VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KONTROLA KVALITY VSTŘIKOVANÝCH PLASTŮ POMOCÍ RENTGENOVÉ POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE
QUALITY CONTROL OF INJECTION MOLDED PLASTICS USING X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Erik Figar
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	**Bc. Erik Figar**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.**
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kontrola kvality vstřikovaných plastů pomocí rentgenové počítačové tomografie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní počítačová tomografie umožňuje nedestruktivní přístup k vnitřní struktuře výrobku. Použitím této technologii společně s vhodným softwarem lze analyzovat vybrané vlastnosti výrobků pomocí rozměrových měření, či aplikováním pokročilých analýz vnitřní struktury. Díky tomu lze nalézt specifické defekty, realizovat třídění zmetků a navrhovat úpravy parametrů výroby.
Diplomová práce bude věnována nedestruktivní zkoušce vybraného plastového dílce ve spolupracující firmě s podporou laboratoře Rentgenové počítačové mikro a nanotomografie na CEITEC VUT v Brně.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu řízení kvality vstřikování plastů ve vybrané firmě.
Systémový rozbor hodnocení kvality plastového výrobku.
Posouzení možností využití počítačové mikrotomografie při měření rozměrů, posuzování porezity a případného návrhu korekcí forem.
Aplikace vybraných metod na zvoleném výrobku a příslušné formy.
Technické posouzení dosažených výsledků.
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů. Brno: Sekurkon, 2007. ISBN 978-80-86604-36-7.

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

HSIEH, Jiang. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 2003. ISBN 0-8194-4425-1.

KAK, Avinash C. and Malcolm SLANEY. Principles of computerized tomographic imaging. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001. ISBN 978-0898714944.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá použitím technologie rentgenové počítačové tomografie pro komplexní analýzu plastových výrobků při řízení jejich kvality. Předmětem analýz byly dva různé druhy plastových výrobků, které byly společně s výkresovou dokumentací a CAD modely dodány od dvou výrobců. Výrobky byly analyzovány na základě jejich kvalitativních požadavků. Jednalo se o kontrolu tvarové přesnosti a vyhodnocení vnitřní porozity, jejíž výsledky byly číselně i graficky vyjádřeny. Dále došlo u zájmových oblastí výrobku, které nebyly ve shodě s požadovanými tolerancemi, k otestování nového modulu softwaru VGStudio Max pro korekci vstřikovacích forem a byly navrženy korekce vstřikovací formy. V závěru proběhlo porovnání výsledků dvou analýz vnitřní porozity aplikovaných na stejném výrobku s různým voxelovým rozlišením, které ukazují složitost této problematiky a důležitost volby voxelového rozlišení.

ABSTRACT

This Master‘s thesis deals with an aplication of computed tomography as the technology for quality control check of the plastic parts made by the injection molding process. The analyses were performed on two different types of plastic parts. These parts were delivered by two companies and they included the drawing documentation and CAD models. These plastic parts were analyzed according to their qualitative requirements. The analyses included evaluation of the geometric tolerances and porosity analysis with numerical and graphical evaluation. The new module for tool correction ,which is part of VGStudio Max, was tested on parts that were not in accordance with the required tolerances. Afterwards the new corrected geometries were exported. At the end of this Master’s thesis the porosity comparison was assessed between two different voxel resolution CT data. This comparison shows the complexity of this phenomenon and the importance of voxel resolution settings.

KLÍČOVÁ SLOVA

Počítačová tomografie, vstřikování plastů, analýza vnitřní porozity, rozměrové měření, korekce vstřikovacích forem.

KEYWORDS

Computed tomography, injection molding, porosity analysis, coordinate measurement, tool correction.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FIGAR, E. *Kontrola kvality vstřikovaných plastů pomocí rentgenové počítačové tomografie*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2020, 75 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Róbertovi Jankových, CSc. za věcné připomínky a trpělivost s vedením mé práce. Rovněž bych rád poděkoval zejména Ing. Tomášovi Zikmundovi, Ph.D za cenné a odborné komentáře. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, své partnerce a přátelům, kteří při mně stáli a podporovali mě po celou dobu mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Róberta Jankových, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne ……

Bc. Erik Figar

OBSAH

ÚVOD **15**

MOTIVACE **16**

1 ŘÍZENÍ KVALITY **19**
1.1 Management kvality 19
1.1.1 Principy managementu kvality 20
1.1.2 Trvalé zlepšování 20

2 SYSTÉMOVÝ ROZBOR HODNOCENÍ KVALITY PLASTOVÝCH VÝROBKŮ **21**
2.1 Technologie vstřikování plastů 21
2.1.1 Materiály vhodné pro technologii vstřikování 22
2.1.2 Konstrukce plastového dílu 22
2.1.3 Výroba vstřikovací formy 24
2.1.4 Smrštění 25
2.2 Konvenční metody pro hodnocení kvality plastových výrobků 26
2.2.1 Kontrola rozměrů a tvarové přesnosti plastových výrobků 26
2.2.2 Povrchové vady plastových výrobků 27
2.2.3 Vnitřní vady plastových výrobků 28
2.2.4 Další hodnocení kvality 28

3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE PRO KONTROLU KVALITY PLASTOVÝCH VÝROBKŮ **29**
3.1 Rentgenová počítačová tomografie 29
3.1.1 Princip rentgenové počítačové tomografie 30
3.1.2 Reprezentace dat – voxelová mřížka 31
3.1.3 Faktory ovlivňující měření 32
3.1.4 Tomografické artefakty 32
3.1.5 Kalibrace CT přístrojů 34
3.2 Analýza tomografických dat 34
3.2.1 Určení povrchu naměřeného vzorku 35
3.2.2 Rozměrové měření 35
3.2.3 Tloušťka stěn 36
3.2.4 Porovnání s nominálním objektem 36
3.2.5 Porozita 36
3.2.6 Vlákny zpevněné kompozity 37
3.2.7 Korekce forem 38

4 PRAKTICKÁ ČÁST **39**
4.1 Vybrané plastové výrobky 39
4.1.1 Plastový výrobek Inlet Tank 39
4.1.2 Plastový výrobek Cog Wheel 41
4.2 CT měření 42
4.2.1 Laboratoř rentgenové počítačové mikrotomografie na CEITEC VUT v Brně 42
4.2.2 Příprava vzorků 43
4.2.3 Kalibrace 44

4.2.4 Parametry měření ... 45
4.2.5 Rekonstrukce tomografických dat ... 45
4.3 Vyhodnocení plastového výrobku Cog Wheel ... 46
4.3.1 Proces softwarového zpracování výrobku ... 46
4.3.2 Určení povrchu naskenovaných CT dat ... 47
4.3.3 Registrace dat ... 47
4.3.4 Porovnání s nominálním CAD modelem ... 48
4.3.5 Kontrola geometrických tolerancí ... 49
4.3.6 Objemová analýza vnitřní porozity ... 50
4.3.7 Zhodnocení výsledků kontroly kvality výrobků Cog Wheel ... 53
4.4 Analýza plastového výrobku Inlet Tank ... 54
4.4.1 Proces softwarového zpracování výrobku ... 54
4.4.2 Určení povrchu naskenovaných dat ... 55
4.4.3 Registrace dat ... 55
4.4.4 Porovnání s nominálním CAD modelem ... 56
4.4.5 Kontrola geometrických tolerancí ... 56
4.4.6 Návrh korekce vstřikovací formy ... 57
4.5 Vliv voxelového rozlišení na výsledky analýzy vnitřní porozity ... 61
5 ZHODNOCENÍ A DISKUZE ... 66
6 ZÁVĚR ... 67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ... 68
SEZNAM OBRÁZKŮ ... 71
SEZNAM PŘÍLOH ... 75

ÚVOD

Kvalita výrobků je zcela zásadním faktorem pro udržitelnost a růst firmy, která se jeho výrobou zabývá. Z tohoto důvodu je taktéž důležitá kontrola kvality výrobku společně s hledáním efektivních řešení a neustálá snaha o zlepšování.

Za účelem kontroly kvality se využívá mnoho různých měřidel a různých vyhodnocovacích metod. Tyto metody vyhodnocování kvality výrobku jsou závislé na funkci daného výrobku a od ní odvozených kvalitativních požadavků. Nejčastěji se jedná o kontrolu tvarové přesnosti dle předepsaných tolerancí, jenž se realizuje obvykle pomocí konvenčních měřicích metod.

Jednou z možností kontroly kvality výrobků je moderní rentgenová počítačová mikrotomografie. Tato technologie, jakožto univerzální měřicí metoda, umožňuje nedestruktivní přístup nejen k rozměrům daného výrobku, ale také k vnitřní struktuře výrobku. Společně s vhodným softwarem lze pak výrobek komplexně analyzovat, ať už z hlediska rozměrových měření, vnitřní porozity, nebo aplikováním dalších pokročilých analýz.

Počítačová tomografie se často využívá pro kvalitativní vyhodnocování vstřikovaných plastů. Většina těchto výrobků je vhodná pro měření prostřednictvím této technologie a jsou tak získány potřebné informace o navrhovaných či vyráběných výrobcích, na základě kterých je pak možné schvalovat či upravovat výrobní proces pro dosažení lepších výsledků.

V současné době se začínají v počítačové tomografii vedle běžných analýz testovat také moderní softwarové nástroje pro korekce vstřikovacích forem plastových výrobků. Tyto nástroje tak ve spojení s běžnými tomografickými analýzami zajišťují komplexní analýzu kvality výrobku spolu s návrhem korekcí, které vedou ke zlepšení kvality výrobků. Pomocí rentgenové počítačové tomografie je tak možné komplexně kontrolovat plastové výrobky a dodat zpětnou vazbu pro řízení kvality v dané firmě.

První kapitola (1) diplomové práce se zabývá obecným úvodem do problematiky kontroly kvality, kde jsou představeny hlavní principy jejího managementu. Druhá kapitola (2) rozebírá možnosti kontroly kvality plastových výrobků. V této kapitole jsou také popsány základní principy pro výrobu plastových výrobků pomocí technologie vstřikování, jelikož se jedná o důležité faktory, které je při kontrole kvality těchto výrobků nutné zohlednit. Třetí kapitola (3) vysvětluje základní principy rentgenové počítačové tomografie, která je jednou z možných měřicích metod plastových dílů. Tato rešerše zahrnuje také obvyklé problémy počítačové tomografie jako jsou tomografické artefakty, popisuje způsob rekonstrukce a následné interpretace tomografických dat a v neposlední řadě představuje možnosti softwarového zpracování s použitím základních i pokročilých analýz. Diplomová práce pokračuje praktickou částí, která popisuje postup tomografického měření výrobků, jejich následné softwarové zpracování a vyhodnocení.

MOTIVACE

Díky působení v laboratoři rentgenové počítačové mikrotomografie se denně setkávám s požadavky na vyhodnocení kvality plastových výrobků, především z pohledu rozměrového měření a vyhodnocení vnitřní porozity.

V tomto odvětví se nyní v počítačové tomografii objevuje trend korekcí vstřikovacích forem. Toto softwarové řešení navazuje na vyhodnocení plastových výrobků pomocí počítačové tomografie a nabízí možný efektivní způsob pro následné úpravy vstřikovací formy.

Hlavní motivací této práce byla tedy možnost detailního komplexního vyhodnocení plastových dílů ve spolupráci s průmyslovými partnery, kde bude následně možné otestovat softwarové možnosti zpracování zahrnující i nové softwarové řešení pro návrh korekcí vstřikovacích forem.

Cíle diplomové práce:

1. popis současného stavu řízení kvality vstřikování plastů ve vybrané firmě,
2. systémový rozbor hodnocení kvality plastového výrobku,
3. posouzení možností využití počítačové mikrotomografie při měření rozměrů, posuzování porezity a případného návrhu korekcí forem,
4. aplikace vybraných metod na zvoleném výrobku a příslušné formy,
5. technické posouzení dosažených výsledků a vlastní závěry a doporučení pro praxi,

byly dle pokynů vedoucího diplomové práce a dle požadavků průmyslových partnerů plněny následovně.

- Realizace tomografického měření dvou plastových výrobků v závislosti na jejich materiálu, velikosti, tvaru, apod. Tato měření jsou požadována za účelem kontroly kvality výrobků jako prototypu pro budoucí velkosérii. Plastové výrobky společně se souvisejícími materiály poskytly k dispozici společnost Hanon Systems a BRANO GROUP, a.s. Výrobky se od sebe liší nejen tvarem a velikostí, ale také požadavky k jejich kontrole.
- Návrh vhodného postupu softwarového vyhodnocení pro každý výrobek zvlášť. Každý výrobek má jinou funkci a jsou tak na něj kladeny odlišné kvalitativní požadavky. Je nutné tedy navrhnout vhodný postup odlišný pro každý výrobek v závislosti na jeho požadavcích.
- Realizace softwarového vyhodnocení, tedy vyhodnocení tvarové přesnosti dle požadovaných tolerancí a analýza vnitřní porozity vyjádřena graficky i číselně.
- V případě nedodržení tolerančních hodnot při tvarové kontrole otestovat nový modul pro korekci vtřikovacích forem. Tento modul se jeví jako možné řešení pro snížení nákladů při obvyklých několikacyklových korekcích vstřikovacích forem a toto otestování by bylo použito při dalších diskuzích s průmyslovými partnery.
- Analýza dopadu voxelového rozlišení skenu a na vyhodnocení vnitřní porozity. Jedná se o širokou problematiku, která v oblasti počítačové tomografie hraje významnou roli při hodnocení vnitřní porozity.

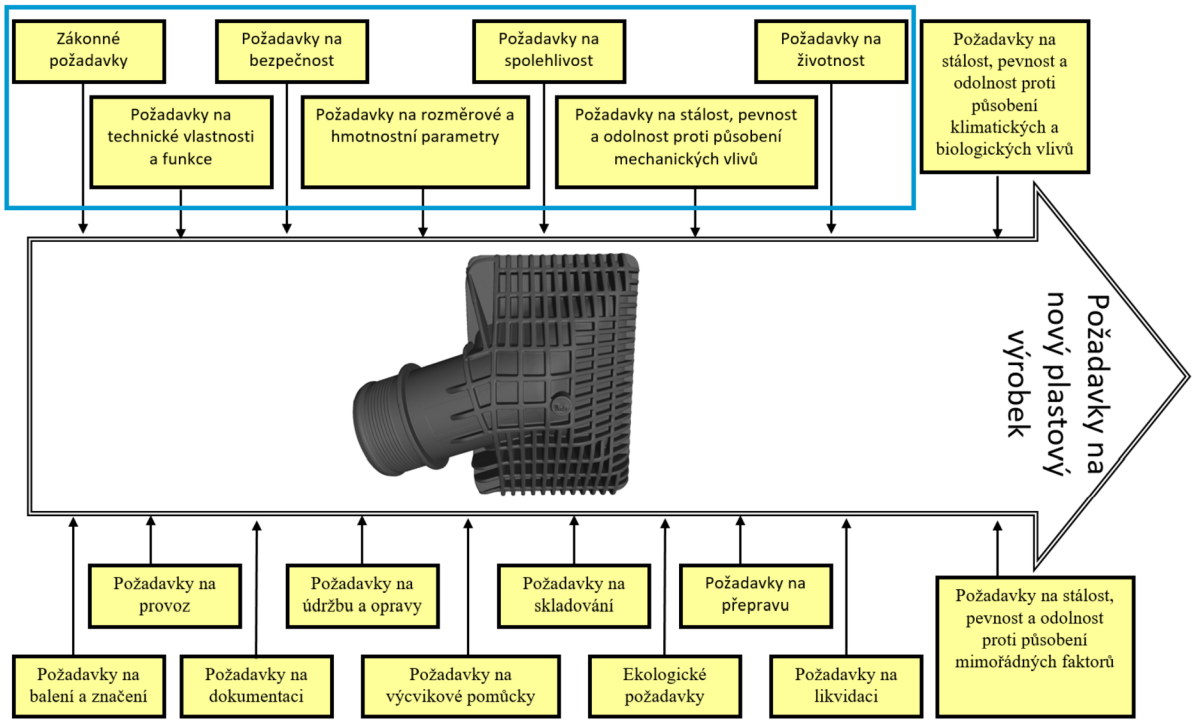
1 ŘÍZENÍ KVALITY

Kvalita je v posledních desetiletích velice často zmiňovaný pojem, objevující se v řadě odvětví. Definice tohoto pojmu bývá různě interpretována, lze ale říci, že se jedná o soubor inherentních vlastností, které dávají danému výrobku možnost plnit definované nebo předpokládané požadavky zákazníka a také požadavky dané závaznými předpisy. Tyto požadavky mohou být velice individuální v závislosti na daném výrobku a odvětví. [17]

1.1 Management kvality

Řízení kvality je široká problematika, kterou se zabývá norma ČSN EN ISO 9000:2015. Tato problematika zasahuje téměř do všech firemních procesů. Pro dosažení požadované kvality je obvykle nutné začít plánováním. Plánem se rozumí určitý záměr, jakým způsobem chce daný subjekt (firma, instituce, jednotlivec, …) dosáhnout stanovených cílů. Tyto plány se mohou výrazně lišit formou zpracování, od ústní dohody až po formální dokument schválený vedením společnosti. Plánování je tedy prvním krokem pro dosažení požadované kvality. Pro samotné řízení kvality se pak používají různé metody a přístupy. Záměry pro zavedení těchto metod jsou obvykle: standardizace postupů, bezpečnost práce, zvýšení efektivity, snížení nákladů, obdržení certifikátu, apod. Pro správnou funkci managementu kvality je nutná také kontrola kvality daných procesů. Toto se provádí mnoha různými způsoby, od kontroly jednotlivých procesů až po komplexní kontrolu splnění požadavků daného výrobku. Poslední, avšak neméně důležitou částí managementu kvality, je jeho trvalé zlepšování. [17], [18]

Tato diplomová práce se zabývá kontrolou kvality plastových výrobků na základě jejich funkčních požadavků. Toto je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1: Grafické znázornění řízení kvality plastového výrobku. modře jsou vyznačeny požadavky související s tématem diplomové práce.

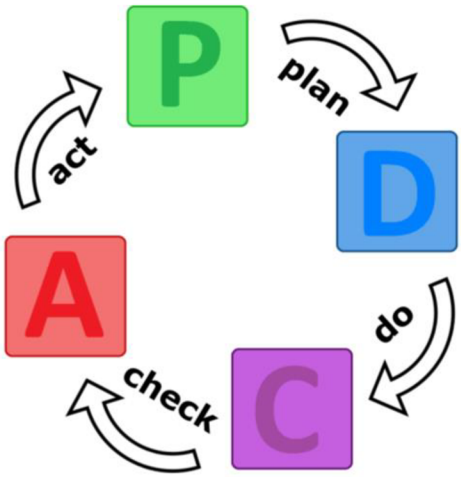
1.1.1 Principy managementu kvality

V oblastí řízení kvality existuje alespoň jedenáct všeobecně respektovaných základních principů, jimiž jsou [21], [22] :

- zaměření na zákazníka,
- vůdcovství,
- zapojení zaměstnanců,
- učení se,
- flexibilita,
- procesní přístup,
- systémový přístup managementu,
- neustálé zlepšování,
- management na základě faktů,
- vzájemně prospěšné vztahy s dodavateli,
- společenská odpovědnost.

1.1.2 Trvalé zlepšování

V rámci managementu kvality je nutné dbát na neustálé zlepšování, kterým se zabývá norma ČSN EN ISO 9001:2016. Firmy s fungujícím managementem kvality, který zahrnuje jeho trvalé zlepšování, dosahují obvykle dlouhodobě lepších výsledků oproti konkurenci, která managementem kvality nedisponuje, nebo její management není na dostačující úrovni. V procesu neustálého zlepšování je známá cyklická metoda PDCA (z anglického plan-do-check-act, neboli plánuj-dělej-kontroluj-jednej), neboli Demingův cyklus [23]. Tento cyklus je graficky znázorněn na Obr. 2. Tato metoda reprezentuje snahu neustálého zlepšování, které je založeno na cykličnosti, tedy poučení a zohlednění neustále nových poznatků. V rámci trvalého zlepšování probíhají jednoduché úpravy procesů a drobná vylepšení, může se však jednat i o celkové nahrazení jednoho či více procesů. [23]



Obr. 2: Diagram PDCA cyklu.

2 SYSTÉMOVÝ ROZBOR HODNOCENÍ KVALITY PLASTOVÝCH VÝROBKŮ

V této kapitole jsou shrnuty zásadní konstrukční principy vstřikování plastů a faktory ovlivňující výslednou kvalitu výrobku. Tyto principy jsou důležité v souvislosti s cíli diplomové práce a s požadavky průmyslových partnerů.

Pro rozbor hodnocení kvality plastového výrobku je nutné nejprve porozumět procesu jeho výroby. Od návrhu konstrukce výrobku, přes zvolený materiál, až po samotný proces vstřikování. Napříč všemi těmito etapami se vyskytuje velké množství parametrů, které ovlivňují výslednou kvalitu výrobku.

Při vyhodnocování kvality daného výrobku hodnotíme především dvě zásadní kritéria - shodu s funkčními požadavky daného výrobku a shodu rozměrové a tvarové přesnosti s danými tolerancemi.

Funkční požadavky plastových výrobků se individuálně výrazně liší. Kontrola funkční kvality daného výrobku tak může být zpracována mnoha různými procesy a tato funkční shoda je nedílnou součástí kontroly kvality plastového výrobku.

Metrologickou část hodnocení kvality výrobku lze provádět mnoha různými metodami s odlišnými měřícími přístroji. Z hlediska metrologie hodnotíme především rozměrové a geometrické tolerance výrobku. Tato měření lze provádět na mnoha měřidlech, ať už konvenčních, nebo univerzálních. [1], [3]

2.1 Technologie vstřikování plastů

Pro systémový rozbor hodnocení kvality plastového výrobku je nutné zhodnotit také výrobní proces a parametry, které ho ovlivňují.

Technologie vstřikování je technologie, při níž se potřebné množství materiálu ve formě taveniny vstřikuje pomocí šneku nebo pístu do uzavřené vstřikovací formy, kde ztuhne v konečný výrobek. Jedná se o nejpoužívanější technologii v oblasti termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, ale také kaučuků a pryží [3]. Výhodou této technologie je opakovatelnost procesů. Na jeden cyklus lze získat tvarově velmi složitý výrobek a jednotlivé cykly mohou mít velice malou časovou náročnost. Nevýhodou jsou vysoké náklady spojené s pořizovací cenou stroje, náklady na výrobu vstřikovacích forem a v neposlední řadě je nevýhoda také v náročnosti na technologičnost procesu. Z těchto důvodů je technologie vstřikování vhodná především pro velkosériovou výrobu.

Princip této technologie lze zjednodušeně popsat následovně. Materiál, nejčastěji v podobě granulí, je pomocí šneku či pístu dopravován do tavící komory, kde se díky tření a tepelnému zahřívání mění v taveninu. Tavenina je poté vstřikována do dutiny vstřikovací formy. Tuto dutinu tavenina zcela zaplní a získá její tvar. Následuje tzv. dotlak, který zajišťuje menší deformace při smrštění, ke kterému dochází při ochlazení taveniny. Po ztuhnutí taveniny a dosažení potřebné tvarové fixace je výrobek vyhozen z formy.

Výroba pomocí technologie vstřikování plastů je založena na dvou základních etapách - konstrukce výrobku a technologičnost výroby. Mezi těmito dvěma etapami je zapotřebí držet určitou úroveň kompromisů a spolupráce. Při konstrukci výrobku je tak nutné myslet nejen na funkci daného dílu, ale také na technologičnost jeho výroby. [1]

2.1.1 Materiály vhodné pro technologii vstřikování

Pro technologii vstřikování se používají polymery. Tyto polymery jsou tvořeny makromolekulami, které vznikají spojením základních prvků, merů. Makromolekuly jsou tedy spojité řetězce jednotlivých merů, které lze dále dělit dle struktury, či jiných vlastností. Základní rozdělení uvažuje dvě skupiny – plasty a elastomery [3]. Zásadní rozdíl mezi těmito dvěma skupinami je v chování materiálů po ochlazení, tzv. tvarové fixaci. Plasty se chovají jako tuhé těleso na rozdíl od elastomerů, které mají elastické vlastnosti. Základními materiály tedy jsou:

Termoplasty – jedná se o polymery, které od určité vyšší teploty získávají plastický až kapalný stav a po ochlazení se vrací do pevného stavu. Tento proces roztavení a následné tvarové fixace je možné opakovat. [2], [1]

Reaktoplasty – někdy zvané jako termosety. Jsou tvarovatelné za tepla, nicméně po vychladnutí a fixaci tvaru již není možné tento proces opakovat. Při dalších ohřevech totiž dochází k jejich degradaci. [2], [1]

Termoplastické elastomery – jsou to polymerní systémy, které spojují vlastnosti elastomerů (vysoká elastická deformace) a zpracovatelnost termoplastů (možnost opakovaně projít cyklem výroby – proces roztavení a ochlazení). [2], [1]

Vulkanizovatelné elastomery (pryže) – vyrábí se vulkanizací z kaučuku, který se mění na pryž. Tento proces, stejně jako u reaktoplastů, již není možné opakovat. Základní vlastností pryže jsou elastické deformace (100-500 %). Zajímavostí je, že deformace není přímo úměrná napětí. Tímto se pryže výrazně liší od ostatních materiálů. [24], [25], [19], [2], [1]

2.1.2 Konstrukce plastového dílu

Při konstrukci plastového dílu musí být splněny nejen požadavky funkční, ale také technologické. Při konstrukci plastového dílu je proto nutné držet se obecných zásad, aby nedocházelo k výrobním nedostatkům v podobě deformací a neshod rozměrových či tvarových tolerancí. [1]

Zaformovatelnost

Zaformovatelností rozumíme volbu optimální dělící roviny, aby požadovaný výrobek mohl být ekonomicky vyráběn, nejlépe v automatizované výrobě. S volbou dělící roviny by měli být obeznámeni také konstruktéři výrobku, jejichž řešení je v blízké souvislosti s řešením technologů. Při volbě dělící roviny musí být bráno v potaz, že místo, kde dochází k dělení jednotlivých částí formy, představuje pro plastový výrobek ostrou hranu. Konstrukce dílu by měla být v souladu s návrhem dělící roviny, která by měla využívat ostrých hran, jež v místě dělící roviny vzniknou. [1]

V zaformovatelnosti hrají svoji roli také úkosy, jež jsou nutné pro správnou odformovatelnost a zabránění smýkání povrchu plastového dílu po povrchu formy během jejího otvírání. Úkosy se zpravidla užívají u prvků výrobku, které ve formě tvoří slepé otvory (např. komínky, žebra, výztuhy). Užívají se také na všech površích, které jsou rovnoběžné se směrem odformování. Úkosy se volí dle mnoha různých faktorů a nelze tak jasně stanovit pravidla pro jeho použití. Standardně se však využívá obecného pravidla úhlu 1° + 1° na každých 0,02 mm hloubky nerovnosti povrchu. [20], [5]

Tloušťka stěn

Tloušťka stěn plastových výrobků se mnohdy značně liší. Toto je pro technologii vstřikování nežádoucí. Tloušťka stěn sice musí splňovat funkční požadavky, tzn. pevnost a tuhost, nicméně

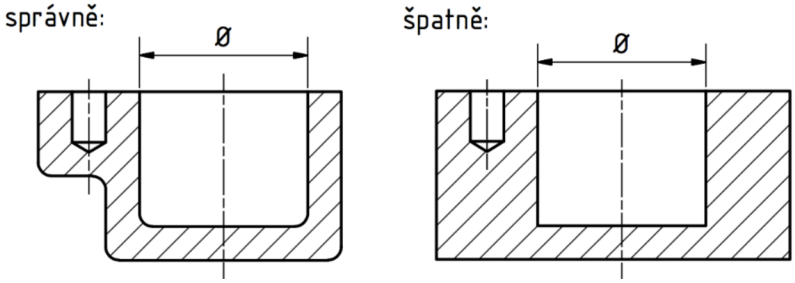
je nutné, aby splňovala také požadavky technologické. Tloušťka stěny je parametr, který z technologického hlediska nejvíce ovlivňuje kvalitu výsledného plastového výrobku. V závislosti na tloušťce stěny je pak nutné zvolit materiál se správnou tekutostí taveniny a optimalizovat i další parametry. [1]

Při nevhodné volbě tloušťky stěny nebo materiálu může docházet ke vzniku vakuových bublin, tzv. lunkrů. Lunkry vznikají nejčastěji v tlustostěnných výrobcích. Vznikají při tuhnutí taveniny, kdy povrch ve styku s formou ztuhne a vytvoří tak jakýsi tuhý obal, zatímco uvnitř se nachází stále horká tavenina. Při tuhnutí se tato tavenina smršťuje a není-li možnost doplnění tohoto objemu, vznikne vakuová bublina – lunkr. [2], [1]

Tyto lunkry je možné destruktivně detekovat a analyzovat pomocí rozříznutí dílu, případně jsou tyto lunkry lehce detekovatelné u transparentních dílů. Jako nedestruktivní možnost detekce vakuových bublin je možné využít např. počítačovou tomografii, díky které lze lunkry detekovat a následně i analyzovat. [3]

Možností, jak zabránit tvořením lunkrů, je několik. Především se jedná o již zmíněnou tloušťku stěn a volbu vhodného materiálu. Dále však je možné předejít tvorbě lunkrů pomocí optimalizace dalších parametrů, jako zvýšení průřezu vtoku, zvýšení teploty formy, prodloužení dotlaku, apod. [1], [2], [3],

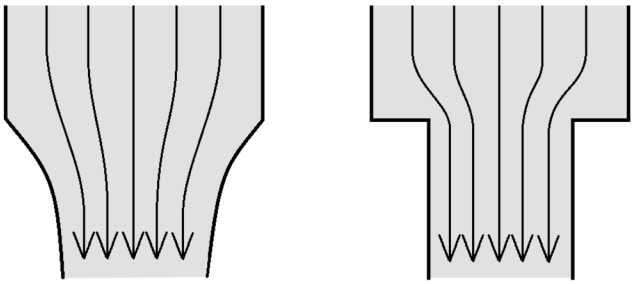
V mnoha případech, pokud to dovolují funkční požadavky výrobku, je nejvhodnější upravit konstrukci stěn a přizpůsobit tak jejich šířku v celém dílu podobných rozměrů (Obr. 3). [1], [2]



Obr. 3: Příklad konstrukční úpravy tloušťky stěny pro technologii vstřikování.

Zaoblení

Konstrukce plastového dílu by neměla obsahovat ostré rohy. V oblasti zhuštění proudnic dochází ke koncentraci napětí a tato koncentrace napětí se zvětšuje u rychlých změn průřezů (Obr. 4). Místa s ostrými hranami jsou těžce vyrobitelná a navíc je zde velké riziko tvorby defektů. Čím větší je zaoblení hran, tím menší je zde koncentrace napětí. Obecně se dodržuje pravidlo pro vnitřní stranu ostrého rohu, které udává 0,5 násobek tloušťky dané stěny. Vnější rádiusy jsou obvykle zvětšeny o tloušťku dané stěny, aby byla zachována stejná tloušťka stěny v celém jejím zakřivení. [5], [1]



Obr. 4: Znázornění zhuštění proudnic

Otvory

Otvory, které jsou v částech formy též nazývány jako jádra, se obvykle konstruují tak, aby byla ve směru odformování. V opačném případě je nutno formu vybavit tzv. pohyblivými jádry, což značně zvyšuje cenu, náklady na údržbu, technologické nároky, apod. Obecně platí, že poměr délky jádra a jeho průměru by neměl překročit poměr 3:1. Výjimku mohou tvořit tzv. podepřená jádra, pokud jsou podepřena z obou stran. Kvalitně podepřená jádra mají lepší odolnost vůči mechanickému namáhání od taveniny plastu, než jednoduše opřená o protilehlou stěnu dutiny formy. [20], [1]

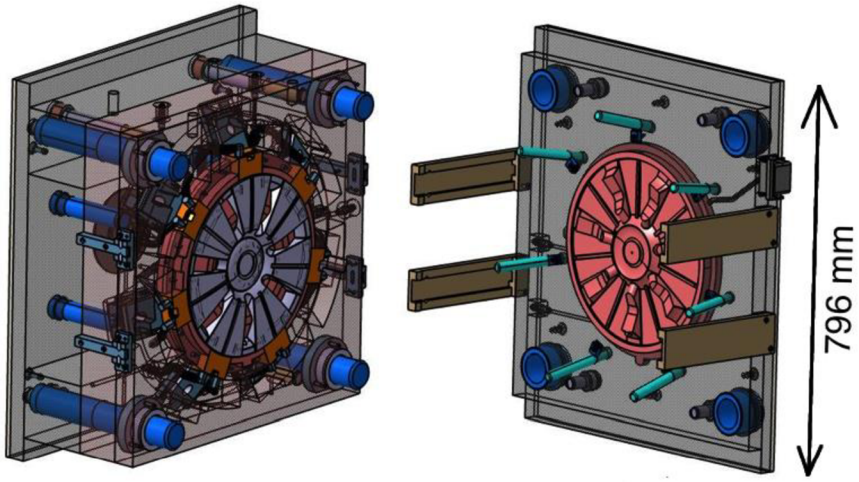
Další konstrukční prvky

Obecné zásady v oblasti technologie vstřikování lze nalézt pro mnoho dalších konstrukčních prvků. Tato doporučení napomáhají k tomu, aby výrobek dosahoval co nejvyšší kvality. Mezi další často se objevujícími konstrukčními prvky, při kterých by měl být kladen důraz na technologičnost, jsou ozubená kola, závity, žebra, záskočkové spoje, apod. [1]

2.1.3 Výroba vstřikovací formy

Při konstrukci a výrobě formy je nutné zohlednit velké množství požadavků, které vychází z technologie vstřikování plastů. Hlavní funkcí formy je zajištění výsledného tvaru výlisku včetně jeho tolerancí. Požadavky tvaru a tolerancí sebou obvykle nesou související požadavky (např. efektivní odvod tepla). Forma zároveň musí zajišťovat bezpečné a rychlé vyjmutí výlisku pro opakující se cyklus při sériové výrobě. [3], [20]

Vstřikovací forma se skládá z mnoha součástí. Obecně je možné tyto součásti rozdělit na tvářecí prvky, vtokový systém, temperační systém, vyhazovací systém, vodící elementy a upínací elementy. Před výrobou formy je nutné zhodnotit velké množství parametrů, na základě kterých bude forma navržena a vyrobena. Musí být navrhnut materiál formy, kde se obvykle používají konstrukční a nástrojové oceli, přičemž vznikají náklady na výrobu součástí formy z těchto materiálů. Dále pak musí být navrhnuty související systémy (vtokový systém, temperační systém, vyhazovací systém) a v neposlední řadě musí být vytvořena dutina, která udává tvar plastového výrobku. Vstřikovací formy jsou obvykle velice složité (Obr. 5), z důvodu požadavků na kvalitu, životnost, násobnost, opakovatelnost použití, apod. Z tohoto důvodu se často využívá simulačních softwarů a výroba vstřikovací formy je tak zdlouhavý a složitý proces. [3], [20]



Obr. 5: Příklad vstřikovací formy pro plastovou poklici kola automobilu. [15]

Kvalitní vstřikovací forma musí zajišťovat požadavky technické, ekonomické, funkční a ergonomické. Technické požadavky zajišťují správnou funkci formy, ekonomické požadavky zajišťují finanční návratnost a neméně důležité jsou požadavky ergonomické, které zajišťují snadnou manipulaci a tím i vysokou produktivitu práce. [3]

2.1.4 Smrštění

Smrštění je objemová změna, která se vyskytuje u všech plastových výrobků. Tato změna vzniká v důsledku ochlazení materiálu, kdy není zapotřebí působení vnější síly. Smrštění se obvykle posuzuje procentuálně:

$$S = \frac{X_f - X_v}{X_f} 100 \text{ [\%]}, \tag{1}$$

kde:

X_f – rozměr dutiny vstřikovací formy při teplotě 23° C [mm],

X_v – rozměr výrobku při teplotě 23° C [mm].

Procentuální vyjádření smrštění udává o kolik se rozměry plastového výrobku liší od rozměrů dutiny vstřikovací formy. Toto lze aplikovat také na určitou zájmovou oblast a vyhodnocovat lokální smrštění. [2], [4]

Na velikosti smrštění má vliv mnoho faktorů. Velikost smrštění nejvíce ovlivňuje samotný výběr materiálu, tedy polymer, který je do dutiny vstřikován. Dále jsou to pak téměř všechny technologické a konstrukční parametry. Tyto parametry navíc nelze hodnotit samostatně, jelikož se navzájem ovlivňují. Mezi nejvlivnější faktory pro smrštění patří:

Výběr materiálu – ovlivnění smrštění plastového výrobku začíná již samotným výběrem materiálu. Obecně se dá říct, že amorfní struktury mají menší smrštění než semikrystalické struktury. Na velikosti smrštění mají také výrazný vliv přísady, které se využívají pro více účelů (jako mazivo, stabilizátor, změkčovadlo, barvivo, ...). Jedním z účelů může být i snížení výsledného smrštění. [2]

Umístění vtoku – umístění vtoku výrazně ovlivňuje směr a proudění taveniny do dutiny formy. Tímto je ovlivněna orientace struktury materiálu, kde dochází k rozdílným smrštěním ve směru toku materiálu, nebo ve směru kolmém. [2]

Teplota vstřikovací formy – obecně lze říci, že při delším ochlazovacím čase vzniká větší smrštění. Smrštění však můžeme ještě rozdělit do dvou kategorií – výrobní smrštění a dodatečné smrštění. Při vyšších teplotách vstřikovací formy sice dochází ke většímu výrobnímu smrštění, nicméně dodatečné smrštění je poměrně malé. Naopak při nízkých teplotách vstřikovací formy nedochází k výraznému výrobnímu smrštění, dodatečné smrštění je ale výraznější. [2]

Teplota taveniny – teplota taveniny je obvykle provázána se vstřikovacím tlakem. I když by zvýšení teploty taveniny při konstantním tlaku vedlo ke zvýšení smrštění, při zvýšení teploty taveniny se obvykle navyšuje i vstřikovací tlak a ke zvýšení smrštění tak nedochází [2]

Vstřikovací tlak – jak vyplývá z textu výše, zvýšením vstřikovacího tlaku dochází ke snížení smrštění. Tlak však obvykle nebývá v celé dutině stejný a ve vzdálenějších oblastech od umístění vtoku materiálu tlak klesá. Tímto je způsobeno, že při zvýšení tlaku se smrštění eliminuje převážně v okolí vtoků. [2]

Dotlak – dotlak se využívá právě pro snížení smrštění. Zvýšení dotlaku a stejně tak jeho čas mají příznivý vliv na eliminaci výrobního smrštění. [2]

2.2 Konvenční metody pro hodnocení kvality plastových výrobků

Plastové výrobky vyrobené pomocí technologie vstřikování plastů mají poměrně velké množství parametrů, které ovlivňují jejich výslednou kvalitu. Konečné vlastnosti a celkovou kvalitu ovlivňuje materiál, konstrukce výrobku, konstrukce vstřikovací formy, technologické parametry a mnoho dalšího. Jednotlivé parametry navíc nepůsobí jen samostatně, ale ovlivňují se navzájem. [3], [6]

Hodnocení výsledné kvality výrobku lze zjednodušit na dvě hlavní kritéria – funkční požadavky a technologické požadavky. Hodnocení funkčních požadavků je velice individuální problematika. Zkoušky se mohou výrazně lišit u každého výrobku, dle jeho požadované funkce. Může se jednat o jednoduchou funkční zkoušku, jako ověření funkce záskočkového spoje, ale mohou obsahovat také technologické zhodnocení, které je spojeno s funkcí výrobku (tahová zkouška, cyklické zatěžování, měření drsnosti povrchu, ...) [3], [6]

2.2.1 Kontrola rozměrů a tvarové přesnosti plastových výrobků

Jednou z nejčastěji kontrolovaných kvalitativních vlastností plastového výrobku jsou beze sporu jeho rozměry a tvarová přesnost. K rozměrovým měření lze využít mnoho konvenčních měřidel či celých měřících systémů.

Měřidla délkových rozměrů

Délkové rozměry lze měřit mnoha druhy měřidel. Při měření délek základními měřidly délkových rozměrů by mělo být dodrženo několik zásad. Přesnost měřidla by měla být alespoň o řád vyšší než požadovaná přesnost měřeného rozměru. Měřidla by také měla mít minimální teplotní roztažnost a otěruvzdornost, aby byla zaručena co největší možná přesnost a opakovatelnost měření. [14]

Délková měřidla se využívají k měření vnějších i vnitřních rozměrů. Dělí se do několika kategorií: měřidla pevná, měřidla s přímým odečítáním rozměru, úchylkoměry, měřidla komparační, měřidla univerzální. [14]

Měření tvarové přesnosti

Skutečné výrobky mají vždy více či méně tvarovou nepřesnost vůči teoretickému výrobnímu tvaru. Rozdíly v této tvarové nepřesnosti definují geometrické úchylky. Dle normy ČSN 01 4401 rozlišujeme základní geometrické tolerance pro tvarové nepřesnosti. Tyto geometrické tolerance a jejich popis jsou znázorněny v tabulce č. 1. Pro vyhodnocení těchto tvarových tolerancí se používají speciální zařízení. Obvykle lze ale všechny tvarové geometrické úchylky měřit na souřadnicových měřících strojích. [12]

Tab. 1: Geometrické tolerance tvaru. [12], [13]

Název	Značka	Popis
Přímost		Tolerance vyhovuje v případě, kdy skutečná kontura leží ve 2 rovnoběžných přímkách, jejichž vzdálenost uvádí tolerance.
Rovinnost		Tolerance vyhovuje v obdobném případě jako u přímosti. Jedná se ale o roviny místo přímek.
Válcovitost		Tolerance vyhovuje v případě, kdy válcová plocha leží mezi dvěma soustřednými válci. Rozdíl průměrů udává hodnota tolerance.

Kruhovitost		Tolerance vyhovuje v případě, kdy kruhový profil leží mezi dvěma soustřednými kružnicemi. Rozdíl průměrů udává hodnota tolerance.
Tvar profilu		Tolerance vyhovuje v případě, kdy skutečný profil leží mezi dvěma konturami. Vzdálenost mezi konturami určuje hodnota tolerance.
Tvar plochy		Tolerance vyhovuje v případě, kdy skutečná plocha leží mezi dvěma ekvidistantními plochami. Vzdálenost mezi těmito plochami určuje hodnota tolerance.

Souřadnicové měřící stroje

Souřadnicové měřící systémy nabízí několik výhod oproti jednoduchým měřidlům. Ve srovnání s odečítáním naměřených hodnot z jednoduchých měřidel, což je poměrně zdlouhavé, představují souřadnicové měřící systémy (s možností automatického zápisu naměřených hodnot) značný pokrok.

Principy souřadnicových měřících systémů jsou založeny na stanovení základního bodu v prostoru, a následného odečtení ve třech ortogonálních osách X, Y, Z. Určení základního bodu v prostoru, od kterého jsou následné měření odečítány, je obrovskou výhodou oproti jednoduchým měřidlům.

Další velkou výhodu představují možnosti napojení souřadnicových měřících systémů na systémy CAD/CAM/CAQ. Díky tomu lze na základě nominálního CAD modelu a příslušných tolerancí vyhodnotit tvarové odchylky výrobku.

I když jsou souřadnicové měřící přístroje velkým krokem vpřed, stále mají svá omezení. Program pro měření musí obsahovat trajektorie k jednotlivým bodů a při složitějších tvarech na měřeném výrobku se výrazně navyšuje čas měření. [3]

3D skenování

V současnosti je velice rozšířenou univerzální měřící metodou optické 3D skenování. Optické skenování je založeno na principu vytvoření 3D modelu v ortogonálním souřadnicovém systému z naskenovaného mračna bodů.

Optické 3D skenování se základně dělí na dvě kategorie – aktivní a pasivní. Při pasivní metodě se nepoužívá žádný zdroj osvětlení a energie je z objektu pouze přijímána, přičemž se pro skenování používají alespoň dvě kamery (případně jedna kamera z více úhlů) a objekt (případně kamery) se otáčí. Při aktivní metodě je objekt emitován světlem, které se odráží zpět do přijímače. Tato metoda je přesnější a spolehlivější než metoda pasivní, je však taky finančně náročnější.

Jedním z nejčastěji využívaných typů 3D skenerů je 3D skener strukturovaného světla. Tento skener na objekt promítá určitý světelný vzor (nejčastěji vodorovné pruhy) a jejich odraz je pak přijímán přijímačem. Při dopadu rovného pruhu na zakřivený povrch se pruh deformuje a přijímači tak dává informaci o zakřivení objektu. Výsledkem je pak mračno bodů, ze kterého se zrekonstruuje 3D objekt. [3]

2.2.2 Povrchové vady plastových výrobků

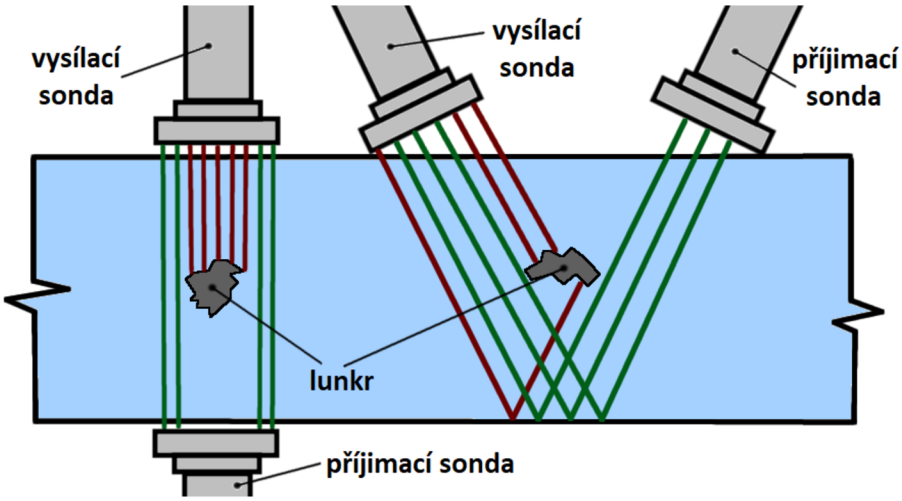
Hodnocení povrchových vad plastového výrobku se nejčastěji provádí pomocí indikačních kapalin kapilárními metodami. Metoda je založena na využití vzlínacích sil. Na povrch

zkoumaného výrobku (případně jen na určitou oblast zájmu) je nanesena indikační kapalina. Tato kapalina vniká do povrchových vad a tyto vady tak zvýrazní a je možné je detekovat. Tato indikační metoda je často využívána pro svou jednoduchost a účinnost. Je možné kontrolovat i velké výrobky za použití nízkých nákladů a podmínky metody přizpůsobit požadavkům (existuje mnoho druhů indikačních kapalin s různou citlivostí). Detekční schopnost této metody začíná přibližně u jednotek tisícin milimetru, přičemž je nutno vzít v úvahu další parametry, které mají na tuto hodnotu vliv (drsnost povrchu, druh povrchové vady, ...) [26], [4]

Pro hodnocení povrchových vad výrobků obecně existuje ještě celá řada dalších metod, avšak většinu těchto metod není možné na plastové materiály použít, nebo je jejich použití příliš nákladné a složité. [26], [4]

2.2.3 Vnitřní vady plastových výrobků

Jednou z nedestruktivních metod pro vyhodnocení vnitřních vad plastových výrobků, kterou je možné použít, je zkouška ultrazvukem. Tato metoda využívá zvukových vln o frekvenci přibližně 1–15 MHz. Princip metody spočítá v procházení ultrazvukové vlny prostředím zkoumaného materiálu, pokud tato vlna narazí na nějakou vadu, např. lunkr, odrazí se a vrací se zpět. Ultrazvukové zkoušky se dělí na dvě základní metody – průchodová metoda a odrazová metoda. Tyto metody se liší v umístění vysílacích a přijímacích sond. Obě dvě metody jsou znázorněny na Obr. 6. Vyhodnocení vnitřních vad platů pomocí ultrazvuku má své uplatnění, nicméně je tato metoda výrazně omezena z hlediska struktury materiálu a složitosti tvaru výrobku. [26], [4], [27]



Obr. 6: Znázornění ultrazvukové zkoušky. Vlevo - metoda průchodová, vpravo - metoda odrazová

2.2.4 Další hodnocení kvality

Při hodnocení kvality plastových výrobků může být využito obrovské množství zkoušek, kontrol, či měření. Zvolené hodnocení kvality je vždy individuálně sestaveno pro funkční a technologické požadavky daného výrobku. Kromě již zmíněných zkoušek a měření můžou být na plastových výrobcích prováděny také destruktivní zkoušky (zkouška ohybem, tahem, namáhání, odlupovací zkouška, …) a v některých případech může být součástí kontroly kvality i další měření, jako měření hmotnosti, teplotní odolnosti, chemických vlastností apod. [26], [4]

3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE PRO KONTROLU KVALITY PLASTOVÝCH VÝROBKŮ

V oblasti kontroly kvality plastových výrobků existuje řada měřících metod. Vedle konvenčních měřících metod, jako je měření na souřadnicových systémech, je možné využít i univerzálních měřících metod.

Významnou část v tomto odvětví univerzálních měření tvoří rentgenová počítačová tomografie, tedy technologie, která pomocí určitého množství rentgenových snímků dokáže z měřeného vzorku či oblasti vytvořit model obsahující i vnitřní strukturu. Navíc se jedná o nedestruktivní metodu, a v mnoha ohledech je tak významnou měřící technologií současnosti.

3.1 Rentgenová počítačová tomografie

Rentgenová počítačová tomografie je známá už desítky let z oblasti medicíny. V posledním desetiletí se však stále intenzivněji využívá v oblasti průmyslu jako zobrazovací metoda ke kontrole průmyslových dílů, měření jejich rozměrů a především k zobrazování vnitřní struktury a případných defektů. [8]

Počítačová tomografie je jednou ze zobrazovacích nedestruktivních metod, která využívá rentgenového záření pro zobrazování vnitřních struktur a rozměrů skenovaného tělesa. Tato metoda se objevila již v 70. letech 20. století v oblasti medicíny. S postupným technologickým vývojem této technologie se začala rentgenová počítačová tomografie využívat také v průmyslu. [8]

Díky tomu, že se jedná o nedestruktivní metodu, s jejíž pomocí je možné zobrazit také vnitřní strukturu tělesa nebo špatně dostupné oblasti v sestavách, má počítačová tomografie své nezaměnitelné místo v oblasti zobrazovacích metod. I když disponuje několika dalšími výhodami oproti konvenčním měřícím metodám, jako například možností skenování několika těles najednou, jsou zde také limitující omezení. K limitujícím vlastnostem patří zejména rozměr a materiál daného vzorku. V případě velkého absorpčního koeficientu měřeného materiálu spolu s velkou kumulovanou tloušťkou totiž není možné vzorek prozářit a výsledná data jsou příliš zašuměná. V případě materiálů s menším absorpčním koeficientem se naopak může vyskytnout problém s velikostí skenovaného objektu, kvůli které není možné dosáhnout požadovaného rozlišení, nebo dokonce není možné vzorek kvůli jeho velikost ani umístit do prostoru mezi rentgenovou trubici a detektor. Tyto dvě limitující vlastnosti jsou spolu provázány a z velmi obecného hlediska se dají jejich limitní hodnoty popsat na třech reprezentujících materiálech. [8], [7]

Plast – v tomto případě je limit zejména v rozměrech příslušného tomografu, jelikož plastové materiály nemají příliš velkou pohltivost a jsou poměrně lehce prozařitelné. Pro prozáření plastových dílů proto obvykle stačí i méně výkonná rentgenová trubice. V běžné praxi lze pro prozáření takovýchto vzorků využít standardní RTG zdroje.

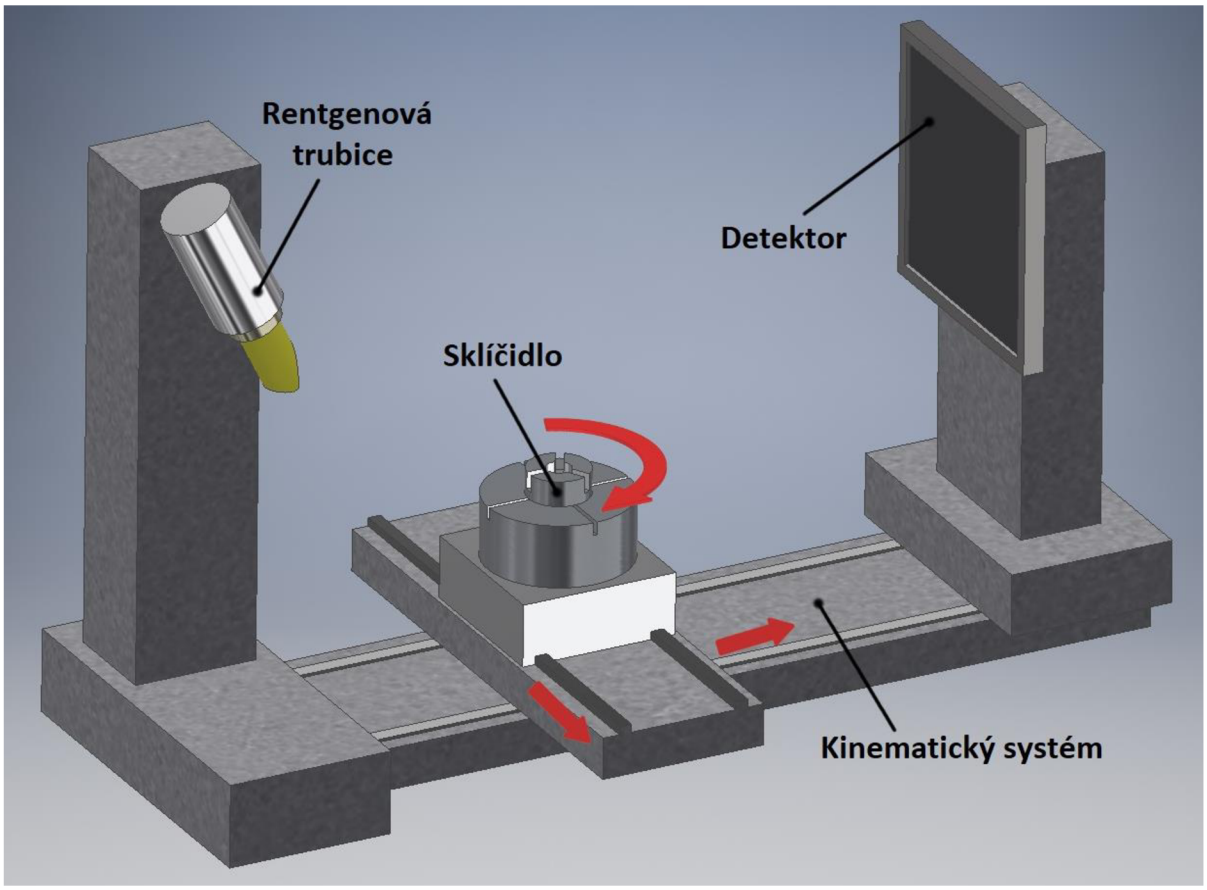
Hliník - dalším příkladem je limitní rozměr hliníkových materiálů. Zde už měření není limitováno pouze rozměrem tomografu, a při větší kumulaci materiálu (např. 50 mm) už se urychlovací napětí běžně pohybuje u 180 kV. U méně výkonných tomografů proto můžeme narazit nejen na rozměrové limity, ale také na limity výkonnostní.

Kovové materiály – Pro tomografické měření kovových materiálů je nutné využít výkonnějších tomografů. Již při malých kumulovaných tloušťkách (přibližně 10 mm) se běžně využívá urychlovací napětí až 200 kV. Při nárůstu tloušťky materiálu se urychlovací napětí ještě dále zvyšuje.

I přes tyto limitující vlastnosti je počítačová tomografie jedinečnou technologií v mnoha případech, kdy je nutné nedestruktivně zkoumat celý vzorek včetně jeho vnitřní struktury.

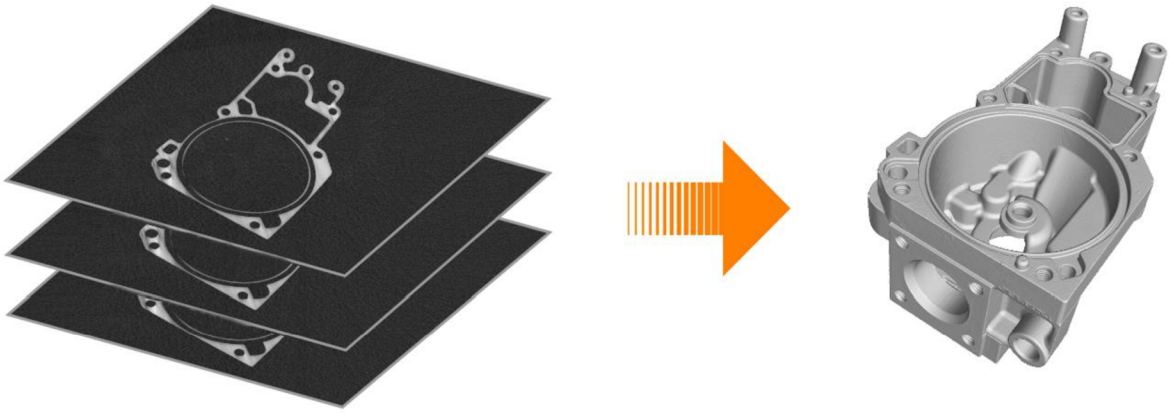
3.1.1 Princip rentgenové počítačové tomografie

Princip rentgenové počítačové tomografie spočívá v pořizování rentgenových snímků kolem osy rotace měřeného tělesa, či zájmové oblasti. CT systémy, které se pro rentgenovou počítačovou tomografii využívají, mají tři základní součásti – zdroj, detektor a kinematický systém. Zatímco v CT přístrojích, které jsou určeny pro využití v medicíně, kinematický systém rotuje se zdrojem rentgenového záření a detektorem, u průmyslových CT přístrojů je tomu naopak. U průmyslových tomografů se ve většině případů zdroj záření ani detektor nepohybuje a kinematický systém rotuje s měřeným vzorkem (zjednodušená konstrukce tomografu je vizualizovaná na Obr. 7). Vzorek je tak vycentrovaný v ose mezi zdrojem a detektorem detekujícím dopadající záření, které prošlo přes měřený vzorek. V tomto rozložení se při rotaci vzorku pořídí určité množství rentgenových snímků. Počet těchto snímků, tzv. projekcí, se odvíjí od velikosti skenované oblasti a požadavků na rozlišení daného měření. Obvykle se však počet projekcí pohybuje okolo 2 000. [28], [29]



Obr. 7: Vizualizace konstrukce tomografu

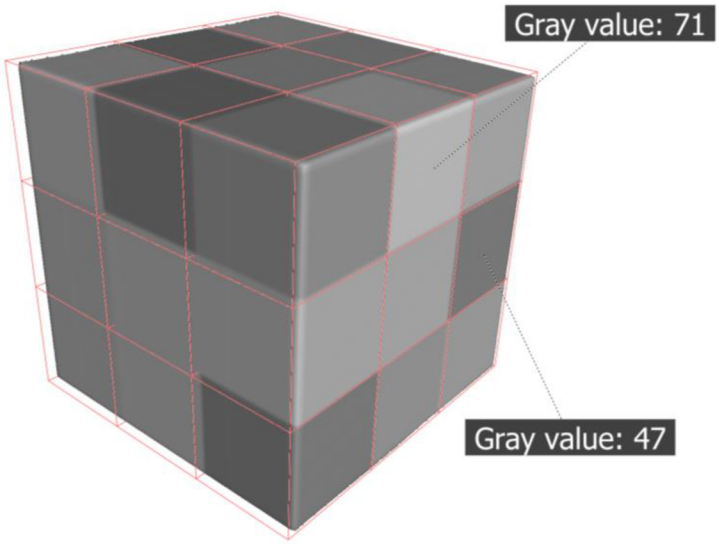
Po získání potřebných projekcí je potřeba tyto projekce matematicky proložit a vytvořit tak výsledná data. Problematika tohoto proložení, tzv. rekonstrukce dat je poměrně obsáhlá. Existuje několik různých rekonstrukčních algoritmů, obvykle se však používá filtrovaná zpětná projekce, neboli FBP. Tento algoritmus pak promítá projekce zpět do předmětového prostoru a vzniknou tak výsledná zrekonstruovaná CT data. Výsledkem je tedy virtuální objem měřeného vzorku. Tento objem se skládá z jednotlivých vrstev, neboli tomografických řezů. Tyto řezy jsou na sebe položeny a vzniká tak trojrozměrný model (Obr. 8). [28]



Obr. 8: Vizualizace tomografických řezů

3.1.2 Reprezentace dat – voxelová mřížka

Důležitou roli v počítačové tomografii hraje reprezentace získaných dat. Získaná data se na rozdíl od konvenčních měřících metod, kde se udává přesnost daného měřidla, reprezentují pomocí voxelového rozlišení. Toto rozlišení udává velikost elementární částice - voxelu, který nese jednoduchou informaci o hodnotě šedi. Celá zrekonstruovaná CT data jsou tedy mřížkou mnoha voxelů, kde každý jednotlivý voxel o určité velikosti nese vypočítanou hodnotu šedi (Obr. 9). Ta reprezentuje pohlcení rentgenového záření daným materiálem. CT data se obvykle používají v invertované podobě, než je tomu u rentgenových snímků. Tedy nejsvětlejší voxel reprezentuje nejvíce pohltivý materiál. [31]



Obr. 9: Vizualizace voxelové mřížky tomografických dat

3.1.3 Faktory ovlivňující měření

CT měření je ovlivňováno rozsáhlým množstvím faktorů, které mají vliv na výslednou kvalitu získaných CT dat. Špatným nastavením parametrů pak může docházet ke zhoršení kvality výsledných dat, chybějící informaci způsobené tomografickými artefatky, či k úplnému znehodnocení. Mezi hlavní faktory ovlivňující CT měření patří:

Zdroj rentgenového záření

Parametry rentgenového záření jsou jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují výsledná CT data.

Operátor nastavuje urychlovací napětí v trubici a proud procházející žhavícím vláknem. Tyto dva hlavní parametry ovlivňují povahu rentgenového záření (především schopnost proniknout měřeným materiálem). Faktorů, které povahu záření dále ovlivňují, je kromě těchto dvou hlavních ještě mnoho dalších. Záleží na materiálu terče, tloušťce terče, velikosti ohniska, materiálu krycího okénka, velikosti krycího okénka, apod. Je taky nutné zmínit, že se záření výrazně liší v závislosti na použité konstrukci rentgenového trubice – reflexní, nebo transmisní. [32]

Kinematický systém

Dalším důležitým faktorem je kinematický systém tomografického přístroje. Vzájemná poloha tří hlavních součástí (zdroj, detektor, měřený vzorek) je důležitým parametrem, který ovlivňuje výsledné rozlišení a případně chyby v geometrickém tvaru. V některých případech může chybné nastavení kinematického systému způsobit i nerealizovatelnost rekonstrukce CT dat. Správné nastavení kinematického systému je zvlášť důležité při metrologickém měření. K tomu se využijí metody pro kalibraci CT systémů. Tato problematika je podrobněji rozepsána v kapitole Kalibrace CT přístrojů. [32]

Vzorek

Kvalitu výsledných tomografických dat určuje i samotný měřený vzorek. Dle koeficientu absorpce měřeného materiálu dochází k útlumu emitovaného rentgenového záření. Vysílané rentgenové záření společně s materiálem vzorku velice významně ovlivňuje výsledná data. Je také limitována maximální kumulovaná tloušťka měřeného vzorku, v závislosti na použitém rentgenovém záření. Výslednou kvalitu také ovlivňuje drsnost povrchu daného vzorku. Dle experimentů drsnost povrchu způsobuje systematickou odchylku od měření na souřadnicových měřících strojích. [32]

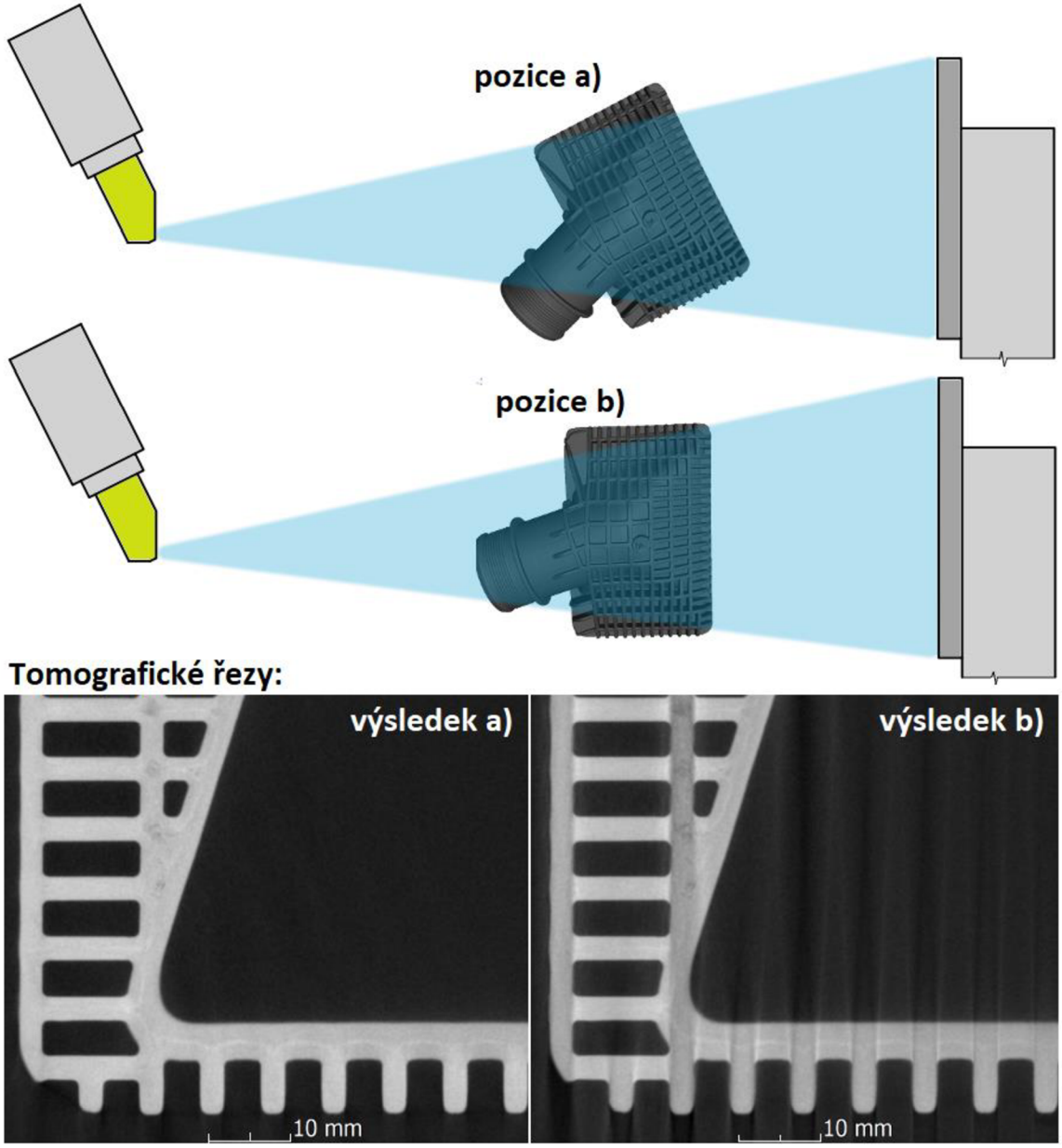
Svou důležitost má i poloha vzorku a jeho upevnění. Vzorek musí být upevněn stabilně, aby při rotaci během skenu nedocházelo k vibracím, či nějakému vychýlení vzorku z původní polohy. Polohu vzorku je nutné volit tak, aby při skenování docházelo k co možná nejmenší tvorbě tomografických artefaktů, především pak v oblasti, která je pro sken důležitá. Vzorek je navíc vhodné upevňovat do méně absorpčního materiálu, aby ho bylo možné následně v softwaru jednoduše odsegmentovat. K tomuto se nejčastěji využívá polystyren, který lze jednoduše upravit na tvar vhodný pro uchycení a v tomografických datech se oproti skenovaným materiálům jeví téměř transparentně.

3.1.4 Tomografické artefakty

Jednou z nejčastěji se vyskytujících chyb v naměřených CT datech jsou tomografické artefakty. Vznikají různými způsoby a mají velmi nepříznivý vliv na vyhodnocování a práci s naměřenými CT daty.

Rozpoznání artefaktů vyžaduje fyzikální znalost jejich tvoření a často také zkušenosti z praxe. Mezi možné příčiny tvorby tomografických artefaktů patří mnoho faktorů, např.: chybná kalibrace detektoru, nedostatečné energie pro prozáření vzorku, nechtěný pohyb vzorku, špatná filtrace, apod. Při skenování hustších materiálů, jako je třeba ocel, je nutné také počítat s korekcemi tvrdnutí svazku. Tento jev, zvaný jako cupping effect, se projevuje sníženou absorpcí materiálu uvnitř vzorku a zvýšenou absorpcí na okrajích. Cupping effect se ovšem ve většině případů skenování plastových vzorků nevyskytuje. [9], [10]

V souvislosti se skenováním plastových vzorků je ale nutné zmínit ještě jeden faktor ovlivňující tvorbu artefaktů – poloha vzorku při skenování. Poloha vzorku při skenování má zásadní vliv na tvorbu artefaktů, ať už se jedná o méně pohltivé plastové materiály, či více pohlcující kovy. Poloha vzorku by měla být vždy určitým způsobem nakloněná, aby nedocházelo ke skenování rovnoběžných ploch ve směru záření. Toto je demonstrováno na vzorku plastové komory s žebrováním. Při naklonění je výsledek výrazně čistší, než při poloze s žebrováním ve vertikální a horizontální poloze (Obr. 10).



Obr. 10: Demonstrace rozdílných výsledků při různých polohách vzorku.

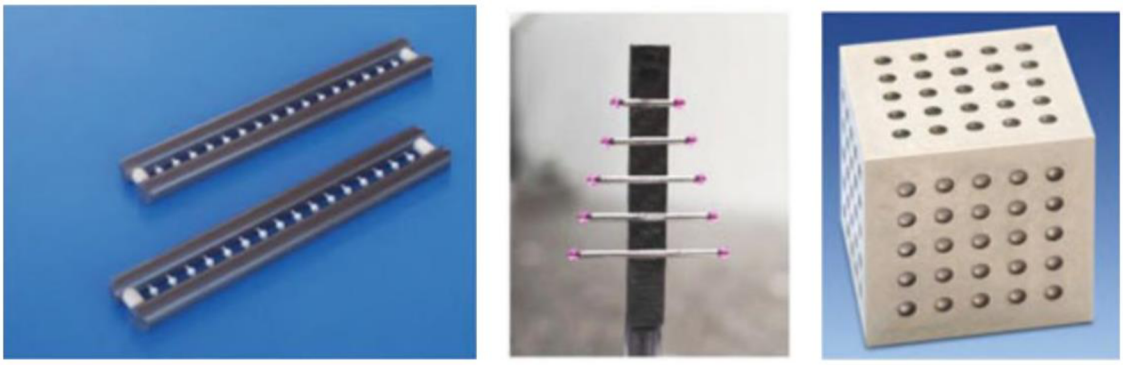
3.1.5 Kalibrace CT přístrojů

Kalibrace je důležitou součástí tomografických měření, aby bylo dosaženo dostatečně přesných výsledků. Kalibrace CT přístroje ve své podstatě vyjadřuje správné určení velikosti voxelu. Při tomografickém měření je velikost voxelu vypočtena z pozice tří základních prvků, tedy vzdáleností rentgenové trubice, detektoru a rotační osy skenovaného objektu. [30]

Výpočet velikosti voxelu však ovlivňuje mnoho faktorů a způsobuje tak nechtěné nepřesnosti a chyby. Možnými faktory, které tyto chyby způsobují mohou být: teplotní roztažnost, vibrace, chyby kinematického systému tomografu, a mnoho dalších. Některé faktory jsou navíc známy jen z části nebo vůbec. Tím se tedy do měření dostává velký počet systematických chyb, které jdou jen obtížně a pouze částečně spravovat. Z tohoto důvodu je při přesném tomografickém měření důležité nejdříve provést kalibraci, která tyto systematické chyby komplexně koriguje. [30]

K provedení kalibrace se nejčastěji využívají kalibrační vzorky – fantomy. Tento fantom se naskenuje v již nastavených podmínkách, které budou následně použity pro naskenování požadovaného vzorku. Po zrekonstruování naskenovaného fantomu a jeho rozměrovém vyhodnocení je naměřená hodnota porovnána s nominální kalibrovanou hodnotou fantomu a podle toho je případně upravena velikost voxelu. [30]

Fantomy se výrazně liší svou konstrukcí. Mezi ty nejzákladnější patří fantom dvou rubínových kuliček, jež jsou pevně připevněny k podstavci a vzdálenost jejich středů nese určitou nominální zkalibrovanou hodnotu. Tento druh fantomu se používá nejčastěji, jelikož je jeho použití rychlé a jednoduché. Existují však mnohem složitější fantomy, které slouží např. k dlohodobému vyhodnocení systematické chyby daného tomografu. [30]



a) b) c)

Obr. 11: Příklady kalibračních fantomů; a) ball rail b) CT tree c) Calotte Cube. [30]

V současné době je z oficiálních norem pro tuto problematiku dostupná pouze německá norma VDI/VDE 2630-1.3, která popisuje kalibraci vhodnou pro provedení metrologického měření na CT přístrojích. Při dodržení správného nastavení a kalibrace lze totiž tomografické měření využít nejen jako metodu nedestruktivního testování, ale také jako metrologické měření srovnatelné i s konvenčními měřidly, jako je souřadnicový měřící stroj. [30]

3.2 Analýza tomografických dat

Pro vyhodnocování tomografických dat a jejich následné analýzy lze použít množství různých softwarů. CT data je možné zpracovávat i pomocí 2D softwarů (např. software ImageJ), do kterých se importují jednotlivé CT řezy a vyhodnocování probíhá právě na těchto CT řezech.

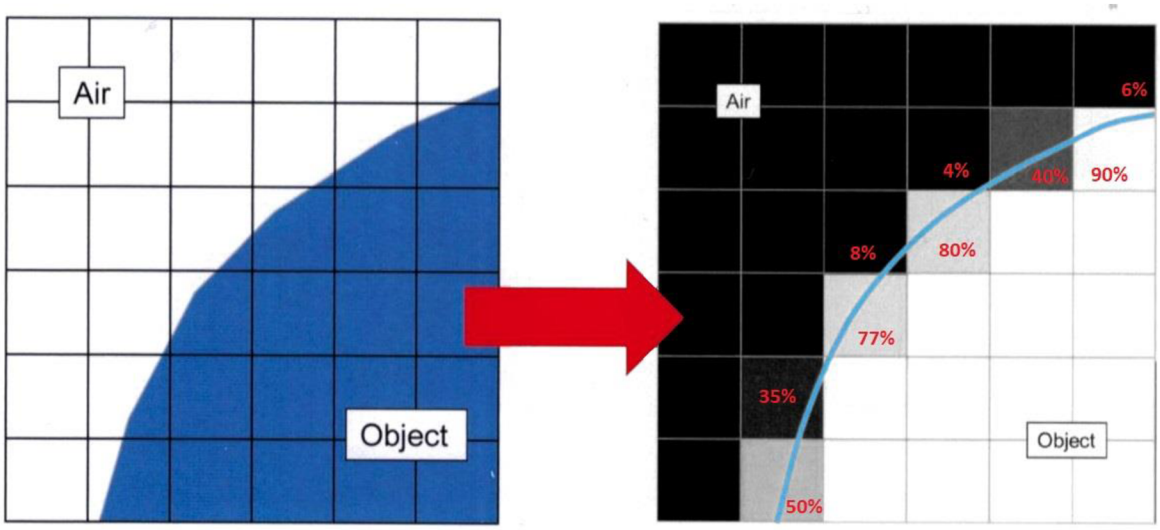
K více specializovaným softwarům můžeme řadit např. Avizo, WinWerth, GOM Inspect, VGStudio Max, apod. Tyto softwary pracují jak s tomografickými řezy, tak s 3D objemovými modely. Disponují navíc dalšími specializovanými nástroji. [33], [11]

3.2.1 Určení povrchu naměřeného vzorku

Základním zpracováním tomografických dat je určení povrchu naměřeného vzorku (v softwarech často označováno jako surface determination). Jedná se o poměrně širokou problematiku, pro kterou se využívá množství algoritmů s různými parametry. [37]

Základní myšlenkou pro určení povrchu vzorku je určení hraniční hodnoty, která rozlišuje materiál od pozadí. Software tuto hraniční hodnotu může automaticky vyhodnotit dle histogramu, případně ji může operátor určit manuálně. Automatické vyhodnocení této hraniční hodnoty spočívá v určení vrcholů histogramu jednotlivých materiálů (včetně pozadí) v histogramu a následným umístěním hraniční hodnoty, neboli isovalue, do středu mezi těmito vrcholy. V případě určení isovalue operátorem je zpravidla hraniční hodnota umístěna do minima mezi dvěma vrcholy materiálů v histogramu. [37]

Při určování povrchu většinou dochází ještě k tzv. subvoxelové přesnosti. [30] Jedná se o procentuální výpočet voxelů na hranici mezi materiálem a pozadím. Povrch není umisťován dle jednotlivých voxelů, ale prochází skrz jednotlivé voxely, v závislosti na hodnotě šedi hraničního voxelu. Toto je znázorněno na Obr. 12. [37]



Obr. 12: Subvoxelové určení povrchu [37]

3.2.2 Rozměrové měření

Při rozměrovém měření na CT datech se nejčastěji využívá určeného povrchu a následného fitování geometrických prvků na jednotlivé části naměřeného vzorku. Jedná se o proces, kdy je pomocí množství bodů a určitého algoritmu reálný povrch vzorku převeden do ideálního geometrického prvku (plocha, válec, kužel, apod.), který lze následně měřit a vyhodnotit. K rozměrovému měření se pak používají právě nafitované geometrické prvky, přičemž je možné k těmto měřením přidat toleranční hodnoty a mohou tak být vyhodnoceny ihned v rámci rozměrového měření.

Problematika rozměrového měření je velice obsáhlá. Možnosti různých nastavení začínají už při fitování jednotlivých geometrických prvků, které je možné fitovat pomocí různých algoritmů v závislosti na požadavcích rozměrového měření.

3.2.3 Tloušťka stěn

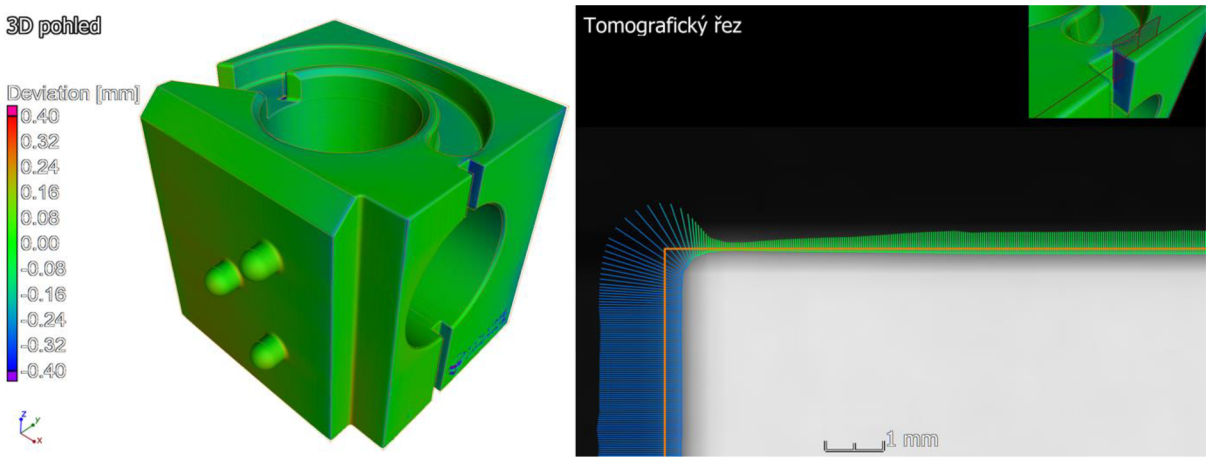
Jednou ze základních analýz na tomografických datech je měření tloušťky stěn naskenovaného vzorku. Jedná se o jakési pokročilé rozměrové měření, které obvykle funguje na algoritmu hledání protějšího povrchu pod určitým úhlem. Výsledkem této analýzy může být barevná mapa, která barevně zobrazuje tloušťku měřené stěny a může tak odhalit např. slabá místa.

3.2.4 Porovnání s nominálním objektem

Nástroje pro porovnání naměřených CT s nominálním objektem poskytuje možnost jednoduchého a rychlého zobrazení a vyčíslení odchylek od nominálního tvaru. Většinou jde o porovnání s nominálním CAD modelem ideálního kusu vzorku, nicméně tato porovnání lze využít i pro jiné aplikace (např. porovnání několika naměřených kusů mezi sebou).

Pro správnou funkci této analýzy je nejdříve nutné umístit oba srovnávané objekty (ať už se jedná o CT data, STP, STL, nebo o jakýkoli jiný objekt) do stejné pozice. Tento krok se zajišťuje pomocí nástrojů pro registraci objektů a má výrazný vliv na výsledky této analýzy. Základním nástrojem pro umístění objektů je metoda Best-fit, která dle příslušného algoritmu vypočítá vzájemné umístění objektů tak, aby jejich povrchové odchylky byly navzájem co nejmenší. Objekty je možné sesazovat i několika dalšími způsoby, je však nutné si tuto registraci dopředu stanovit a zhodnotit jakým způsobem ovlivní výslednou analýzu.

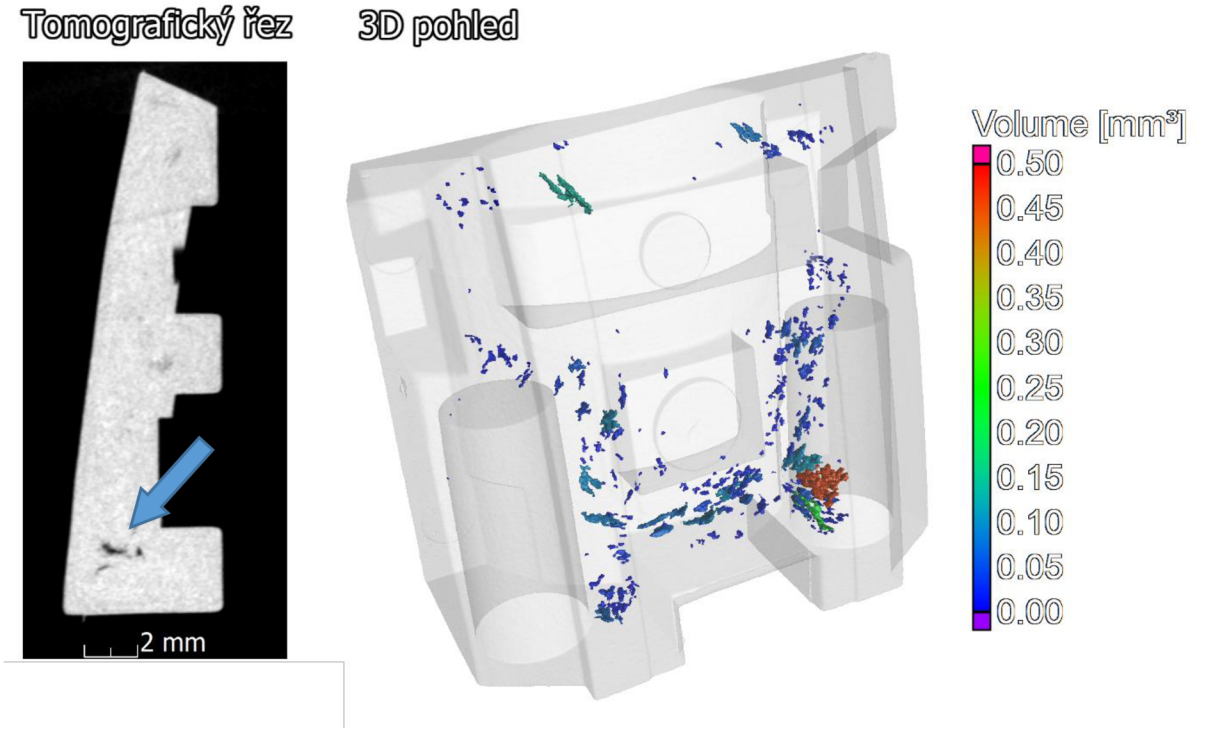
Výsledkem tohoto porovnání je obvykle barevná mapa (Obr. 13), která zobrazuje odchylky povrchu měřeného vzorku od povrchu nominálního (ve většině případů CAD model).



Obr. 13: Barevná mapa odchylek povrchu od nominálního CAD modelu. CAD model je vyznačen oranžovou konturou

3.2.5 Porozita

Pomocí rentgenové počítačové tomografie je možné efektivně analyzovat vnitřní strukturu naměřených dat. Často se tak využívají různé analýzy pro vyhodnocení vnitřní porozity. Tyto analýzy vyhodnocují vnitřní porozitu na základě hodnoty šedi jednotlivých voxelů. Existuje několik různých parametrů a někdy je zapotřebí tyto algoritmy i kombinovat, aby byla výsledná analýza vnitřní porozity co nejpřesnější. Nejčastěji se využívá globálního prahování, tedy způsobu, kdy software za pomoci pevně dané prahové hodnoty šedi oddělí vnitřní lunkry od zbytku materiálu. Nejedná se však o jedinou metodu. U CT dat s menším kontrastem mezi materiálem a pozadím nebo u více zašuměných dat se využívají i pokročilejší adaptivní algoritmy založené na lokálních minimech v histogramu.

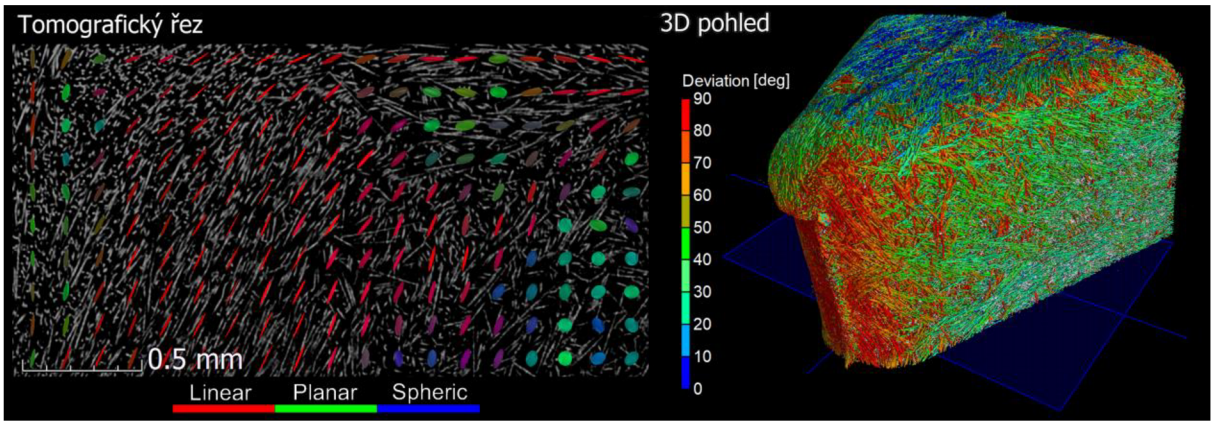


Obr. 14: Barevná vizualizace analýzy vnitřní porozity. Modrá šipka ukazuje vnitřní defekty v tomografickém řezu.

Výsledky analýzy vnitřní porozity jsou číselně vyjádřeny, přičemž jsou k dispozici statistické údaje jako objem analyzovaného vzorku, objem detekovaných defektů, objemy jednotlivých defektů, procentuální porozita, atd. Zanalyzované vnitřní defekty je možné také vizualizovat ve 3D semi-transparentním pohledu s barevným kódováním (Obr. 14).

3.2.6 Vlákny zpevněné kompozity

Při dostatečně velkém rozlišení CT skenu je softwarově možné analyzovat vlákna daného materiálu. Tato analýza je vhodná pro ověření směru toku plastových materiálů. Při voxelovém rozlišení přibližně 10 µm je obvykle možné analyzovat skelná vlákna ve zpevněných kompozitech.



Obr. 15: Znázornění analýzy vlákny tvrzeného kompozitu.

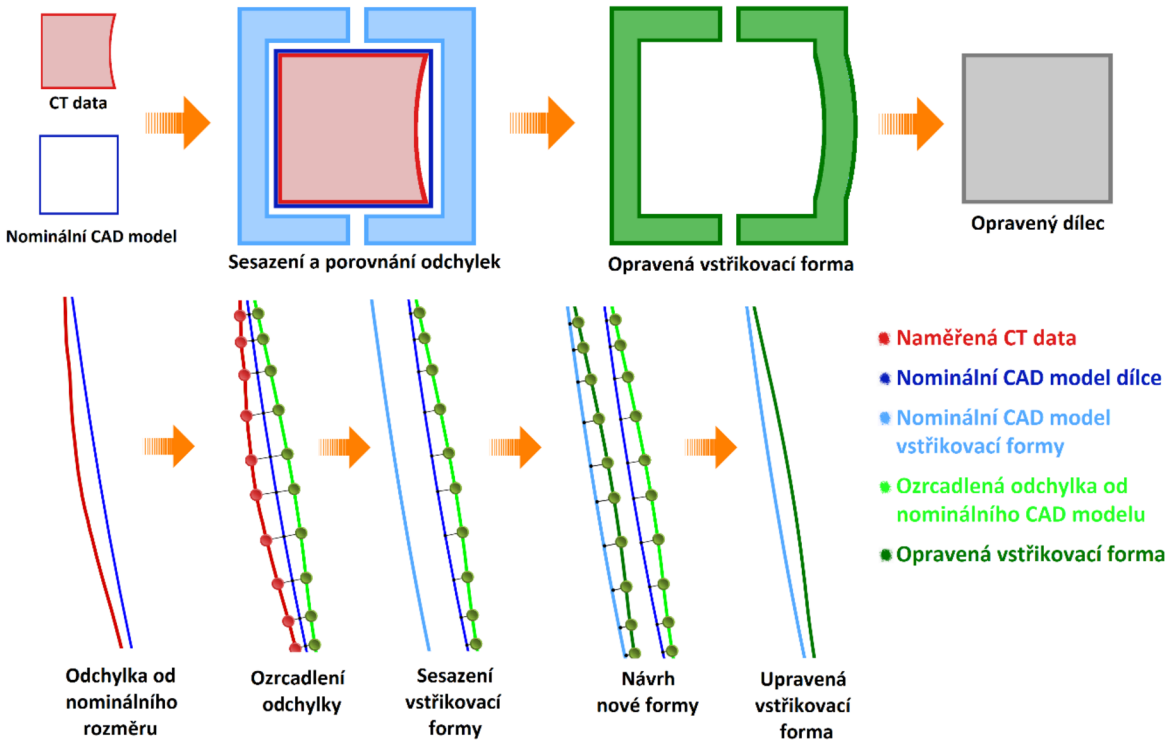
Analýzu lze vyhodnotit číselně i graficky, přičemž je možné zohledit pouze některé osy orientace vláken a získat tak např. odchýlení orientace od určité roviny. Na Obr. 15 lze vidět grafické znázornění výsledků analýzy vláken, která zobrazuje orientaci vláken

v tomografickém řezu společně s vyhodnocenými tenzory a 3D zobrazení orientace vláken v prostoru.

3.2.7 Korekce forem

V současnosti se při konstrukci a výrobě vstřikovací formy využívají 3D softwary a simulace výrobních procesů. Při těchto simulacích však nejde dosáhnout přesné shody s okrajovými podmínkami, mnohé procesy jsou z důvodu výpočetní náročnosti zjednodušeny a při výrobě tak dochází k systematickým a geometrických odchylkám. Tyto geometrické odchylky často nejsou v rámci tolerance daného výrobního dílce a vstřikovací forma tak musí projít určitou korekcí, aby tyto odchylky eliminovala. Tento proces je velice problematický a vyžaduje mnoho zkušeností. V mnoha případech se navíc nejedná o jednu korekci, ale forma prochází několika-cyklovým procesem, kdy je vyroben díl, na jehož základu je upravena vstřikovací forma, následně je vyroben další díl, opět upravena forma, atd. [37]

Nástroj pro korekci forem pomocí zpracování CT dat je v podstatě určitá forma nadstavby nástrojů pro porovnání s nominálním objektem. Základní porovnání nominálního modelu s naměřenými CT daty probíhá obdobně. Po správném sesazení CT dat na nominální model jsou vypočítány odchylky tvaru naměřeného vzorku. Na toto sesazení je sesazena ještě vstřikovací forma, která obklopuje nominální i naměřený vzorek (v ideálním případě). Pomocí jednotlivých geometrických prvků nominálního objektu jsou části naměřeného vzorku ozrcadleny a vzniká tak invertovaná kontura. Tato nová kontura je na základně informací z analýzy porovnání posunuta do úrovně vstřikovací formy a vytváří se návrh upravené formy na základně naměřených odchylek. Celý tento postup je schematicky zobrazen na Obr. 16. [37]



Obr. 16: Postup při korekci forem pomocí softwaru VGStudio Max 3.3.4

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce zahrnuje analýzu dvou různých druhů plastových výrobků pomocí rentgenové počítačové mikrotomografie. Proces analýzy je u každého dílu navržen dle požadavků zákazníka.

Při praktické části bylo využito přístroje GE v|tome|x L 240 pro CT měření a následně softwaru datos|x reconstruction pro rekonstrukci tomografických dat. Následné softwarové zpracování a analýzy dat byly prováděny v softwaru VGStudio Max verze 3.3.

4.1 Vybrané plastové výrobky

Analyzovány byly dva rozdílné plastové výrobky ze dvou společností.

4.1.1 Plastový výrobek Inlet Tank

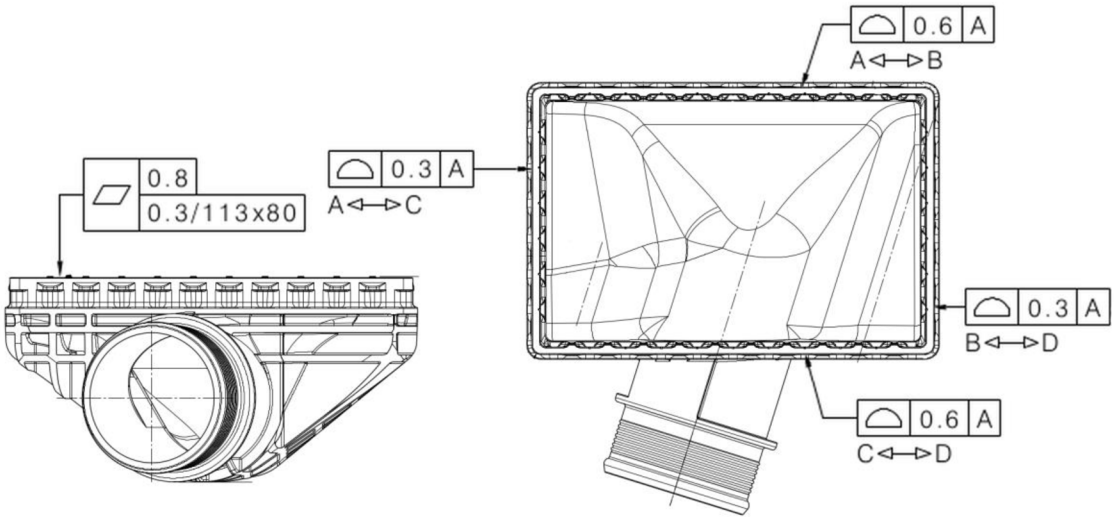
Výrobek Inlet Tank poskytla společnost Hanon Systems. Ta se zabývá výrobou a vývojem chladicí techniky a komponent klimatizací pro automobilový průmysl. Mezi jejich výrobky patří komponenty do klimatizací, ventilací, topení, ale také kompresory, chladící systémy hnacích jednotek, baterií, systémy pro distribuci kapalin a další. [34]

Výrobkem je plastová vstupní komora (Obr. 17), která je součástí mezichladiče automobilového motoru. Tato komora slouží ke vstupu horkého vzduchu do chladícího jádra a musí tak být vzduchotěsně spojena s dalšími komponenty.

Obr. 17: Fotografie výrobku Inlet Tank poskytnutého společností Hanon Systems.

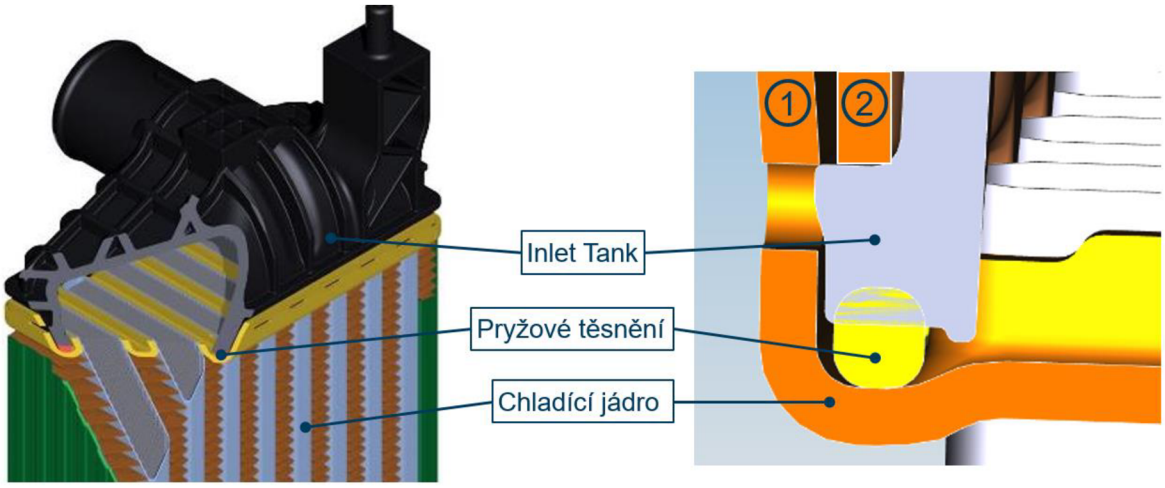
<u>Požadavky na kvalitu výrobku Inlet Tank</u>

Na základě výkresové dokumentace (příloha č. 1), funkce výrobku a požadavků Hanon Systems, bylo určeno několik zájmových oblastí výrobku, u kterých je potřeba provést kontrolu tvarové přesnosti a případně navrhnout korekce pro další výrobu prototypu. Tyto zájmové oblasti ovlivňují kvalitu spoje plastového výrobku s hliníkovým chladícím jádrem. Toto hliníkové jádro se tvarově nijak nepřizpůsobí spoji a je tak nutné vyrobit plastový výrobek Inlet Tank s dostatečnou tvarovou přesností. Zájmové geometrické tolerance jsou zobrazeny na Obr. 18.



Obr. 18: Zájmové geometrické tolerance plastového výrobku Inlet Tank.

Spoj mezi plastovým výrobkem Inlet Tank a hliníkovým chladicím jádrem je zajišťován pomocí několika záskočkových spojů vedoucích po obvodu paty komory. Mezi plastovým výrobkem a hliníkovým jádrem se nachází pryž, která je při zaskočení spoje stlačena a utěsňuje tak spoj po celém jeho obvodu. Při nedostatečné tvarové přesnosti plastového výrobku nedojde ke správnému stlačení pryže a po vehnání horkého vzduchu by docházelo k úniku.



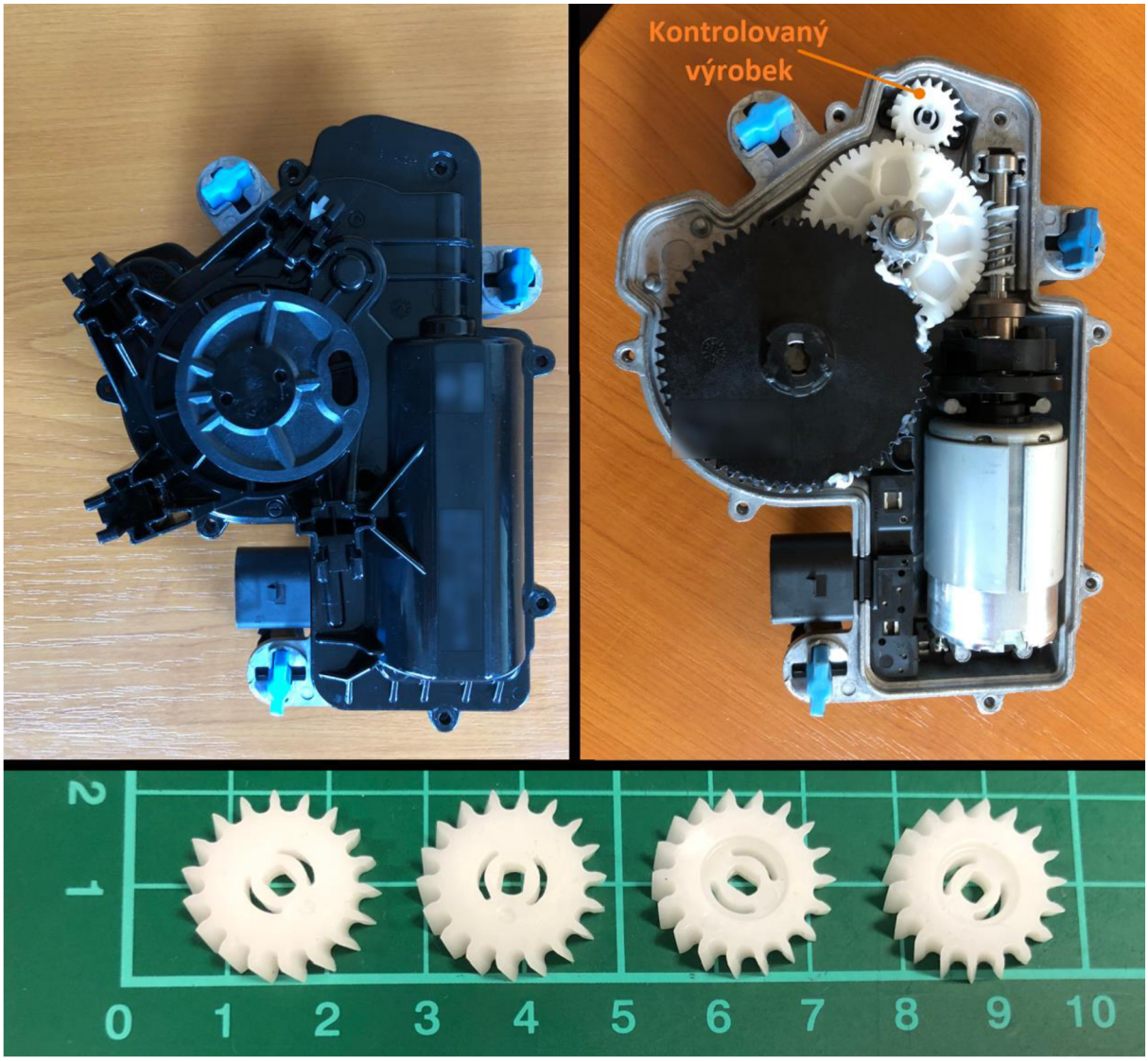
Obr. 19: Vizualizace uchycení výrobku Inlet Tank ke chladícímu jádru.

V případě, že tvarová přesnost nebude ve shodě s požadovanými tolerancemi, je nutné upravit výrobní podmínky, ať už změnou procesních parametrů, nebo tvarovou korekcí vložky vstřikovací formy.

4.1.2 Plastový výrobek Cog Wheel

Výrobek Cog Wheel poskytla společnost BRANO GROUP, a.s., BRANO GROUP, a.s. vznikla na základě vstupu BRANO a.s. do akciové společnosti ATESO v roce 2000. BRANO GROUP se zabývá vývojem mnoha různých dílů do automotivu. Mezi jejich portfolio lze zařadit např. zámky dveří, kryty zámků, pedálová ústrojí, tlumiče, topení a další. [35]

Ozubené kolo Cog Wheel je součástí přitahovače pro zamykací systém pátých dveří vozů koncernu VW. Tento přitahovač se aktivuje v situaci, kdy dveře nejsou zavřeny kompletně, ale pouze na první západ. Při aktivaci přitahovač přitáhne rohatku zámku a dveře se tak zavřou i na druhý západ do kompletně zavřené polohy. Výrobek Cog Wheel je ozubené kolo sloužící jako tlumič pro vyrovnávání rázů při převádění kroutícího momentu v mechanizmu tohoto přitahovače.



Obr. 20: Fotografie výrobku Cog Wheel a jeho umístění v mechanizmu. a) uzavřený přitahovač b) otevřený přitahovač s názorným umístěním výrobku Cog Wheel c) výrobky poskytnuté společností BRANO GROUP, a.s.

Pro účely tomografické analýzy byly dodány celkem 4 kusy těchto výrobků. Tento počet vychází ze vstřikovací formy, která obsahuje celkem 4 kovové vložky a vyrábí se tak 4 kusy ozubených kol najednou. Označení těchto kusů je dle výrobních čísel: 5, 6, 7 a 8.

Požadavky na kvalitu výrobku

U výrobku Cog Wheel jsou předmětem zájmu obzvláště profily jednotlivých zubů, které musí splňovat tvarovou přesnost z důvodu přesného dosedání při pohybu ozubených kol, kdy při nepřesné výrobě dochází v mechanizmu k přílišnému hluku a následným reklamacím od zákazníka.

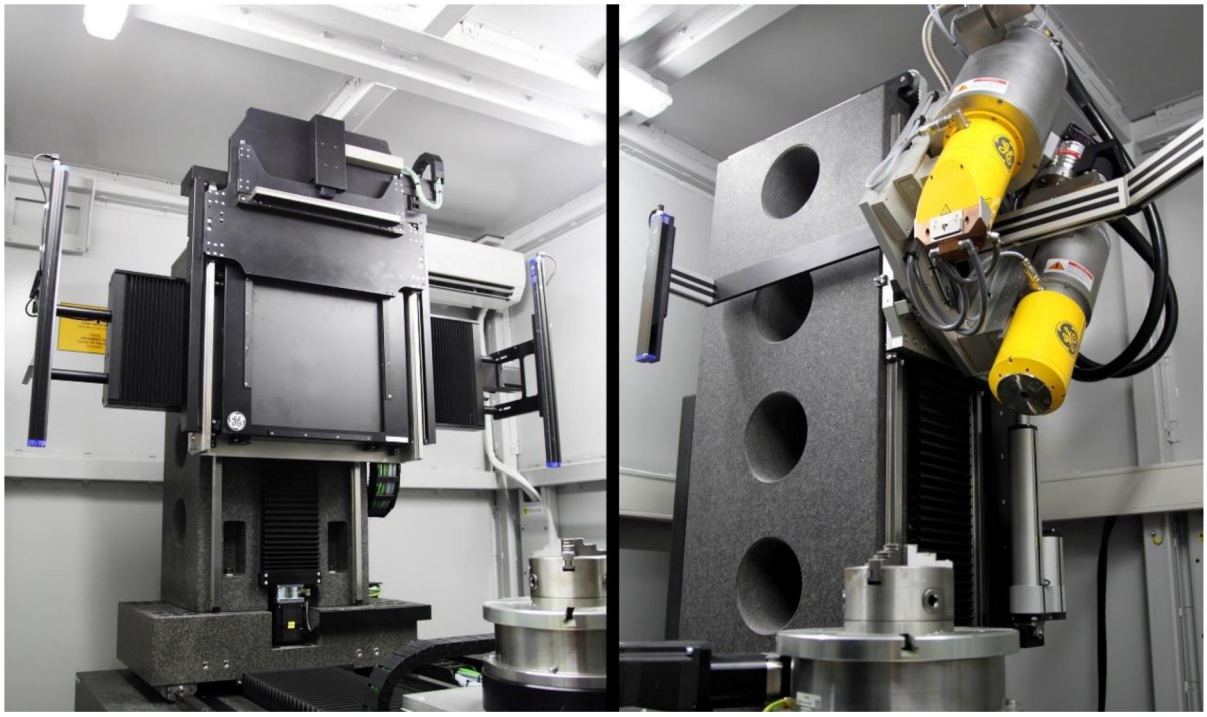
Výkresová dokumentace (příloha č. 2) počítá s kontrolou pomocí 3D skenování a pro celý výrobek je předepsána geometrická tolerance tvaru 0.3 mm. Výkres pak obsahuje ještě tolerance axiálního a radiálního házení o hodnotě 0,1 mm. Výkresová dokumentace ještě obsahuje několik rozměrů s tolerancemi. Tyto jsou však dle diskuze s konstruktérem nepotřebné v případě, kdy dojde ke kontrole geometrických tolerancí tvaru na celém výrobku.

Cílem analýzy výrobku Cog Wheel je ovšem nejen kontrola tvarové přesnosti, ale také objemová analýza vnitřní porozity. Doposud se kontrola vnitřní porozity prováděla pouze na základě měření hmotnosti vyrobeného kusu. Toto měření však neposkytuje žádné informace o charakteru lunkrů nebo jejich distribuci. V tomto smyslu by tedy počítačová tomografie přinášející informace o distribuci a charakteru lunkrů měla být poměrně velkým přínosem.

4.2 CT měření

4.2.1 Laboratoř rentgenové počítačové mikrotomografie na CEITEC VUT v Brně

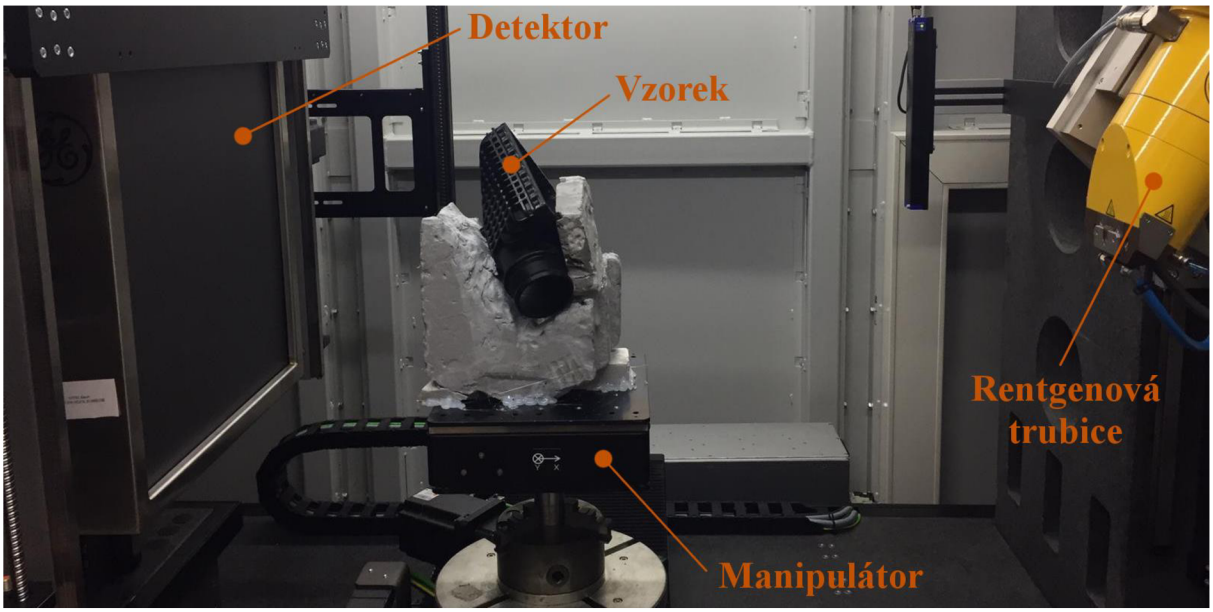
CT měření bylo realizováno v laboratoři rentgenové počítačové mikrotomografie na CEITEC VUT v Brně. Tato laboratoř byla první laboratoří v ČR, kde byl instalován tomograf GE v|tome|x L 240 (Obr. 21). Tato instalace proběhla v roce 2012 a celá laboratoř postupně procházela modernizací. V současnosti se laboratoř zabývá vývojem a aplikacemi tomografických metod v různých oborech s pružným režimem upraveným pro spolupráci s průmyslovými partnery. Zároveň je však kladen důraz na kvalitu tomografických výstupů a jejich interpretaci.



Obr. 21: Tomograf v|tome|x L 240 v laboratoři rentgenové počítačové mikrotomografie na CEITEC VUT v Brně. [ctlab.cz]

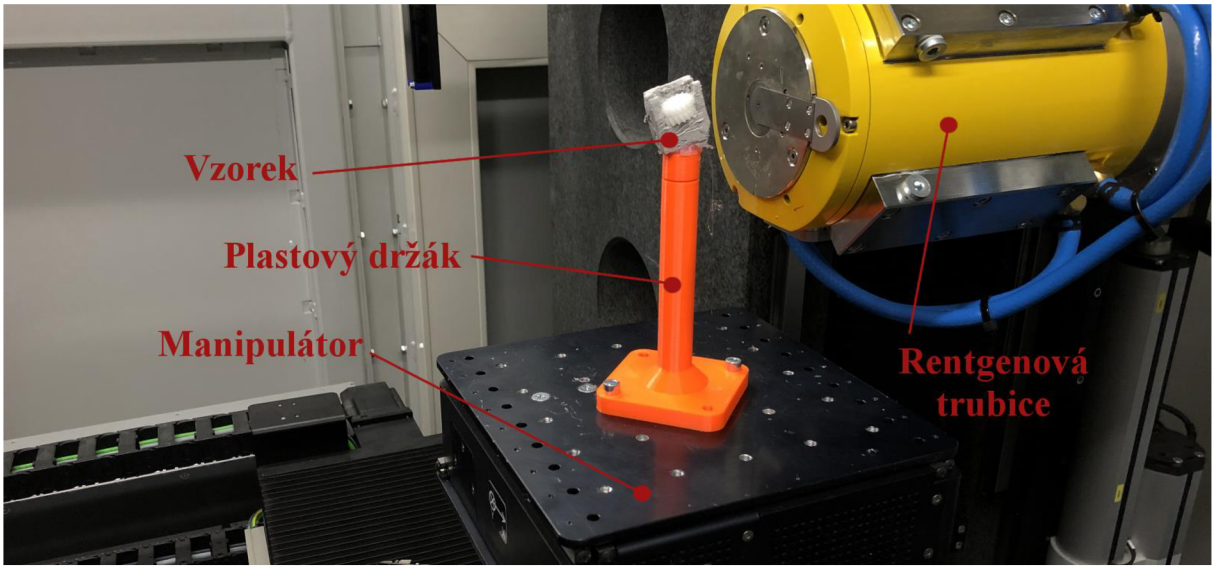
4.2.2 Příprava vzorků

Plastový výrobek Inlet Tank byl upevněn do polystyrenového držáku v nakloněné poloze. Tento držák byl přilepen na manipulátor [36] pro snadné vycentrování a celá sestava byla upevněna do sklíčidla mezi rentgenovou trubici a detektor. Vzhledem k velikosti výrobku bylo nutné sestavu umístit relativně blízko k detektoru, aby se celý výrobek vešel do zorného pole.



Obr. 22: Fotografie upevněného plastového výrobku Inlet Tank v tomografu. Výrobek je upevněn v náklonu za účelem minimalizace tomografických artefaktů. K upevnění byl použit tvrzený polystyren na manipulátoru.

Při přípravě plastových ozubených kol Cog Wheel byly vzorky přichystány pro měření po dvou kusech. K tomuto rozhodnutí bylo přistoupeno vzhledem k ušetřené časové náročnosti, přičemž voxelové rozlišení zůstává stejné jako při měření jednoho kusu. Ozubená kola jsou dostatečně úzká na to, aby i při připevnění dvou ozubených kol v náklonu nebylo zapotřebí rozšiřovat zorné pole. Při měření by bylo možné naměřit i 4 kusy najednou, přičemž by se voxelové rozlišení zhoršilo přibližně jen o polovinu, může to být tedy předmětem diskuze v budoucích měřeních.



Obr. 23: Fotografie upevněného plastového výrobku Cog Wheel v tomografu. Výrobky jsou upevněny po dvou kusech v náklonu za účelem minimalizace tomografických artefaktů. K upevnění byl použitý polystyren přilepen na plastový držák.

Tab. 2: Geometrické nastavení tomografu.

Měřený výrobek	Vzdálenost detektoru od rentgenové trubice	Vzdálenost osy rotace výrobku od rentgenové trubice	Voxelové rozlišení
Inlet Tank	1000 mm	620 mm	62 µm
Cog Wheel	800 mm	48 mm	12 µm

Plastové díly byly upevněny, stejně jako v případě výrobku Inlet Tank, do vyřezaného polystyrenu. Tento polystyren byl přilepen na vysoký úzký plastový držák, aby nedošlo ke kolizi rentgenové trubice a posuvného manipulátoru. Díky tomu bylo možné vzorky umístit blíže k rentgenové trubici a získat tak lepší voxelové rozlišení. Plastové díly byly upevněny v pozici, kdy nedochází k žádnému doteku mezi nimi. Díly tak budou jednoduše segmentovatelné při softwarovém zpracování.

4.2.3 Kalibrace

Pro kalibraci tomografu (resp. kalibraci velikosti voxelu) byly využity kalibrační fantomy s nominálním rozměrem. Konkrétně byl použit kalibrovaný fantom dvou rubínových kuliček o nominální vzdálenosti. Při měření výrobku Inlet Tank o nominální vzdálenosti 100,0026 mm jejich středů. Těsně před skenem plastového výrobku, tedy po nastavení geometrie a parametrů pro daný sken, byl naskenován fantom rubínových kuliček při zachování geometrického rozložení částí tomografu. Získaná data fantomu byla zpracována a byla naměřena vzdálenost středů těchto kuliček. Na základě těchto hodnot byla upravena původní velikost voxelu dle jednoduchého vzorce: [37]

$$vx_{kalibrovaná} = vx \frac{l_{nominální}}{l_{naměřená}} \quad (2),$$

kde:

$vx_{kalibrovaná}$ – výsledná velikost strany voxelu po kalibraci [µm],

vx – naměřená velikost strany voxelu před kalibrací [µm],

$l_{nominální}$ – nominální vzdálenost středů rubínových kuliček [mm].

$l_{naměřená}$ – naměřená vzdálenost středů rubínových kuliček [mm].

Obr. 24: Naměřená hodnota fantomu s nominální hodnotou 100,0026 mm při nastavení pro plastový výrobek Inlet Tank. Naměřená vzdálenost středů rubínových kuliček je 99,9906 mm.

Po naměření fantomů (Obr. 24) před jednotlivými skeny byly získány následující hodnoty:

Tab. 3: Naměřené hodnoty při měření kalibračních fantomů.

Geometrické nastavení	Kalibrovaná vzdálenost středů	Naměřená vzdálenost středů
Inlet Tank	100,0026 mm	99,9906 mm
Cog Wheel	40,0619 mm	40,0031 mm

4.2.4 Parametry měření

Pro obě tomografické měření byl použit tomograf phoenix v|tome|x L 240. Měření výrobku Inlet Tank proběhlo na reflexní trubici s mikrofokusem při využití plného rozsahu detektoru dynamic 41|100 s rozlišením 4000 x 4000 px. V případě výrobku Cog Wheel byla využita transmisní nanofokusová trubice a na detektoru byl zvolen binning 2x2. Výsledné rozlišení detektoru při měření výrobku Cog Wheel bylo tedy 2000x2000. Parametry měření jsou uvedeny v Tabulce 4.

Tab. 4: Parametry CT měření plastových výrobků

Výrobek	Napětí	Proud	Expozice	Počet snímků	Filtrování	Voxelové rozlišení
Inlet Tank	150 kV	300 µA	334 ms	3600	0,5 mm Cu	62 µm
Cog Wheel	80 kV	150 µA	600 ms	2300	-	12 µm

Výsledné voxelové rozlišení bylo v závislosti na kalibraci upraveno na následující hodnoty:

- Výrobek Inlet Tank – 61,9740 µm
- Výrobek Cog Wheel – 11,9824 µm

4.2.5 Rekonstrukce tomografických dat

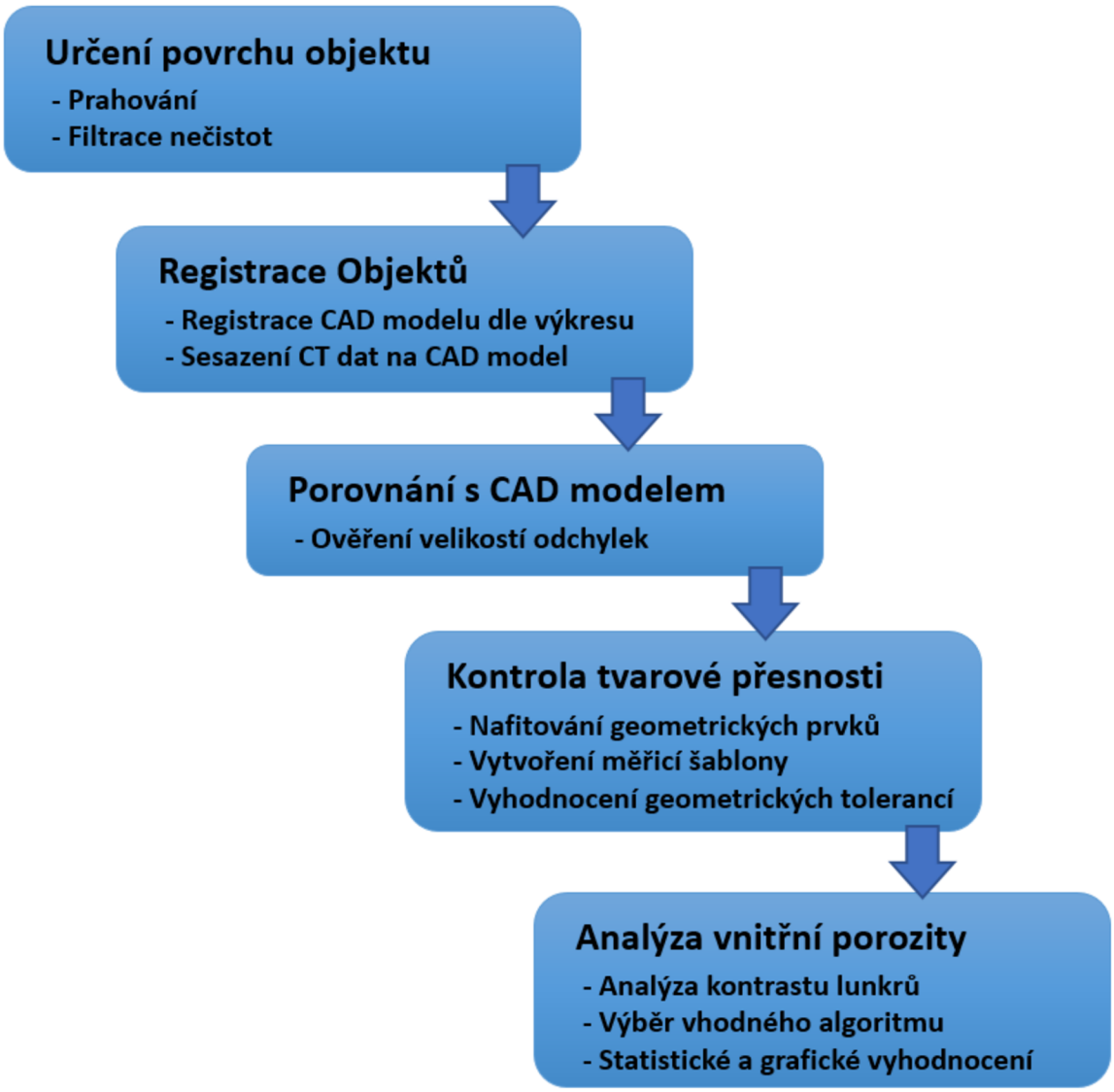
Základním výstupem tomografického měření je série rentgenových snímků, které mapují vzorek ze stran okolo 360°. Tyto snímky je nutno zrekonstruovat do výsledného objemového souboru a ten pak v příslušném softwaru zpracovat, aby byl použitelný pro zamýšlené analýzy.

Pro rekonstrukci rentgenových snímků byl použit software datos|x reconstruction. Při rekonstrukci výrobku Inlet Tank byl použit modul BHC+|module, který filtruje tzv. tvrdnutí svazku. Tyto artefakty se však u plastových materiálů příliš neobjevují, proto byl tento modul využit s nízkou hodnotou. Pro lepší zpracovávání dat bylo využito ještě modulu Inline Median, který filtruje tomografické snímky a tím tak dochází k redukci zašumění a snížení kruhových artefaktů. V případě rekonstrukce výrobku Cog Wheel nebylo využito modulu BHC+|module, ani modulu Inline Median, z důvodu lehčího materiálu a mírnějšího zašumění.

4.3 Vyhodnocení plastového výrobku Cog Wheel

4.3.1 Proces softwarového zpracování výrobku

Proces softwarového zpracování byl navržen v závislosti na kvalitativních požadavcích, které vychází především z jeho funkce. Proces softwarového zpracování je znázorněn na Obr. 25.



Obr. 25: Grafického znázornění procesu softwarového zpracování naskenovaných dat výrobků Cog Wheel.

4.3.2 Určení povrchu naskenovaných CT dat

Pro analýzu výrobku Cog Wheel, která zahrnuje kontrolu tvarové přesnosti a objemovou analýzu vnitřní porozity, je nutné určit povrch naskenovaného objektu. V softwaru VGStudio Max byl k určení povrchu použit nástroj Surface determination, který nabízí poměrně širokou škálu možností, od základního určení povrchu pomocí hraniční hodnoty rozdělující pozadí a materiál, až po multi-materiálové určení povrchu na základě různých startovacích kontur.

Pro určení povrchu výrobku byla zvolena základní funkce isovalue based, která nabízí určení povrchu pouze na základě hraniční hodnoty šedi. Při použití této funkce software detekoval i některé další objekty v pozadí, jako např. nečistoty vyskytující se v polystyrenovém držáku.

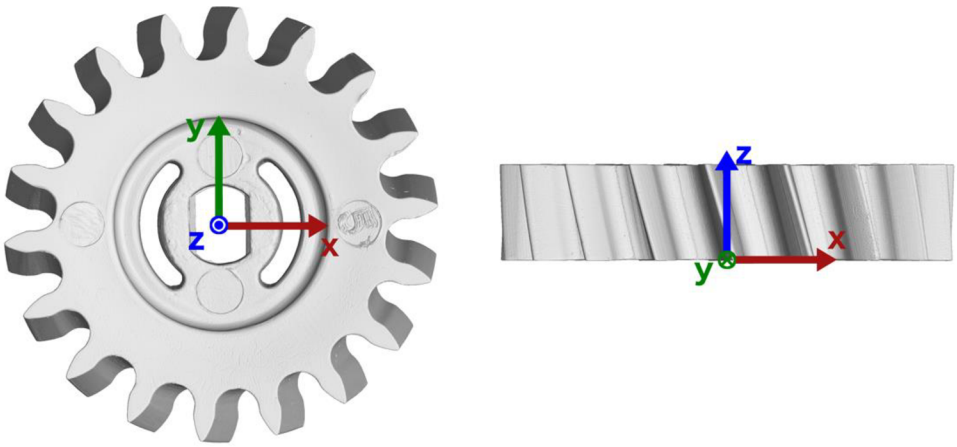
Obr. 26: Zobrazení odfiltrování nečistot v naskenovaných datech výrobku Cog Wheel č.5. Vlevo - povrch s nečistotami určený pomocí funkce isovalue based; vpravo - povrch určený za pomoci startovací kontury a hledání povrchu v jejím okolí.

Pro zdokonalení určeného povrchu a odstranění nežádoucích nečistot (Obr. 26) byl ze základního povrchu pomocí nástroje Split vyfiltrován pouze největší spojitý objekt a byl použit jako startovací kontura pro nové určení povrchu naskenovaného výrobku.

4.3.3 Registrace dat

Při přípravě dat k následné tvarové kontrole je klíčové data zarovnat do souřadného systému. Tento proces se nazývá registrace a obvykle je vzorek zarovnán tak, aby bylo možné ho procházet v rovinách kolmých na důležité plochy vzorku.

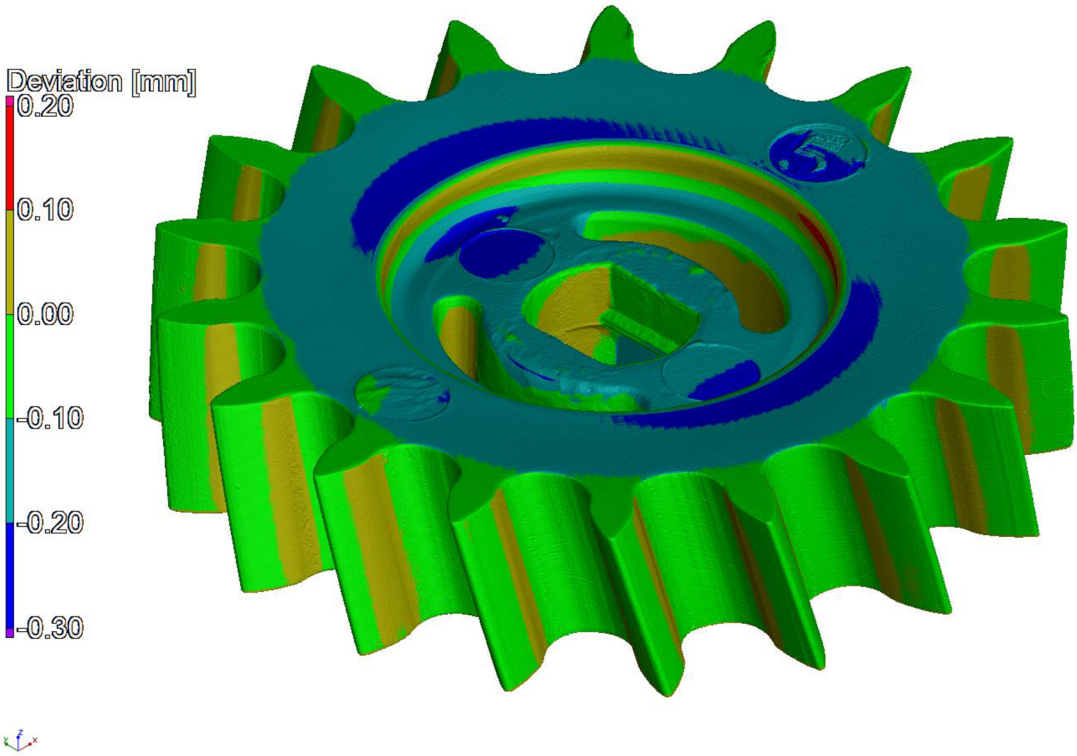
Software VGStudio Max využívá pravotočivý kartézský souřadnicový systém. Plastové výrobky byly zaregistrovány dle výkresové dokumentace pomocí nástroje Sequential registration. Tento nástroj umožňuje registraci nominálního CAD modelu dle základen zakreslených ve výkresové dokumentaci. Následně je na CAD model sesazen naskenovaný objekt, využívajíc určený povrch. Objekt je sesazen pomocí základen, které jsou vybrány na nominálním CAD modelu. Sesazení probíhá postupně, kdy je nejprve co nejlépe sesazena primární základna, následně je co nejlépe sesazena sekundární základna a na závěr základna terciální. Při vyhodnocování tolerancí házení pak byla terciální základna nahrazena celkovým best-fitem (co nejlepším sesazením celého objektu) vzhledem k zakreslení tolerance ve výkresu. Registrace je znázorněna na Obr. 27.



Obr. 27: Registrace plastového výrobku Cog Wheel znázorněna na dvou paralelních 3D pohledech.

4.3.4 Porovnání s nominálním CAD modelem

Před vyhodnocováním geometrických tolerancí byla pro kontrolu tvarové přesnosti využita analýza porovnání naskenovaných dat s nominálním CAD modelem. Tato analýza zobrazuje výsledné odchylky od nominálního tvaru ve 3D modelu pomocí barevné mapy. Analýza byla provedena za účelem předběžného vyhodnocení, které ověří, že se tvarové odchylky pohybují v hodnotách, kdy je následné vyhodnocení tolerancí smysluplné.

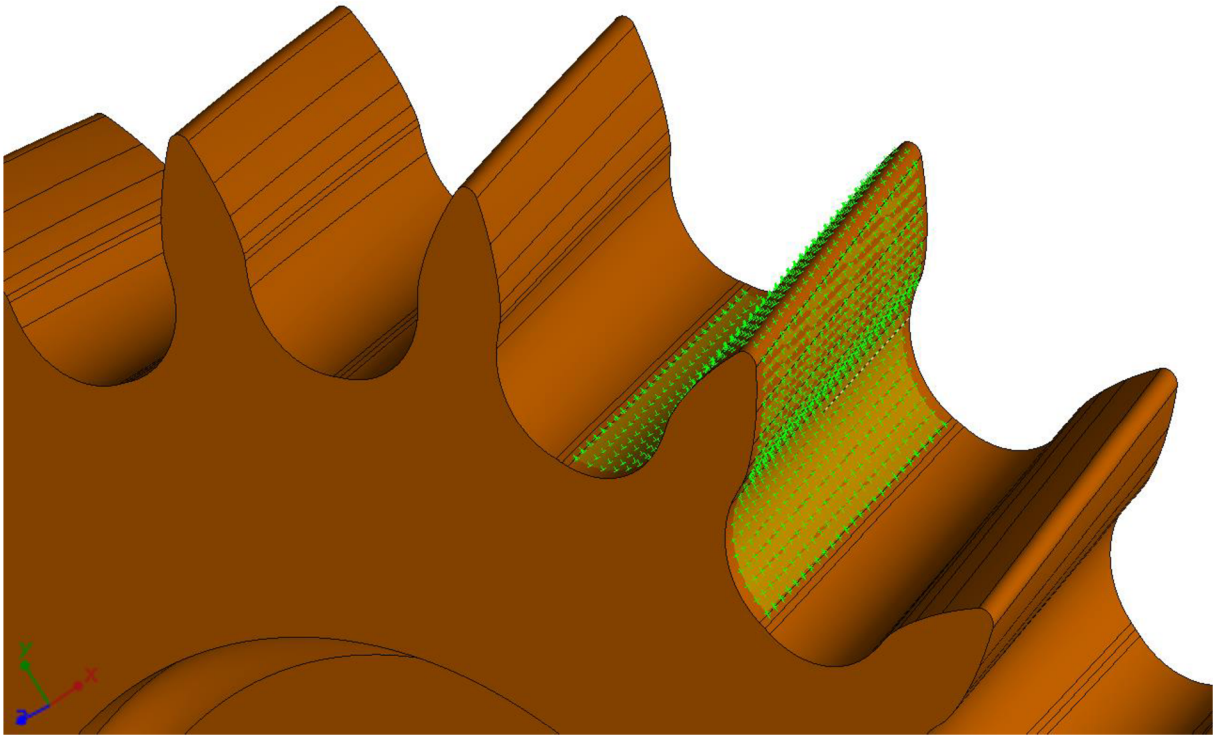


Obr. 28: Ukázka barevné mapy při porovnání nominálního CAD modelu výrobku Inlet Tank s naskenovanými daty.

4.3.5 Kontrola geometrických tolerancí

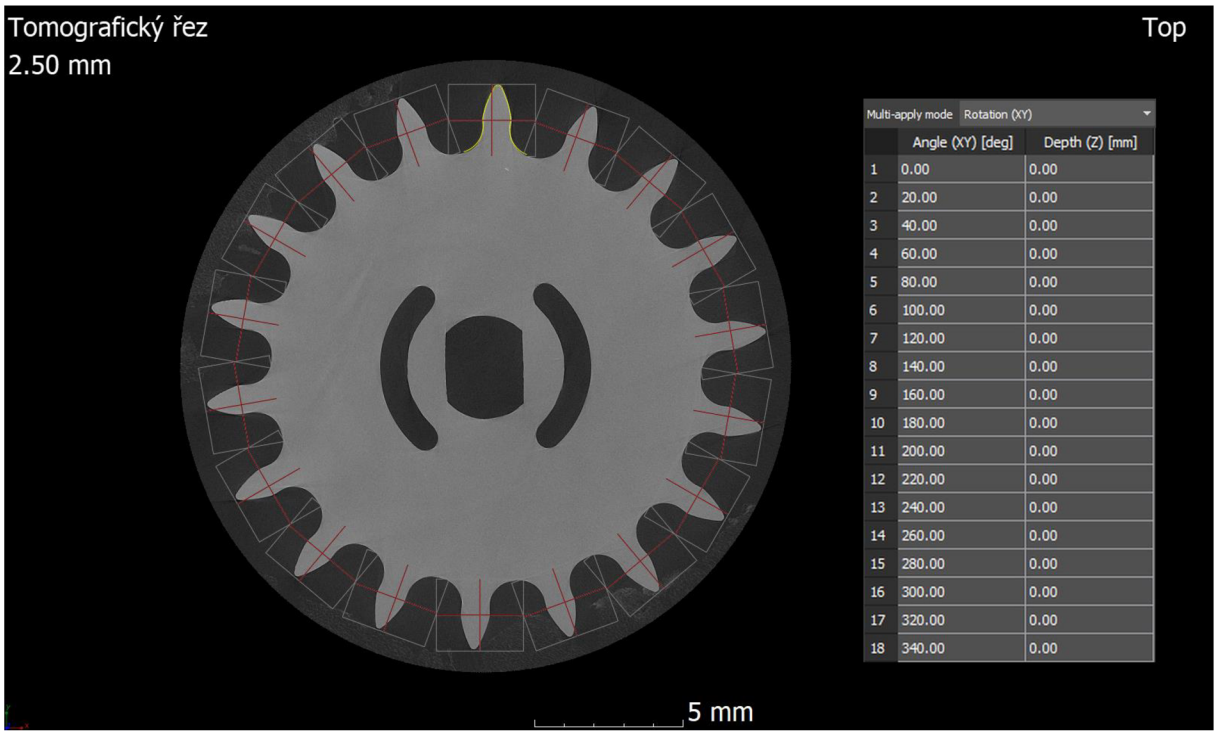
Primárním zájmem u kontroly výrobku Cog Wheel je jeho ozubení. Tedy tvarová odchylka zubů a vyhodnocení tolerance obvodového házení. I přesto, že ozubení nese stejnou geometrickou toleranci tvaru jako zbytek výrobku, je tvar zubu hlavním kritériem pro zhodnocení kvality výrobku.

Tvar zubu se skládá z několika geometrických prvků. Při fitování geometrických prvků byly vybrány všechny plochy, které určují tvar zubu, a tyto plochy daného zubu byly označeny jako jedna skupina. Tím vyhodnocení geometrické tolerance tvaru zubu odpovídá vždy celému jeho povrchu.



Obr. 29: 3D vizualizace vybraných ploch, které tvoří spojitý tvar celého zubu.

Tvar zubu, tedy celá skupina ploch, byl vybrán na CAD modelu a pomocí funkce Pattern byl přenesen a rozmnožen okolo osy ozubeného kola. Připraveno k vyhodnocení tak bylo všech 18 zubů (Obr. 30).



Obr. 30: Rozmnožení geometrického tvaru zubu pro následné vyhodnocení všech 18 zubů. Výrobek Cog Wheel č.5.

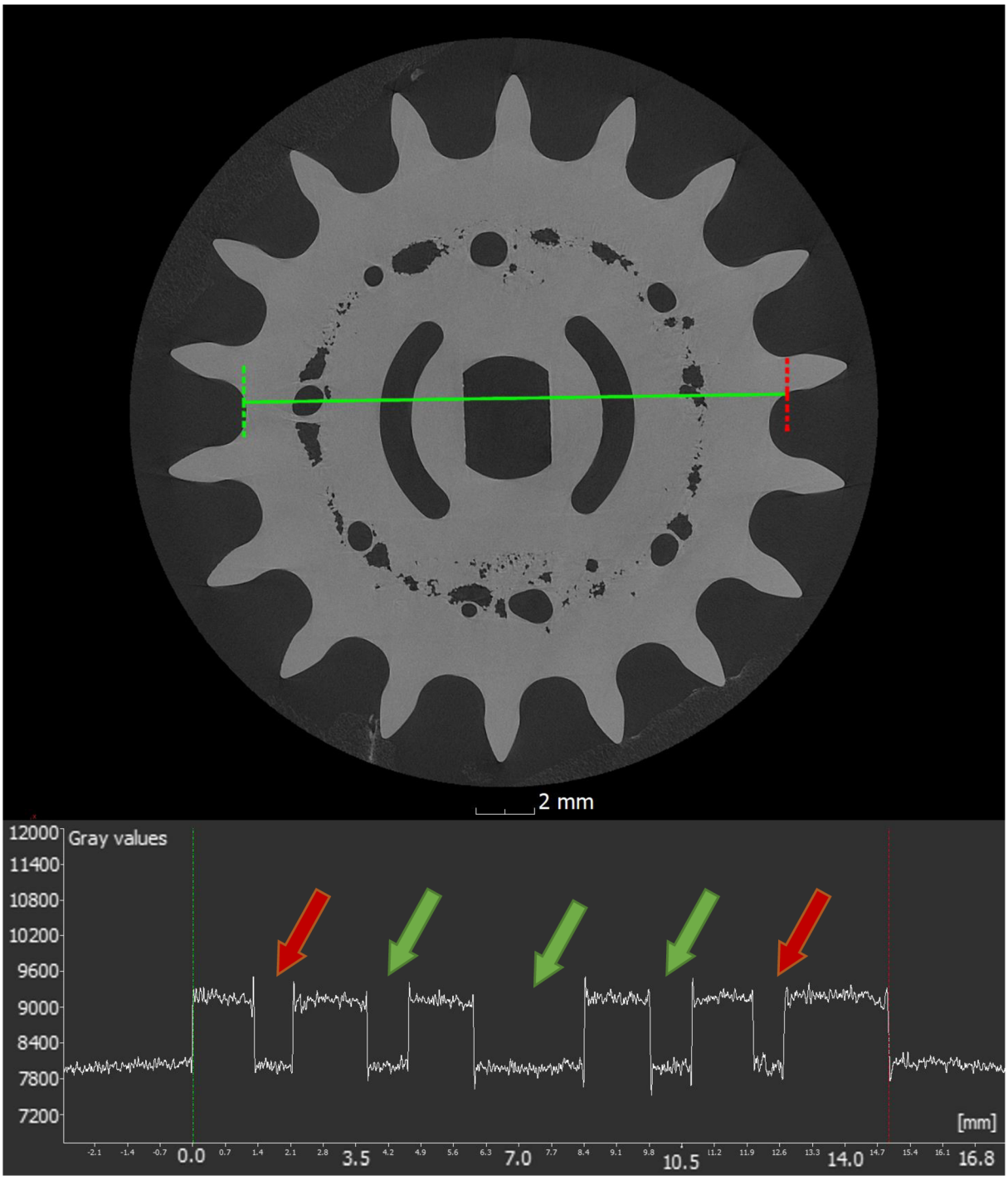
Vedle kontroly tvarové přesnosti ozubení je nutné zkontrolovat ještě zbylé části výrobku. Zbylé části výrobku byly zkontrolovány dle zmíněné tvarové tolerance na základně výkresové dokumentace. Některé části byly opět seskupeny, např. středový otvor, který je složen z rovin a rádiusů.

Tvarová kontrola výrobku Cog Wheel byla provedena na díle č.5. Z této tvarové kontroly byla vytvořena měřicí šablona a naimportována do dalších třech dílů 6, 7 a 8 (přičemž byla dodržena registrace dle výkresové dokumentace). Jedná se o efektivní způsob měření, který lze využít při větším množství typově stejných dílů.

Vyhodnocení všech rozměrů výrobků Cog Wheel je k dispozici ve výstupním protokolu – příloha č. 4.

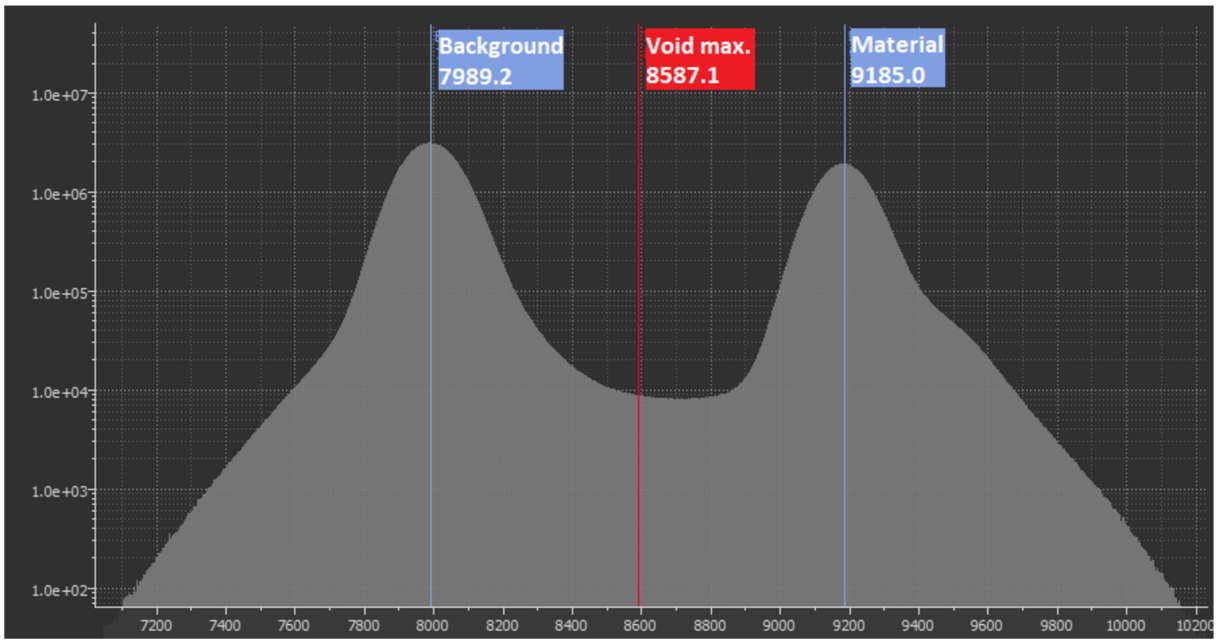
4.3.6 Objemová analýza vnitřní porozity

Při výběru algoritmu pro analyzování lunkrů ve výrobcích Cog Wheel byl zvolen algoritmus Only Threshold, který využívá globální prahování. K tomuto nástroji bylo přistoupeno z důvodu výrazného kontrastu mezi lunkry a materiálem výrobku. Kontrast je pomocí histogramu zobrazen na Obr. 31. Tento kontrast je taktéž patrný na Obr. 33 v tomografickém řezu bez aktivované analýzy, kde je zobrazen rovněž výsledek objemové analýzy s distribucí lunkrů zbarvených dle velikosti jejich objemů.

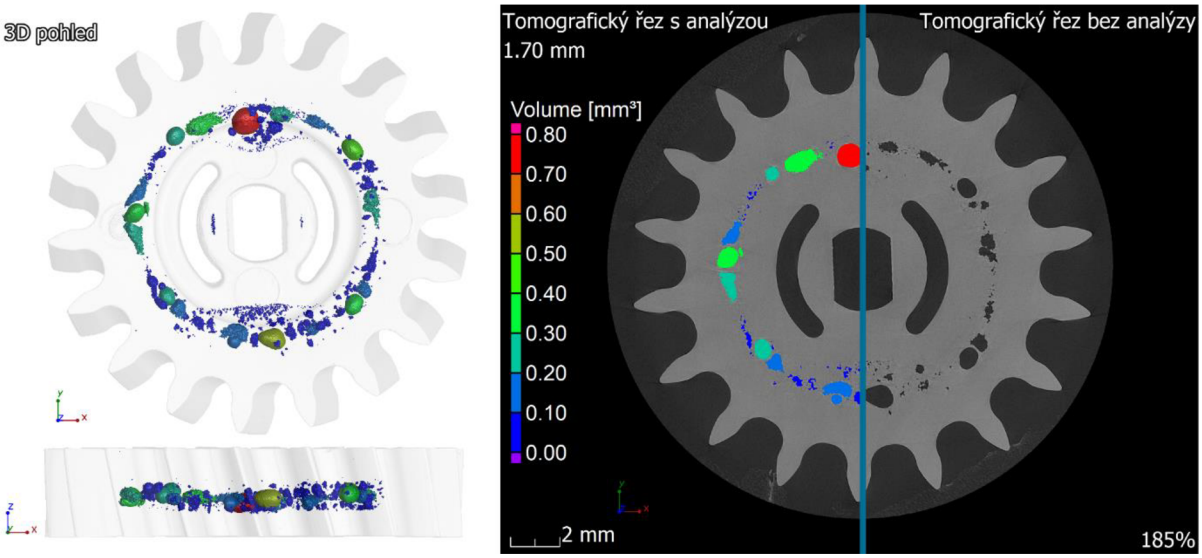


Obr. 31: Histogram zobrazující distribuci šedi podél zelené kontury. Zelené šipky označují propady způsebené otvorem, červené šipky označují propady způsebené lunkrem.

Hodnota Void max., která určuje hranici pro rozlišení lunkru, byla nastavena pomocí automaticky vypočtené hodnoty na základě interpolace histogramu CT skenu. Automatický výpočet hodnoty Void max. pomocí interpolace je vypočten na základě detekce dvou nejvyšších vrcholů v histogramu. Tyto vrcholy v tomto případě reprezentují pozadí a materiál skenovaného výrobku. Automatická hodnota Void max. je pak umístěna do středu mezi nimi. V ideálním případě tedy do lokálního minima histogramu. Výsledná hodnota Void max. byla tedy automaticky stanovena na 8587,1.

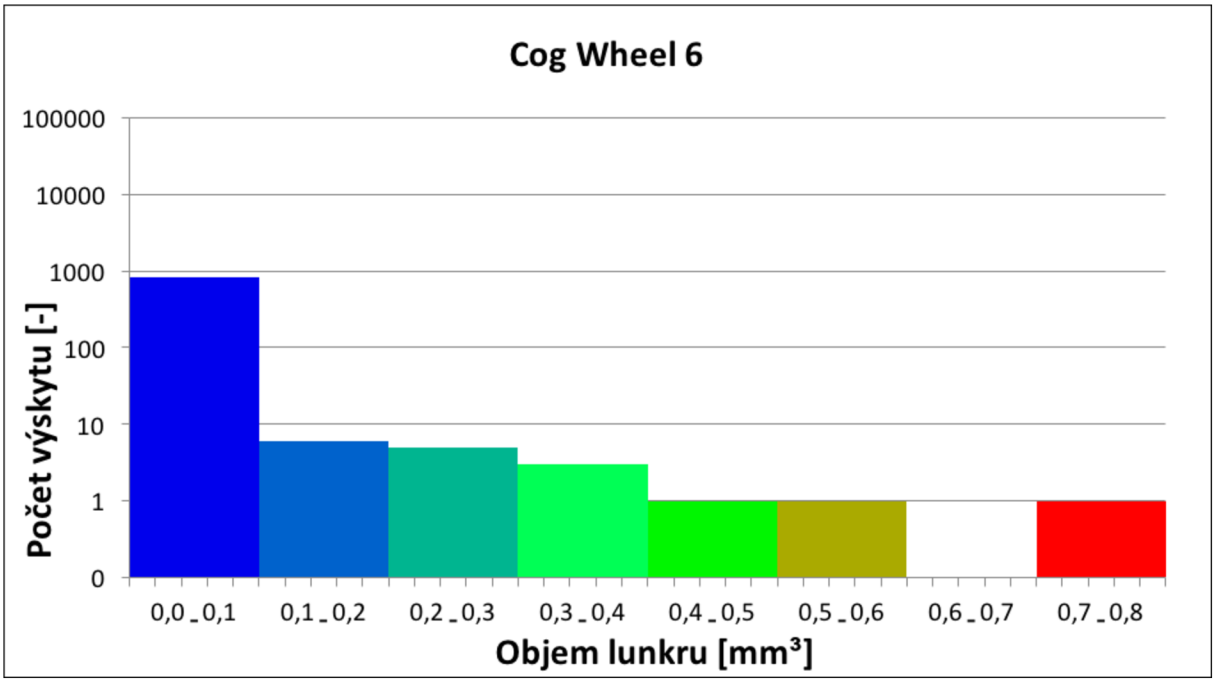


Obr. 32: Automatický výpočet hodnoty Void max. pomocí interpolace v softwaru VGStudio Max.



Obr. 33: Zobrazení distribuce detekovaných lunkrů ve výrobku Cog Wheel č.6.

Vnitřní porozita výrobku Cog Wheel 6 byla vypočtena na 0,98 %. Podrobněji jsou výsledky vnitřní analýzy zobrazeny na Obr. 34 a v tabulce č. 5. Výsledky objemové analýzy vnitřní porozity všech čtyř výrobků jsou vypracovány v příloze č. 6.



Obr. 34:Histogram velikostí lunkrů detekovaných v CT datech výrobku Cog Wheel 6.

Tab. 5: Statistické výsledky objemové analýzy vnitřní porozity výrobku Cog Wheel 6.

	Objem lunkrů	**Počet lunkrů**
Lunkry menší než 0,1 mm^3	1,59 mm^3 (844)	844
Lunkry 0,1 – 0,2 mm^3	0,92 mm^3 (5)	5
Lunkry 0,2 – 0,3 mm^3	1,20 mm^3 (3)	3
Lunkry 0,3 – 0,4 mm^3	1,09 mm^3 (1)	1
Lunkry 0,4 – 0,5 mm^3	0,42 mm^3 (1)	1
Lunkry 0,5 – 0,6 mm^3	0,50 mm^3 (1)	1
Lunkry 0,6 – 0,7 mm^3	-	-
Lunkry 0,7 – 0,8 mm^3	0,71 mm^3 (1)	1
Lunkry větší než 0,8 mm^3	-	-
Celkem	6,43 mm^3	856
Celková porozita	0,98 %	

Pozn. V závorce je uveden počet detekovaných lunkrů dané kategorie.

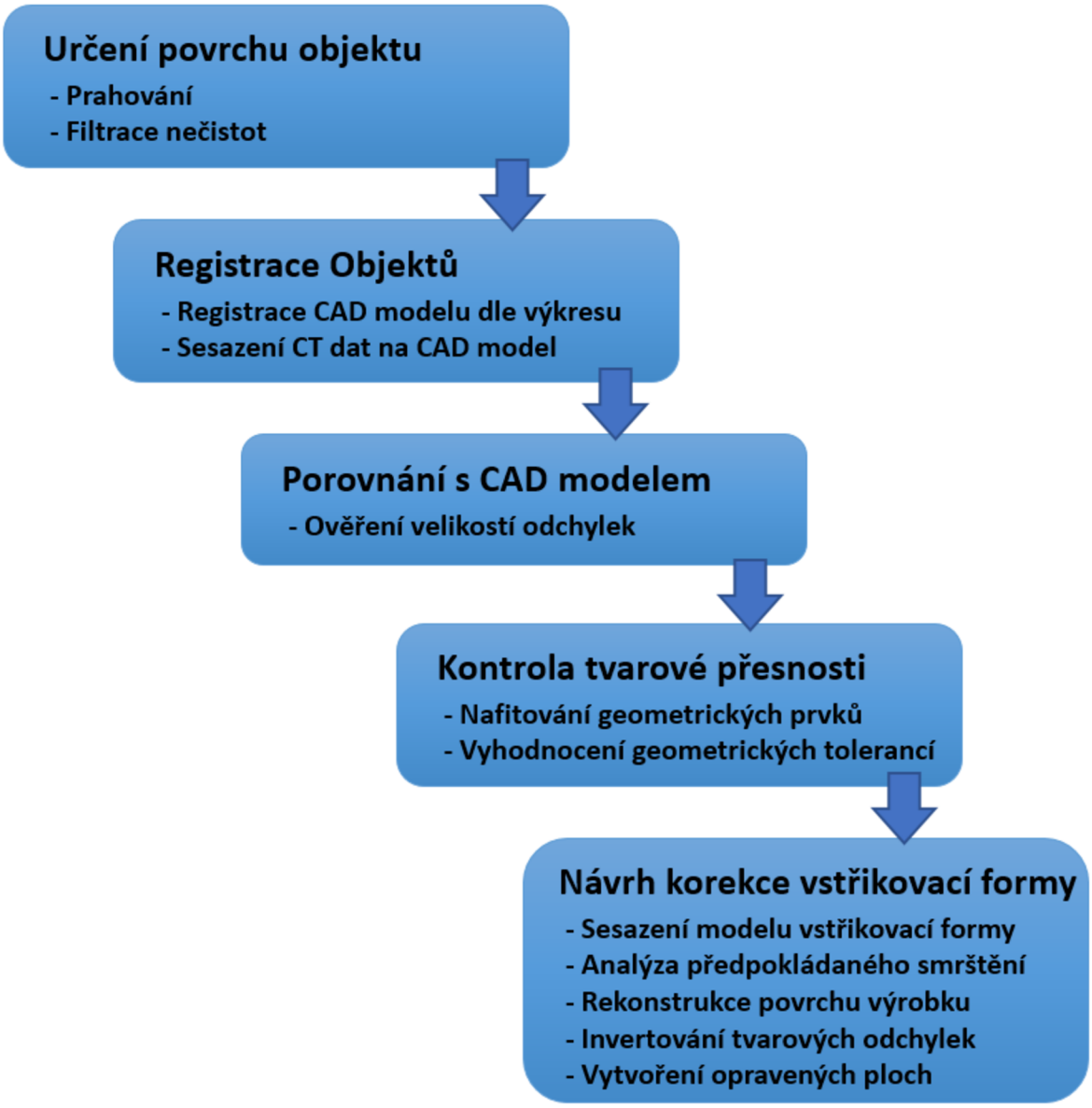
4.3.7 Zhodnocení výsledků kontroly kvality výrobků Cog Wheel

Všechny 4 plastové výrobky Cog Wheel prošly kontrolou tvarové přesnosti v požadované toleranci. Zároveň byla na každém výrobku provedena objemová analýza vnitřní porozity, která vyhodnocuje vnitřní lunkry graficky i číselně. Je tak možné graficky interpretovat distribuci lunkrů a zobrazit jejich umístění ve vzorku. Zároveň je možné tyto lunkry popsat číselně společně s hodnotami jako je např. průměr opsané kružnice lunkru, jeho objem, povrch apod. Tato analýza tedy přináší mnohem více informací o vnitřní porozitě, než dosavadní procentuální vyjádření na základě porovnání hmotnosti výrobků. Plastové výrobky navíc díky jejich diskovitému tvaru lze měřit i po více kusech a pomocí měřících šablon tak dosáhnout efektivní a ekonomicky výhodné kontroly kvality zahrnující kontrolu tvarové přesnosti a podrobné vyhodnocení vnitřní porozity výrobků.

4.4 Analýza plastového výrobku Inlet Tank

4.4.1 Proces softwarového zpracování výrobku

Proces softwarového zpracování byl navržen především v závislosti na kvalitativním požadavku vyhovění předepsaným geometrickým tolerancím v oblasti spoje výrobku s chladícím jádrem případným návrhem korekcí pro vstřikovací formu. Proces je znázorněn na Obr. 36.



Obr. 35: Grafického znázornění procesu softwarového zpracování naskenovaných dat výrobku Inlet Tank.

4.4.2 Určení povrchu naskenovaných dat

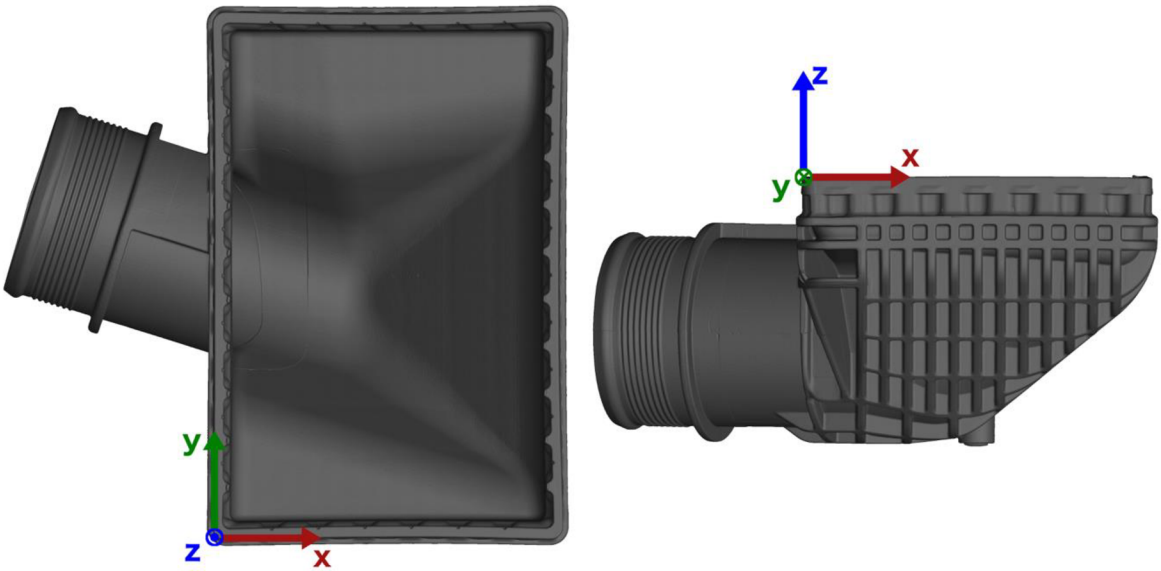
Pro analýzu výrobku Inlet Tank, která zahrnuje kontrolu tvarové přesnosti, je stejně jako u výrobku Cog Wheel nutné určit povrch naskenovaného objektu. Na detekovaném povrchu budou probíhat měření tolerancí a případné korekce.

Pro určení povrchu výrobku byl zvolen obdobný postup jako u výrobku Cog Wheel. Tedy určení na základě prahování, filtrace největšího spojitého objektu a následné využití startovací kontury (Obr. 36).

Obr. 36: Zobrazení odfiltrování nečistot v naskenovaných datech výrobku Cog Wheel č.5. Vlevo - povrch s nečistotami určený pomocí funkce isovalue based; vpravo - povrch určený za pomoci startovací kontury a hledání povrchu v jejím okolí.

4.4.3 Registrace dat

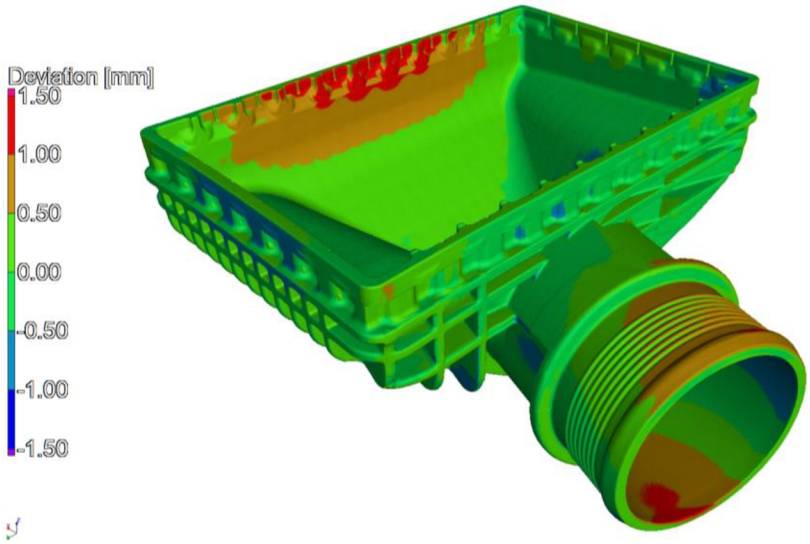
Pro registraci vzorku byl stejně jako u výrobku Cog wheel využit nástroj Sequential registration, který umožňuje registraci CAD modelu dle primární, sekundární a terciální základny, a zároveň sesazení CT dat na tento CAD model podle příslušných základen a jejich priorit. Při vyhodnocování tolerancí byly však některé základny nahrazeny best-fitem tak, jak udává výkresová dokumentace (příloha č. 1).



Obr. 37: Registrace plastového výrobku Inlet Tank znázorněna na dvou 3D pohledech s paralelním vykreslením.

4.4.4 Porovnání s nominálním CAD modelem

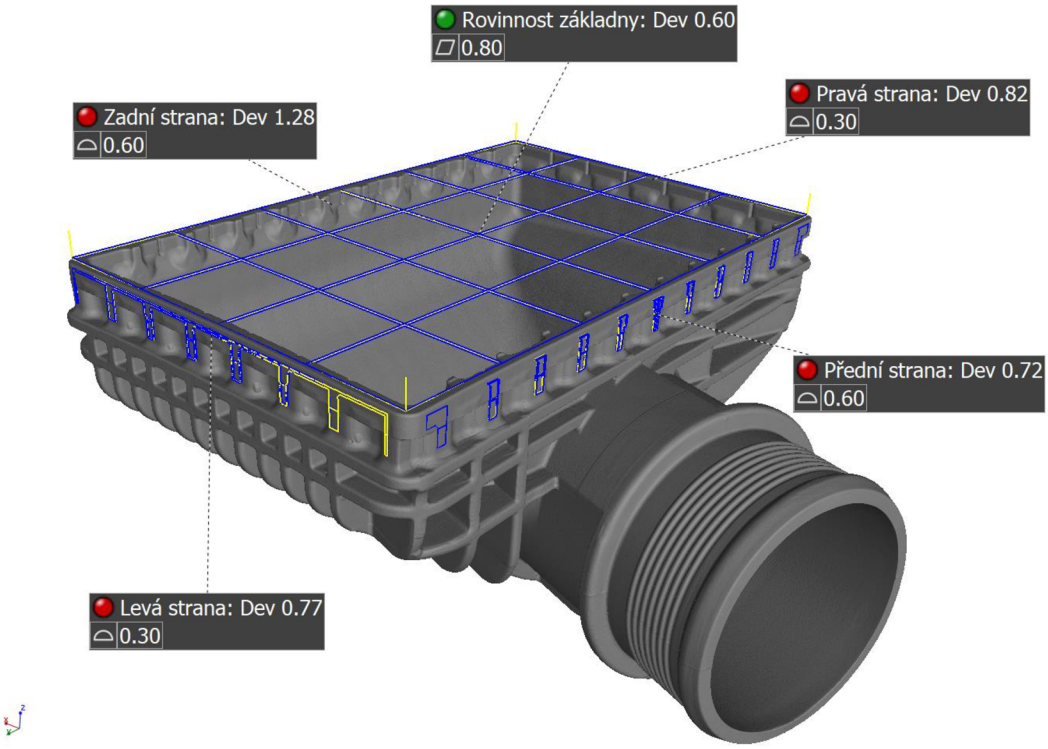
Před samotným vyhodnocováním geometrických tolerancí byla pro kontrolu tvarové přesnosti využita analýza porovnání naskenovaných dat s nominálním CAD modelem. Tato analýza předběžně napovídá povahu tvarových nepřesností a již zde je patrné zakřivení bočních stěn.



Obr. 38: Ukázka barevné mapy při porovnání nominálního CAD modelu výrobku Inlet Tank s naskenovanými daty.

4.4.5 Kontrola geometrických tolerancí

Na získaný povrch výrobku Inlet Tank bylo z nominálního CAD modelu přeneseno 5 zájmových geometrických prvků. První z nich je základna A, ze které byla vyhodnocena rovinnost. Dále pak byly přeneseny 4 boční stěny pro tvarovou kontrolu dle geometrických tolerancí (Obr. 39). Všechna fitování byla provedena pomocí Gaussovy metody nejmenších čtverců.



Obr. 39: Vyhodnocení zájmových geometrických tolerancí výrobku Inlet Tank.

Kompletní vyhodnocení všech geometrických tolerancí společně s analýzou porovnání CT dat s nominálním CAD modelem je vypracováno ve výstupním protokolu v příloze č. 3.

Výrobek Inlet Tank byl po zavedení souřadného systému a registraci podroben analýze pro porovnání odchylek od nominálního CAD modelu. Již tato analýza zobrazila tvarové nepřesnosti výrobku, především zkroucení (propadnutí) bočních stěn (Obr. 38). Dále byly na povrch nafitovány zájmové geometrické prvky z CAD modelu – základna A a 4 boční stěny. Vyhodnocení těchto prvků, které je vypracováno ve výstupním protokolu, ukázalo splněnou toleranci rovinnosti základny A. Všechny 4 boční stěny však nesplnily požadavky tvarové tolerance od nominálního tvaru. Je tedy zapotřebí upravit výrobu výrobku.

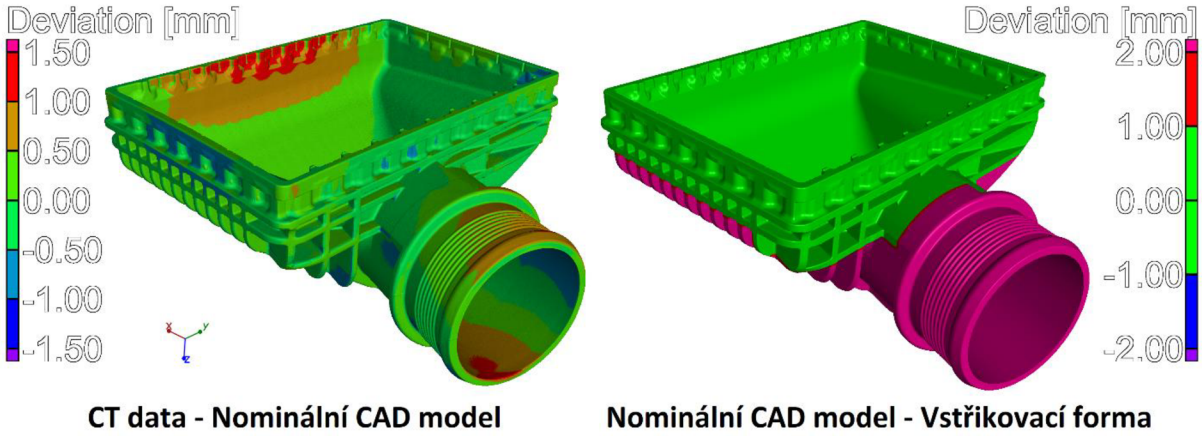
4.4.6 Návrh korekce vstřikovací formy

Součástí poskytnutých materiálů k plastovému výrobku Inlet Tank byl také CAD model vstřikovací formy. Vzhledem k výsledkům kontroly tvarové přesnosti, kde nedošlo ke shodě s požadovanými tolerancemi, bylo přistoupeno k návrhu korekce forem pomocí nového modulu v softwaru VGStudio Max 3.3.

Aby bylo možné návrh korekce formy provést, je nutné nejprve CAD model formy sesadit na již nachystaná CT data, která jsou společně s nominálním CAD modelem výrobku již zaregistrovány. Tvar modelu vstřikovací formy je shodný s nominálním CAD modelem výrobku s tím rozdílem, že je poměrově větší o uvažované smrštění. Smrštění se obvykle pohybuje kolem 3 %, záleží ovšem na materiálu, procentuální zastoupení vláken apod.

Model vstřikovací formy tedy obklopuje nominální model výrobku s určitým odskokem. Tato vzdálenost je obvykle ve všech místech stejná (pokud není např. z empirických důvodů navržena jinak). Sesazení vstřikovací formy tedy proběhlo tak, aby nominální model obklopovala vstřikovací forma ve všech směrech se stejným odskokem.

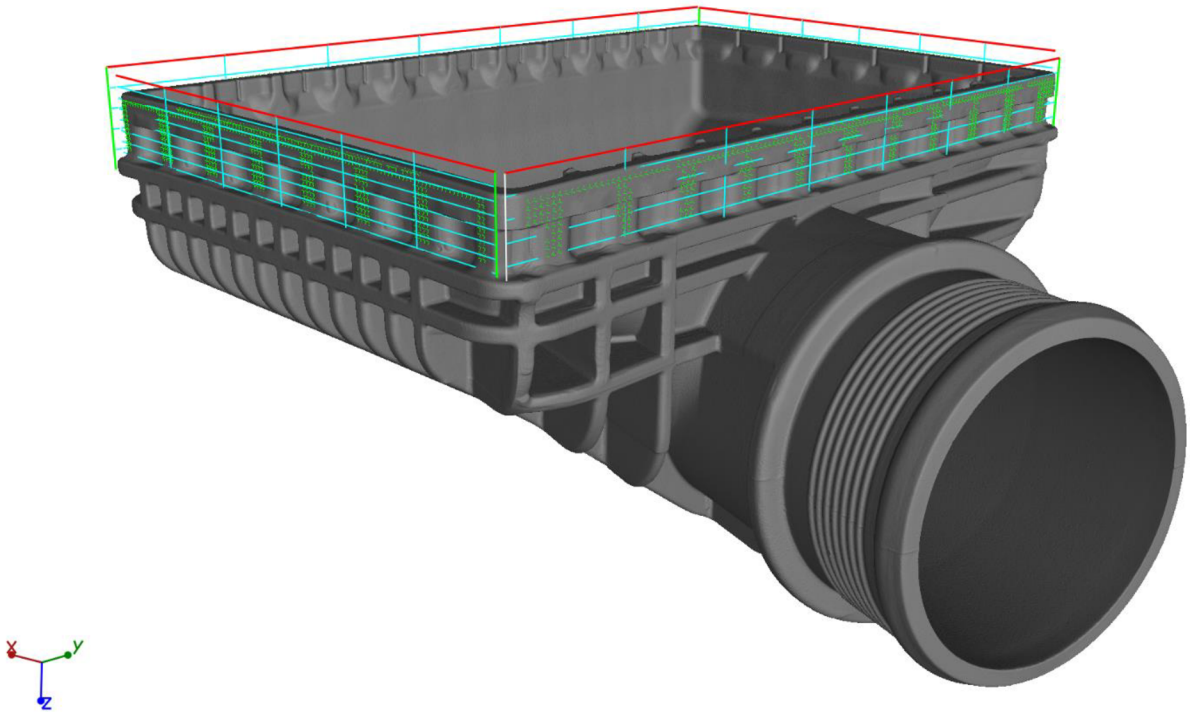
Důležitou součástí procesu korekce vstřikovací formy je analýza pro porovnání odchylek mezi jednotlivými objekty. Tato analýza se v běžné praxi využívá pro určení odchylek skutečného výrobku od nominálního tvaru. Stejně tak je využita v procesu korekce forem. Pro správnou funkci procesů korekce formy je však nutné také porovnat nominální CAD model vzorku a CAD model vstřikovací formy. Toto porovnání je důležité pro získání informací o vzdálenosti mezi modelem výrobku a vstřikovací formy. Ve své podstatě se tedy jedná o získání informace o uvažovaném smrštění. Vzhledem k zájmovým oblastem byla porovnána pouze část vstřikovací formy (Obr. 40).



Obr. 40: Vlevo - barevné znázornění analýzy porovnání CT dat a nominálního CAD modelu. Vpravo - barevné znázornění analýzy porovnání nominální CAD modelu a zájmové části vstřikovací formy.

Po správném zaregistrování všech potřebných částí, tedy naskenovaného vzorku, nominálního CAD modelu a CAD modelu vstřikovací formy a provedení obou analýz porovnání s modely jsou data připravena pro využití modulu pro návrh korekce vstřikovací formy.

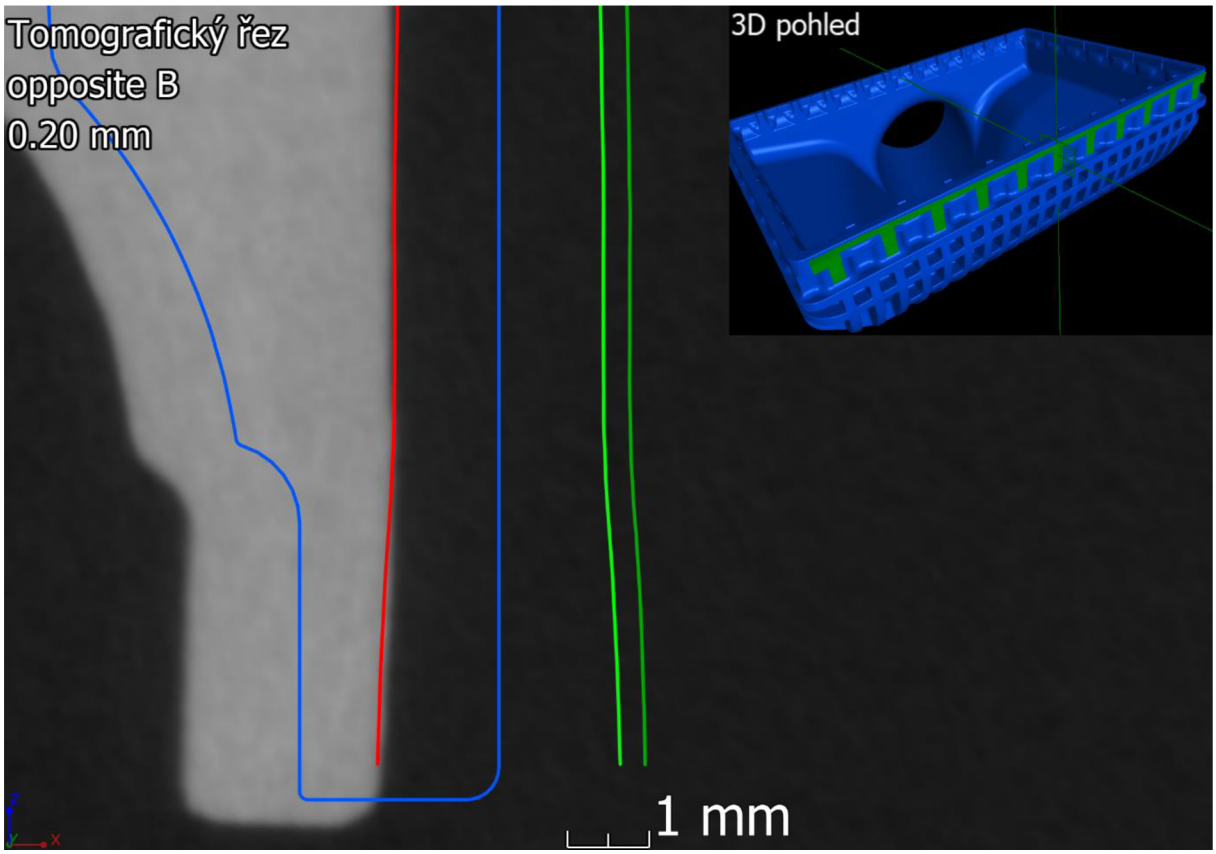
V první řadě je nutné zájmové oblasti převést do tzv. rekonstruovaného povrchu. Jedná se o proces, kdy je často členitý povrch ze zájmové oblasti převeden do jednodušší geometrie, se kterou lze poté dále pracovat.



Obr. 41: Zobrazení procesu fitování rekonstruovaného povrchu pomocí řídících bodů.

Tento proces se provádí za pomoci řídících bodů, které jsou nafitovány na povrch skutečného výrobku. Pomocí těchto bodů jsou tak vytvořeny spojité polynomiální plochy, ze kterých je následně vytvořen plocha, se kterou je poté možné dále pracovat. Úkolem rekonstruovaného povrchu je tak vytvoření plochy, která co nejvíce reprezentuje skutečný povrch naskenovaného výrobku. VGStudio Max nabízí řadu parametrů, které tvorbu rekonstruovaného povrchu značně ovlivňují. Tím je možné dosáhnout potřebného napodobení skutečného povrchu a získat tak co nejlepší výsledek.

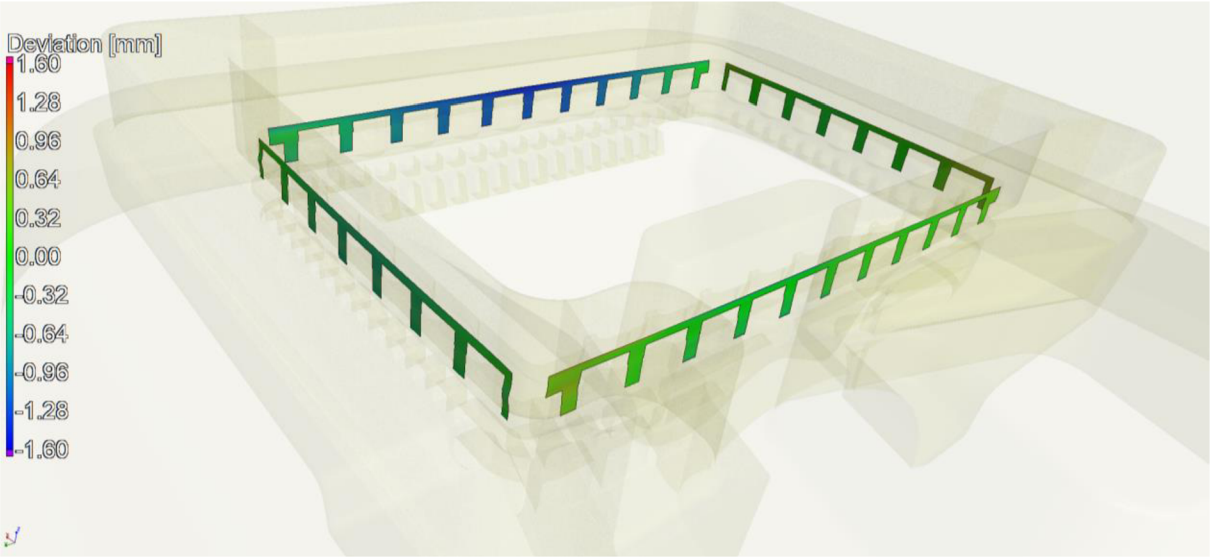
Po získání zájmových ploch byly odchylky těchto ploch od nominálního CAD modelu invertovány. Pro invertování byl použit deviační koeficient 1. Díky tomu tak byly vytvořeny invertované plochy za použití nominálního CAD modelu jakožto osy zrcadlení. Tyto invertované plochy pak byly pomocí získaných informací z analýzy porovnání nominálního CAD modelu a vstřikovací formy posunuty na úroveň vstřikovací formy, tedy o vzdálenost mezi těmito modely, která je uvažována v souvislosti se smrštěním výrobku. Celý tento proces je znázorněn na tomografickém řezu na Obr. 42.



Obr. 42: Tomografický řez stěnou opposide B. Modrá – nominální CAD model; červená – rekonstruovaný povrch výrobku; světle zelená – invertovaný rekonstruovaný povrch; tmavě zelená – invertovaný rekonstruovaný povrch s posunutím do úrovně vstřikovací formy.

Opravené plochy je nutné zakomponovat do původní vstřikovací formy. Tento postup závisí na domluvě s konstruktérem. V některých případech návrh korekce skončí u exportu opravených zájmových ploch a konstruktér pak na základě těchto ploch a znalostí daného procesu vstřikování upraví model vstřikovací formy.

Opravené plochy tak byly vyexportovány ve formátu STP do jednoho souboru. Tento soubor nese informaci o každé upravené ploše zvlášť a je tak možné jednotlivé plochy zobrazit jako komponenty ve stromě (někdy také nazývaný strom historie či prohlížeč). Exportované plochy zachovávají souřadnicový systém, který je ve VGStudiu Max při exportu právě využíván. Pro správné zakomponování upravených ploch do vstřikovací formy je proto nutné buďto současně při exportu upravených ploch exportovat také vstřikovací formu, aby byl zaručen stejný souřadný systém, nebo před exportem upravit souřadný systém na původní souřadný systém modelu vstřikovací plochy. Zakomponování ploch do vstřikovací formy bude realizovat konstruktér a při exportu tak byl zvolen souřadnicový systém dodaného modelu vstřikovací formy.



Obr. 43: 3D render: barevná mapa porovnání opravených ploch s původními zájmovými plochami.

Při porovnání opravených ploch s původními zájmovými plochami si lze všimnout výrazného propadu jedné stěny oproti zbylým třem. Tato stěna tedy bude hlavním předmětem diskuze s konstruktérem při korekci původní formy.

4.5 Vliv voxelového rozlišení na výsledky analýzy vnitřní porozity

Jedním z nejčastějších požadavků při poptávání tomografického měření plastových výrobků je bezpochyby detekce lunkrů. Nedestruktivní detekování lunkrů v plastových výrobcích a jejich následná analýza je unikátní vlastností počítačové tomografie a proto se jedná o jednu z nejčastěji poptávaných analýz.

Při této analýze hraje výraznou roli voxelové rozlišení naskenovaných dat. Za účelem interpretace rozdílných výsledků objemové analýzy vnitřní porozity při změně voxelového rozlišení byla provedena objemová analýza porozity na výrobku Inlet Tank. Toto porovnání bylo provedeno na již získaných datech, které byly naměřeny s voxelovým rozlišením 62 µm, a následně proběhlo skenování s dvojnásobně lepším voxelovým rozlišením, tedy 31 µm. Vzhledem k velikosti výrobku Inlet Tank byla při rozlišení 31 µm skenována pouze část výrobku. Stejná část pak byla vyexportována z již získaných dat s rozlišením 62 µm, aby byly výsledky lépe porovnatelné.

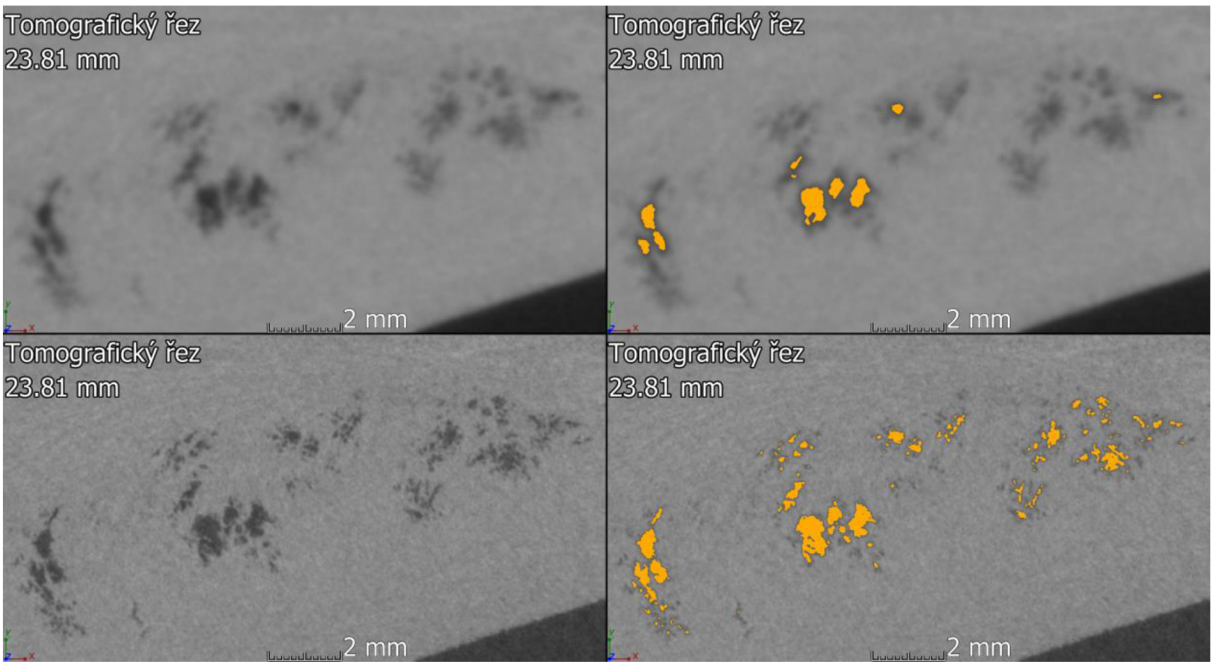
Obr. 44:

Objemová analýza porozity v CT datech s rozlišením 62 µm detekovala větší lunkry (řádově o průměru cca 0,3 mm a výš). Při získaném voxelovém rozlišení 62 µm se však vnitřní porozita na mnoha místech jeví spíše jako řidčeji distribuovaný materiál. V těchto místech analýza často není schopna lunkry detekovat. Příliš malý lunkr (poměrově k voxelovému

rozlišení) je společně s jeho ohraničením reprezentován jen malým množstvím voxelů (např. jen osmi voxely, kde žádný voxel nereprezentuje pouze vnitřní prostor lunkru, ale vždy i nějakou část materiálu), což vede pouze k mírnému zeslabení šedi voxelu. Voxely lunkru pak nemají dostatečný kontrast a analýza tento lunkr není schopná vyhodnotit, jelikož se tak malý kontrastní rozdíl vyskytuje i ve zbytku výrobku kvůli nedokonalé homogenitě, šumu, artefaktům, apod.

Před analýzou vnitřní porozity je proto vždy nutné diskutovat požadavky s konstruktérem a vytýčit si hranici velikosti lunkrů, které je potřeba detekovat. I přes stanovenou hraniční hodnotu velikosti lunkrů však není jednoduché jednoznačně určit potřebné voxelové rozlišení pro zajištění detekce lunkrů dané velikosti. Voxelové rozlišení je jen jeden z mnoha faktorů, které ovlivňují výslednou kvalitu skenu a tedy i schopnost detekovat lunkry. Obecné doporučení, které vychází z empirických zkušeností a také z doporučení vývojářů softwaru, je dosáhnout alespoň 4x lepšího voxelového rozlišení, než je průměr opsané kružnice nejmenšího požadovaného lunkru. Porovnání kvality skenu a softwarové rozpoznání lunkrů na zmíněných dvou CT datech s rozdílnou velikostí voxelového rozlišení lze vidět na Obr. 45. Číselné vyjádření výsledků obou analýz je pak porovnáno v Tabulce č. 6 a distribuce velikostí lunkrů je porovnána v histogramech na Obr. 46 a Obr. 47.

V případě, že voxelové rozlišení skenu není dostatečné pro detekci lunkrů s požadovanou velikostí, je nutné nastavit parametry měření tak, aby bylo dosaženo lepšího voxelového rozlišení. Toto je možné řešit několika způsoby. V případě, že jsou jednotlivé části tomografu pohyblivé, lze zvýšit vzdálenost detektoru a tím tak zvýšit zvětšení. Tento způsob však obvykle zlepší voxelové rozlišení pouze marginálně, jelikož při větší vzdálenosti detektoru dochází ke ztrátě signálu. Možnou variantou je však skenování výrobku na více částí s následným softwarovým spojením jednotlivých skenů. Touto metodou lze dosáhnout výrazného voxelového zlepšení, ovšem v některých případech byť jen dvojnásobné voxelové zlepšení odpovídá několikanásobně větší časové náročnosti.

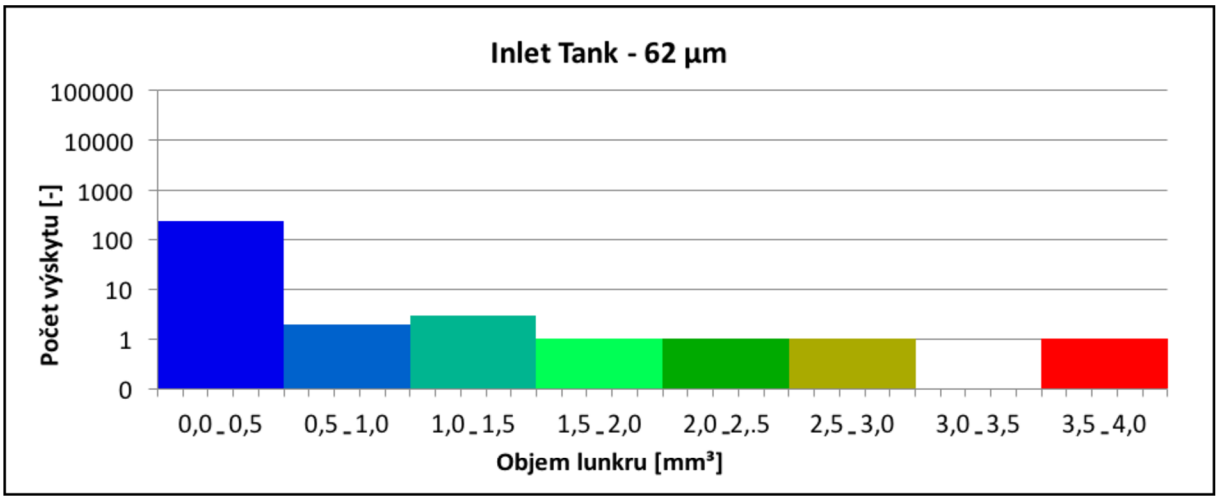


Obr. 45: Porovnání softwarové detekce lunkrů na dvou CT datech s rozdílným voxelovým rozlišením. Horní polovina – voxel 62 µm , dolní polovina – voxel 31 µm, levá polovina – data bez analýzy, pravá polovina – aktivovaná analýza porozity

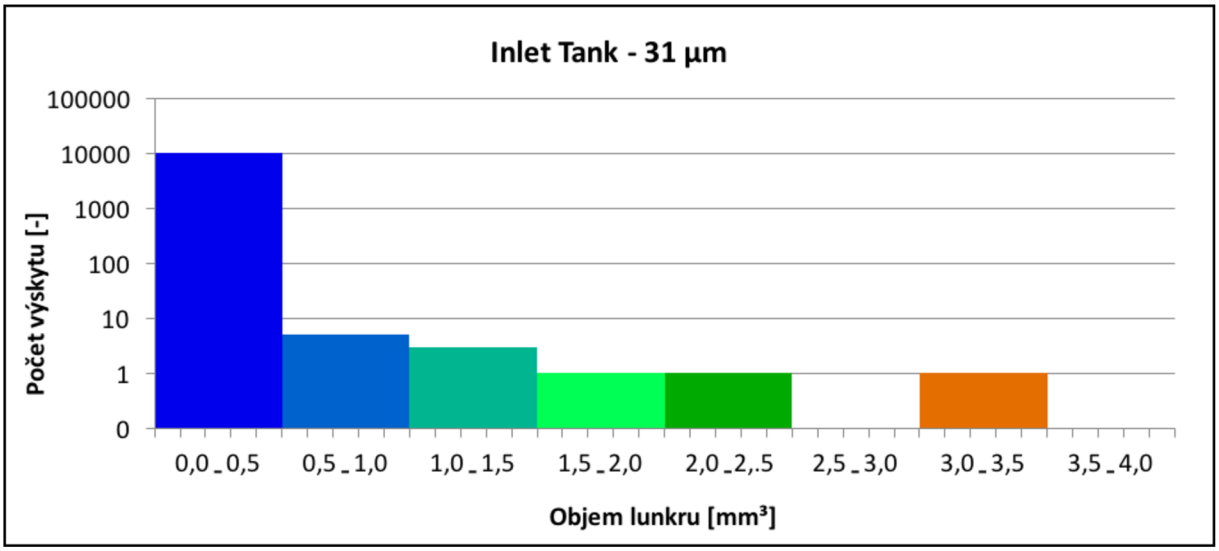
Tab. 6: Statistické výsledky objemové analýzy vnitřní porozity části výrobku Inlet Tank.

	Sken 62 µm (objem lukrů)	**Sken 31 µm (objem lunkrů)**
Lunkry menší než 0,5 mm^3	9,27 mm^3 (236)	25,19 mm^3 (10514)
Lunkry 0,5 – 1 mm^3	1,66 mm^3 (2)	3,39 mm^3 (5)
Lunkry 1 – 1,5 mm^3	3,84 mm^3 (3)	4,11 mm^3 (3)
Lunkry 1,5 – 2 mm^3	1,97 mm^3 (1)	1,57 mm^3 (1)
Lunkry 2 – 2,5 mm^3	2,46 mm^3 (1)	2,03 mm^3 (1)
Lunkry 2,5 – 3 mm^3	2,90 mm^3 (1)	-
Lunkry 3 – 3,5 mm^3	-	3,42 mm^3 (1)
Lunkry 3,5 – 4 mm^3	3,68 mm^3 (1)	-
Lunkry větší než 4 mm^3	-	22,01 mm^3 (2)
Celkový objem lunkrů	25,77 mm^3	61,72 mm^3
Celková porozita	0,03 %	0,06 %

Pozn. V závorce je uveden počet detekovaných lunkrů dané kategorie

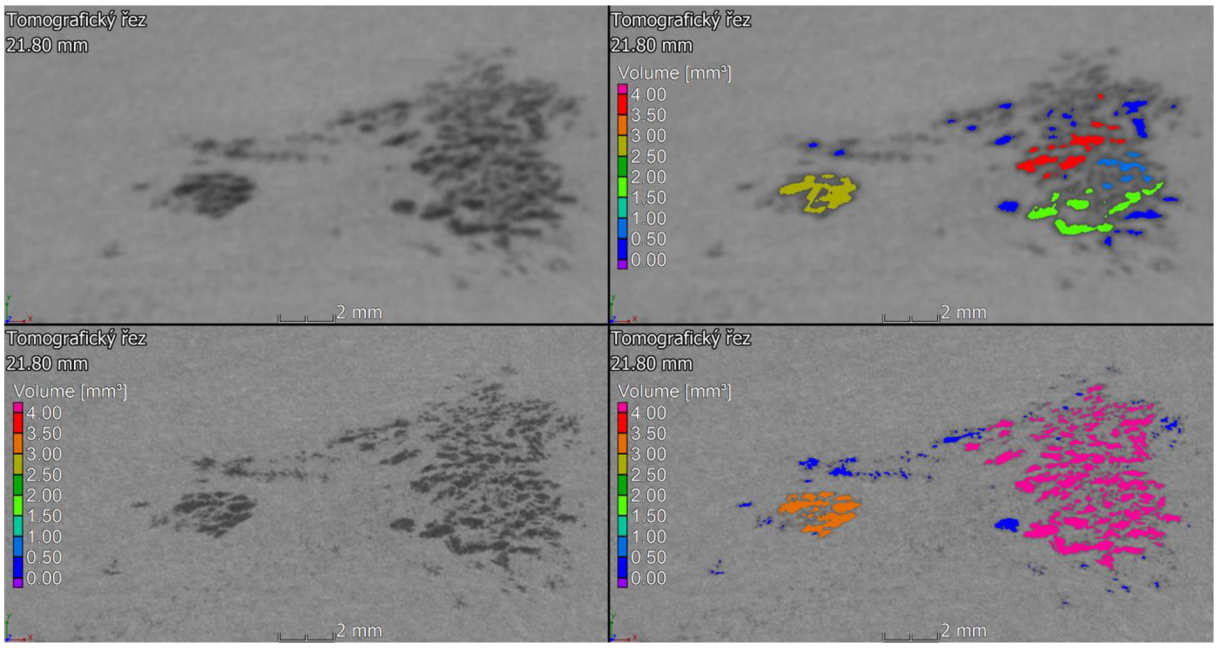


Obr. 46: Histogram velikostí lunkrů detekovaných v CT datech získaných s voxelovým rozlišením 62 µm.



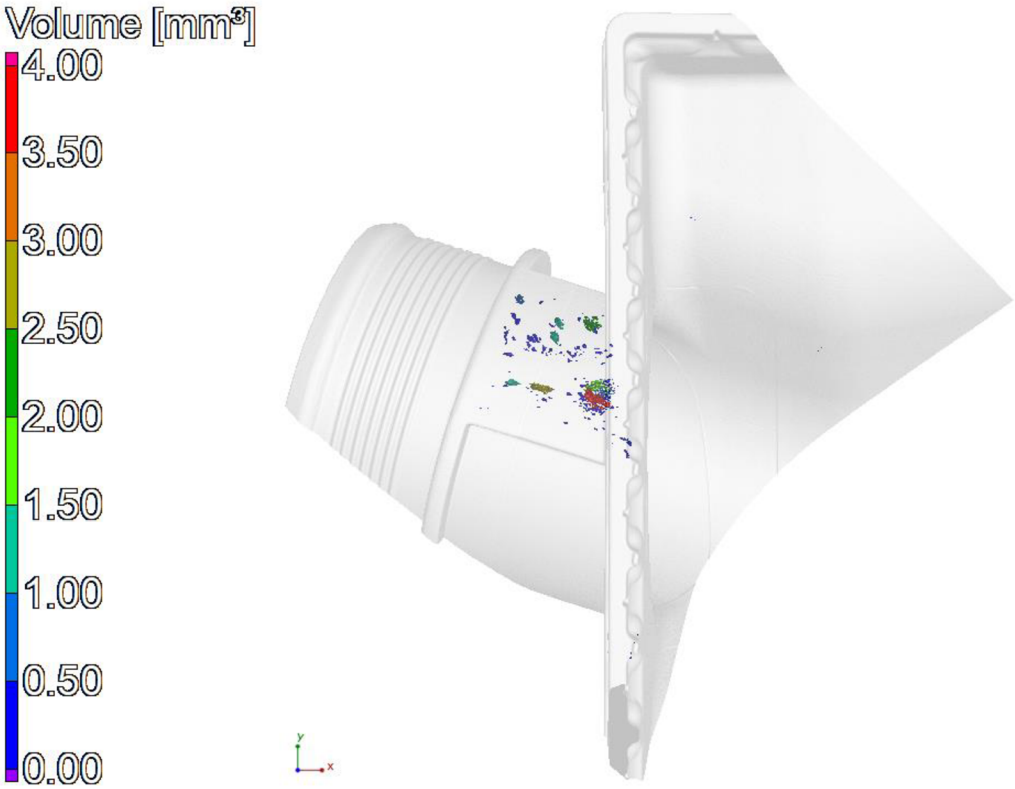
Obr. 47: Histogram velikostí lunkrů detekovaných v CT datech získaných s voxelovým rozlišením 31 µm.

Při porovnání výsledků lze konstatovat, že analýza provedená na CT datech s lepším voxelovým rozlišením detekovala více lunkrů a vyhodnotila tak celkovou porozitu (pouze v rámci vybrané oblasti) s dvojnásobně větší vnitřní porozitou. Stále se však porozita pohybuje v řádech setin procenta. Největší lunkr, který byl ve výrobku Inlet Tank detekován, se nachází u závitové části a tvoří podstatnou část celkového objemu vnitřní porozity. Jedná se o shluk lunkrů, které se při zlepšeném voxelovém rozlišení ukazují jako propojený celek. V CT datech s velikostí voxelu 31 µm tak tento lunkr dokonce tvoří téměř třetinu celkového objemu vnitřní porozity. Zobrazení tohoto lunkru o objemu 17,85 mm^3 společně se softwarovým vyhodnocením u obou CT skenů je zobrazeno v tomografických řezech na Obr. 48. U skenu s lepším voxelovým rozlišením si lze také všimnout, že analýza zaznamenala mnohonásobně více menších lunkrů (především lunkry s objemem menším než 0,5 mm^3). Tyto lunkry tvoří v obou případech přibližně třetinu detekované porozity, a proto tedy může specifikace minimální velikosti zájmových lunkrů výrazně změnit výsledek této analýzy.

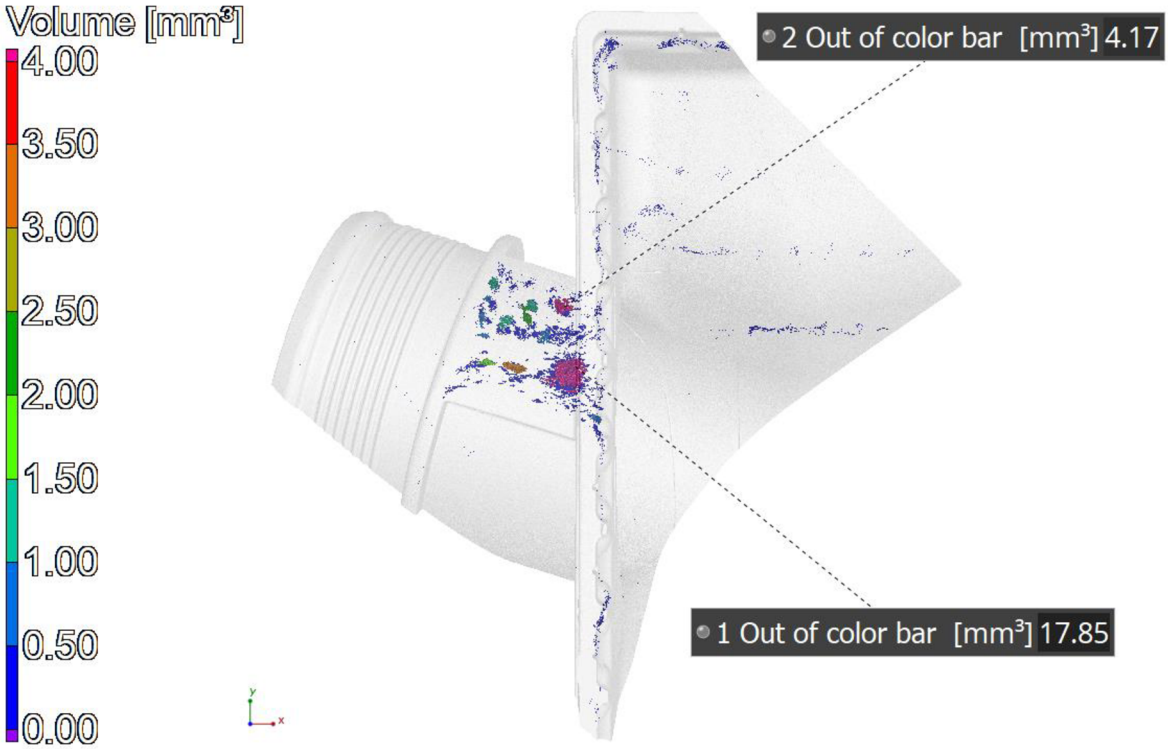


Obr. 48: Porovnání softwarového vyhodnocení lunkrů na dvou CT datech s rozdílným voxelovým rozlišením. Horní polovina – voxel 62 µm , dolní polovina – voxel 31 µm, levá polovina – data bez analýzy, pravá polovina – výsledky objemové analýzy vnitřní porozity. Objem lunkru vykresleného růžovou barvou je 17,85 mm^3.

Výsledky porozity jsou taktéž zpracovány ve výstupním protokolu v příloze č. 5. Tento výsledek byl dosažen za použití algoritmu Only threshold s automaticky vypočtenou hodnotou Void Max na základě interpolace histogramu.



Obr. 49: Vizualizace distribuce lunkrů ve skenu s voxelovým rozlišením 62 µm. Lunkry jsou barevně označeny na základě jejich objemů.



Obr. 50: Vizualizace distribuce lunkrů ve skenu s voxelovým rozlišením 31 µm. Lunkry jsou barevně označeny na základě jejich objemů. Dva lunkry označeny anotací svými objemy přesahují barevnou škálu.

5 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Rentgenová počítačová tomografie oproti klasickým způsobům kontroly kvality výrobků nabízí mnoho výhod. Jednou z hlavních výhod je získání informací o vnitřní struktuře výrobku, což z ní v některých případech dělá jediný možný způsob kontroly kvality výrobku. Zároveň je díky svému univerzálnímu použití vhodná pro téměř jakékoli výrobky, nehledě na složitost jejich tvaru nebo množství vestavěných komponentů. V kombinaci s vhodným vyhodnocovacím softwarem je navíc možné touto technologií vyhodnocovat několik různých parametrů, případně tvořit měřicí šablony, s tím kontrolu kvality výrazně zefektivnit.

Limity rentgenové počítačové technologie jsou v podstatě hlavní dva – velikost výrobku a kumulovaný materiál. První limit, velikost výrobku, je závislý na typu tomografu, ve kterém je tomografické měření zamýšleno. Z podstaty technologie vyplývá, že výrobek musí být schopen rotovat mezi rentgenovou trubicí a detektorem. Limitní rozměry výrobku jsou tedy vždy odlišné. Obvykle se však pohybují kolem 20 cm opsané kružnice výrobku. Ve většině technologicky neproveditelných tomografických měření hraje roli materiál, který daný tomograf není schopen prozářit. V důsledku rotace při skenování se výrobek může dostat do polohy, kdy je kumulace materiálu tak velká, že zdroj záření není schopen proniknout vším materiálem. V určitých případech je možné toto omezení částečně eliminovat vhodným náklonem skenovaného objektu, nicméně v mnoha případech je kumulovaný materiál natolik silný, že není možné jej daným zdrojem prozářit. Toto však obvykle platí u kovových materiálů, u plastových výrobků nastává tento problém zřídka (např. při použití méně výkonných rentgenových trubic).

Silnou nevýhodou této technologie jsou finanční náklady. Cena základní tomografického měření se pohybuje okolo 10 000 Kč a v závislosti na požadavcích, jak kvality skenu, tak i množství analýz či rozměrového měření, se cena dále navyšuje.

Obecně lze technologii počítačové tomografie doporučit pro praktické řízení kvality plastových výrobků, avšak v praxi se využívá především ve dvou případech. První případ nastává tehdy, kdy je podezření na možnou zvýšenou zmetkovitost série, které jsou již např. nějakým způsobem zkompletovány a znovuvyrobení zahrnující celý proces by bylo finančně příliš nákladné. Druhým případem je fáze vývoje výrobku. Ať už se jedná o rozměrovou kontrolu prvních prototypů, ověření správnosti montáže jednotlivých komponent, či zobrazení vnitřní struktury materiálu. Vhodným příkladem pro použití technologie počítačové tomografie jako prostředku kontroly kvality je analyzovaný výrobek Cog Wheel, jehož skenování a následné komplexní vyhodnocení je možné provádět na více kusech najednou vzhledem k jeho rozměrům.

Důležitou součástí vývoje plastových výrobků je návrh a výroba vstřikovací formy. Při tomto procesu je možné taktéž využít technologii počítačové tomografie a využít potenciál, který počítačová tomografie v současné době s pokročilými analýzami umožňuje. Příkladem je plastový výrobek Inlet Tank, u kterého proběhla kontrola tvarové přesnosti a následný návrh korekce vstřikovací formy. Tyto korekce budou následně použity pro vývoj nové vstřikovací formy a v případě pozitivních výsledků se tak bude jednat o výrazný pokrok v oblasti řízení kvality plastových výrobků pomocí rentgenové počítačové tomografie.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá použitím technologie rentgenové počítačové tomografie za účelem komplexní analýzy plastových výrobků pro potřeby jejich kontroly kvality.

Prvním z cílů diplomové práce byl vzhledem k utajeným postupům řízení kvality ve spolupracujících firmách vypracován jako obecná rešerše na téma řízení kvality plastových výrobků.

Druhým z cílů, tedy systémový rozbor hodnocení kvality výrobku, byl taktéž vypracován formou obecné rešerše. Rešerše zahrnuje popis výrobního procesu vstřikování plastů, možných příčin defektů a deformací a popis konvenčních měřicích metod pro ověření dostatečné kvality výrobku. Systémový rozbor hodnocení kvality plastového výrobku byl částečně splněn také v úvodu praktické části při představení vybraných vzorků a jejich kvalitativních požadavků.

Třetímu z cílů se věnuje kapitola Možnosti využití počítačové tomografie pro kontrolu kvality plastových výrobků, která vysvětluje základní principy počítačové tomografie, nastiňuje zásadní výhody i problémy této technologie a obecně shrnuje možnosti jejího využití za předpokladu vhodného softwarového zpracování.

Čtvrtý cíl je popsán v praktické části, a byl splněn pro dva vybrané plastové výrobky od spolupracujících firem, a tedy pro každý vzorek odlišně vzhledem k jejich kvalitativním požadavkům. Tato část nejprve popisuje metodiku a realizaci tomografického měření vybraných vzorků. Dále pak popisuje návrh postupu softwarového zpracování a následně realizaci navrhovaného postupu. U vzorku Inlet Tank byl kladen důraz především na splnění geometrických tolerancí v oblasti spoje s hliníkovým chladícím jádrem. Jednalo se o 5 zájmových geometrických tolerancí, z nichž pouze jedna vyhovuje. U vzorků Cog Wheel, které byly dodány ve 4 kusech, byla pozornost zaměřena především na profily jednotlivých zubů. Přesto však byl vyhodnocen celý výrobek zahrnující všechny geometrické tolerance. Hlavní oblasti zájmu byly ve shodě s požadovanou tolerancí. Stejně tak tomu bylo u zbývajících tolerancí, vyjma jednoho otvoru, který se pohybuje těsně za hranou této tolerance. Jelikož se ale nejedná o zájmovou oblast, po diskuzi s konstruktérem byla tato tolerance rovněž prohlášena za vyhovující. Součástí analýzy výrobku Cog Wheel byla objemová analýza vnitřní porozity. Tento požadavek vznikl na základě dosavadní kontroly vnitřní porozity pomocí porovnávání hmotností výrobku a nedodával tak dostatečné informace o charakteru lunkrů.

V souvislosti se čtvrtým cílem proběhlo otestování nového modulu pro korekci vstřikovacích forem. Tento modul byl otestován na 4 stěnách výrobku Inlet Tank, které byly vyhodnoceny v neshodě s požadovanou tvarovou tolerancí. Za hlavní přínos diplomové práce lze považovat výsledek testování tohoto modulu – návrh korekcí zmiňovaných stěn, který byl vyexportován ve formě souboru typu STP a bude sloužit pro budoucí diskuzi s konstruktérem.

Poslední dva cíle diplomové práce, tedy technické posouzení výsledků a vlastní závěry s doporučením pro praxi, jsou postupně zmíněny v praktické části diplomové práce u jednotlivých témat a celkově jsou pak shrnuty v kapitole Zhodnocení a diskuze.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-833-5.

[2] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

[3] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN isbn978-80-271-0614-1.

[4] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Pardubický kraj: publi.cz, 2016 [cit. 2020-05-23]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: https://publi.cz/books/184/Cover.html

[5] KOLOUCH, Jan. *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.

[6] Principy konstrukce plastových výlisků. *MM spektrum* [online]. 13.2.2013 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/principy-konstrukce-plastovych-vylisku.html

[7] Průmyslové CT - podpora kvality. *PBT | Zařízení pro SMT a THT výrobu* [online]. Rožnov pod Radhoštem [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.pbt.cz/cz/clanky/prumyslove-ct-podpora-kvality

[8] HSIEH, J. *Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances*. SPIE Press, 2003. ISBN 9780819444257.

[9] ABDULLA, Sarah. CT artefacts. *Radiology Café* [online]. Nottigham, UK, 29.1.2019 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.radiologycafe.com/radiology-trainees/frcr-physics-notes/ct-artefacts

[10] FEI, Baowei. Cupping artifact correction and automated classification for high-resolution dedicated breast CT images. *Semantic Scholat* [online]. 2012 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.semanticscholar.org/paper/Cupping-artifact-correction-and-automated-for-CT-Yang-Wu/139858919c05a497f30c7726a42b061bb5b6fda3

[11] WinWerth® FormCorrect – nový 3D proces korekce dílců. *Přístroje pro měření a metrologii | PRIMA BILAVČÍK* [online]. 2014 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.merici-pristroje.cz/novinky/detail/winwerth-formcorrect-novy-3d-proces-korekce-dilcu.htm

[12] Úchylky tvaru. *ELUC* [online]. [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1099

[13] Geometrické tolerance. *E-konstruktér* [online]. 02.06.2014 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance

[14] *Český metrologický institut* [online]. Brno, 12.07.2011 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Uredni_deska/3417-ID-C_3417-ID-C_0.pdf

[15] SVOZIL, David. *Konstrukce vstřikovací formy pro výrobu poklice automobilu*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.

[16] Polyamidy s plnivem ze skelných vláken. *Ensinger* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/modifikovane-plasty/polyamidy-s-plnivem-ze-skelnych-vlaken

[17] NENADÁL, Jaroslav. *Moderní management jakosti: principy, postupy, metody*. Praha: Management Press, 2008. ISBN 978-80-7261-186-7.

[18] SKOVAJSA, Adam. *Management kvality* [online]. Uherské Hradiště: Code Creator, 2016 [cit. 2020-05-23]. ISBN 978-80-88058-86-1. Dostupné z: https://publi.cz/books/276/Cover.html

[19] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.

[20] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2020-05-23]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: https://publi.cz/books/179/Cover.html

[21] VEBER, Jaromír, Marie HŮLOVÁ a Alena PLÁŠKOVÁ. *Management kvality, environmentu a bezpečnosti práce: legislativa, systémy, metody, praxe*. Praha: Management Press, 2006. ISBN isbn80-7261-146-1.

[22] NENADÁL, Jaroslav. *Moderní management jakosti: principy, postupy, metody*. Praha: Management Press, 2008. ISBN 978-80-7261-186-7.

[23] IMAI, Masaaki. *Kaizen: metoda, jak zavést úspornější a flexibilnější výrobu v podniku*. Brno: Computer Press, c2007. Business books (Computer Press). ISBN 978-80-251-1621-0.

[24] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, 2016 [cit. 2020-05-23]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/Cover.html

[25] Elasticita kaučukových sítí. In: *Univerzita Tomáše Bati* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_08.pdf

[26] *Defektoskopie | Energoservis s.r.o.* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://www.defektoskopie.cz/produkty/

[27] MEtody NDT. *CONTROLTEST spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://www.controltest.cz/metody-ndt/prozarovanim.php

[28] KALENDER, W. A. *Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications*. 3rd edition. Wiley, 2011. ISBN 9783895786440. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=gfLWmRjoyPMC

[29] DEROO, Nate. *How many projections do I need for my CT Scan?* [online]. 2015 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://4nsi.com/blog/2015/11/12/how-many-projections-do-i-need-for-my-ct-scan/

[30] CARMIGNATO, S., W. DEWULF a R. LEACH. *Industrial X-Ray Computed Tomography*. Springer International Publishing, 2017. ISBN 9783319595733. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=KLo6DwAAQBAJ

[31] *Volume Graphics* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.volumegraphics.com/en/company/technology.html

[32] *VDI/VDE 2630 BLATT 1.2. Computed Tomography in Dimensional Measurement Influencing Variables on Measurement Results and Recommendations for Computed-Tomography Dimensional Measurements*. Berlin: Beuth, 2011.

[33] Software. *CTLAB - Laboratoř rentgenové počítačové tomografie* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://ctlab.ceitec.cz/cs/software/

[34] *Hanon Systems* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.hanonsystems.com

[35] *Brano Group a.s.* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: http://www.brano.eu

[36] *Cactux - XY Translation Stage* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: https://cactux.cz/

[37] *Power training VGStudio Max 3.3.* Volume Graphics. Dostupné z: Interní dokument.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Grafické znázornění řízení kvality plastového výrobku. modře jsou vyznačeny požadavky související s tématem diplomové práce. 19

Obr. 2: Diagram PDCA cyklu. 20

Obr. 3: Příklad konstrukční úpravy tloušťky stěny pro technologii vstřikování. 23

Obr. 4: Znázornění zhuštění proudnic 23

Obr. 5: Příklad vstřikovací formy pro plastovou poklici kola automobilu. [15] 24

Obr. 6: Znázornění ultrazvukové zkoušky. Vlevo - metoda průchodová, vpravo - metoda odrazová 28

Obr. 7: Vizualizace konstrukce tomografu 30

Obr. 8: Vizualizace tomografických řezů 31

Obr. 9: Vizualizace voxelové mřížky tomografických dat 31

Obr. 10: Demonstrace rozdílných výsledků při různých polohách vzorku. 33

Obr. 11: Příklady kalibračních fantomů; a) ball rail b) CT tree c) Calotte Cube. [30] 34

Obr. 12: Subvoxelové určení povrchu [zdroj VG školení] 35

Obr. 13: Barevná mapa odchylek povrchu od nominálního CAD modelu. CAD model je vyznačen oranžovou konturou 36

Obr. 14: Barevná vizualizace analýzy vnitřní porozity. Modrá šipka ukazuje vnitřní defekty v tomografickém řezu. 37

Obr. 15: Znázornění analýzy vlákny tvrzeného kompozitu. 37

Obr. 16: Postup při korekci forem pomocí softwaru VGStudio Max 3.3.4 38

Obr. 17: Fotografie výrobku Inlet Tank poskytnutého společností Hanon Systems. 39

Obr. 18: Zájmové geometrické tolerance plastového výrobku Inlet Tank. 40

Obr. 19: Vizualizace uchycení výrobku Inlet Tank ke chladícímu jádru. 40

Obr. 20: Fotografie výrobku Cog Wheel a jeho umístění v mechanizmu. a) uzavřený přitahovač b) otevřený přitahovač s názorným umístěním výrobku Cog Wheel c) výrobky poskytnuté společností BRANO GROUP, a.s. 41

Obr. 21: Tomograf v|tome|x L 240 v laboratoři rentgenové počítačové mikrotomografie na CEITEC VUT v Brně. [ctlab.cz] 42

Obr. 22: Fotografie upevněného plastového výrobku Inlet Tank v tomografu. Výrobek je upevněn v náklonu za účelem minimalizace tomografických artefaktů. K upevnění byl použit tvrzený polystyren na manipulátoru. 43

Obr. 23: Fotografie upevněného plastového výrobku Cog Wheel v tomografu. Výrobky jsou upevněny po dvou kusech v náklonu za účelem minimalizace tomografických artefaktů. K upevnění byl použitý polystyren přilepen na plastový držák. 43

Obr. 24: Naměřená hodnota fantomu s nominální hodnotou 100,0026 mm při nastavení pro plastový výrobek Inlet Tank. Naměřená vzdálenost středů rubínových kuliček je 99,9906 mm. 44

Obr. 25: Grafického znázornění procesu softwarového zpracování naskenovaných dat výrobků Cog Wheel. 46

Obr. 26: Zobrazení odfiltrování nečistot v naskenovaných datech výrobku Cog Wheel č.5. Vlevo - povrch s nečistotami určený pomocí funkce isovalue based; vpravo - povrch určený za pomoci startovací kontury a hledání povrchu v jejím okolí. 47

Obr. 27: Registrace plastového výrobku Cog Wheel znázorněna na dvou paralelních 3D pohledech. 48

Obr. 28: Ukázka barevné mapy při porovnání nominálního CAD modelu výrobku Inlet Tank s naskenovanými daty. 48

Obr. 29: 3D vizualizace vybraných ploch, které tvoří spojitý tvar celého zubu. 49

Obr. 30: Rozmnožení geometrického tvaru zubu pro následné vyhodnocení všech 18 zubů. Výrobek Cog Wheel č.5. 50

Obr. 31: Histogram zobrazující distribuci šedi podél zelené kontury. Zelené šipky označují propady způsebené otvorem, červené šipky označují propady způsebené lunkrem. 51

Obr. 32: Automatický výpočet hodnoty Void max. pomocí interpolace v softwaru VGStudio Max. 52

Obr. 33: Zobrazení distribuce detekovaných lunkrů ve výrobku Cog Wheel č.6. 52

Obr. 34:Histogram velikostí lunkrů detekovaných v CT datech výrobku Cog Wheel 6. 53

Obr. 35: Grafického znázornění procesu softwarového zpracování naskenovaných dat výrobku Inlet Tank. 54

Obr. 36: Zobrazení odfiltrování nečistot v naskenovaných datech výrobku Cog Wheel č.5. Vlevo - povrch s nečistotami určený pomocí funkce isovalue based; vpravo - povrch určený za pomoci startovací kontury a hledání povrchu v jejím okolí. 55

Obr. 37: Registrace plastového výrobku Inlet Tank znázorněna na dvou 3D pohledech s paralelním vykreslením. 55

Obr. 38: Ukázka barevné mapy při porovnání nominálního CAD modelu výrobku Inlet Tank s naskenovanými daty. 56

Obr. 39: Vyhodnocení zájmových geometrických tolerancí výrobku Inlet Tank. 56

Obr. 40: Vlevo - barevné znázornění analýzy porovnání CT dat a nominálního CAD modelu. Vpravo - barevné znázornění analýzy porovnání nominální CAD modelu a zájmové části vstřikovací formy. 57

Obr. 41: Zobrazení procesu fitování rekonstruovaného povrchu pomocí řídících bodů. 58

Obr. 42: Tomografický řez stěnou opposide B. Modrá – nominální CAD model; červená – rekonstruovaný povrch výrobku; světle zelená – invertovaný rekonstruovaný povrch; tmavě zelená – invertovaný rekonstruovaný povrch s posunutím do úrovně vstřikovací formy. 59

Obr. 43: 3D render: barevná mapa porovnání opravených ploch s původními zájmovými plochami. 60

Obr. 44: 61

Obr. 45: Porovnání softwarové detekce lunkrů na dvou CT datech s rozdílným voxelovým rozlišením. Horní polovina – voxel 62 µm , dolní polovina – voxel 31 µm, levá polovina – data bez analýzy, pravá polovina – aktivovaná analýza porozity. 62

Obr. 46: Histogram velikostí lunkrů detekovaných v CT datech získaných s voxelovým rozlišením 62 µm. 63

Obr. 47: Histogram velikostí lunkrů detekovaných v CT datech získaných s voxelovým rozlišením 31 µm. 63

Obr. 48: Porovnání softwarového vyhodnocení lunkrů na dvou CT datech s rozdílným voxelovým rozlišením. Horní polovina – voxel 62 µm , dolní polovina – voxel 31 µm, levá polovina – data bez analýzy, pravá polovina – výsledky objemové analýzy vnitřní porozity. Objem lunkru vykresleného růžovou barvou je 17,85 mm^3. 64

Obr. 49: Vizualizace distribuce lunkrů ve skenu s voxelovým rozlišením 62 µm. Lunkry jsou barevně označeny na základě jejich objemů. 65

Obr. 50: Vizualizace distribuce lunkrů ve skenu s voxelovým rozlišením 31 µm. Lunkry jsou barevně označeny na základě jejich objemů. Dva lunkry označeny anotací svými objemy přesahují barevnou škálu. 65

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Výkres výrobku Inlet Tank [pdf]
Příloha č. 2 – Výkres výrobku Cog Wheel [pdf]
Příloha č. 3 – Výstupní protokol: kontrola tvarové přesnosti výrobku Inlet Tank [pdf]
Příloha č. 4 – Výstupní protokol: kontrola tvarové přesnosti výrobků Cog Wheel [pdf]
Příloha č. 5 – Výstupní protokol: analýza vnitřní porozity výrobku Inlet Tank [pdf]
Příloha č. 6 – Výstupní protokol: analýza vnitřní porozity výrobků Cog Wheel [pdf]
Příloha č. 7 – Korekce zájmových ploch výrobku Inlet Tank [stp]