilní proces výroby a tím pádem vzorky jsou. Abychom mohli proces regulovat nesmí podléhat chybě systematické a data musí být normálového rozdělení. Obě tyto podmínky splňujeme. Obecně pak platí, podle Nelsonova pravidla (ISO 8258), že pokud regulační diagram vykazuje jednu z:

1. Min. 1 bod mimo 3σ
2. 9 a více bodů na jedné straně
3. 6 a více bodů lineárně roste
4. 2 body ze 3_{2s}
5. 4 z 5 více než 1σ na jednu stranu
6. 15 bodů do 1σ na jednu stranu

7. 14 bodů a více osciluje
8. 8 hodnot mimo 1σ na obou stranách průměru

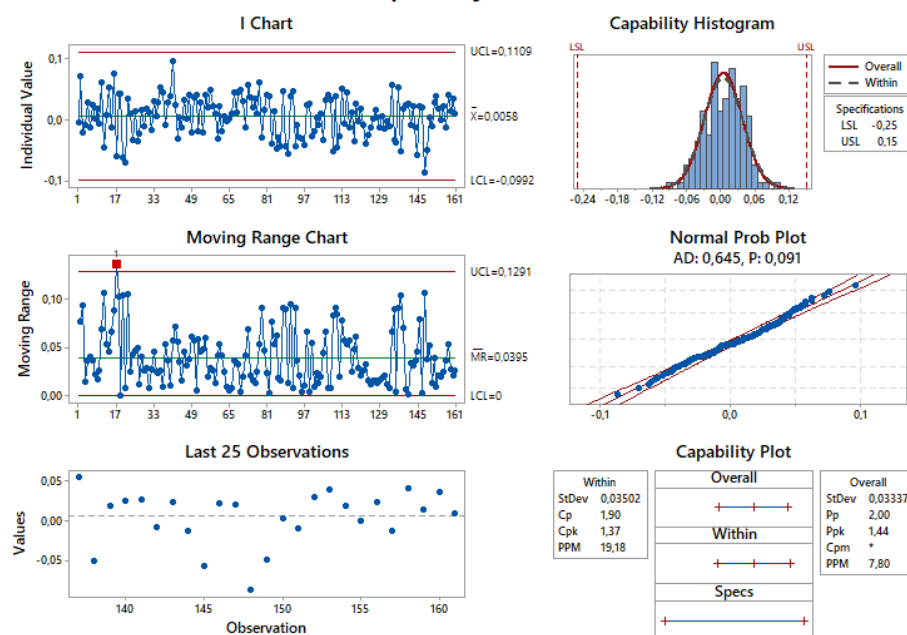
8.2.1 Příklad Způsobnost procesu různých kavít pro Pin 1

Způsobnost procesu PIN 1 Kavita 5



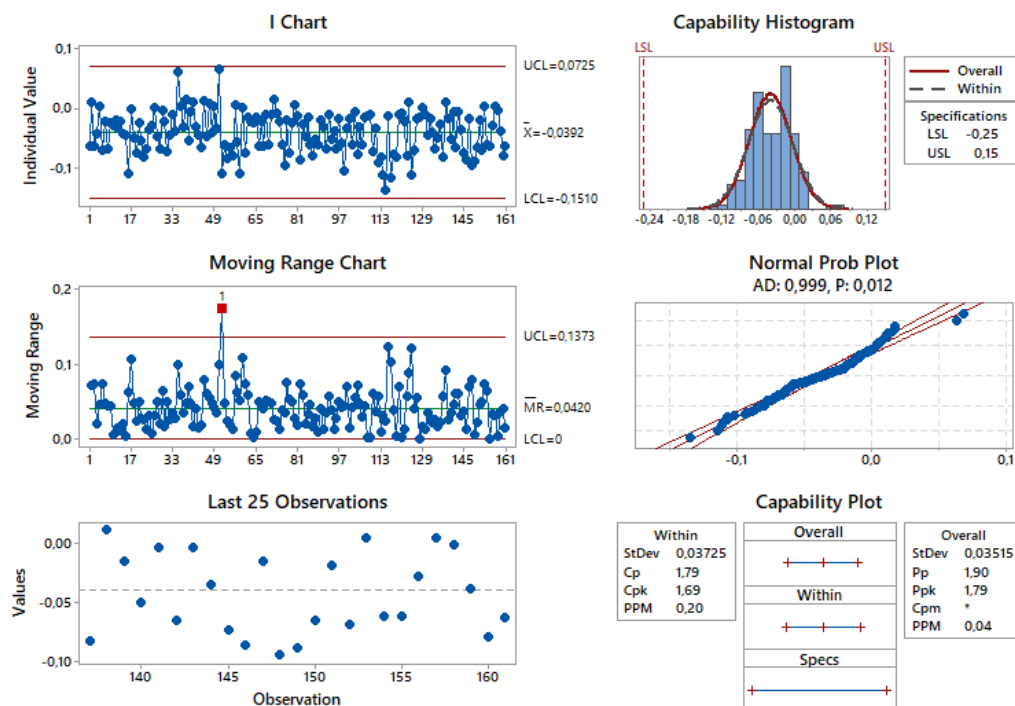
Obrázek 24.- způsobnost procesu pin 1 kavita 5

Process Capability PIN 1 Kavita 6



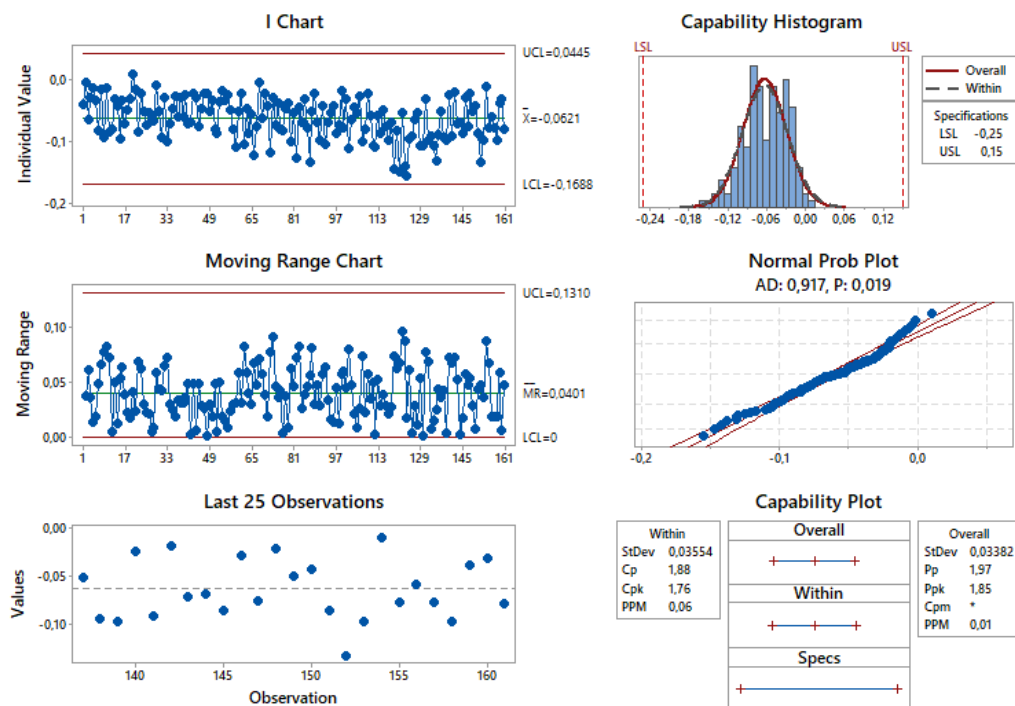
Obrázek 25 Způsobnost procesu pin 1 kavita 6

Process Capability PIN 1 Kavita 7



Obrázek 26. – způsobilost procesu Pin 1 kavita 7

Process Capability PIN 1 Kavita 8

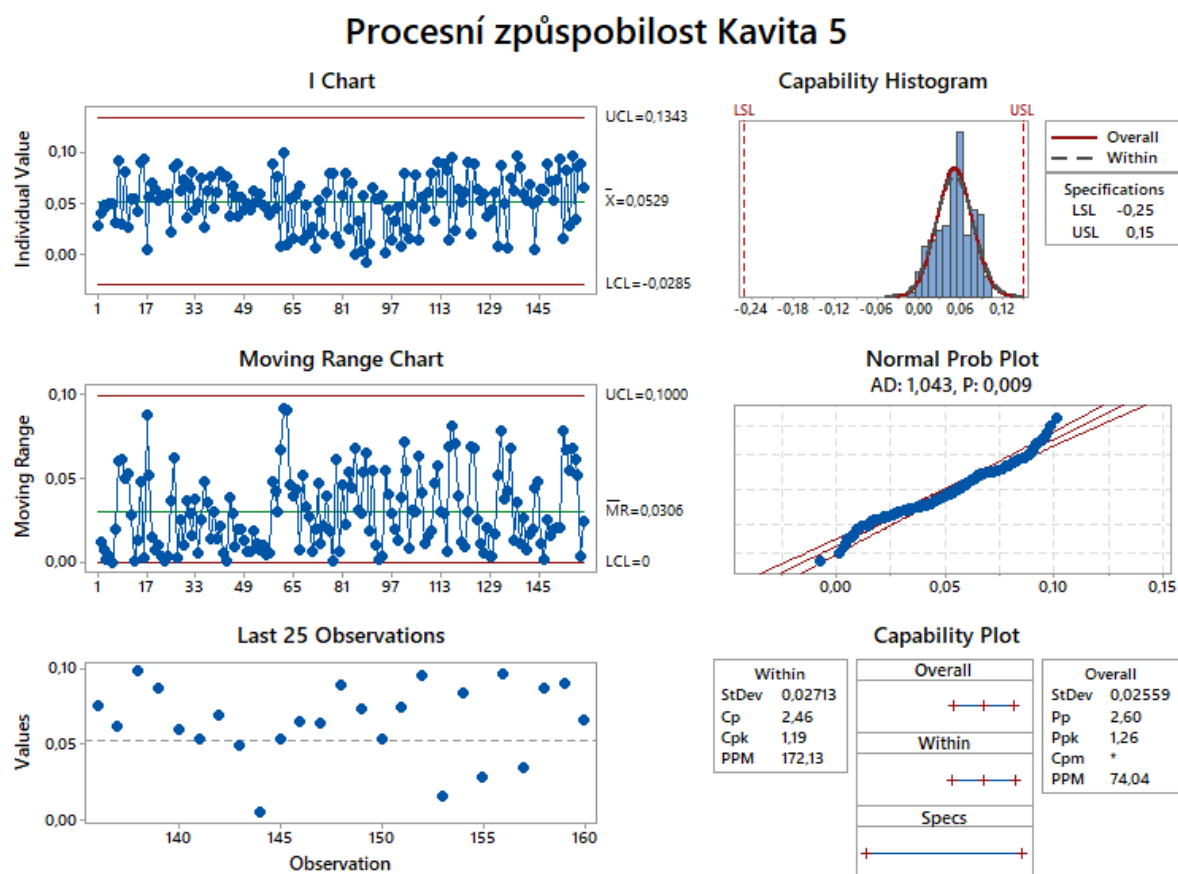


Obrázek 27. – způsobilost procesu pin 1 kavita 8

8.2.2 Výsledky způsobilosti pro Pin 1

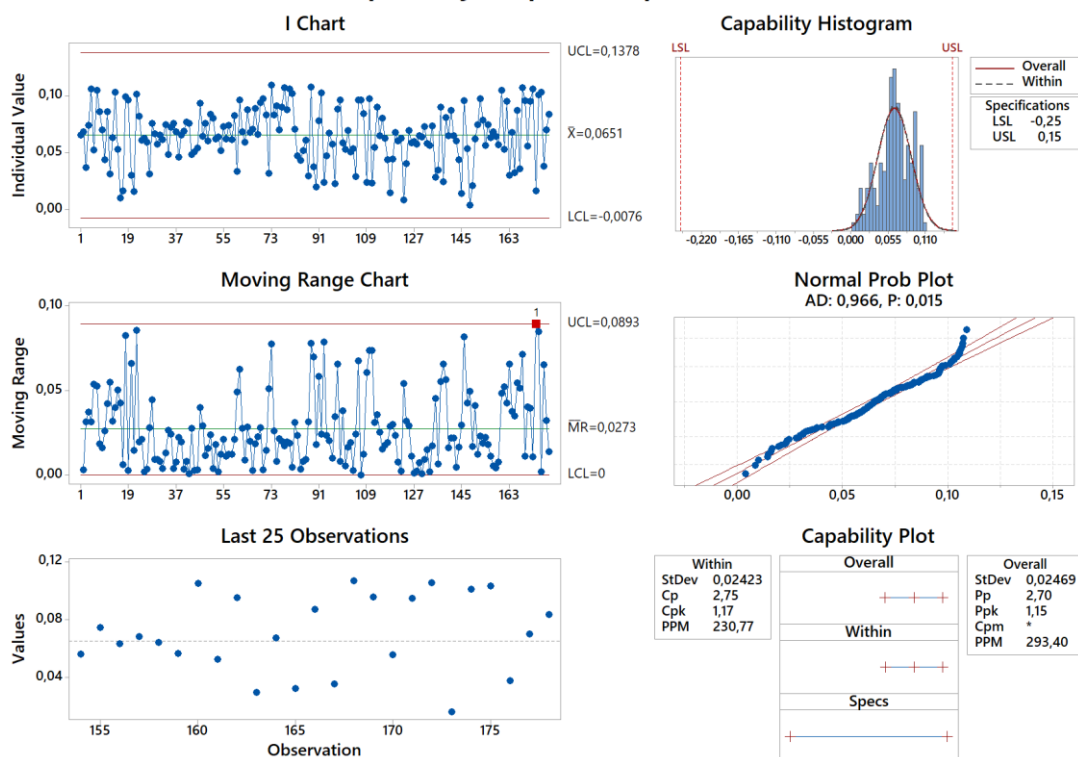
Když se podíváme na hodnoty indexů C_p a C_{pk} je patrné, že kavita 6 je v tomto případě nejzpůsobilejší, $C_p = 1,90$, $C_{pk} = 1,37$ avšak stejně vykazuje trend, který vyžaduje zásah do procesu a jeho optimalizaci

8.2.3 Souhrnné výsledky způsobilosti jednotlivých kavit



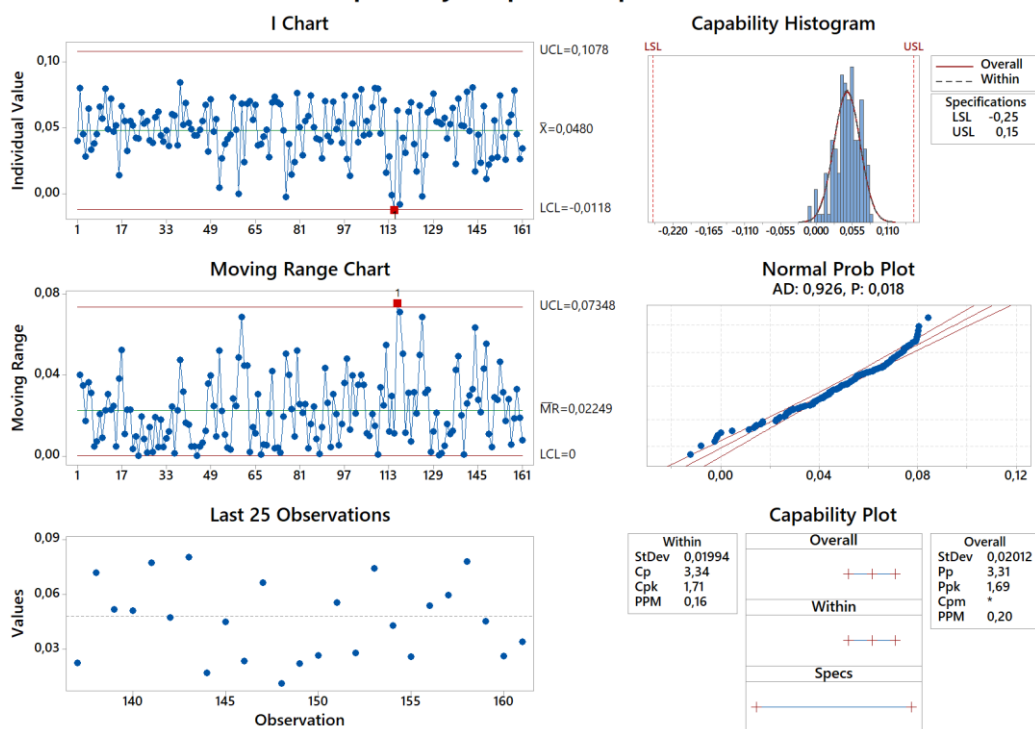
Obrázek 28.- způsobilost procesu pro kavitu 5

Process Capability Sixpack Report for Kavita 6

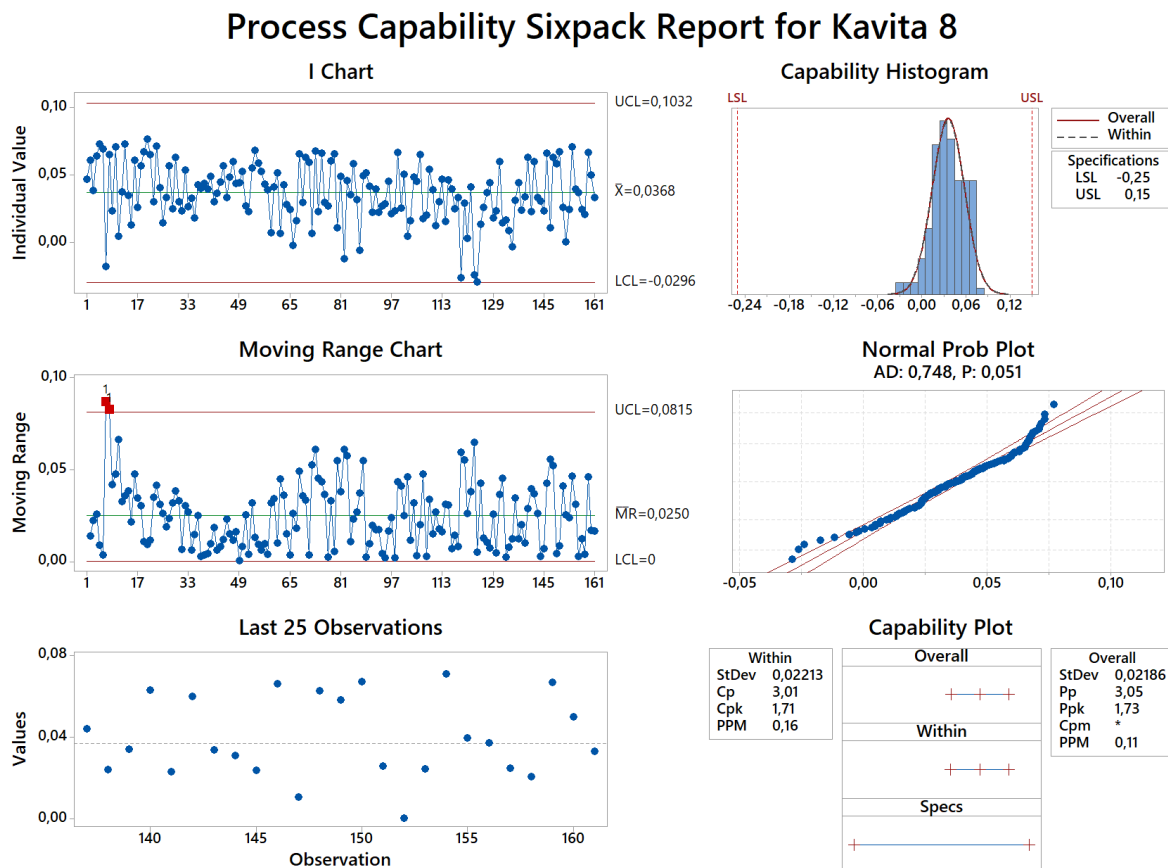


Obrázek 29. – Procesní způsobilost kavity 6

Process Capability Sixpack Report for Kavita 7



Obrázek 30. – Procesní způsobilost kavity 7



Obrázek 31. – Procesní způsobilost kavity 8

8.2.4 Výsledky způsobilosti procesu jednotlivých kavit

Když se podíváme na výsledky jednotlivých kavit, kavity 7 a 8 dosahují indexu Cpk okolo 1,70 což ukazuje na způsobilý proces. Zároveň je vidět tendence rozptylu směřovat k horní mezi, což vzhledem k měřicí metodě topologie dává smysl a korekce by nebyla od věci. Nicméně kavita 6 a 5 nevykazují trend optimalizovaného procesu. To jde vidět i na exaktních naměřených datech, které jsou vyjádřeny box ploty výše. Nejhorší výsledek pak dosahuje kavita 6, což bylo očekávatelné vzhledem k tomu, jak dopadla EDA.

8.3 Anova

Finální odpověď na to, jestli se geometrie jednotlivých primárních optik a jejich prstů liší nám poskytne Anova. Kdy srovnáme všechny kavity V případě této práce bude stačit jednocestná.

Tabulka 1– Vstupy pro jednocestnou Anovu

$\bar{x}$ (mm)	Kavita 5	Kavita 6	Kavita 7	Kavita 8
Pin 1	-0,0042	0,0057	-0,0392	-0,0621
Pin 2	0,0503	0,0558	0,0302	0,0199
Pin 3	0,0448	0,0623	0,0462	0,0478
Pin 4	0,0587	0,0810	0,0670	0,0755
Pin 5	0,0606	0,0826	0,0791	0,0849
Pin 6	0,0716	0,0974	0,0936	0,0915
Pin 7	0,0831	0,1067	0,1001	0,0864
Pin 8	0,0527	0,0730	0,0626	0,0424
Pin 9	0,0507	0,0634	0,0589	0,0344
Pin 10	0,0262	0,0391	0,0327	0,0099
Pin 11	0,0324	0,0471	0,0383	0,0162
Pin 12	0,0412	0,0545	0,0458	0,0250
Pin 13	0,0503	0,0613	0,0569	0,0443
Pin 14	0,0562	0,0715	0,0592	0,0568
Pin 15	0,0528	0,0653	0,0497	0,0607
Pin 16	0,0577	0,0637	0,0294	0,0324
Pin 17	0,0056	0,0107	-0,0425	-0,0373
Pin 18	0,0070	0,0007	-0,0353	-0,0682
Pin 19	0,0454	0,0538	0,0086	-0,0011
Pin 20	0,0693	0,0903	0,0709	0,0652
Pin 21	0,0686	0,0869	0,0776	0,0689
Pin 22	0,0769	0,0947	0,0973	0,0774
Pin 23	0,0781	0,0910	0,0944	0,0692
Pin 24	0,0839	0,0944	0,0972	0,0730
Pin 25	0,0922	0,1033	0,1003	0,0813
Pin 26	0,0801	0,0870	0,0531	0,0430
Pin 27	0,0271	0,0216	-0,0369	-0,0434

Tabulka 2– Výstup jednocestné Anovy

Faktor	N	$\bar{x}$ (mm)	Výsledek
kavita 6	27	0,0653	A
Kavita 5	27	0,0525	AB
Kavita 7	27	0,0479	AB
Kavita 8	27	0,0368	B

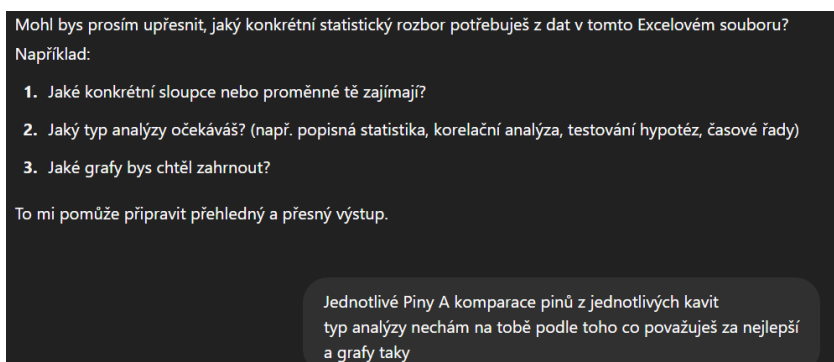
8.3.1 Výsledek jednocestné Anovy

Jak už bylo předesláno, Anova je metodou, která srovná průměry souboru hodnot a podle hladiny významnosti, v tomto případě $\alpha=0,005$ procent buď podpoří nebo nepodpoří hypotézu o stejnosti, nebo rozdílnosti souborů. Na základě výsledků této práce vychází, že

se s přesností na 95% liší Kavita 6 a kavita 8. kavity 5 a 7 se svým rozptylem překrývají se všemi kavitami. Ovšem vzhledem k tomu, jak způsobilý je proces, není divu, protože hodnoty těchto kavit se nachází na obou hranicích tolerance.

8.4 Co na to Umělá inteligence

S rozmachem umělé inteligence vyvstává otázka, jak by si s tímto problémem poradil stroj. Pro účely této práce byla zvolena neplacená verze ChatGPT, která je běžně k dispozici a byla ponechána naprostá svoboda strojům.



Obrázek 32. – úryvek konverzace autora a Chat GPT

Pro lepší výsledky umělé inteligence byla využita funkce hloubkový průzkum. I přes relativně obecné zadání Chat GPT začal metodikou EDA (pouze v numerické verzi). Což byl i postup autora této práce, který si ulehčil život grafickým znázorněním výsledků

Data ze souboru obsahují sloupce „Pin 1“ až „Pin 27“, které představují jednotlivá měření pinů. Dále je k dispozici sloupec „Silicone cavity“ (číslo kavity). Nejprve byly spočteny základní popisné statistiky pro každý Pin (aritmetický průměr, medián, směrodatná odchylka, minimum a maximum). Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce:

Pin	Průměr	Medián	Směrodatná odchylka	Min	
Pin 1	-0,025	-0,022	0,045	-0,156	0,096
Pin 2	0,039	0,036	0,029	-0,053	0,144
Pin 3	0,050	0,052	0,027	-0,036	0,158
Pin 4	0,071	0,072	0,027	-0,006	0,148
Pin 5	0,077	0,078	0,030	-0,030	0,147
Pin 6	0,088	0,088	0,028	-0,035	0,156
Pin 7	0,094	0,095	0,021	-0,032	0,149
Pin 8	0,057	0,057	0,021	-0,081	0,120
Pin 9	0,052	0,052	0,021	-0,084	0,119
Pin 10	0,027	0,028	0,025	-0,090	0,080
Pin 11	0,033	0,034	0,025	-0,090	0,092
Pin 12	0,041	0,042	0,024	-0,074	0,098
Pin 13	0,053	0,053	0,021	-0,035	0,144

Obrázek 33 – EDA vytvořená ChatGPT

Poté ChatGPT překvapivě zvolil metodiku ANOVA, po které sáhl i autor, aby si ověřil, zda se liší jednotlivé kavity. Umělá inteligence pak došla ke stejnému závěru a to, že největší rozdíl je mezi kavitou 6 a 8. Neboli na rozměry pinů má opravdu vliv, z jaké kavity vstřikovacího nástroje primární optiky jsou

Srovnání výsledků mezi kavitami

Následující analýza se zaměřila na porovnání výsledků Pinů mezi čtyřmi různými kavitami (číslovanými 5, 6, 7, 8). Pro každý Pin jsme rozdělili data podle sloupce *Silicone cavity* a porovnali je pomocí jednofaktorové analýzy rozptylu (ANOVA) a neparametrického Kruskal-Wallisova testu. Kruskalův-Wallisův test je neparametrickou variantou jednofaktorové ANOVA, která testuje shodu distribučních funkcí ve více skupinách cs.wikipedia.org.

Pro všechny Piny jsme zjistili velmi nízké p-hodnoty ($p \ll 0,05$), tedy statisticky významné rozdíly mezi kavitami. To znamená, že průměrné hodnoty Pinů se liší podle čísla kavity. Například průměrná hodnota „Pin 1“ v kavitě 8 byla výrazně nižší než v kavitě 6 (−0,062 vs. 0,0058). Podobné odlišnosti nacházíme i u dalších Pinů. Tyto výsledky ukazují, že na hodnoty měření Pinů může mít vliv právě použité číslo kavity.

Obrázek 34. – ChatGPT a Anova

V čem Umělá inteligence naprosto selhala, tak byla jakákoli generace grafického zobrazení dat, pouze poskytl generelní ideu, jaké jsou možné způsoby prezentace dat. Zároveň by bylo záhodno dodat, že tato část s umělou inteligencí vznikla až ex post, čistě ze zvědavosti autora a garanta, jakou metodu by zvolil stroj, bez bližšího zadání.

9 ZÁVĚR

V rámci práce byla prověřena aplikovatelnost kontaktního CMM měření a bezkontaktní laserové topografie na povrchová měření LSR dílů. Experimentální analýza ukázala, že zvýšení zatěžovací síly sondy CMM vedlo ke snížení rozptylu měření, tedy vyšší opakovatelnosti výsledků. Laserové skenování poskytlo velmi hustý bodový záznam povrchu, avšak vykazovalo větší variabilitu výsledků měření než CMM. Tuto vyšší nejistotu lze přičíst nízké opakovatelnosti skenování v jednotlivých polohách a potížím se skládáním dílčích skenů. Statistická analýza dat (EDA, ANOVA) ukázala, že mezi průměrnými hodnotami parametrů získanými oběma metodami nebyly obecně významné systematické odchylky, nicméně bylo možné identifikovat lokální rozdíly způsobené variabilitou různých dutin formy i měřicími strategiemi. Při měření elastomerových dílů se prokázalo, že opakovatelnost kontaktních měření je výrazně závislá na přítlačné síle sondy: vyšší síla zmenšuje klouzání sondy po povrchu a snižuje koeficient variace výsledků. Laserová topografie zachycuje detailní topografii povrchu, ale výsledky jsou silně ovlivněny optickými vlastnostmi materiálu. Pro neprůhledné a lesklé elastomery může paprsek pronikat či se odrážet, což přidává dodatečné chyby a vyšší rozptyl dat. Pro vyhodnocení spolehlivosti měření poskytly statistické nástroje (EDA, ANOVA, SPC) klíčové poznatky o hlavních zdrojích variability – např. o rozdílech mezi dutinami formy – a umožnily stanovit, zda jsou pozorované rozdíly statisticky významné. Na základě těchto poznatků lze doporučit, aby praxe využívala kombinaci metod podle konkrétního účelu měření. Topografické lasery mohou sloužit k rychlé vizuální inspekci a zachycení složitých 3D tvarů, je však nutné je kalibrovat a validovat na referenčních měřicích vzorcích. V obou případech je užitečné využít průběžného statistického řízení procesu (SPC) pro udržení stability výroby a včasné odhalení nežádoucích odchylek. Výsledky této práce tak přispívají k objektivnější volbě měřicích metod pro polymerní výrobky a k zavedení robustních postupů kontroly kvality v průmyslové praxi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Yuan, M., Huang, D., & Zhao, Y. (2022). Development of Synthesis and Application of High Molecular Weight Poly (Methyl Methacrylate). *Polymers*, 14(13), 2632. <https://doi.org/10.3390/polym14132632>
- [2] Goseki, R., & Ishizone, T. (2015). Poly (methyl methacrylate) (PMMA). In *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* (pp. 1702–1710). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29648-2_244
- [3] Goseki, R., & Ishizone, T. (2015). Poly (methyl methacrylate) (PMMA). In *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* (pp. 1702–1710). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29648-2_244
- [4] CHT Group. (n.d.). Liquid Silicone Rubber (LSR) for Injection Moulding Processes. Dostupné z [https://solutions.cht.com/cht/medien.nsf/gfx/med_MJOS-B6VH4W_46B45D/\\$file/CHT-Liquid-silicone-rubber-LSR-liquid-injection-moulding.pdf](https://solutions.cht.com/cht/medien.nsf/gfx/med_MJOS-B6VH4W_46B45D/$file/CHT-Liquid-silicone-rubber-LSR-liquid-injection-moulding.pdf)
- [5] Ramya, U., Sammaiah, P., Subbarao, M., Mahesh, V., & Kumar, K. S. (2024). Advancements in Carbon Fiber Reinforced Liquid Silicone Rubber: A Scientometric Study. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. <https://doi.org/10.1007/s40032-024-01146-9>
- [6] HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd; SINGH, Ravi Pratap; RAB, Shanay; SUMAN, Rajiv et al. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. Online. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*. 2022, roč. 3, s. 161-171. ISSN 26663074. Dostupné z doi: 10.1016/j.ijcce.2022.08.003.
- [7] AMEEN, Wadea; AL-AHMARI, Abdulrahman a HAMMAD MIAN, Syed. Evaluation of Handheld Scanners for Automotive Applications. Online. *Applied Sciences*. 2018, roč. 8, č. 2. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app8020217
- [8] RAKITINA, Evgenia, et al. An overview of 3D laser scanning technology. In: *Proc. of the International Scientific Conference, (Varna, Bulgaria)*. 2008
- [9] JAVAID, Mohd; HALEEM, Abid; PRATAP SINGH, Ravi a SUMAN, Rajiv. Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications. Online. *Sensors International*. 2021, roč. 2. ISSN 26663511. 10.1016/j.sintl.2021.100114

- [10] Chen, L.-C., Wu, G.-W., Singh, S. K., & Chein, W.-H. (2024). State-of-the-Art Optical Profilometry Techniques. In *Diffraction Image Microscopy for 3D Imaging* (pp. 27–35). Springer Tracts in Mechanical Engineering. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7782-2_3
- [11] Materials Research Institute. (n.d.). Optical Profilometry. Získané z <https://www.mri.psu.edu/materials-characterization-lab/characterization-techniques/optical-profilometry>
- [12] Clark, S. R., Greivenkamp, J. E., Richard, R. M., & Sasian, J. M. (2000). Optical Reference Profilometry. In *OSA Technical Digest* (Optica Publishing Group, 2000), paper OTuB2. <https://doi.org/10.1364/OFT.2000.OTuB2>
- [13] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3
- [14] CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG. Advanced injection molding technologies. Cincinnati, OH: Hanser Publications, [2019]. ISBN 978-1-56990-603-3
- [15] OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. Injection Molding Handbook. 2nd ed., Updated 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2008. ISBN 978-1-56990-420-6
- [16] IBM. What is exploratory data analysis (EDA). Online. Dostupné z: <https://www.ibm.com/topics/exploratory-data-analysis>
- [17] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. Kompendium statistického zpracování dat. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [18] WHITEHOUSE, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- [19] MCCLAVE, James T. a SINCICH, Terry. Statistics. Thirteenth edition. New York: Pearson, [2018]. ISBN 978-1-292-16155-6.
- [20] MONTGOMERY, Douglas C. Statistical quality control: a modern introduction. Seventh edition. Singapore: Wiley, [2013]. ISBN 9781118322574.
- [21] Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (2023). The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air. Získáno z

https://www.vda.de/dam/jcr:926bb912-371f-45db-8b30-b5809a413318/FAT-Schriftenreihe_301.pdf

- [22] Thermo Fisher Scientific. (n.d.). Cleanliness Testing Using Scanning Electron Microscopes: How to Comply with the ISO 16232 and VDA 19 Quality Norms. Získáno z <https://www.thermofisher.com/us/en/home/materials-science/learning-center/applications/cleanliness-testing-using-scanning-electron-microscopes.html>
- [23] VDA. (n.d.). Quality Management in the Automotive Industry: Quality Assurance of Production Processes. Získáno z https://connect.forcemotors.com:88/Employee_Information/ISO%20Standard/QUALITY/Vda2en.pdf
- [24] NENADÁL, Jaroslav. Management kvality pro 21. století. Praha: Management Press, 2018. ISBN 9788072615612.
- [25] NENADÁL, Jaroslav. Moderní management jakosti: principy, postupy, metody. Praha: Management Press, 2008. ISBN 9788072611867.
- [26] Wang, S., Chen, G., & Zhang, L. (2022). Parameter inversion and microscopic damage research on discrete element model of cement-stabilized steel slag based on 3D scanning technology. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127402>
- [27] Melendreras Ruiz, R., Marín Torres, M. T., & Sánchez Allegue, P. (2022). Comparative Analysis Between the Main 3D Scanning Techniques: Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanner, and Structured Light Scanner in Religious Imagery: The Case of The Holy Christ of the Blood. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 15(1), 1-23. <https://doi.org/10.1145/3469126>
- [28] Specifikace: 2D/3D laserový skener - Řada LJ-X8000 | KEYENCE International Belgium(Čeština), Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/measure/laser-2d/lj-x8000/specs/>
- [29] Zeiss Prismo Family, Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/cmms/bridge-type-cmms/prismo-family/zeiss-prismo.html>

- [30] BRANDT, Siegmunt. *Data analysis: statistical and computational methods for scientists and engineers*. 4th ed. Přeložil Glen COWAN. Cham: Springer, c2014. ISBN 978-3-319-03761-5.
- [31] SANCHEZ-MARQUEZ, Rafael a José Manuel JABALOYES VIVAS. Multivariate SPC methods for controlling manufacturing processes using predictive models – A case study in the automotive sector. *Computers in Industry*. 2020, 123. ISSN 01663615.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. – Příklad výrobku z PMMA [2]	17
Obrázek 2. – Příklad výrobku z LSR [6]	20
Obrázek 3. – Děje během vstřikovacího cyklu [13]	21
Obrázek 4. – Průběh vstřikovacího cyklu [13]	22
Obrázek 5. – Průběh vstřikovacího tlaku v různých místech vstřikovacího stroje a dutiny formy [13]	23
Obrázek 6. – Procesní okno vstřikování [13]	24
Obrázek 7. – Schéma vstřikování LPR [4]	25
Obrázek 8. – Obecné rozdělení 3D skenerů [8]	27
Obrázek 9.- CMM ZEISS PRISMO [29]	28
Obrázek 10. – Vizualizace 3D skenování [9]	29
Obrázek 11 Laser LJ-X8080[28]	33
Obrázek 12. – jeden z měřených vzorků	53
Obrázek 13. – Separátor použitý k měření	53
Obrázek 14. – měřené geometrie na díle	54
Obrázek 15. – 3D data primární optiky	54
Obrázek 16 – příklad „kalibrovaného“ separátoru	55
Obrázek 17. – naměřená primární optika v software Calipso	55
Obrázek 18. – Naměřené výsledky zobrazené softwarem Calipso	56
Obrázek 19. – reálný kus na měření	56
Obrázek 20. – Box-Plot pro kavitu 5	57
Obrázek 21. – Box-Plot pro kavitu 6	58
Obrázek 22. – Box plot pro Kavitu 7	59
Obrázek 23. – Box Plot Pro kavitu 8	60
Obrázek 24.- způsobilost procesu pin 1 kavita 5	61
Obrázek 25 Způsobilost procesu pin 1 kavita 6	61
Obrázek 26. – způsobilost procesu Pin 1 kavita 7	62
Obrázek 27. – způsobilost procesu pin 1 kavita 8	62
Obrázek 28.- způsobilost procesu pro kavitu 5	63
Obrázek 29. – Procesní způsobilost kavity 6	64
Obrázek 30. – Procesní způsobilost kavity 7	64
Obrázek 31. – Procesní způsobilost kavity 8	65
Obrázek 32. – úryvek konverzace autora a Chat GPT	67
Obrázek 33 – EDA vytvořená ChatGPT	67

Obrázek 34. – ChatGPT a Anova.....	68
------------------------------------	----

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1– Vstupy pro jednocestnou Anovu	66
Tabulka 2– Výstup jednocestné Anovy	66

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný prostor
2D	Dvojměrný prostor
EDA	Explorativní datová analýza
Mm	Milimetr
CAD	„computer - aided design“
$\bar{x}$	Střední hodnota
Δ	Rozdíl
P_i	Pořadová pravděpodobnost
SPC	„Statistical process control“
UL	„Upper Line“ / Horní limit
LL	„Lower Line“ / Dolní limit
PMMA	Polymethylmetakrylát
LSR	Liquid silicon rubber
VDA	Verband der Automobilindustrie