

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

OPTIMALIZACE MINIMÁLNĚ KÓTOVANÝCH VÝKRESŮ
ADITIVNĚ VYRÁBĚNÝCH SOUČÁSTÍ

Bakalářská práce

Autor práce: Radek Souček

Vedoucí práce: Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.

Jihlava 2024

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce:	Radek Souček
Studijní program:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Obor:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu:	doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.
Název práce:	Optimalizace minimálně kótovaných výkresů aditivně vyráběných součástí
Vedoucí práce:	Ing. Bc. Karel Dvořák, Ph.D.
Cíl práce:	Cílem práce je definování optimálních modelových parametrů obvyklých konstrukčních prvků na součástech vyráběných vybranými aditivními technologiemi. Parametry jsou optimalizovány na základě výroby experimentálních modelů, jejich změření a vyhodnocení porovnáním s teoreticky přesným modelem. Ze získaných charakteristik jsou definovány parametry rozměrových a geometrických tolerancí, uváděných na výkresech a systemizovaných v interních postupech. Výstupem je návrh metody modelování, deklarování údajů na výrobních výkresech a postupů měření aditivně tištěných dílů, obsahujících standardní i nestandardní tvarové prvky. Uvedené výstupy jsou východiskem pro návrhy interních i globálních standardů a postupů.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá přístupy k návrhu minimálně kótovaných výkresů aditivně vytvářených součástí, obsahující exaktní i volné tvarové prvky. Nejprve jsou využitím odlišných modelovacích metod vytvořeny tři tvarově odlišné digitální modely. Využitím těchto digitálních modelů jsou vytištěny experimentální modely z materiálu PLA. Vytištěné modely jsou porovnávány se svým teoreticky přesným modelem a na základě výsledků jsou stanoveny optimální rozměrové a geometrické tolerance, které jsou uvedeny na technických výkresech. Výstupem práce je návrh přístupů k tvorbě technické dokumentace obsahující referenční 3D modely, které jsou primárním nosičem informace o rozměrech výrobků, a minimálně kótované technické výkresy s využitím důležitých kót pro zachování funkčních rozměrů výrobků.

Klíčová slova

Model; 3D modelování; technický výkres; kótování; geometrické tolerance; aditivní technologie

Abstract

The bachelor thesis deals with approaches to the design of minimally dimensioned drawings of additively manufactured components, containing exact and free-form shaped elements. First, by using different modelling techniques, three digital models of different shapes are created. Using this digital models, experimental models are printed in PLA material. The 3D printed models are compared with their theoretically accurate model and based on the results, optimal dimensional and geometric tolerances are determined on technical drawings. The output of the work is a proposal of approaches for technical documentation containing reference 3D models, which are primary carrier of information about product dimensions, and minimally dimensioned technical drawings using important dimensions to maintain the functional dimensions of the products.

Keywords

Model; 3D modelling; technical drawing; dimensioning; geometric tolerances; additive technology

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 10. dubna 2024

.....

Podpis studenta

Poděkování

Na začátek bych rád poděkoval panu Ing. Bc. Karlu Dvořákovi, Ph.D., za vedení při vypracovávání mé bakalářské práce. Chtěl bych poděkovat za jeho čas, ochotu a drahocenné rady, které mi poskytoval během konzultací, a především při experimentálních měřeních spojených s touto úlohou.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	8
Seznam zkratk.....	9
Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 Model a modelování.....	11
1.1.1 Rozdělení modelů.....	11
1.1.2 Vlastnosti modelů.....	12
1.1.3 3D modelování	12
1.1.4 Siemens NX.....	14
1.1.5 Principy modelování součástí z nestandardních prvků	16
1.2 Technická dokumentace	16
1.3 Technické výkresy	18
1.3.1 Kótování v technických výkresech	19
1.3.2 Tolerování rozměrů v technických výkresech	22
1.3.3 Geometrické tolerance na technických výkresech.....	22
1.4 Metody reverzního inženýrství.....	25
1.4.1 3D skenování	25
1.4.2 Fotogrammetrie	27
2 Praktická část	29
2.1 Postup tvorby digitálních 3D modelů	29
2.1.1 Multifunkční kalibr	29
2.1.2 Segmentová axiální lopatka	30
2.1.3 Radiální lopatkové kolo	32
2.2 Příprava analýzy	33
2.3 Analýza odchylek rozměrů a stanovení tolerancí modelů.....	35
2.3.1 Analýza odchylek exaktních tvarů	35
2.3.2 Analýza odchylek volných tvarů	38
2.4 Tvorba výkresové dokumentace.....	43
3 Diskuse	45
Závěr	46
Seznam použité literatury	47
Přílohy.....	49

Seznam obrázků

Obr. 1: Úplná a částečná parametrizace	13
Obr. 2: Diagram rozdělení technické dokumentace	17
Obr. 3: Provedení kót	19
Obr. 4: Řetězcové kótování	20
Obr. 5: Kótování od společné základny	20
Obr. 6: Zjednodušené kótování od společné základny	20
Obr. 7: Smíšené kótování	21
Obr. 8: Souřadnicové kótování	21
Obr. 9 Příklady tolerančního pole a prostoru	23
Obr. 10: Rozdělení geometrických tolerancí	24
Obr. 11: Tolerance tvaru plochy	24
Obr. 12: Tolerance umístění	25
Obr. 13: 3D skenování ručním skenerem	26
Obr. 14: Porovnání: Objekt/3D model/vytištěný model	28
Obr. 15: Příklad skici blíže definující tvar objektu	29
Obr. 16: Digitální model universálního kalibru	30
Obr. 17: Křivka tvaru paty lopatky	31
Obr. 18: Skica tvaru špičky lopatky	31
Obr. 19: Pohledy na model axiální lopatky	32
Obr. 20: Tvorb lopatky z volné křivky	33
Obr. 21: Model radiálního lopatkového kola	33
Obr. 22: Modely multifunkčního kalibru vytištěné na 3D tiskárně	34
Obr. 23: Modely lopatkového kola a segmentové lopatky vytištěné na 3D tiskárně	34
Obr. 24: Snímek z měřicího mikroskopu pořízený při měření otvoru	35
Obr. 25: Pozicování měřených rozměrů	36
Obr. 26: Mračno bodů skenovaného lopatkového kola v programu SHINING 3D	38
Obr. 27: Polygonální těleso lopatkového kola se zadanými parametry	39
Obr. 28: Polygonální plocha vnější strany axiální lopatky s dodatečným nastavením jemnosti	39
Obr. 29: Importovaný STL model 3D skenu v programu NX	40
Obr. 30: Vizuální porovnání tvarové podobnosti modelu a polygonálního tělesa	40
Obr. 31: Nastavení indikátoru odchylky v NX	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Nepředepsané mezní úchytky délkových rozměrů	22
Tab. 2: Všeobecné tolerance přímosti a rovinnosti podle normy ČSN ISO 2768-2.....	23
Tab. 3: Parametry tisku modelů	34
Tab. 4: Legenda tříd přesnosti barevně rozlišených pro tabulku 5	36
Tab. 5: Naměřené hodnoty zvolených exaktních útvarů	37
Tab. 6: Četnost vzorků v závislosti na hranici u segmentové lopatky	42
Tab. 7: Volba tolerance tvaru plochy segmentové lopatky	42
Tab. 8: Četnost vzorků v závislosti na hranici u lopatkového kola.....	43
Tab. 9: Volba tolerance tvaru plochy lopatkového kola	43

Seznam zkratek

CAD	Computer Aided Design (Počítačem podporované projektování)
CAE	Computer Aided Engineering (Počítačem podporované konstruování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Počítačem podporované obrábění)
CNC	Computer Numerical Control (Číslicové řízení)
ČSN	Česká státní norma
GPS	Geometrical Product Specifications (Geometrické požadavky na výrobky)
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
PLA	Poly Lactic Acid
PMI	Product Manufacturing Information (Informace o výrobě a výrobku)
NX	Softwarový produkt pro 3D modelování a jiné funkce pro návrh a výrobu součástí
STL	Stereolitografie
SW	Software
U	Rozšířená nejistota měření

Úvod

Jednou ze značných výhod aditivních technologií je možnost výroby těles s nestandartními a komplexními volnými tvary. Tato složitá tělesa nejsou tvořena základními geometrickými tvary, ale jejich tvořící geometrii představují kombinace volných křivek a bodů, případně předchozí volně tvarovaná objemová tělesa.

Návrh a tvorba digitálních modelů, které jsou nosiči informací o rozměrech těchto volně tvarovaných těles, prostřednictvím nástrojů CAD (Computer Aided Design) pro navrhování součástí, vyžaduje pokročilé znalosti modelovacích technik a využití komplexních modelovacích nástrojů, které umožňují tyto metody a techniky využívat a kombinovat.

Technickou dokumentaci, která obsahuje všechny potřebné výrobní informace o výrobku, nemusí tvořit pouze technické výkresy součástí, ale součástí této dokumentace jsou i digitální data v podobě virtuálního 3D modelu. U těles obsahujících volně tvarované plochy je přítomnost digitálního modelu žádoucí především z důvodu, že zobrazení a popis těchto ploch jsou v technických výkresech náročné, nebo i zcela nemožné. U těchto těles je vhodné do technické dokumentace zařadit minimálně kótované výkresy s odkazem na příslušný digitální model, který obsahuje veškerá data o teoreticky přesných rozměrových a tvarových attributech součástí.

Minimálně kótované výkresy obsahují pouze důležité funkční rozměry součástí, u kterých je zapotřebí předepsat konkrétní tolerance rozměrů, které nelze definovat prostřednictvím všeobecných tolerancí, dosažitelných požadovanou výrobní metodou. Předepisovány mohou být také rozměry kterých nelze dosáhnout užitím aditivní technologie a je nutné užití vybraného dokončovacího procesu, obvykle obrábění.

Pro určení kótovaných rozměrů v minimálně kótovaných výkresech je zapotřebí analyzovat experimentální modely těchto těles a určit hodnotu celkové třídy přesnosti dosažené využitím vybrané aditivní technologie.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh modelování digitálních 3D modelů, které jsou součástí technické dokumentace a nesou informace o teoreticky přesných rozměrech součástí. Dále se zaměřuje na návrh minimálně kótovaných výkresů těchto vybraných modelů pro využití v oboru aditivních technologií a jejich dokončovacích procesů.

Implementace těchto postupů vede k rozšíření metod tvorby technické dokumentace s cílem zvýšení efektivity postupů konstruování a technické přípravy výroby předvýrobních a výrobních fází životního cyklu výrobku. Neustálý vývoj aditivních technologií a jejich hojné využití a technologický přínos v různorodých odvětvích průmyslu nás motivuje zabývat se tímto tématem.

1 Teoretická část

Teoretická část se zabývá problematikou modelování, tvorby technických výkresů a metodami reverzního inženýrství. Pro definování optimálních parametrů konstrukčních prvků je důležité orientovat se v těchto technických oborech.

1.1 Model a modelování

V technické praxi se můžeme setkat se širokou škálou definicí modelu. Jednou z definic je, že model můžeme považovat za zjednodušené zobrazení skutečnosti. Model musí znázorňovat objektivním způsobem jevy a procesy reálného světa. Pokud není možno z nějakých důvodů sestavit funkční model, je možno sestavit model, který nepopisuje skutečnost v plné míře, ale je pouze zjednodušeným přiblížením hlavních rysů nebo vztahů chování. Tyto modely se označují jako predikční. (Briš, 2007)

S pojmem model je blízce spjata modelování. Jedná se o lidskou tvůrčí činnost, která idealizuje a zjednodušuje děje reálného světa. Tato činnost vede ke konstrukci modelu. Úspěch správného modelování závisí na lidských schopnostech dobře formalizovat teoretické a praktické znalosti ve zkoumané problematice. (Briš, 2007)

1.1.1 Rozdělení modelů

U modelů rozlišujeme, zda se jedná o modely materiální nebo abstraktní. Za materiální, nebo tzv. fyzické modely se považují reálné objekty vytvořené z různorodých materiálů, může se například jednat o dřevěný model součásti pro tvorbu pískové formy. U myšlenkových, nebo tzv. abstraktních modelů, se jedná o teoretické nezhmotněné vyobrazení popisovaného objektu. Abstraktní modely se dále dělí na modely představové a modely symbolické. Zatímco představové modely jsou konstruovány pomocí abstrakce nebo idealizací skutečnosti na základě představ, prvky symbolických modelů jsou vytvářeny pomocí znaků a symbolů. Tyto modely mají logické a matematické vlastnosti, nazývají se proto také jako matematické modely. Za matematický model se ve většině případů považuje nějaká formalizovaná teorie, která má někdy i svoje matematické zobrazení (nemusí ho mít vždy). Jedním ze základních příkladů matematického modelu může být soustava rovnic. Základní rozdělení matematických modelů je na modely deterministické a stochastické. Rozdíl mezi těmito modely je ten, že u deterministických modelů je známa struktura modelu, může se jednat například o algebraickou nebo diferenciální rovnici, a dále jsou známy i konkrétní hodnoty parametrů. Mezitím stochastické modely obsahují určitou nejistotu a reálné jevy popisují pouze přibližně s určitou pravděpodobností, proto se tyto modely také nazývají jako pravděpodobnostní. (Briš, 2007)

1.1.2 Vlastnosti modelů

Stejně jako všechno kolem nás, i modely mají svoje specifické vlastnosti. Vlastnosti se mohou lišit v závislosti na typu modelu a oblasti jeho využití. Obecnými vlastnostmi modelu jsou validita a reliabilita. Validita je schopnost modelu zachytit klíčové vlastnosti originálu. Validita je vyjádřena stupněm shody mezi originálem a modelem. Reliabilita určuje míru spolehlivosti a opakovatelnosti modelu. Model s vysokou reliabilitou je pouze nepatrně ovlivněn náhodnými vlivy a při opakovaném využití za stejných podmínek získává podobné výsledky. (Budíková, 2016)

U fyzických modelů je zásadní vlastností jejich geometrie, ta udává základní parametry, jako jsou například velikost, tvar nebo rozmístění objektů v modelu. Složitost modelu je vlastností, která závisí na počtu a složitosti jednotlivých objektů v modelu.

1.1.3 3D modelování

Jedná se o činnost, při které dochází k tvorbě digitální reprezentace objektu, která je více známa pod pojmem 3D model. (Kloski, 2017) Tvorba a optimalizace vhodného 3D modelu je esenciálním krokem předcházejícím procesu výroby součásti na všech 3D tiskárnách. Tyto modely se mimo využití v aditivních technologiích dále využívají například v některých softwarech při tvorbě technické dokumentace nebo slouží jako podpora při vytváření CAM (Computer Aided Manufacturing) programů, které obvykle slouží pro programování postupů CNC obráběcích center.

Pro 3D modelování lze využít velké množství modelovacích programů. Jedná se o programy CAD. Příkladem mohou být programy Autodesk Inventor, Siemens NX aj. Mezi dostupnější modelovací programy se řadí například OpenSCAD, TinkerCad, Fusion 360, Blender a spousta dalších. Volba modelovacího programu závisí na osobních preferencích, dostupnosti programu a na funkcích, které jednotlivé programy nabízí. Způsob modelování se lehce liší podle využívaného modelovacího programu a složitosti tvaru navrhované součásti. V současné době jsou k dispozici zpoplatněné i nezpoplatněné online knihovny, které obsahují nesčetné množství modelů uzpůsobených pro 3D tisk. (Prusa Research, 2022)

Základní modelování jednodušších objemových součástí se v modelovacích softwarech (např. Autodesk Inventor nebo Siemens NX) provádí následujícím způsobem:

1. Návrhář vytvoří 2D náčrt (skicu), pomocí kombinace základních geometrických útvarů, úseček, křivek, oblouků. Tím definuje jeho základní tvar.
2. Pomocí kót a geometrických vazeb návrhář určí rozměrové parametry součásti. Využijí kót a vazeb se odvíjí podle zvolené modelovací techniky.
3. Pomocí dostupných funkcí modelovacího softwaru návrhář z 2D náčrtu vytvoří objemový model.
4. Vytvořený 3D model se následně upraví pomocí modelovacích funkcí. Například zaoblení, či zkosení hran, vytvoření děr v součásti a podobně.
5. Z modelu lze v následujícím kroku v některých softwarech vygenerovat technické výkresy a popsat všechny nebo pouze podstatné parametry součásti.

(Fořt a Kletečka, 2007)

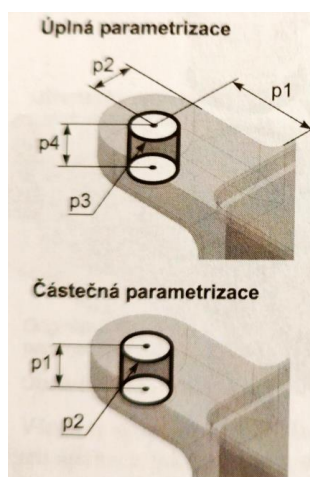
V technické praxi se široce využívají 3 techniky CAD modelování, každá z níže popsaných technik má svoje vlastní výhody a nevýhody a rozdílné aplikace. Jedná se o tyto techniky:

a. Parametrické modelování

Touto technikou konstruktér-návrhář vytváří tzv. parametrický model, který je definovaný charakteristikami jeho geometrických částí a vzájemnými vztahy mezi částmi modelu, nebo jinými součástmi, pokud se jedná o model sestavy více součástí. U parametrických modelů nejsou dány rozměry ani jiné charakteristiky konkrétními hodnotami, ale pomocí vzájemně souvisejících proměnných rovnic a výrazů. Pokud jsou tyto rovnice správně navázány stačí posléze dosadit, za několik zásadních proměnných, konkrétní hodnoty a dojde k dopočítání zbylých rozměrů součástí. Tyto rozměry řídí tzv. parametrické kóty. V náčrtech se ke svázání jednotlivých konstrukčních prvků (úsečky, oblouky, křivky, aj) využívají *geometrické vazby*. Tyto vazby odebírají v rovině náčrtu stupně volnosti a definují geometrii náčrtu. Jedná se například o vzájemnou kolmost nebo rovnoběžnost dvou a více objektů. (Fořt a Kletečka, 2007)

Při modelování se s každým novým krokem vytváří a rozšiřuje historie modelu, která obsahuje všechny informace o vlastnostech, rozměrech a vazbách jednotlivých kroků. Díky této historii je software schopný automaticky aktualizovat a přizpůsobit model, při změně jedné z částí v historii. (Dassault Systèmes, c2002-2024)

Při parametrickém modelování rozlišujeme, zda se jedná o plnou nebo částečnou parametrizaci. U plné parametrizace, jak z názvu napovídá, je nutné určit vazby mezi objekty a plně okótovat rozměry. Nevýhodou úplné parametrizace oproti částečné je větší časová a uživatelská náročnost. Při částečné parametrizaci se cílí pouze na určité parametry. Výhodou částečné parametrizace proti úplné parametrizaci je menší časová a uživatelská náročnost. Velkou nevýhodou však je nepředvídatelné chování geometrie bez pevných vazeb při modifikaci součásti nebo sestavy. (Fořt a Kletečka, 2007)



Obr. 1: Úplná a částečná parametrizace

Zdroj: Fořt a Kletečka (2007, s. 23)

Na obrázku 1 jsou znázorněny postupy úplné a částečné parametrizace otvoru na totožném modelu součásti. Z obrázku je zřetelné, že kdyby byly rozměry výstupku optimalizovány, při plné parametrizaci bude otvor stále situovaný podle parametrů p_1 a p_2 . Otvor při částečné parametrizaci může být situován na jiné pozici, kvůli nepředvídatelnému chování nekótované geometrie.

b. Přímé modelování

Jedná se spíše o intuitivní proces, který není omezen žádnými faktory. Pomocí přímého modelování může návrhář libovolně manipulovat s modelem a upravovat jeho tvar roztahováním nebo stlačováním jeho povrchu. Touto technikou lze snadno a rychle měnit podobu modelu bez nutnosti zadávání jakýchkoli vazeb nebo parametrů. Tato technika se většinou využívá pro umělečtější zaměřené návrhy než na přesné struktury. Výhodou je volnost modelování, která umožňuje snadno a rychle vytvářet tělesa volných tvarů. Tato volnost je však v určitých případech sama o sobě problematická v případech, kdy chceme tvořit přesné objekty. Proto nevýhodou přímého modelování je menší přesnost z důvodu chybějící parametrizace součásti. Na rozdíl od parametrického modelování se při přímém modelování nevytváří historie modelování, což má za následek to, že nejsou zaznamenávány postupné kroky při tvorbě modelu a s chybějícími parametry nelze snadno a rychle optimalizovat nebo měnit proporce vytvářeného modelu. Z těchto důvodů je přímé modelování spíše vhodné pro tvorbu konceptu než pro tvorbu složitých sestav. Díky snadnosti a rychlosti, s kterou lze manipulovat s tvary součásti, je tato technika ideální pro návrhy, kde estetika a představivost jsou přednější než jednotnost a přesnost. (Dassault Systèmes, c2002-2024)

c. Hybridní modelování

Hybridní modelování je integrací obou předešlých technik. Využívá výhod parametrického i přímého modelování a tím umožňuje návrhářovi rychle vytvářet a modifikovat model součásti. Tento přístup převážně využívají modelovací programy Solid Edge a Siemens NX. (Parametric vs Direct vs synchronous CAD Modeling Techniques, 2020)

Znalosti o těchto modelovacích technikách budou později využity při návrhu přístupů k modelování tvarově odlišných součástí. V kapitole 2.1.

1.1.4 Siemens NX

Siemens NX, nebo také pouze NX, je CAD softwarový produkt od společnosti Siemens, vhodný pro 3D modelování, výpočty, optimalizaci, simulace, analýzy a další komplexní funkce pro návrh a výrobu součástí. Software byl vyvinut pro konstruktéry a inženýry na všech úrovních výroby součástí a je stále aktualizován a rozšiřován o nové funkce. (Siemens, c2024)

Siemens NX poskytuje kreativní nástroje v oblastech:

- 3D modelování jednotlivých součástí i komplexních sestav
- tvorby výkresové dokumentace
- výpočtu a zprávy dat
- analýzy proveditelnosti návrhu součástí
- simulace výroby
- kontroly kvality
- tvorby programů pro číslíkově řízená obráběcí centra a měřicí přístroje
- tvorby návrhů pro aditivní výrobu
- a další...

Je využíván v mnoha oblastech průmyslu, jakožto jeden z nejkomplexnějších a nejvýkonnějších softwarových produktů, pro 3D modelování, dostupných na mezinárodním trhu. (Siemens, c2024)

Software NX poskytuje všestranné nástroje pro 2D a 3D modelování a nabízí širokou škálu funkcí a odlišných přístupů k modelování. Přístup modelování se odvíjí dle tvarových a technologických požadavků navrhované součásti, nebo jednoduše dle přístupů návrháře, či inženýra. Každý modelovací CAD nástroj disponuje možností skicování svou vlastní formou. Tyto formy skicování jsou v základech velmi podobné, ale jsou založeny na odlišných funkcích a přístupech. NX se pokouší co nejvíce zefektivnit skicování a zjednodušit náročnost úprav jednotlivých náčrtů, podporou využívání nejrůznějších modelovacích technik, dle potřeb návrháře a tvarové náročnosti návrhu. Modelovací řešení kombinuje výkonné parametrické modelování a sílu synchronních technologií pro dosažení co nejvěrnějších návrhů prvotní myšlenky. (Siemens, c2024)

Součástí balíčku funkcí siemens NX je mimo dříve zmíněné i řešení pro industrializaci aditivní výroby. Modul programu NX, *Additive Manufacturing*, umožňuje realizaci procesu aditivní výroby od tvorby návrhu až po výrobu tištěné součásti. Řešení aditivní výroby pomocí NX umožňuje navrhovat složité konstrukce s vlastnostmi, jako jsou například optimalizované povrchy a mřížkové struktury. Přípravu tisku usnadňují integrované výrobní nástroje, které navrhnou co nejefektivnější umístění orientace a vyráběných součástí a jejich podpor v sestavovacím zásobníku. Řešení NX nabízí simulaci výroby, čímž poukazuje na místa, které jsou vhodné optimalizovat před tiskem výrobku, a tím zvyšuje úspěšnost tisku napoprvé bez větších komplikací. NX zajišťuje správnou konektivitu s co nejširší škálou strojů pro aditivní výrobu. Jelikož se Siemens snaží zaštitit celý proces výroby, nabízí řešení pro operace po samotném tisku, jedná se o operace: odstranění prášku, vyjmutí dílu ze sestavovacího zásobníku a jeho následné obrobení. (Aditivní výroba, c2024)

Modelovací software NX byl zvolen jako výchozí program pro tvorbu CAD modelů, analytický rozbor a tvorbu výkresové dokumentace, které jsou podrobně popsány v průběhu kapitoly 2.

1.1.5 Principy modelování součástí z nestandardních prvků

Modelovací software NX usnadňuje vytváření volných neparametrických návrhů těles pomocí balíčku funkcí pro volné modelování (angl. *Freeform modeling*). Tato integrovaná sada nástrojů kombinuje ve dvojrozměrných a trojrozměrných prostorech křivky, plochy, tělesa, body, povrchové plochy a principy synchronního modelování pro rychlé a snadné navržení a úpravy složitých těles složených z volných neparametrizovaných tvarů.

Rozdíl mezi plochou a povrchovou plochou nemusí být zcela zřejmý. V tomto kontextu lze tuto problematiku vnímat podle užití v prostoru a rovině. Pojem plocha se převážně využívá v rovině pro 2D geometrický útvar (např. čtverec). Pojem povrchová plocha se rozumí plocha, která je součástí 3D objektu a je ohraničená jeho hranicemi (např. krychle nebo kužel). Nemusí se jednat pouze o základní geometrické útvary, ale může se jednat i složité tvarové plochy. (KEYENCE INTERNATIONAL, c2024)

1.2 Technická dokumentace

Jedná se o souhrn dokumentů, který je určený ke sdělení výsledků o určité provedené činnosti ve fázích realizace produktu. Technická dokumentace je nezbytná při uvádění produktů na trh pro všechny firmy napříč všemi odvětvími průmyslu. Obsahuje nezbytné technické informace o konstrukci a funkci výrobku nebo jeho výrobci, a slouží k předávání těchto informací během vývoje a výzkumu, až po výrobu nebo jako manuál pro koncové uživatele. Technická dokumentace dále musí obsahovat veškeré důkazy o tom, že výrobek splňuje všechny požadavky, které jsou od produktu vyžadovány. Každý výrobce musí připravit technickou dokumentaci před uvedením výrobku na trh a zajistit, aby byla dostupná k náhledu příslušným orgánům. Dalším kritériem je takto uchovávat technickou dokumentaci alespoň 10 let, pokud není stanoveno jinak. Existují zásady a pravidla, podle kterých je nutno se držet při tvorbě technické dokumentace, proto je její tvorba normalizována. (Technická dokumentace a EU prohlášení o shodě, 2023), (Mlčák, 2017)

Technickou dokumentaci lze rozdělit do mnoha kategorií, níže jsou uvedeny některé z nich:

Dle technického zaměření:

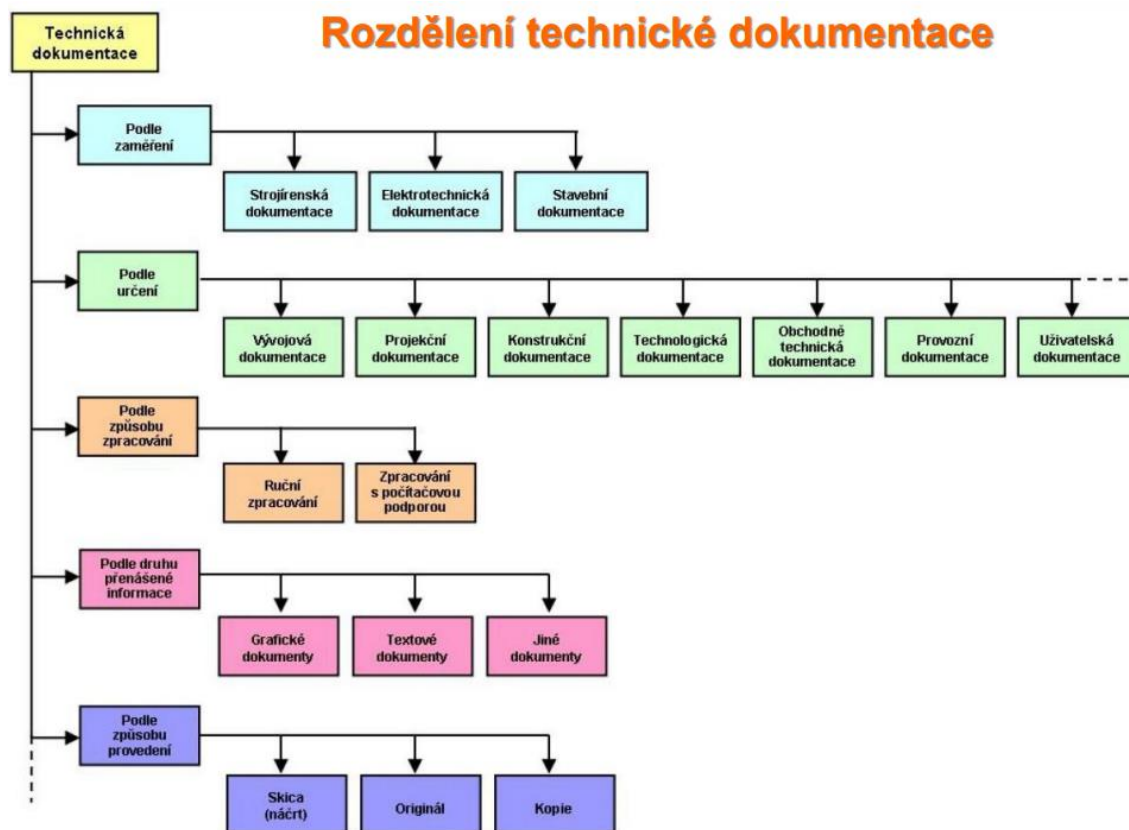
- Strojírenská dokumentace
- Elektrotechnická dokumentace
- Stavební dokumentace

Dle prostředku přenášené informace:

- Grafické dokumenty = *výkresová dokumentace*, schémata, diagramy, 3D modely, grafy, harmonogramy
- Textové dokumenty = technické a vědecké zprávy, výpočty, tabulky, seznamy
- Jiné dokumenty = fotodokumentace, videa, zvukové záznamy

Dle účelu:

- Vývojová = výsledky zkoušek, patentová dokumentace
- Konstrukční = výrobní výkresy, výkresy podsestav a sestav, kusovníky, schémata
- Technologická = technologické postupy, programy, nástrojové plány, kontrolní postupy
- Obchodní = nákupní specifikace, prodejní dokumentace
- Provozní = informace o instalaci, údržbě, opravách a seřizování
- Uživatelská = uživatelské manuály (návody pro využívání a likvidaci produktu)



Obr. 2: Diagram rozdělení technické dokumentace

Zdroj: Mlčák (Rozdělení technické dokumentace, 2017)

Na obrázku je grafické znázornění rozdělení technické dokumentace do výše zmíněných skupin a dále rozdělení dle způsobu zpracování, kdy rozlišujeme, zda se jedná u dříve využívanou ruční tvorbu a v dnešní době preferovanou formu počítačového zpracování. (Mlčák, 2017)

V souvislosti s technickou dokumentací se stále více prosazuje koncept užití bezvýkresové dokumentace. Jedná se o dokumentaci produktu, která obsahuje model a PMI, bez využití výkresové dokumentace, jak vyplývá ze samotného názvu. Účelem PMI (Product Manufacturing Information) je přenést veškeré potřebné informace k výrobě součásti přímo do 3D modelu této součásti. Všechny následující procesy (CAM, CAE, analýzy, ...) tyto informace dále mohou využívat a také je lze využít při komunikaci s dodavateli a zákazníky. Využitím nástrojů pro PMI, které dnes ve většině případů podporují všechny hlavní CAD systémy, lze vytvořit kompletní popis výrobku v jeho 3D modelu, pomocí rozměrových kót, rozměrovými tolerancemi,

geometrickými tolerancemi i značkami jakosti povrchu, které jsou obvykle obsaženy v technických výkresech. Využitím těchto nástrojů, lze zapsat všechny potřebné informace i poznámky k výrobě součásti a odpadá tím potřeba tvorby technických výkresů. (Nechvátal, 2013)

Námi řešená problematika v kapitole 2 rozšiřuje toto základní rozdělení technické dokumentace přístupem, který využívá 3D model a minimálně kótované technické výkresy. Jedná se o prozatím nestandardizovaný přístup k technické dokumentaci.

1.3 Technické výkresy

V této práci se zaměříme především na výkresovou dokumentaci, neboť se stále jedná o základní způsob uvádění a předávání informací o vyráběných součástech.

Technické výkresy jsou základním dokumentem využívaným ve strojírenství při návrhu nového produktu a při jeho výrobě. Jedná se o soubor informací, který je vypracován v souladu s normalizovanými pravidly. Technické výkresy byly zprvu kresleny klasickým ručním kreslením pomocí tužky a rýsovacích pomůcek. V dnešní době se dává přednost tvorbě technických výkresů pomocí CAD programu, která nese spoustu výhod. Mezi hlavní výhody se řadí možnost rychlých a snadných modifikací, jednoduchost a menší časová náročnost. (Kletečka a Fořt, 2007)

Technické výkresy se rozdělují podle způsobu provedení do tří skupin:

1. Náčrt (skica)

Jedná se o hrubý návrh tvaru součásti, který naznačuje proporce součásti bez ohledu na jejich skutečné rozměry a měřítko. Při ručním kreslení se využívá jako předloha upřesňující představu o budoucím návrhu. Při návrhu pomocí CAD softwaru (například NX) se využívá při parametrickém modelování součásti.

2. Originál

Originálem se rozumí výkres, který je vytvořený ručně, či pomocí softwaru za dodržení všech norem. Rozměry a tolerance na tomto výkrese odpovídají skutečnosti. V dnešní době jsou tyto výkresy ve většině případů uchovávány a archivovány v digitální formě a slouží pro zhotovování fyzických kopií pomocí tiskárny nebo plotteru.

3. Kopie

Jde o identickou kopii originálu, vytvořenou pomocí reprografických metod. V technické praxi slouží jako podklad pro operátory výroby při výrobě, montáži a kontrole součásti.

(Kletečka a Fořt, 2007)

Dále dle účelu se technické výkresy rozdělují do těchto skupin:

1. Návrhové výkresy

Tyto výkresy zobrazují součásti ve vzájemné poloze a kladou důraz na jejich uložení a základní, či důležité rozměry. Využívají se jako podklad při tvorbě konečného řešení.

2. Výkresy součásti

Jedná se o základní podklad, využívaný při výrobě součásti nebo při tvorbě CAM programu pro počítačově řízené obráběcí stroje. V technické praxi se tyto výkresy také nazývají jako výrobní výkresy. Mohou obsahovat veškeré informace o rozměrech, tolerancích a struktuře povrchu součásti, nebo obsahují pouze rozměry nutné pro daný proces, či operaci. Součástí výkresů je také popisové pole, které obsahuje dodatečné informace o materiálu součásti, konstruktérovi a schvalující osobě, aj.

3. Výkresy sestav a podsestav

Zobrazují výsledný celek ze sestavených součástí po finální montáži. Součástí výkresu nebo jako dodatek k výkresu je tzv. kusovník. Jedná se o soupis všech součástí v sestavě, či podsestavě v podobě tabulky obsahující informace o dílci a čísle jeho výrobního výkresu. Součásti jsou ve výkrese vyznačovány pozicemi, které jsou spjaty s číslováním v kusovníku. Výkresy sestav obsahují pouze hlavní rozměry uložení a rozměry určující vazby mezi součástmi.

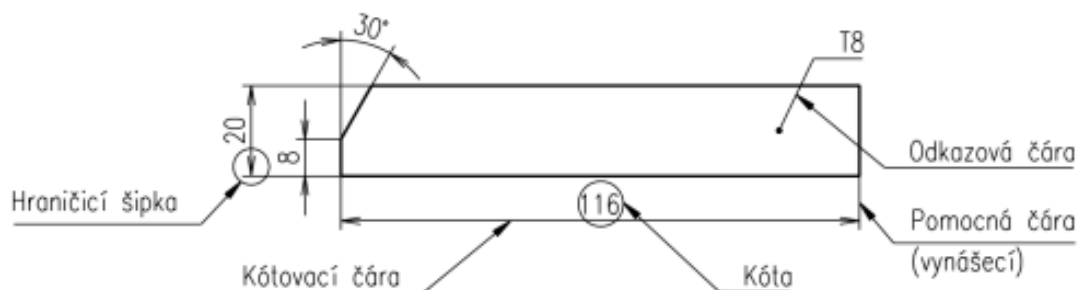
(Kletečka a Fořt, 2007)

4. Montážní výkresy

Zobrazují postupné kroky montáže. Součásti se zobrazují zjednodušeně, většinou pomocí vnějších obrysů a normalizované přístroje se často zobrazují pouze symbolickými značkami.

1.3.1 Kótování v technických výkresech

Kóta je číslo, určující na technickém výkrese skutečnou nebo požadovanou velikost jednotlivého rozměru nebo polohu nějakého útvaru na promítané součásti. Vždy je udáváno konkrétní číslo, bez ohledu na využívané měřítko. Kóty ve strojírenských výkresech jsou převážně uváděny v milimetrech, proto díky obecné znalosti není nutné značku pro jednotku “mm” u jednotlivých kót uvádět. Pokud je kóta v jiných jednotkách, například úhel zkosení, jednotka je za kótou uváděna. Všechny informace, potřebné k srozumitelnému popsání součásti, musí být uvedeny na výkrese, k tomu mimo jiné kóta slouží jako nositel informace. Pro zajištění co nejlepší přehlednosti a jednoznačnosti, je provedení kótování řízeno určitými pravidly. Například kótovací čáru a kótu samotnou nesmí přerušovat žádné jiné čáry. (Kletečka a Fořt, 2007)



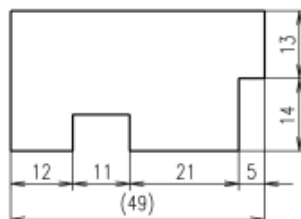
Obr. 3: Provedení kót

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 73)

Je několik přístupů kótování, kterými se lze řídit podle potřeby při kótování součásti na výkrese:

1. Řetězcové kótování

Při tomto přístupu jsou kóty zapisovány v jednom řetězci bezprostředně za sebou. Je nutno mít na paměti, že součet jednotlivých mezních úchylek rozměrů může ovlivňovat funkčnost nebo vyměnitelnost součásti, v tom případě nelze tento přístup aplikovat. Pokud je součástí jednoho řetězce více stejných rozměrů, lze je kótovat součinem (např. 4x10).



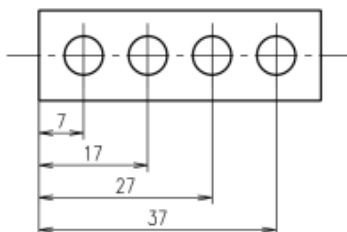
Obr. 4: Řetězcové kótování

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 77)

Ve výkresech není žádoucí, aby bylo více kót, než je nutné, proto se nadbytečné kóty, které ale mohou být užitečné pro čtenáře, uvádějí v kulatých závorkách.

2. Kótování od společné základny

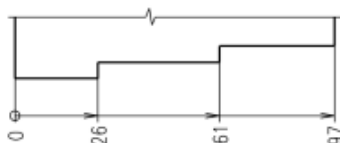
Využívá se v případech, kdy má poloha kótovaného prvku funkční nebo technologický vztah k danému prvku. Tento prvek je pak základnou pro kótování a jsou od něho vedeny kótovací čáry délkových nebo úhlových rozměrů.



Obr. 5: Kótování od společné základny

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 78)

Pokud by kótování od společné základny zabírá velkou plochu na výkrese, je možné využít zjednodušené kótování od společné základny. Počátek kótovací čáry je znázorněn malou kružnicí a číslicí 0 a kóty jednotlivých rozměrů jsou zaznamenávány u vynášecí čáry vzdálené ve stejné velikosti od počátečního bodu.

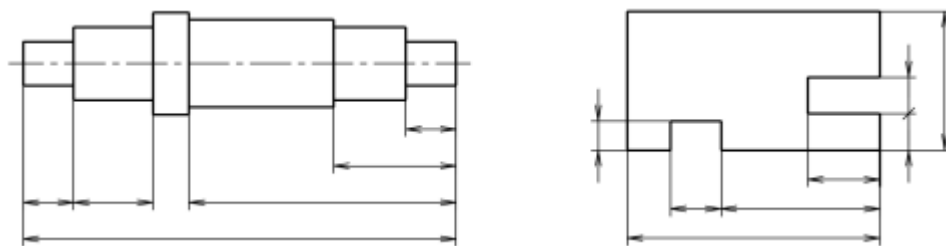


Obr. 6: Zjednodušené kótování od společné základny

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 78)

3. Smíšené kótování

Jedná se o kombinaci výše zmíněných přístupů ke kótování. Tento přístup najde využití u složitějších těles, u kterých je třeba plně popsat jejich rozměry.



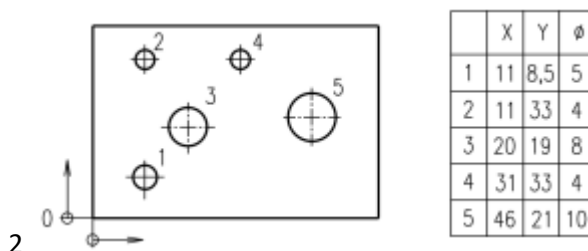
Obr. 7: Smíšené kótování

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 79)

4. Souřadnicové kótování

Tento přístup nachází využití na výkresech sloužících, jako podklad při programování některých číslicově řízených obráběcích strojů. Jednotlivé prvky mohou být ve výkrese označeny pouze čísla a jednotlivé souřadnice od stanoveného počátku a jejich rozměry mohou být zaznamenány v příslušné tabulce.

(Kletečka a Fořt, 2007)



Obr. 8: Souřadnicové kótování

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 79)

Podobně jako u modelování, i u kótování technických výkresů jsou různé způsoby, jak přistupovat k četnosti interpretovaných informací. Dříve bylo běžné ve výkresech plně definovat všechny rozměry součásti, tedy mít plně okótované výrobní výkresy (výkresy součásti). V současné době se více začíná využívat minimálně kótovaných výkresů. Přispívá tomu zvláště také současná přítomnost 3D modelu, který sám o sobě obsahuje informace o svých teoreticky přesných rozměrech, který je při výrobě součásti k dispozici. Můžeme se také setkat s pojmy výkresy s omezenými rozměry nebo výkresy s redukovanými rozměry, kdy se v podstatě jedná o synonyma. U minimálně kótovaných výkresů se konstruktér zaměřuje pouze na kótování funkčních rozměrů součásti, které jsou podstatné pro správnou funkci součásti. Konstruktér pak vynechává základní rozměry součásti, které jsou obsaženy v 3D modelu. Jedná se tedy o hybridní přístup k technické dokumentaci, kdy je využíván jak 3D model, tak minimálně kótovaný technický výkres. (Herron, 2021)

Při kótování je nutno brát ohled na to, zda se jedná o rozměr funkční, či nefunkční. Funkční rozměry jsou rozměry ploch součástí, které se stýkají s plochami jiné součásti, což celkově ovlivňuje funkci zaměnitelnost a životnost obou součástí. Tyto rozměry jsou obvykle doplněny tolerančními značkami. Nefunkční rozměry se týkají ploch, které nemají přímý vliv na funkci součásti, z toho důvodu nemusejí být tak přesné. (Kletečka a Fořt, 2007)

1.3.2 Tolerování rozměrů v technických výkresech

Kóty předepsané na výkresech jsou pouze teoretické, protože v technické praxi nejsme zatím schopni vytvořit dokonale přesný rozměr. Vzniklé nepřesnosti od ideálního stavu se odvíjí od zvolené technologie výroby, procesu výroby a lidského faktoru. Z tohoto důvodu se předepisují meze a tím i přesnosti, v jakých mají být součásti vyrobeny. Proces předepisování v určitých mezích se nazývá tolerování. Jelikož tolerování klade vyšší nároky na výrobu, a tím zvyšuje cenu výrobku, tolerují se pouze podstatné funkční rozměry. (Kletečka a Fořt, 2007)

Pokud není na výkrese kóta rozměru s předepsanou tolerancí, pak platí, že rozměr spadá do mezí všeobecné tolerance. Všeobecná tolerance je stanovena normou ČSN ISO 2768-1, která je platná již od roku 1992. Norma rozlišuje všeobecné tolerance do čtyř tříd přesnosti od jemné po velmi hrubou. Aby byla norma na výkrese platná, musí být ve výkresovém poli uvedeno, že se všeobecné tolerance řídí podle této normy a s jakou třídou přesnosti (např. ISO 2768 - m). Hodnoty jednotlivých tolerancí podle rozmezí velikosti rozměru jsou pak dohledatelné, například ve strojnických tabulkách. (Kletečka a Fořt, 2007), (Leinveber a Vávra, 2008)

Tab. 1: Nepředepsané mezní úchytky délkových rozměrů

Třída přesnosti		Mezní úchytky pro základní rozsah rozměrů							
Označení	Název	0,5 *	přes 3	přes 6	přes 30	přes 120	přes 400	přes 1000	přes 1200
		do 3	do 6	do 30	do 120	do 400	do 1000	do 1200	do 4000
f	jemná	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	-
m	střední	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	± 2
c	hrubá	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	± 2	± 3	± 4
v	velmi hrubá	-	$\pm 0,5$	± 1	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	± 4	± 6	± 8
* U jmenovitého rozměru pod 0,5 mm se mezní úchytky předepíše za odpovídající jmenovitý rozměr									

Zdroj: Vlastní zpracování dle Leinveber a Vávra (2008, s. 138)

1.3.3 Geometrické tolerance na technických výkresech

Pro správnou funkci součásti je také důležitá přesnost geometrického tvaru jejích funkčních ploch. Stejně jako u tolerování délkových rozměrů i geometrické tolerance definují přípustné odchylky skutečných tvarů od teoreticky přesných tvarů a také se definují pouze na rozměrech, u kterých si to vyžaduje funkčnost součásti. (Kletečka a Fořt, 2007)

Všeobecné geometrické tolerance se řídily v letech 1994-2021 normou ČSN ISO 2768-2 se třemi třídami přesnosti. Třídy přesnosti se značily velkými písmeny H, K, L, kdy byly v tomto pořadí řazeny jako nej přesnější, střední a nejméně přesná. Třída přesnosti, je v popisovém poli na neaktualizovaných výkresech staršího data uváděna za třídou přesnosti všeobecných tolerancí (např. ISO 2768 - mK). I když je cílem od této normy postupně odstoupit, stále je hojně využívána, především z důvodů vzniklých nejasností o principech tolerovaná podle nové normy. (Kletečka a Fořt, 2007), (Leinveber a Vávra, 2008)

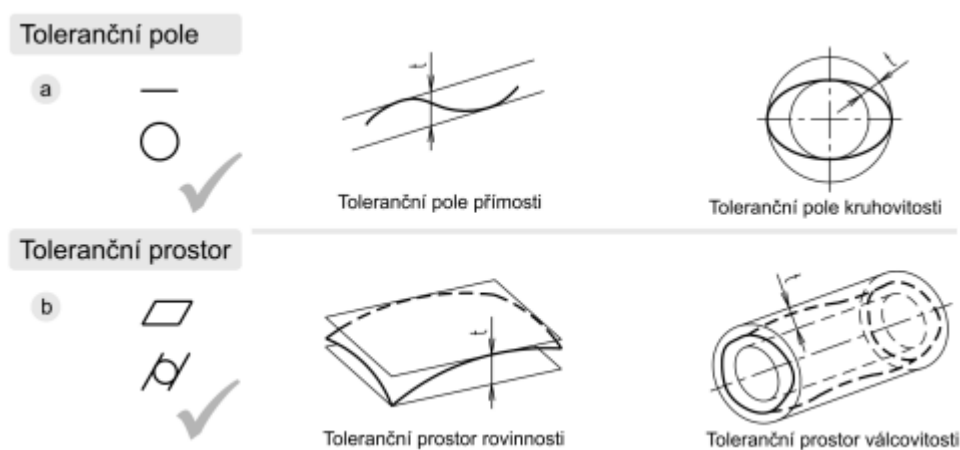
Tab. 2: Všeobecné tolerance přímosti a rovinnosti podle normy ČSN ISO 2768-2

Třída přesnosti	Tolerance přímosti a rovinnosti pro rozsah jmenovitých délek					
	do 10	přes 10 do 30	přes 30 do 100	přes 100 do 300	přes 300 do 1000	přes 1000 do 3000
H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6

Zdroj: Leinveber a Vávra (2008, s. 142)

Od července 2022 se tolerance tvaru plochy řídí normou ČSN EN ISO 22081 - Geometrická specifikace produktu (GPS). Tolerance byla upravena především z důvodu, četných neshod, které měla stará tolerance s nově aktualizovanou normou ISO 8015:2011 a zavedením systému ISO GPS ve tvorbě výkresové dokumentace. (Petr, 2023)

Geometrické tolerance se definují pomocí tolerančního pole (pokud se jedná o geometrický útvar v rovině) nebo tolerančního prostoru (pokud se jedná o geometrický útvar v prostoru), ve kterém musí daný prvek ležet, aby byl v toleranci. (Kletečka, 2007)



Obr. 9 Příklady tolerančního pole a prostoru

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 121)

Na následujícím obrázku je rozdělení geometrických tolerancí se svoji specifickou značkou, která se uvádí na technickém výkrese společně s hodnotou tolerance. Dále jsou z nich popsány některé vybrané geometrické tolerance.

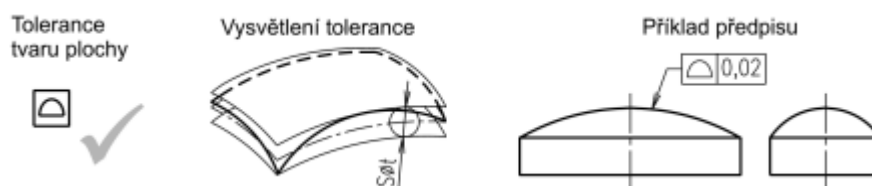
Geometrické tolerance		Značka
Tvaru	Přímosti	—
	Rovinnosti	
	Kruhovitosti	
	Válcovitosti	
	Tvaru profilu	
	Tvaru plochy	
Směru	Rovnoběžnosti	//
	Kolmosti	
	Sklonu	
Polohy	Umístění	
	Soustřednosti a souososti	
	Souměrnosti	
Házení	Kruhového	
	Celkového	

Obr. 10: Rozdělení geometrických tolerancí

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 120)

1. Tolerance tvaru plochy

Tolerance tvaru plochy udává, že skutečná plocha tolerované součásti musí ležet mezi dvěma ekvidistančními plochami, které obalují totožné koule s průměrem rovným hodnotě předepsané tolerance. (Kletečka a Fořt, 2007)

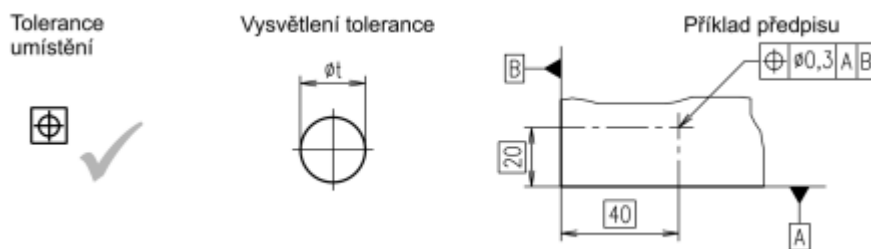


Obr. 11: Tolerance tvaru plochy

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 123)

2. Tolerance umístění

Při tolerování umístění je předepisováno, že bod (např. střed díry) musí ležet uvnitř válcového tolerančního pole o průměru stanovené tolerance umístění. Pro specifikování správné polohy je nutné zadat, ke které základně se tato tolerance vztahuje. Pro tento popis se předepisují tzv. *základny pro geometrické tolerance*. Jedná se o teoreticky přesný prvek na výkrese, ke kterému se vztahuje geometrická tolerance. Tolerance se může vztahovat i k více základnám najednou, tyto základny se zapisují do dalších políček a hodnotou tolerance s pravidlem, že jsou psány v pořadí od nejdůležitějších po ty méně důležité. (Kletečka a Fořt, 2007)



Obr. 12: Tolerance umístění

Zdroj: Kletečka a Fořt (2007, s. 124)

1.4 Metody reverzního inženýrství

Reverzním inženýrstvím se rozumí proces, který přistupuje opačně než klasické 3D modelování. V tomto případě není zapotřebí vyrobit objekt z ideálního modelu, ale model je pomocí specifického softwaru generován z reálného objektu.

1.4.1 3D skenování

Jedná se o technologii sloužící k vytváření vysoce přesných 3D modelů reálných objektů. Skener vytváří snímky zkoumaného objektu. Tyto snímky jsou poté spojeny v digitálním prostředí do 3D modelu. Skenem se rozumí 3D model složený z malých trojúhelníků neboli polygonů, složený v polygonální síť, která kopíruje geometrii skenovaného objektu. Přesnost a detailnost modelu závisí na počtu polygonů obsažených v polygonální síti modelu. (Kivolýa, 2019)

Druhy 3D skenerů:

a) Podle funkce:

1. Optické skenery

Fungují na principu senzorů, které snímají světlo odražené od skenovaného objektu a na základě získaných informací vytváří digitální 3D model. Optické skenery se využívají pro základní skenování s nízkými požadavky na přesnost.

2. Dotykové skenery

Data jsou získávána kontaktem měřicí sondy se snímaným objektem. Dotykové skenery jsou přesnější, než optické a jsou vhodné pro skenování různorodých materiálů.

3. Laserové skenery

Skener vysílá na snímaný objekt laserový paprsek, který se od něj odráží zpět do přijímače a na základě získaných informací vytváří digitální 3D model. Jedná se o nejpreciznější snímače, které jsou schopny zachycovat nejmenší detaily povrchu objektu. Z tohoto důvodu jsou laserové skenery hojně využívány v technické praxi.

(Hubáček, c2022)

- b) Podle konstrukce:
1. Přenosné (Ruční)
 2. CT skenery
 3. Robotická řešení



Obr. 13: 3D skenování ručním skenerem

Zdroj: Hubáček (Co je 3D skenování a k čemu ho využijete, c2022)

Volba vhodného skeneru závisí na určitých faktorech, na které je nutno brát ohledy:

1. Účel dat

V tomto faktoru se rozlišuje, zda je objekt skenován za účelem reverzního inženýrství, kontroly kvality, pro plánovaný 3D tisk nebo zda se jedná pouze o mezikrok před následující úpravou 3D modelu. Podle tohoto faktoru je vhodné volit skenery s dostatečnou přesností, především pokud je účelem skenování kontrola kvality nebo reverzní inženýrství.

2. Velikost objektu

Jako je to u většiny měřidel, volba správného rozsahu je velice zásadní pro správné získávání informací. Při špatně zvoleném typu skeneru dojde ke snížení přesnosti.

3. Textura objektu

Je možné skenovat objekty s reálnou barevnou strukturou nebo pouze v jedné univerzální barvě. Jelikož skenování s barevnou strukturou snižuje přesnost, v technické praxi se spíše využívají skenery bez barevné struktury.

4. Místo skenování

Každý skener má určité pracovní podmínky, jako jsou například teplota, vibrace nebo světelné podmínky, jejichž nedodržení vede ke snížení jeho přesnosti. Proto je důležité zvolit vhodný skener podle toho, zda bude skenování probíhat v interiérech v laboratorních podmínkách nebo exteriérech. Tento faktor také ovlivňuje, zda je objekt přenosný nebo nikoli.

5. Čas

Skenování objektu si vyžaduje určitý čas a požadovaný čas se odvíjí od počtu skenovaných objektů za den. Při sériové kontrole se stanovuje čas, který je možný do kontroly investovat, to se může podepsat na výsledné kvalitě. V některých případech je ale naopak nutné provést sken co nejrychleji, příkladem je skenování lidského těla, kdy dochází k neustálému pohybu svalů.

6. Software

Při výběru skeneru je zapotřebí ověřit, že výstupní formát (.STL, .OBJ, .WRL...), který skener generuje, námi preferovaný software podporuje.

(SolidVision, [2024])

Každý skener má přednastavené, ve kterém formátu je schopný exportovat nasnímaná výstupní data. Formát dat je důležitý pro následující zpracování dat a výběr vhodného výpočetního softwaru. Mezi základní datové výstupy skenerů se řadí:

1. Soubory .STL

Modely jsou tvořeny pomocí trojúhelníkové sítě a tím vytvářejí dojem plošného modelu. Jedná se o nejjednodušší vyjádření 3D modelu, které se nejčastěji využívá na přímý 3D tisk.

2. Soubory .OBJ

Model je pomocí dat vytvářen pomocí stejného principu jako soubory .STL. Ovšem data těchto souborů ještě navíc obsahují barevnou texturu modelu, zachycenou pomocí snímků při skenování.

3. Mračna bodů

Jedná se o množinu bodů v prostoru, která definuje 3D objekt pomocí umístění jednotlivých bodů. Každý bod obsahuje svá vlastní data, jako například informace o směru normály nebo barvě jednotlivého bodu. Jelikož v tomto formátu není 3D model vyjádřen plošně, vizuálně se s modelem hůře pracuje. Tento formát využívají především skenery s vysokým rozsahem snímané oblasti. Formáty obsahující mračna bodů využívají přípony: *.dxf, *.igs, *.asc, *.vtx nebo *.wrl.

(SolidVision, [2024])

Využitá metoda 3D skenování bude popsána v podkapitole 2.3.2 Analýza odchylek volných tvarů.

1.4.2 Fotogrammetrie

Jedná se o proces, který využívá pořízených fotografií pomocí fotoaparátu nebo videokamery k výpočtu umístění jednotlivých bodů v trojrozměrném prostoru. S výpočtem pomáhá software, který hledá společné prvky mezi fotografiemi a snaží se určit úhel ze kterého byla fotografie pořízena. S informací o úhlu a vzdálenosti kamery pak dokáže určit body v 3D prostoru, které tvoří výsledný 3D model snímaného objektu. (Zuza, 2018)

Prvním krokem metody je volba fotoaparátu. V dnešní době stačí k fotogrammetrii využít osobní chytrý telefon, avšak výsledná přesnost 3D modelu závisí na kvalitě, a především na ostrosti fotografie. Proto je preferováno využívání zrcadlovky nebo moderního chytrého telefonu

s kvalitním fotoaparátem. Pro správné „vykreslení“ modelu je zapotřebí minimálně dvaceti fotografií. Pro správné zachycení detailů je vhodné zachytit požadovaný objekt na 50 - 80 fotografiích. Je pravděpodobné, že některé fotografie bude nutné vymazat z důvodu nedostatečné kvality nebo je výpočetní software odmítne zpracovat. Z tohoto důvodu je vhodné pořídit fotografií více, pokud je požadováno dosažení co nejvyšší přesnosti. Při fotografování je důležité zachovat stejnou polohu objektu, pozadí i okolních předmětů, aby nedošlo ke špatnému výpočtu bodů v prostoru. Z toho důvodu je nutné se kolem objektu pohybovat v kruzích a nevyužívat otočných podstavců jako u 3D skenování. Ze stejného důvodu je nutné vyhnout se vysoce kontrastním stínům a pořizovat snímky za vhodného osvětlení. (Zuza, 2018)

Existuje široká škála výpočetních programů pro fotogrammetrii. Jako u většiny programů, i v tomto případě je možnost volit mezi placenými programy, jako například ReCap Photo (dříve ReMake) od společnosti Autodesk, nebo neplacenými programy, například Colmap, Zephyr nebo Meshroom. I když placené programy mohou disponovat pokročilejšími funkcemi, i přes menší limitace, jako je například maximální hranice počtu fotografií, neplacené programy dokáží vytvořit věrohodný 3D model objektu. Volba programu závisí na možnostech a potřebě každého jednotlivce. Výpočty v softwaru jsou náročné na hardwarové požadavky stolního počítače nebo notebooku, to se potom odráží na době trvání výpočtu. (Zuza, 2018)

Zpracování dat se liší podle možností zvoleného programu. Například program Colmap na konci výpočtu vygeneruje dva soubory. První soubor obsahuje polygonový objekt, který lze převést do formátu .STL a nechat vytisknout na tiskárně, avšak je doporučeno nejdříve převést model do vhodného programu (např. Meshlab) a opravit vzniklé chyby. Častým nedostatkem je chybějící základna, kterou není možno zachytit na fotografiích. Druhý soubor obsahuje *mračno bodů*, jedná se o shluk bodů v 3D prostoru, ze kterého lze objekt vygenerovat převedením do programu Meshlab. Jedná se o pracnější proces, který ale může přinést lepší výsledky. Po vygenerování 3D modelu z mračna bodů a optimalizaci vzniklých anomálií lze model převést do formátu .STL a připravit k tisku, či k podrobnější analýze. Druhým příkladem je program Meshroom, který umožňuje rychlejší a jednodušší zpracovávání dat z fotografií, které po stisknutí jediného tlačítka dokáže automaticky zrekonstruovat do virtuální vizualizace. Po vizualizaci je možné přidávat dodatečné sady fotografií v místech, kde je zapotřebí větší detail na tvar povrchu. Veškeré kroky procesu jsou zaznamenávány ve větvích editoru, což napomáhá lepší přehlednosti. Po finální rekonstrukci je zapotřebí provést úpravu základny a jiné modelové úpravy, jako u předešlého příkladu, v jiném příslušném programu. (Zuza, 2018)



Obr. 14: Porovnání: Objekt/3D model/vytištěný model

Zdroj: Zuza (Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu, 2018)

2 Praktická část

V praktické části bylo provedeno experimentální měření na modelech vytištěných na 3D tiskárně. Tyto odlišné experimentální modely byly vytvořeny na základě teoreticky přesných digitálních modelů s využitím odlišných přístupů k modelování v modelovacím softwaru NX. Princip experimentu spočíval v porovnávání teoreticky přesného digitálního modelu s fyzickým modelem. Rozdíl v rozměrech na exaktních i volných tvarech je pozorovatelný ve formě vzniklé odchylky mezi jednotlivými rozměry obou modelů. Informace o velikosti odchylek dále pomáhají stanovit vhodnou rozměrovou toleranci nebo toleranci tvaru plochy, které jsou využity pro vhodný zápis v technické dokumentaci.

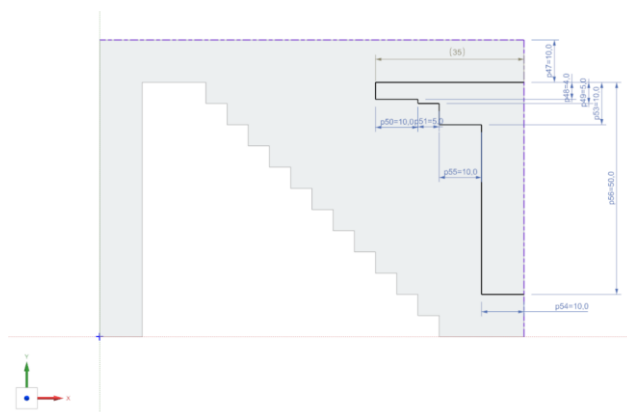
2.1 Postup tvorby digitálních 3D modelů

Pro tvorbu digitálních modelů byl zvolen modelovací software NX, především pro jeho komplexní podporu vícecestných postupů. Modely byly zvoleny tak, aby zastupovaly jednoduché objekty skládající se ze základních i nestandardních geometrických tvarů, které si vyžadují odlišné přístupy k modelování. V následujících podkapitolách budou jednotlivé modely popsány a bude zjednodušeně popsán postup modelování.

2.1.1 Multifunkční kalibr

První model reprezentuje multifunkční porovnávací měřidlo určené pro kontrolu nejružnějších délkových i válcových rozměrů. Model tohoto měřidla se skládá z dobře definovatelných tvarů a těles. Aby byla zachována funkce tohoto měřidla je nutné, aby jeho ideální model měl přesně nadefinované rozměry, z tohoto důvodu je vhodné tento model vytvořit pomocí parametrického modelování, které bylo popsáno v podkapitole 1.1.3. Vytvořením modelu s úplnou parametrizací se docílí pevného ustanovení všech rozměrů.

Model vychází ze skici (náčrtu), kterou tvoří obyčejný obdélník. Z tohoto náčrtu je posléze pomocí funkce *vysunutí* vytvořeno jednoduché objemové těleso. Specifický tvar tělesa je v tomto případě vytvářen postupným odebíráním materiálu z objemového tělesa. Odebírané části jsou definovány vytvořením dalších skic na stěně tělesa a využíváním podfunkce *odečíst*, která je součástí funkce *vysunutí*.

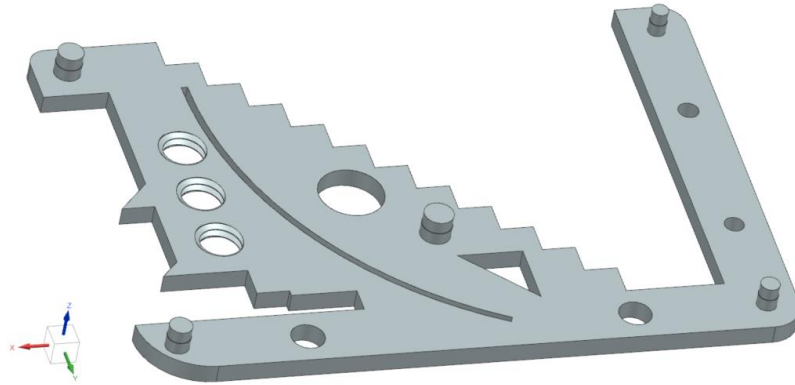


Obr. 15: Příklad skici blíže definující tvar objektu

Zdroj: Vlastní zpracování

Jelikož se jedná o parametrický model, je kladen důraz na skutečnost, že všechny náčrty musí být plně definovány pomocí kót a podmínek polohy. Tomu napomáhá zabudovaná funkce NX, která informuje o počtu nedefinovaných pohyblivých křivek. Plně definované křivky ve skicách se v NX automaticky zobrazují černou barvou (Obr. 15).

Postup modelování pokračuje postupným skicováním základních geometrických tvarů a odebíráním, či přidáváním materiálu k základnímu tělesu. Při modelování je vhodnější tvořit více jednoduchých náčrtů než se pokoušet všechny tvary definovat v jediném náčrtu. Tvorba více jednodušších náčrtů napomáhá lepší přehlednosti i snazší editaci jednotlivých kroků. Na konci modelovacího procesu je vytvořen digitální model s úplnou parametrizací.



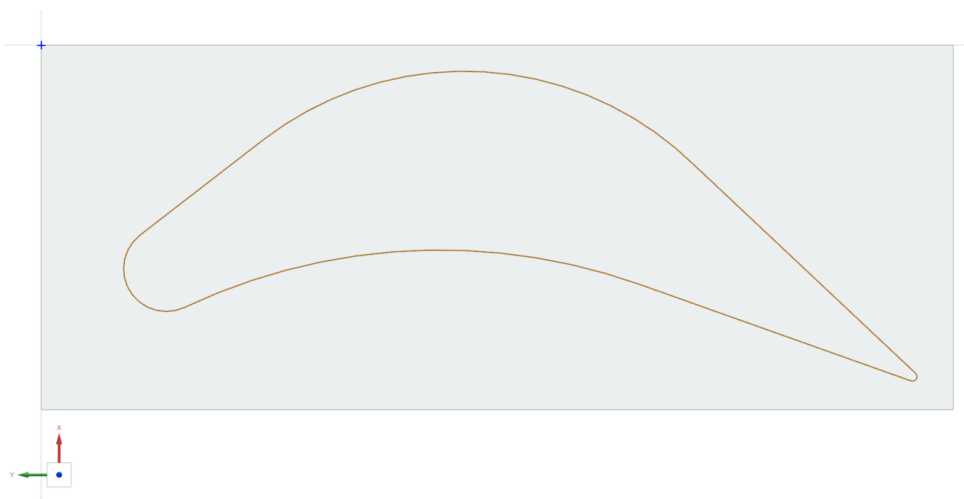
Obr. 16: Digitální model universálního kalibru

Zdroj: Vlastní zpracování

2.1.2 Segmentová axiální lopatka

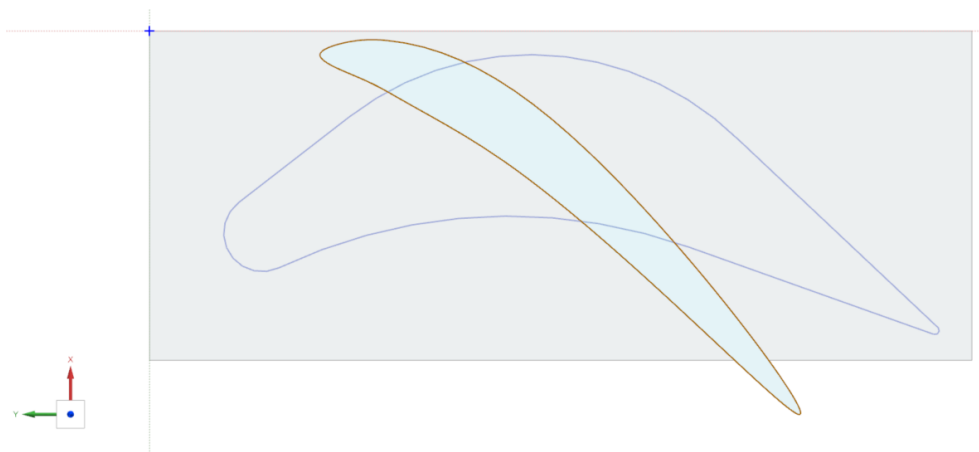
Druhým tělesem je model segmentové axiální lopatky rotoru. Jedná se o návrh jednoduchého tělesa, které na rozdíl od prvního modelu neobsahuje pouze exaktně definovatelná tělesa, ale pro jeho návrh je nutné využít i křivky volných tvarů. Jelikož je průřez lopatky proměnlivý, její tvarové plochy definují průřezy ve stanovených rovinách a plochy modelu jsou parametrizovány pouze svojí tvořenou geometrií.

Při tvorbě lopatky je v prvním kroku vytvořena obdélníková základna, která je se tvoří stejně jako u předešlého modelu. Základnu tvoří skica profilu z odstupňovaných vnějších rybinových drážek. Na základně je vytvořen náčrt obsahující křivku vytvořenou využitím úseček, křivek a oblouků. Tato uzavřená křivka definuje obvod paty lopatky pouze svojí geometrií bez využití parametrizace. Toto řešení může být nahrazeno využitím funkce *křivka na ploše*, kterou lze definovat tvar obvodu paty lopatky umístěním skupiny bodů, rozmístěných do požadovaného tvaru.

**Obr. 17: Křivka tvaru paty lopatky**

Zdroj: Vlastní zpracování

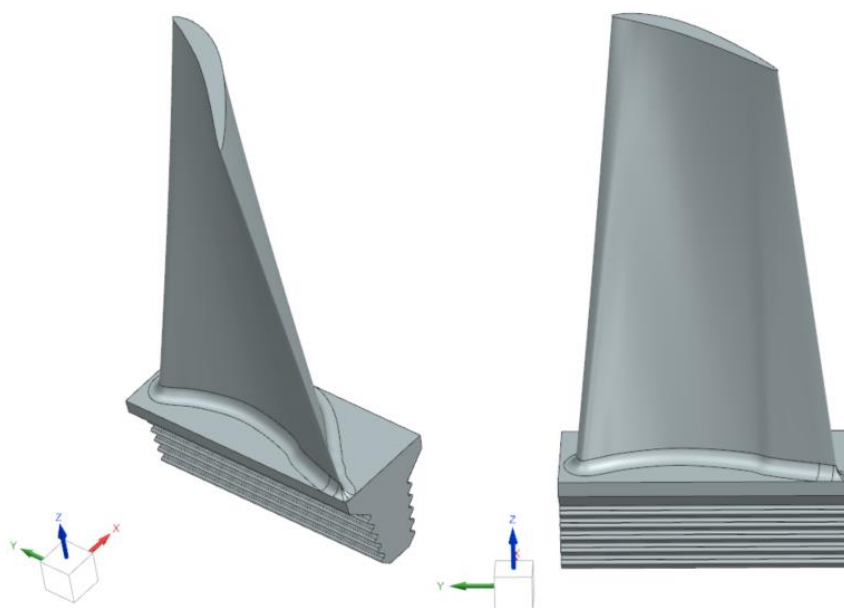
Vodorovně k náčrtu křivky paty lopatky je vytvořena rovina ve vzdálenosti rovné délky lopatky. Na této rovině je vytvořený náčrt, na kterém je navržen tvar obvodu vrcholu lopatky. Náčrt je vytvořen jedinou křivkou s využitím umístěných bodů. Jinou metodou by mohla být kombinace křivek a oblouků s částečnou parametrizací. Při tvorbě je možné si v pozadí zobrazit předchozí náčrt, který leží pod aktuální rovinou (Obr. 18), tento náčrt je vyobrazen pomocí světle-modrých křivek. Software NX při skicování napomáhá zobrazováním, které křivky nejsou stále plně definovány a jsou tzv. pohyblivé. Tyto pohyblivé křivky jsou vyobrazeny hnědou barvou. Poloha vrcholu vůči kořenu lopatky, natočení i velikost ovlivňují výsledný tvar plochy lopatky. Do tohoto náčrtu je možné se kdykoli v průběhu modelování vrátit a provést editaci křivky, která ovlivní výsledný tvar plochy tělesa dle představ a požadavků.

**Obr. 18: Skica tvaru špičky lopatky**

Zdroj: Vlastní zpracování

Využitím vytvořených křivek ve skicách a využitím funkce z balíčku NX pro volné modelování *Křivkami* (angl. *Trough Curves*) jsou vytvořeny plochy lopatky, které by parametricky nebylo možné vytvořit. Při tomto modelování je plně využíván hybridní přístup modelování softwaru NX, díky možnostem zpětné editace vytvořených skic, které využívá parametrické modelování,

a volného navrhování křivek je možno modifikovat model, dokud není dosaženo vhodného volného tvaru objemového tělesa. Pokud jsou křivky skici editovány tvar tělesa je po dokončení náčrtu automaticky přemodelován. Tvar plochy je také možné modifikovat využitím funkcí *odsazená plocha* (angl. *Offset Surface*) a *odsazená stěna* (angl. *Offset Wall*), pomocí těchto funkcí je možné upravovat rozměry plochy, např. zvýšit, či snížit tloušťku tělesa, bez nutnosti zásahu do vytvořených náčrtů. Tato metoda je velmi užitečná v případech, kdy by podobné úpravy mohly rozhodit geometrii tělesa. Na konci procesu modelování je výsledný digitální model segmentové axiální lopatky.



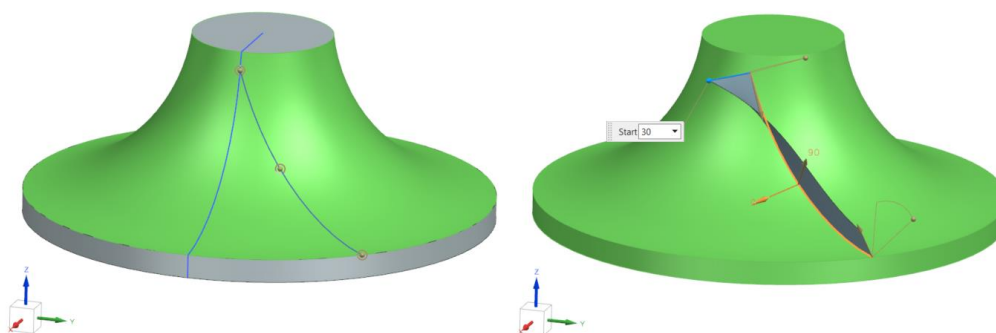
Obr. 19: Pohledy na model axiální lopatky

Zdroj: Vlastní zpracování

2.1.3 Radiální lopatkové kolo

Třetím modelem je radiální lopatkové kolo, které reprezentuje složitější těleso volných tvarů. Podobně jako u druhého modelu se využívá hybridního přístupu k modelování, kdy je částečně parametrizováno pouze malé množství rozměrů. Zbylé části jsou modelovány pomocí funkcí pro volné modelování a využíváním technik přímého modelování. Tvorba tohoto modelu vyžaduje pokročilejší znalost postupů při modelování.

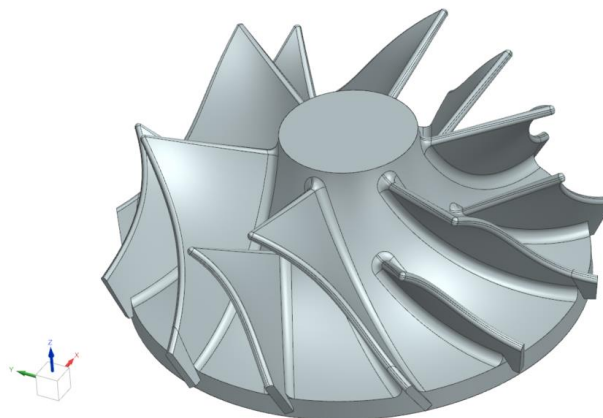
Prvním krokem při tvorbě modelu je náčrt profilu základny. Náčrt je kreslen po osu rotace, podle které se následně funkcí *rotace* "orotuje" v objemové těleso. Na ploše tělesa je načrtnuta volná křivka pomocí funkce *křivka na ploše* (angl. *Curve on Surface*). Umístění a tvar křivky se stanovuje pomocí vytvořených bodů, které se mohou volně zvolit s výjimkou, že jeden stupeň volnosti bodu odebírá kontakt s plochou, na které je křivka tvořena (Obr. 20 - levý). Funkcí *prodloužení pomocí předpisu* je z volné křivky vytvořena plocha, kterou lze tvarovat metodou přímého modelování, uchycením za krajní body plochy (Obr. 20 - pravý).



Obr. 20: Tvorba lopatky z volné křivky

Zdroj: Vlastní zpracování

Následovně je ploše přidán objem funkcí *zesílit*. Po drobných úpravách, jako je například zaoblení hran, se vytvořená lopatka duplikuje po 60° podle osy rotace. A celý proces je zopakován při tvorbě menší lopatky. Výsledkem je digitální model radiálního lopatkového kola.



Obr. 21: Model radiálního lopatkového kola

Zdroj: Vlastní zpracování

2.2 Příprava analýzy

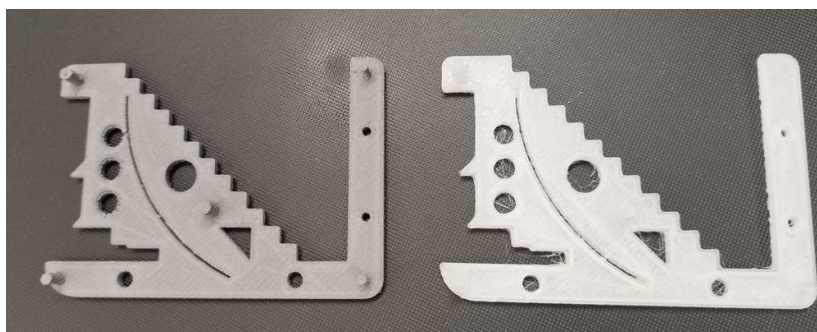
Podle vytvořených digitálních modelů byly vytištěny experimentální modely na 3D tiskárně Ultimaker 3. Modely byly vytištěny využitím filamentu z materiálu PLA (Poly Lactid Acid), který je specifický pro snadný tisk a jedná se o nejpoužívanější materiál filamentu využívaný v oboru aditivních technologií. Modely jsou vytištěny s tloušťkou tiskové vrstvy 0,2 mm a rychlostí tisku 25 mm³/s. Byl využit průměr trysky 0,8 mm, jelikož se jedná o největší možný průměr trysky, stanovujeme tím minimální hranici dosažené přesnosti. Teplota tisku byla nastavena na 210°C a teplota tiskové podložky na 50°C, tato teplota zajistí správné přilnutí k podložce a není překročena teplotní hranice skelného přechodu, aby bylo dosaženo co nejvěrnějšího tvaru a rozměrů experimentálního modelu stanovených digitálním modelem.

Tab. 3: Parametry tisku modelů

Materiál	PLA
Tloušťka tiskové vrstvy	0,2 mm
Průměr trysky	0,8 mm
Objemová rychlost tisku	25 mm ³ /s
Teplota tisku	210°C
Teplota tiskové podložky	50°C

Zdroj: Vlastní zpracování

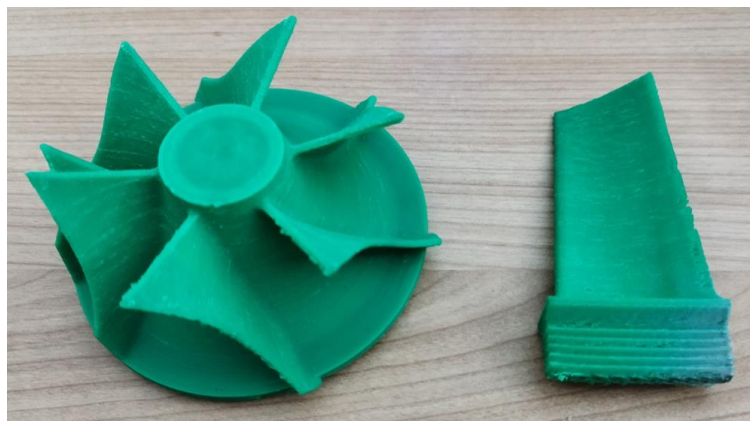
Na 3D tiskárně byly vytištěny čtyři experimentální modely. Dva modely byly vytištěny podle modelu multifunkčního kalibru využitím dvou odlišných filamentů. Jeden model byl vytištěn z materiálu PLA (Obr. 22 – vpravo) a druhý ze slitiny hliníku AlSi10Mg (Obr. 22 – vlevo). Jak již bylo zmíněno tyto modely reprezentují tělesa skládající se z exaktních tvarů, z tohoto důvodu budou využity odlišné přístupy k analýze odchylek než u modelů lopatky a lopatkového kola.



Obr. 22: Modely multifunkčního kalibru vytištěné na 3D tiskárně

Zdroj: Vlastní zpracování

Dále byly vytištěny modely radiálního lopatkového kola a axiální segmentové lopatky. Pro každý objekt byl vytištěn jeden experimentální model s využitím stejného materiálu. Na modelech jsou primárně zkoumány volné plochy lopatek.



Obr. 23: Modely lopatkového kola a segmentové lopatky vytištěné na 3D tiskárně

Zdroj: Vlastní zpracování

2.3 Analýza odchylek rozměrů a stanovení tolerancí modelů

Úkolem analýzy rozměrů je zjistit odchylku rozměrů vytištěných skutečných od rozměrů ideálních stanovených v digitálním modelu. Postup zvolených metod analýzy exaktních tvarů volných tvarů je odlišný a bude dále podrobně rozepsán v následujících podkapitolách.

2.3.1 Analýza odchylek exaktních tvarů

Pro měření exaktních tvarů jsou využity vytištěné modely univerzálních kalibrů. Jelikož jsou tyto modely složeny ze základních geometrických útvarů, jejich rozměry jsou dobře měřitelné pomocí měřících zařízení. Na vzorcích bylo zvoleno 25 rozměrů, které byly změřeny na obou vzorcích pomocí měřicího mikroskopu ISM-DL301.



Obr. 24: Snímek z měřicího mikroskopu pořízený při měření otvoru

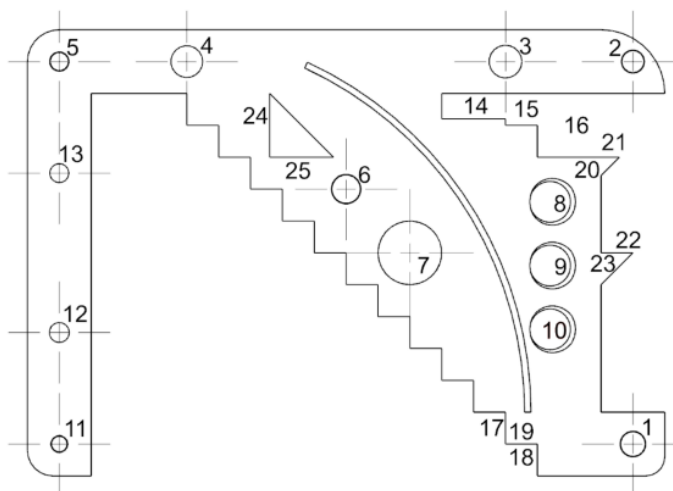
Zdroj: Vlastní zpracování

Mikroskop zobrazuje měřené objekty při patnácti-násobném zvětšení a dodává informace o rozměrech s přesností $\pm 8 \mu\text{m}$. Každý ze zvolených rozměrů byl vycentrován pod čočkou mikroskopu a snímek promítaný na obrazovce byl zaostřen podle potřeby. Následně využitím přímých a úhlových kótovacích čar, které jsou měřícím činitelem mikroskopu, byly nastavovány na hrany měřených útvarů. Kruhové rozměry byly odměřovány pomocí kružnic opisujících hrany otvorů (Obr. 24). Hodnoty rozměrů jsou automaticky měřeny a zapisovány do tabulky v programu Microsoft Excel.

Při měření se počítá s rozšířenou nejistotou měření $U [\mu\text{m}]$, kdy L je naměřená hodnota uváděná v [m]:

$$U = (2,6 + 1,5 * L) \quad (1)$$

S využitím tohoto matematického modelu, který je uveden v kalibračním listu digitálního mikroskopu, je získána rozšířená nejistota měření s faktorem rozšíření 2: $U = \pm 0,003 \text{ mm}$. Tato hodnota platí pro všechny naměřené hodnoty.



Obr. 25: Pozicování měřených rozměrů

Zdroj: Vlastní zpracování

Na obrázku 25 jsou očíslovány jednotlivé pozice zvolených a měřených rozměrů, které jsou následovně porovnávány s ideálními rozměry digitálního modelu. Pro zjištění odchylek byly zvoleny délkové rozměry, kruhové otvory a pozice 19, 20 a 23 zastupují rozměry úhlové.

Tab. 4: Legenda tříd přesnosti barevně rozlišených pro tabulku 5

Třída přesnosti	
Označení	Název
f	jemná
m	střední
c	hrubá
v	velmi hrubá
Mimo toleranci	

Zdroj: Vlastní zpracování

Tab. 5: Naměřené hodnoty zvolených exaktních útvarů

Pozice	Model	Vzorek 1		Vzorek 2	
	Hodnota	Hodnota	Odchylka	Hodnota	Odchylka
1	3,9	3,613	0,287	3,801	0,099
2	3,5	3,328	0,172	3,396	0,104
3	5,2	4,757	0,443	4,972	0,228
4	5	4,544	0,456	4,710	0,29
5	2,9	2,712	0,188	2,846	0,054
6	4,5	4,401	0,099	4,226	0,274
7	10	9,670	0,33	9,673	0,327
8	6,4	6,190	0,21	6,389	0,011
9	6,4	6,311	0,089	6,261	0,139
10	6,4	6,108	0,292	6,325	0,075
11	2,5	2,428	0,072	2,51	-0,01
12	3,2	2,759	0,441	2,867	0,333
13	3	2,589	0,411	2,936	0,064
14	4	3,720	0,28	3,915	0,085
15	5	4,866	0,134	4,918	0,082
16	10	9,754	0,246	9,946	0,054
17	5	4,887	0,113	5,034	-0,034
18	5	4,905	0,095	4,886	0,114
19	90°	86,388°	3,612°	88,370°	1,630°
20	45°	48,489°	3,489°	40,205°	4,795°
21	2,9	2,177	0,723	2,357	0,543
22	45°	46,051°	1,051°	40,245°	4,755°
23	5	4,061	0,939	4,177	0,823
24	10	9,262	0,738	9,452	0,548
25	10	9,185	0,815	9,228	0,772

Zdroj: Vlastní zpracování

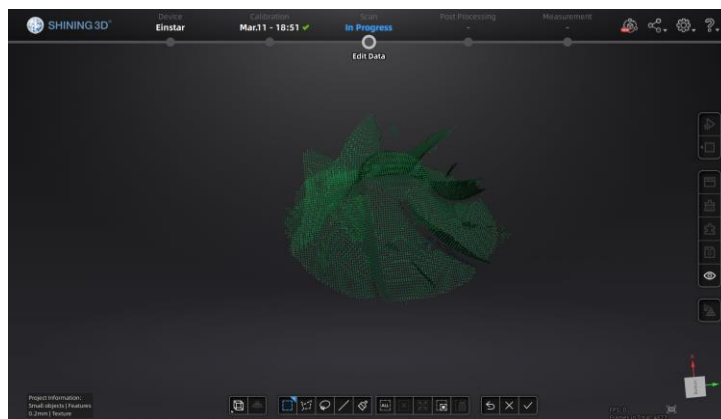
V předcházející tabulce je za a vzorek 1 označován experimentální model vytištěný z materiálu AlSi10Mg a vzorkem 2 je myšlený model z materiálu PLA. Tabulka je rozdělena do 3 částí po dvou sloupcích. V první části vedle sloupce s číslem pozice měřeného rozměru, které je dohledatelné na obrázku 25, se nachází ideální hodnota rozměru obsažená v digitálním modelu. Následující dvě části jsou dále určeny pro každý z měřených vzorků, kdy v jednom sloupci je zapsaná reálná hodnota, naměřená pomocí digitálního mikroskopu, a v druhém sloupci je zapsaná odchylka mezi ideálním a reálným rozměrem. Tyto odchylky jsou dále barevně rozlišeny podle toho, do které třídy přesnosti, dle ČSN ISO 2768-1 (Tab. 1, s. 21), spadají pro daný rozměr.

Naměřené hodnoty mají odlišné odchylky v rozsahu od nižších desetin milimetru po necelé jednotky milimetru. Z 25 měřených rozměrů bylo naměřeno na *vzorku 2* 21 rozměrů s nižší odchylkou, než u *vzorku 1*. Během měření byly naměřeny i rozměry, které jsou mimo toleranci tříd přesnosti a převážně se jedná o úhlové rozměry. Na základě výsledků je nutné na výkrese předepsat velmi hrubou třídu přesnosti (ISO 2768-v). Výrobek vytvořený touto technologií může být využit pro kontrolu rozměrů, pouze pokud nejsou kladeny požadavky na vysokou přesnost rozměrů s maximální požadovanou třídou přesnosti ISO 2768-v. V případě, že se výsledné rozměry pohybují v požadované toleranci, je pro výrobek vhodné využití aditivní technologie s podporou digitálního modelu. V opačném případě je zapotřebí zvolit technologii, která dosáhne požadované přesnosti rozměrů, a to si vyžaduje plně stanovit všechny rozměry výrobku na technickém výkrese.

2.3.2 Analýza odchylek volných tvarů

Z důvodů složitosti měření volných ploch byla zvolena metoda měření pomocí výpočetního programu. Analýza volných ploch byla provedena v programu NX pomocí programových analytických funkcí. Aby bylo možné zrekonstruovat plochy experimentálního modelu v modelovacím programu NX, bylo využito procesu reverzního inženýrství, konkrétně 3D skenování, jehož princip je popsán v kapitole 1.4.1.

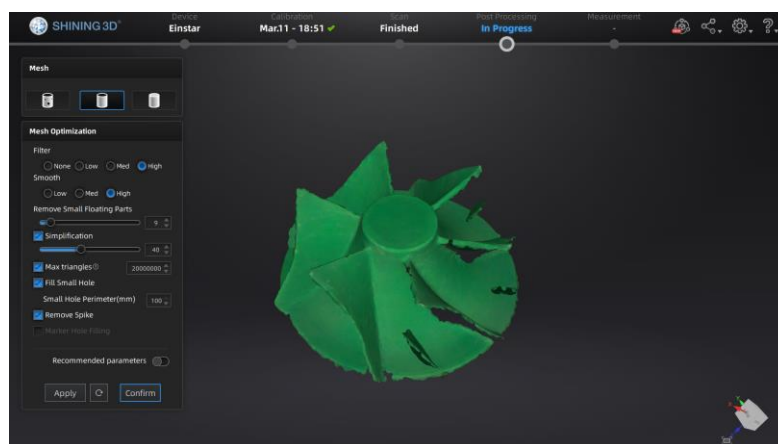
Postup získávání dat o rozměrech experimentálního modelu pomocí reverzního inženýrství probíhal následovně: Oba výtisky byly naskenovány pomocí ručního skeneru Shining 3D Einstar a k rekonstrukci byl využit softwarový nástroj od stejné společnosti. Během ručního skenování se veškerá data převáděla v reálném čase do výpočetního programu, ve kterém bylo možné sledovat postupnou generaci mračka bodů opisující skenovaný objekt.



Obr. 26: Mračno bodů skenovaného lopatekovo kola v programu SHINING 3D

Zdroj: Vlastní zpracování

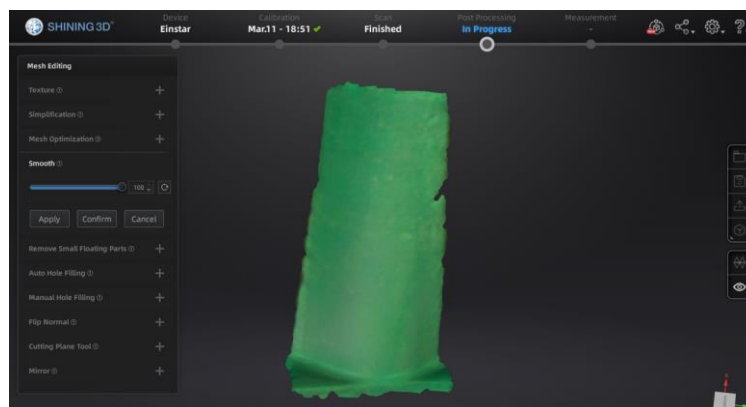
Po dokončení ručního skenování byly v programu manuálně odstraněny odlehlé body vzniklé mimo generovaný objekt během procesu skenování. Po uzavření skenovací části se program automaticky přepne do post-processingové části, ve které se vygenerované mračno bodů přepočítává do polygonálního tělesa. Během post-processingu byly nastaveny požadované parametry (Obr. 27). Mezi zásadní parametry ovlivňující výstup skenování se řadí nastavení filtru, nastavení vysoké jemnosti povrchu objektu. Hodnota maximálního počtu trojúhelníků, ze kterých se skládá polygonální těleso, byla nastavena na 20 milionů podle doporučeného nastavení. Malé otvory v tělesech, zapříčiněné absencí některých bodů, jsou automaticky vyplňovány zaškrtnutím funkce *Fill Small Hole*, hodnota obvodu těchto děr byla nastavena na největší možnou (100). Tyto parametry byly nastaveny pro všechna tělesa stejně.



Obr. 27: Polygonální těleso lopatkového kola se zadanými parametry

Zdroj: Vlastní zpracování

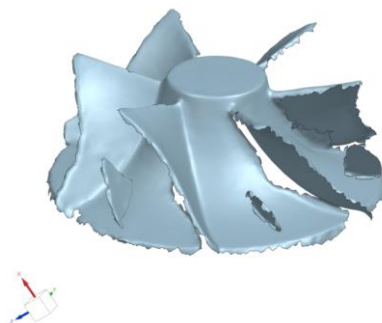
Po odsouhlasení nastavených parametrů bylo možné jednotlivé parametry doladit. Této možnosti bylo využito u nastavení maximální možné jemnosti, která je zobrazena na ukázce polygonální plochy axiální lopatky (Obr. 28). Toto nastavení vizuálně minimálně vyhladilo nerovnosti na povrchu. Stejně byly vyladěny i ostatní skenované povrchy.



Obr. 28: Polygonální plocha vnější strany axiální lopatky s dodatečným nastavením jemnosti

Zdroj: Vlastní zpracování

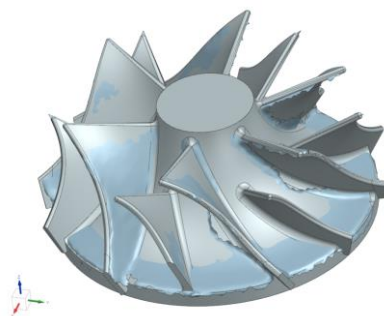
Na výstupech z obou modelů jsou vizuálně zřetelné vzniklé nedostatky 3D skenování složitějších těles. U lopatkového kola se jedná o nenaskenované části na spodních stranách lopatek. Tento problém je způsobený nedostatkem bodů vygenerovaných v těchto místech, zapříčiněný složitostí tělesa, která komplikuje výpočetnímu programu nacházení tvarových spojitostí a také přítomnost stínů v těchto částech experimentálního modelu. Tento nedostatek je nejvíce zřetelný na importovaném tělese v programu NX (Obr. 29). Tyto nedostatky budou zohledněny v analytickém řešení. Po dokončení post-processingu byla polygonální tělesa uložena ve formátu .STL, který je nyní možný importovat do programu NX.



Obr. 29: Importovaný STL model 3D skenu v programu NX

Zdroj: Vlastní zpracování

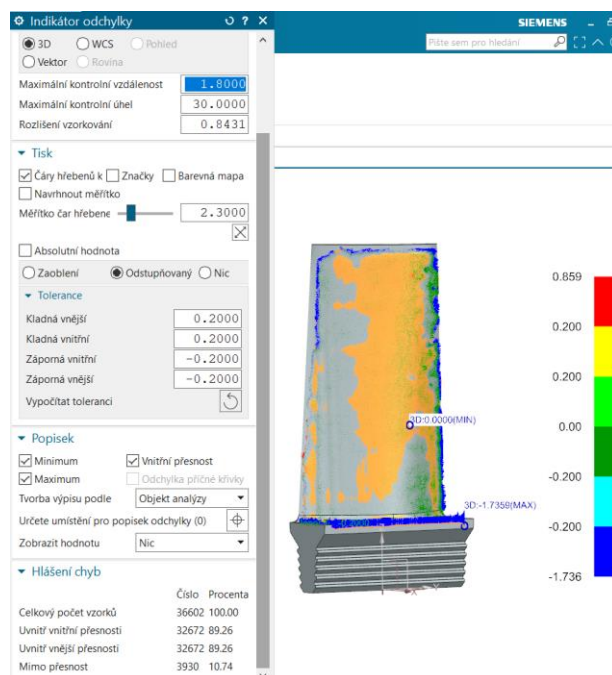
Polygonální těleso bylo importováno do společného souboru s ideálním modelem v softwaru NX. Aby bylo měření odchylky co nejpřesnější, bylo nutné na sebe co nejpřesněji napojit shodné plochy ideálního modelu a plochy polygonálního objektu. Pro tento účel bylo z ideálního modelu vytvořeno fasetové těleso pomocí nástrojů pro modelování facet. Jedná se o těleso složené z malých rovinných ploch (faset), které se přibližují ke tvaru referenčního 3D objektu. Tato funkce vytvoří kopii modelu, která je reprezentovaná pomocí jejích ploch na rozdíl od původního modelu, který je reprezentován křivkami a hranami. Fasetové těleso se vytvoří přesně na pozici původního tělesa, v tomto případě to je ideální stav a není zapotřebí s ním nijak více manipulovat. Pomocí funkce *Nejlépe přizpůsobené zarovnání* (angl. *Best Fit*) se vybraný objekt, v tomto případě naskenovaná plocha, zarovná s fasetovým tělesem modelu. Po programové kalkulaci se plochy jednotlivých těles prolnou a vznikne nejpřesnější proveditelné spojení ploch k porovnání odchylek. Fasetové těleso se nakonec odstraní, a zůstanou pouze prolnuté původní objekty.



Obr. 30: Vizuální porovnání tvarové podobnosti modelu a polygonálního tělesa

Zdroj: Vlastní zpracování

Po zarovnání obou modelů je využito analytické funkce pro měření odchylky. Jako měřené těleso se volí polygonální model a jako referenční těleso se volí digitální teoreticky přesný model. Tato analytická funkce obsahuje široké nastavení užitečných parametrů, pomocí kterých je možné přizpůsobit výstupní parametry dle potřeby. Na následujícím obrázku je znázorněné nastavení parametrů na ploše segmentové lopatky.



Obr. 31: Nastavení indikátoru odchylky v NX

Zdroj: Vlastní zpracování

Na obrázku je možné vidět tabulku s nastavením v horní části a s výstupními daty ve spodní části. Rozlišení vzorkování bylo zachováno podle doporučené hodnoty, kterou NX nabídlo při prvním spuštění analýzy. Důležitým parametrem je *Maximální kontrolní vzdálenost*, tímto parametrem lze určit hranici pro maximální měřenou hodnotu, která bude využita pro odříznutí odlehlých hodnot. Na modelu jsou barevně znázorněny čáry hřebenů jednotlivých vzorků, které jsou barevně značeny v poměru ku nastavené toleranci (viz. Legenda Obr. 31). Každý jeden vzorek při tomto měření reprezentuje jeden bod, který leží v místě měřeného a referenčního objektu a k tomuto vzorku náleží naměřená hodnota odchylky. Na modelu je dále znázorněno, ve kterém bodě se nachází vzorek s největší a nejmenší odchylkou. Parametry byly podobně nastaveny pro oba měřené modely.

1. Určení tolerance tvaru plochy segmentové lopatky na základě získaných výsledků

Mezi modelem segmentové lopatky a plochou vytvořenou 3D skenováním byla z celkových 36 602 vzorků naměřena maximální odchylka -1,7369 mm. Jelikož tyto hodnoty mohou být zatížené chybou, vzniklou při 3D skenování, zjistí se procentuální poměr četnosti výskytů hodnot odchylek.

Tab. 6: Četnost vzorků v závislosti na hranici u segmentové lopatky

Hranice do [mm]	Četnost vzorků	%	Max odchylka
1,8	36602	100,00%	-1,7359
1,4	36598	99,99%	-1,3928
1,0	36555	99,87%	-0,9960
0,8	36353	99,32%	-0,7995
0,6	35967	98,27%	-0,5999
0,4	35335	96,54%	-0,3999
0,2	32672	89,26%	-0,2
0,1	26265	71,76%	-0,1

Zdroj: Vlastní zpracování

První sloupec v tabulce reprezentuje hodnotu parametru: *Maximální kontrolní vzdálenost*, a zároveň reprezentuje možnou hodnotu tolerance, a v druhém sloupci je uvedena četnost vzorků, které se do hranice v prvním sloupci vyskytují. Tato hodnota je zjištěna při analýze v NX v sekci "*Hlášení chyb*" jako celkový počet vzorků při určité zvolené hranici. Ve třetím sloupci je procentuální poměr mezi počtem vzorků pohybujících se v určité hranici a celkovým počtem vzorků (36 602). Čtvrtý sloupec obsahuje maximální hodnotu odchylky vzorku, která se pohybuje ve stanovené hranici.

Z této tabulky vyplývá, že maximální odchylka -1,7369 mm patří spolu s dalšími výskyty až po hranici 0,6 mm mezi velmi ojedinělé odlehlé hodnoty a může se jednat o chybu. V simulaci na modelu je také patrné, že tyto odchylky se vyskytují převážně po obvodu skenované plochy, kde je více pravděpodobný výskyt chyb při skenování. Hodnoty nad hranici 0,6 mm pro svůj malý poměr výskytu jsou považovány za chybu a nejsou dále zohledňovány.

Tab. 7: Volba tolerance tvaru plochy segmentové lopatky

Tolerance [mm]	Uvnitř vnitřní přesnosti	%	Uvnitř vnější přesnosti	%	Mimo přesnost	%
±0,1	26265	73,03%	26265	73,03%	9702	26,97%
±0,2	32672	90,84%	32672	90,84%	3295	9,16%
±0,3	32779	91,14%	34558	96,08%	1409	3,92%
±0,4	35335	98,24%	35335	98,24%	632	1,76%
±0,5	35735	99,35%	35735	99,35%	232	0,65%
±0,6	35967	100,00%	35967	100,00%	0	0,00%

Zdroj: Vlastní zpracování

Parametr maximální kontrolní vzdálenosti byl nastaven na 0,6 mm. Pomocí výše uvedené tabulky se zvolí tolerance tvaru plochy, tak aby 95% naměřených hodnot spadalo do této tolerance. Hodnoty v tabulce jsou získávány z hlášení chyb v simulaci NX (Obr. 31). Procentuální hodnota je vztahena k maximálnímu počtu měřených hodnot do hranice 0,6 mm (=35 967 vzorků, viz. Tab. 3) Z tabulky vyplývá, že zvolenou tolerancí tvaru plochy ±0,3 mm bude ležet 96,08% naměřených hodnot v tolerančním prostoru a pokud by tolerance tvaru plochy byla zvolena ±0,6 mm bude v tolerančním prostoru obsaženo 100% vzorků mimo hodnoty předem stanovené za chybné.

2. Určení tolerance tvaru plochy lopatkového kola na základě získaných výsledků

Mezi modelem lopatkového kola a polygonálním tělesem byla z celkových 192 462 vzorků naměřená maximální odchylka 3,2405 mm. Rozptyl naměřených hodnot je větší než u segmentové lopatky, jelikož se jedná o složitější těleso, byl tento jev očekávaný. Následovně se postupuje stejným způsobem jako u předchozího modelu.

Tab. 8: Četnost vzorků v závislosti na hranici u lopatkového kola

Hranice do [mm]	Četnost vzorků	%	Max. odchylka
3,3	192462	100,00%	3,2405
3	192461	100,00%	2,4273
2	192329	99,93%	1,9883
1	190072	98,76%	-0,9999
0,8	181460	94,28%	-0,8
0,6	167006	86,77%	-0,6
0,4	140588	73,05%	-0,4
0,2	90864	47,21%	-0,2
0,1	48441	25,17%	-0,1

Zdroj: Vlastní zpracování

V tomto případě je zvolena maximální kontrolní vzdálenost 0,8 mm. Na polygonálním tělese jsou vizuálně patrné velmi nepřesné hrany po obvodu kola a na hranách lopatek, které jsou způsobeny obtížemi při skenování složitějšího tělesa, proto procento vzorků považovaných za chybné hodnoty je v tomto případě vyšší než u plochy segmentové lopatky.

Tab. 9: Volba tolerance tvaru plochy lopatkového kola

Tolerance [mm]	Uvnitř vnitřní přesnosti	%	Uvnitř vnější přesnosti	%	Mimo přesnost	%
±0,1	21870	12,05%	48441	26,70%	133019	73,30%
±0,2	90864	50,07%	90864	50,07%	90596	49,93%
±0,3	119116	65,64%	119116	65,64%	62344	34,36%
±0,4	127913	70,49%	140588	77,48%	40872	22,52%
±0,5	157103	86,58%	157103	86,58%	24357	13,42%
±0,6	161396	88,94%	167006	92,03%	14454	7,97%
±0,7	171398	94,45%	174103	95,95%	7357	4,05%
±0,8	178890	98,58%	181460	100,00%	0	0,00%

Zdroj: Vlastní zpracování

Z tabulky 9 vyplývá, že při zvolené toleranci tvaru plochy ±0,7 bude necelých 96% naměřených hodnot ležet v tolerančním prostoru. Při zvolení tolerance tvaru plochy ±0,8 bude 100% naměřených hodnot ležet v tolerančním prostoru mimo hodnoty předem stanovené za chybné.

2.4 Tvorba výkresové dokumentace

Tvorba výkresové dokumentace v programu NX je, za přítomnosti digitálního modelu, velmi snadná díky jeho SW řešení. Využitím zabudované funkce *Master Model Koncept* je technický výkres propojen s digitálním modelem, a pokud jsou na modelu provedeny změny, zajišťuje provedení těchto změn po aktualizaci technického výkresu. Nárys objektu a další potřebné

pohledy k popsání modelu jsou na technickém výkrese vytvořeny metodou pravoúhlého promítání za použití jednoduché funkce. Po zakreslení všech pohledů a potřebných řezů objektu je důležité stanovit důležité kóty rozměrů těles podle zásad kótování, které byly rozebírány v podkapitole 1.3.1. Každý z modelů vyžaduje odlišný počet užitých kót a geometrických tolerancí v závislosti na jeho tvaru, funkci a technologii výroby.

1. Multifunkční kalibr

Na základě získaných výsledků, které nasvědčují o hrubé přesnosti rozměrů tištěného experimentálního modelu, byla stanovena přesnost nekótovaných rozměrů dle ISO 2768–v. Při tvorbě technického výkresu bylo zvoleno úplné okótování rozměrů, jelikož se u většiny rozměrů jedná o rozměry funkční. Funkční rozměry nemají stanovené tolerance a řídí se podle předepsané všeobecné tolerance, ale je předpokládáno, že na těchto rozměrech by musel výrobce stanovit jemnější tolerance podle požadavků na výrobek a jeho užití. Stanovením tolerancí jednotlivých rozměrů na technickém výkrese je užitečné pro kontrolní měření součásti nebo jako dokumentace pro využití jiné výrobní technologie.

2. Segmentová lopatka

Data o rozměrech tvaru lopatky jsou obsažena v digitálním modelu. V případě, že je pro účel výroby dostatečná tolerance tvaru plochy $\pm 0,3$ mm, není nutné k této ploše uvádět žádné další informace o rozměrech plochy lopatky na technickém výkrese. Výjimkou jsou funkční rozměry uložení segmentové lopatky, nacházející se na profilu základny lopatky. Pro vytvoření spolehlivého uložení je nutné stanovit jemně tolerované rozměry a vhodnou strukturu povrchu, které je zapotřebí dosáhnout zvolenou post-processingovou technologií. Tento profil je proto plně okótován a pro všechny tyto rozměry je stanovena všeobecná tolerance ISO 2768-f. Přístup k tvorbě minimálně kótovaného výkresu segmentové lopatky spočívá ve stanovení tolerance tvaru plochy, která platí pro všechny plochy volných tvarů digitálního modelu a stanovuje meze rozměrů dosažitelných využitím zvolené výrobní metody. Kótovány jsou rozměry, u kterých je požadováno dosažení přesnějších rozměrů, které nejsou dosažitelné zvolenou výrobní metodou. Na výkrese jsou navíc uvedeny informativní kóty základních rozměrů součásti.

3. Lopatkové kolo

Stejně jako u segmentové lopatky, data o rozměrech tvaru lopatky jsou obsažena v digitálním modelu, pokud je pro účel použití dostatečná tolerance tvaru plochy lopatek $\pm 0,7$ mm, není nutné vztahovat další informace k tvaru lopatkového kola. Pro lopatkové kolo je vytvořen minimálně kótovaný výkres, obsahující pouze tři kóty, jedná se kóty informační základních rozměrů a o kótu otvoru v ose kola, která je funkčním rozměrem uložení lopatkového kola. Pro tento otvor je zapotřebí předepsat jemnější toleranci. Pro tvorbu minimálně kótovaného výkresu lopatkového kola je vzhledem k počtu volných tvarových ploch modelu využít stejný přístup jako u předešlého výkresu.

K modelům byly vytvořeny technické výkresy podle výše zmíněných popisů. Technické výkresy jsou dostupné k nahlédnutí v podobě přílohy této bakalářské práce.

Dosažené výsledky je také možné interpretovat v podobě PMI ve vytvořených digitálních modelech, místo technických výkresů a využít tak přístupu bezvýkresové dokumentace, o které bylo zmíněno v kapitole 1.2.

3 Diskuse

Pro navržený přístup k tvorbě minimálně kótovaných výkresů součástí obsahujících exaktní i volné tvarové prvky jsou analyzovány experimentální modely a zjištěny hodnoty odchylek od teoreticky přesného modelu. Analytickou metodou jsou zvoleny tolerance pro volné tvarové plochy modelů. Tyto tolerance stanovují rozmezí hodnot rozměrů dosažitelných výrobou využitím aditivních technologií. Mimo rozměry s informativními kótami jsou poté s využitím tohoto přístupu kótovány všechny rozměry, u kterých je pro zachování jejich funkce požadována přesnější tolerance, které nelze dosáhnout zvolenou metodou výroby. Tímto je na výkresech stanoveno, které rozměry je zapotřebí podrobit úpravám pomocí jiné metody výroby (nejčastěji obrábění). Pokud chceme dosáhnout určitých tolerancí, využitím zvolené metody, je zapotřebí tomu předem uzpůsobit návrh modelu podle zjištěných limitací. Návrh k přístupu vytváření minimálně kótovaných výkresů může sloužit k přípravě standardu, který ulehčí komunikaci mezi návrháři a technology výroby.

Experimentální měření se váže ke konkrétním stanoveným parametrům tisku a zároveň podléhá podmínkám okolí při provádění experimentu, jejichž změnou je možno dosáhnout odlišných výsledků anebo naopak potvrdit výsledky dosažené v této bakalářské práci.

Navázat na výzkum této bakalářské práce, lze tiskem více vzorků experimentálních modelů s nastavením odlišných parametrů tisku a porovnání získaných výsledků mezi sebou a s výsledky této práce. Analyzováním a porovnáváním výsledků volně tvarovaných ploch po 3D skenování za odlišných světelných podmínek nebo využitím jiného druhu 3D skeneru, či odlišnou metodou reverzního inženýrství.

Při analyzování odchylek lopatkového kola jsou zřetelné rozdíly v hodnotách odchylky na základě umístění jednotlivých měřených bodů. Analýzou bylo zjištěno, že plochy lopatek se nejvíce blížili teoreticky přesným hodnotám, naopak přechodových v oblastech mezi plochami složitějšího tělesa byly generovány na polygonálním tělese velmi nepřesné oblouky, které výrazně ovlivňují celkové výsledky. Místo analyzování experimentálního modelu jako celku je potenciál dalšího bádání v rozdělení zkoumaných ploch na určité geometrické segmenty a v podrobném zkoumání vzniklých odchylek ve vybraných částech modelu a porovnávání těchto segmentů.

Závěr

Pro analytický rozbor byly navrženy tři tvarově odlišné modely v modelovacím softwaru NX, s využitím odlišných modelovacích metod. Tyto modely byly vytištěny na 3D tiskárně Ultimaker 3 se shodným nastavením parametrů tisku. Pro experimentální modely byl zvolen materiál tiskového filamentu PLA. Parametry byly stanoveny na základě získaných odchylek mezi porovnávanými teoreticky přesnými a skutečnými rozměry, využitím dvou analytických metod.

První metodou byly měřeny exaktní tvary experimentálního modelu měřícím mikroskopem. Při měření 25 rozměrů na dvou materiálově odlišných vzorcích, byl zjištěný rozsah naměřených odchylek 0,01 - 0,93 mm. Jelikož se měřené rozměry pohybují v rozmezí 2,5 - 10 mm, byla předepsána velmi hrubá přesnost nekótovaných rozměrů (ISO 2768 - v). Dále bylo zjištěno, že u 21 z 25 měřených rozměrů vyšel vzorek z PLA s výrazně menšími odchylkami od teoreticky přesného modelu oproti vzorku z AlSi10Mg.

Pomocí druhé metody byly zjišťovány odchylky volně tvarovaných ploch těles, využitím analytických funkcí ve programu NX. Tato metoda byla využita pro dva modely reprezentující tělesa volných tvarů. Pro výpočet odchylek byly plochy experimentálního modelu převedeny do digitální podoby ve formě polygonálního tělesa využitím metody 3D skenování. Využíváním funkce pro měření odchylky byla získána data o četnosti měření pohybujících se ve stanovených mezních hodnotách. Na základě těchto dat byly stanoveny tolerance tvaru plochy pro oba modely. V případě modelu segmentové lopatky byla stanovena tolerance tvaru plochy na $\pm 0,3$ mm. Při nastavení této tolerance se bude 96,08% z naměřených hodnot nacházet v tolerančním prostoru tělesa. U modelu lopatkového kola byla tolerance tvaru plochy stanovena na hodnotu $\pm 0,7$ mm. Tento rozdíl je zapříčiněn větší složitostí tohoto tělesa. Při nastavení tolerance se bude 95,95% z naměřených hodnot nacházet mezi ekvidistantními plochami tolerančního prostoru tělesa.

Na základě naměřených hodnot byly vyhotoveny technické výkresy tištěných modelů. U modelů volných tvarů, byly vytvořeny minimálně kótované výkresy, obsahující pouze dodatečné informace a kóty nezbytné pro post-processingové úpravy rozměrů, kterých nelze dosáhnout zvolenou metodou výroby. Pro model, který reprezentuje objekt složený z exaktních tvarů byl, na základě získaných výsledků, vytvořen technický výkres s předepsanou velmi hrubou přesností všeobecných tolerancí. Pokud by požadavky na výrobek byly vyšší, musí být výrobek podroben dalším úpravám na základě požadovaných výsledných hodnot, a proto je vhodné vytvořit výkres s uvedením všech důležitých kót pro tyto úpravy a technickém výkrese.

Poznatky získané z experimentálních měření lze využít pro další výzkumy zabývající se zkoumáním rozměrů a ploch modelů vytvořených pomocí aditivních technologií.

Seznam použité literatury

- BRIŠ, Radim, 2007. 1. MODEL A MODELOVÁNÍ [online]. 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava 8 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%20II/skriptum/1_Modely_a_modelovani.PDF. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- BUDÍKOVÁ, Marie, 2016. Modely a modelování [online]. Kotlářská 2, Brno [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/jaro2016/M6444/um/61762308/prednaska1.pdf>. Studijní materiál. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI, 2017. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press. ISBN 978-802-5148-761.
- Tvorba vlastních 3D modelů, 2022. Prusa3D [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/tvorba-vlastnich-3d-modelu_2209
- FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA, 2007. In: Autodesk Inventor: funkční navrhování v průmyslové praxi. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, s. 22-23. Učebnice (Computer Press). ISBN 9788025117736.
- Take a deep dive into direct modeling – What is direct modeling?, c2002-2024. Dassault Systèmes [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/store/cad/direct-modeling>
- Parametric vs Direct vs synchronous CAD Modeling Techniques, 2020. SMLease Design [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.smlease.com/entries/cad/types-of-cad-modeling-parametric-direct-and-synchronous-modeling/>
- Siemens [online], c2024. [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/>
- Aditivní výroba, c2024. Siemens [online]. [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/cs-CZ/nx/manufacturing/additive-manufacturing/>
- Metoda pro přesné a snadné měření plochy povrchu, c2024. KEYENCE CORPORATION. KEYENCE INTERNATIONAL [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/ss/products/microscope/measurement-solutions/surface-area.jsp>
- Technická dokumentace a EU prohlášení o shodě, 2023. Your Europe [online]. [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/compliance/technical-documentation-conformity/index_cs.htm
- MLČÁK, Tomáš, 2017. Rozdělení technické dokumentace [online]. 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava 8 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~mlc37/TD_FEI/2_Rozdel.pdf. Studijní materiál. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- NECHVÁTAL, Filip, 2013. Bezvýkresová dokumentace – nastupující realita. CAD [online]. [cit. 2024-04-03]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/pdmplm/86-pdmplm/4632-bezvykresova-dokumentace-nastupujici-realita.html>

- KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT, 2007. Technické kreslení. 2., opr. vyd. Brno: Computer Press. Učebnice (Computer Press). ISBN 978-802-5118-870.
- HERRON, 2021. Why Aren't There Basic Dimensions in MBD? Action Engineering [online]. [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.action-engineering.com/blog/why-arent-there-basic-dimensions-in-mbd/>
- LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA, 2008. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra. ISBN 978-807-3610-517.
- PETR, Karel, 2023. ISO 22081:2021 – Všeobecné/Obecné geometrické tolerance dle ISO GPS – ČÁST 1 a 2. Školení v oblasti ISO GPS a TPD [online]. [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.skoleniisogps.cz/tag/iso-gps/>
- KIVOLYA, Natalia, 2019. What are 3D scanners used for? Artec 3D [online]. [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/what-are-3d-scanners-used-for>
- HUBÁČEK, Ondřej, c2022. Co je 3D skenování a k čemu ho využijete. For3Dtisk [online]. [cit. 2024-03-04]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/co-je-3d-skenovani-a-jak-funguje-blog/>
- 3D / CT skenování, [2024]. SOLIDVISION. 3D SCAN [online]. [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/>
- ZUZA, Mikolas, 2018. Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. Josef Průša [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- ZUZA, Mikolas, 2018. Fotogrammetrie 2 – 3D skenování jednodušší než kdy dřív!. Prusa Research [online]. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/fotogrammetrie-2-3d-skenovani-jednodussi-nez-kdy-driv_29393/

Přílohy

A CAD Modely

A.1 Model multifunkčního kalibru

A.2 Model segmentové lopatky

A.3 Model lopatkového kola

B Technické výkresy

B.1 Výrobní výkres multifunkčního kalibru

B.2 Výrobní výkres segmentové lopatky

B.3 Výrobní výkres lopatkového kola