

Využití reverzního inženýrství při návrhu vstřikovací formy

Bc. Tomáš Barbořík

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Barbořík**
Osobní číslo: **T11157**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Využití reverzního inženýrství při návrhu vstříkovací formy**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Provedte konstrukci 3D modelu zadaného plastového dílu.
3. Naskenujte bezkontaktním způsobem daný díl.
4. Navrhněte vstříkovací formu pro výrobu plastového dílce.
5. Návrh ověřte pomocí analýz.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně10.5.2013.....



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

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

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

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

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

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

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je vytvořit konstrukční návrh vstřikovací formy pro výrobu tělesa reflektoru vozidla, za podpory metod reverzního inženýrství. V prvním bloku teoretické části je rozebrána problematika reverzního inženýrství, postup digitalizace, aplikace a typy 3D skenerů. Druhý blok je věnován obecnému popisu struktury polymerů, procesu vstřikování a zásadám konstrukce vstřikovací formy. V praktické části je popsán použitý bezkontaktní optický 3D skener ATOS II Triplescan od německé firmy GOM, postup provedeného procesu skenování, rekonstrukce modelu a naskenovaný díl je komparován vůči 3D modelu, který byl vytvořen konvenční metodou v CAD aplikaci. Následuje výběr materiálu dílu, vhodného vstřikovacího stroje a konstrukce čtyř dutinové vstřikovací formy za využití normálí firmy Hasco. Celý konstrukční návrh je proveden v CAD aplikaci DS Catia V5R18 a podroben tokovým analýzám polymerního materiálu v programu Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013.

Klíčová slova: reverzní inženýrství, digitalizace, skenování, vstřikování, polymer, vstřikovací stroj, vstřikovací forma, 3D konstrukce formy, ATOS, CAD.

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to create constructional solution of the mold design for headlight lamp reflector, supported by methods of reverse engineering. The first block of the theoretical part deals with issues of reverse engineering, digitizing process, case of application and division of 3D scanners. The second block is devoted to general description of the polymer structure, injection molding process and principles of injection mold design. The practical part describes utilization of the contactless optical 3D scanner ATOS II Triplescan manufactured by German company GOM, scanning procedure, model reconstruction and the digitalized part is compared to the 3D model that was obtained by the conventional method in CAD application. Followed by the selection of material, determination of the suitable injection molding machine and the design of four cavity injection mold powered by Hasco standards. The entire mold was designed in CAD application DS Catia V5R18 and evaluated by flow analysis of the polymer material in Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013.

Keywords: reverse engineering, digitizing, part scanning, injection molding, polymer, injection machine, injection mold, 3D mold design, ATOS, CAD.

Velice rád bych tímto chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval při psaní této diplomové práce. Také bych rád poděkoval Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi, za nezištnou pomoc, kterou mi poskytl při 3D skenování a následném zpracování dat.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

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

Ve Zlíně 10. 5. 2013

.....
podpis autora

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 REVERZNÍ INŽENÝRTVÍ	11
1.1 DIGITALIZACE	11
1.2 APLIKACE REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ A DIGITALIZACE.....	13
2 3D SKENERY	15
2.1 DESTRUKTIVNÍ SKENERY.....	16
2.2 DOTYKOVÉ SKENERY	17
2.2.1 Měřící ramena	18
2.2.2 Souřadnicové měřící systémy – CMM (Coordinate Measuring Machine)	18
2.2.3 Adaptace CNC stroje.....	19
2.3 NEDOTYKOVÉ SKENERY	20
2.3.1 Laserové skenery.....	20
2.3.2 Optické skenery.....	22
2.3.3 Výpočetní tomografie - CT (Computed Tomography)	24
2.3.4 Ultrazvukové skenery.....	26
3 METODY URČENÍ TŘETÍHO ROZMĚRU	27
3.1 MĚŘENÍ DÉLKY DOBY LETU – TOF (TIME OF FLIGHT).....	28
3.2 OPTICKÁ INTERFEROMETRIE.....	29
3.3 TRIANGULAČNÍ METODY	30
3.3.1 Aktivní triangulace.....	30
3.3.2 Pasivní triangulace	31
4 VSTŘIKOVÁNÍ	32
4.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	32
4.2 TOK TAVENINY	34
4.3 PROCESNÍ RÁMEC	35
4.4 KLASIFIKACE POLYMERŮ	35
4.4.1 Termoplasty.....	36
4.4.2 Reaktoplasty	37
4.4.3 Elastomery.....	38
5 VSTŘIKOVACÍ STROJ	39
5.1 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA.....	40
5.2 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA	41
5.3 OVLÁDÁNÍ A ŘÍZENÍ VSTŘIKOVACÍHO STROJE	42
6 VSTŘIKOVACÍ FORMA	43
6.1 VTOKOVÝ SYSTÉM	43
6.1.1 Studený vtokový systém	44
6.1.2 Horký vtokový systém	45

6.2	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	46
6.3	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	47
6.3.1	Konformní způsob temperace	48
6.4	ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM.....	48
6.5	MATERIÁLY FOREM.....	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	50
7	STANOVENÍ CÍLŮ	51
8	HODNOCENÍ PŘEDMĚTNÉHO DÍLU	52
8.1	PROFIL VSTŘIKOVANÉHO DÍLU	52
8.2	MATERIÁL DÍLU	52
9	REKONSTRUKCE TVARU DÍLU.....	54
9.1	POPIS MĚŘICÍ SOUSTAVY	54
9.2	PROCES SKENOVÁNÍ	56
9.2.1	Preprocessing	56
9.2.2	Processing	58
9.2.3	Postprocessing.....	60
9.3	KOMPARACE MODELŮ	61
9.3.1	Popis konvenčního způsobu měření.....	62
9.3.2	Vyhodnocení komparace.....	62
10	VSTŘIKOVACÍ STROJ	64
11	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	66
11.1	POŽITÉ SOFTWARE VYBAVENÍ.....	66
11.1.1	DS Catia V5R18 (SP8).....	66
11.1.2	Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013 (SP4)	66
11.1.3	Hasco 3D Modul (R1-2013).....	67
11.1.4	Autodesk Showcase 2013	67
11.2	RÁM FORMY	68
11.3	ZAFORMOVÁNÍ DÍLU.....	69
11.4	TVAROVÉ PRVKY	70
11.4.1	Pravá a levá tvarová vložka.....	70
11.4.2	Posuvná tvarová jádra	72
11.5	ODFORMOVÁNÍ DÍLU	73
11.6	VTOKOVÝ SYSTÉM	75
11.6.1	Horký vtokový systém	75
11.6.2	Rozvodný kanál.....	77
11.6.3	Vtokové ústí	77
11.7	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	78
11.8	TEMPERACE.....	80
11.8.1	Temperační systém pravé strany formy	81
11.8.2	Temperační systém levé strany formy	82
11.9	ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM.....	83
11.10	TRANSPORTNÍ A ZABEZPEČOVACÍ SYSTÉM VSTŘIKOVACÍ FORMY	83

12	TOKOVÉ ANALÝZY	85
12.1	URČENÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ (GATE LOCATION)	86
12.1.1	Vhodnost umístění vtokového ústí (Gating Suitability)	86
12.1.2	Odpor polymerní taveniny vůči toku (Flow Resistance Indicator)	87
12.2	PLNĚNÍ A DOTLAK (FLOW)	87
12.2.1	Čas plnění (Fill Time)	87
12.2.2	Teplota na čele toku taveniny (Temperature at Flow Front)	88
12.2.3	Tlak v místě vtoku (Pressure at Injection Location: XY plot)	89
12.2.4	Vzduchové kapsy (Air Traps)	90
12.2.5	Objemové smrštění materiálu dílu (Volumetric Shrinkage)	90
12.2.6	Uzavírací síla (Clamp Force: XY plot)	91
12.3	TEMPERACE (COOL)	92
12.3.1	Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature)	92
12.3.2	Tlakový spád v temperačním okruhu (Circuit Pressure)	92
12.3.3	Čas vyhození (Time to Reach Ejection Temperature)	93
12.3.4	Účinnost temperačního systému (Circuit Heat Removal Efficiency)	94
12.4	DEFORMACE (WARP)	95
12.4.1	Zprohýbání dílu (Deflection, All Effects)	95
13	MECHANICKÁ ANALÝZA	96
	DISKUZE VÝSLEDKŮ	98
	ZÁVĚR	100
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	101
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	104
	SEZNAM OBRÁZKŮ	106
	SEZNAM TABULEK	109
	SEZNAM PŘÍLOH	110

ÚVOD

Vlivem rychlého vývoje v oblasti výpočetní techniky a s tím spojeného rozvoje zpracování vysoce objemových digitálních informací, se otevřely značně široké možnosti využití těchto technologií v mnoha sférách lidské činnosti. V současné době a v návaznosti na moderní výrobní proces je jedním z těchto odvětví i oblast reverzního inženýrství, kde je na počátku procesu výrobek, který je zkoumán a převeden do digitální podoby pomocí 3D skeneru.

Možnosti využití 3D skenerů v technické praxi jsou velice rozsáhlé a způsobů převodu tvaru fyzického objektu do digitální podoby existuje celá řada. Jedná se o konjunkci špičkových technologií z oblasti IT, optiky a softwarového zpracování obrazu. Tyto moderní technologie byly z počátku doménou jen automobilového a leteckého průmyslu, ale postupem času došlo k jejich penetraci i do nižších sfér vývoje a výroby. Možnosti a funkce 3D skenerů jsou v průběhu času neustále vylepšovány a vyvíjeny. Tím je zvyšována jejich rychlost, přesnost a dostupnost. S nástupem CNC strojů se zpřesnila a zrychlila výroba. Ve spojení s CAx aplikacemi je umožněno vyrábět i součásti, které obsahují velice složité obecné plochy. Zde mohou nastat obtíže při návrhu (estetické hledisko) nebo kontrole těchto útvarů, kdy prostá plocha monitoru není schopna poskytnout komplexní zobrazení 3D scény a metody reverzního inženýrství zde mohou být vítaným pomocníkem.

V oblasti zpracování polymerů je proces vstřikování jednou z nejpoužívanějších a neproduktivnějších metod. Vyznačuje se vysokou efektivností výroby a možnou vysokou tvarovou složitostí výrobků. Nástrojem je kovová vstřikovací forma do jejíž tvarové dutiny, mající negativní tvar budoucího výrobku, se vstříkuje pod vysokým tlakem polymerní tavenina. Dutina formy může být velice složitým a komplexním tvarovým prvkem. Metodami reverzního inženýrství lze získat digitální 3D model vstřikovaného objektu za účelem vytvoření tvarové dutiny formy a zároveň silný nástroj pro její zpětnou tvarovou a rozměrovou verifikaci. Výsledkem použití těchto metod může být zkvalitnění a zkrácení vývojového a výrobního procesu a nižší finanční zátěž.

I. TEORETICKÁ ČÁST

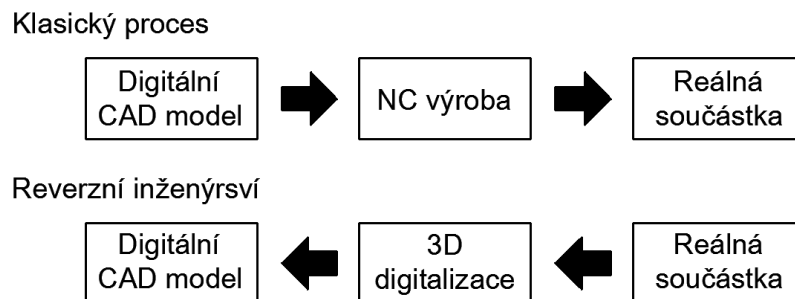
1 REVERZNÍ INŽENÝRTVÍ

Pojmem reverzní inženýrství je označován proces, jehož obecným cílem je analyzovat a odkrýt princip fungování zkoumaného předmětu, za účelem sestrojení jiného předmětu s ekvivalentní funkcionalitou. [35]

Tento termín tedy označuje postup opačný proti klasickému inženýrskému postupu, kde je na základě výkresové dokumentace (papírové nebo digitální) následně vyráběna součást. Podmínkou pro využití reverzního inženýrství je existence reálného výrobku. [35, 27]

Reverzní inženýrství může být využito i za účelem zisku přesné digitální kopie zkoumaného objektu, jeho modifikaci, optimalizaci a zdokonalení procesu výroby. Zahrnuje prvky měření, analýzy struktury předlohy (tzv. dekompozice), zkoumání vnitřních vztahu systému a funkce jednotlivých částí, odhadu nákladů nebo identifikaci potencionálních patentových porušení. [35, 27]

S nárůstem výpočetního výkonu a popularity počítačově podporovaného konstruování se tak i reverzní inženýrství stalo cestou k rychlému vytvoření 3D virtuálního modelu existující fyzické součásti pro následné využití v nejrůznějších CAx systémech. [27]



Obr. 1. Průběh klasického a reverzního procesu. [27]

1.1 Digitalizace

V současné době rostou požadavky na rychlé získání digitální podoby objektů různé složitosti, velikosti a typu. Digitální 3D model lze mj. vytvořit těmito způsoby:

- manuálně pomocí CAD aplikace, kde se na základě změřených rozměrů překresluje daný objekt a modeluje do 3D podoby. Tento způsob je časově náročný a výsledný virtuální model není přesnou reprezentací reálného objektu,
- pomocí 3D skeneru a procesu digitalizace. Takto získaný digitální model věrně reprodukuje svůj předobraz v rámci přesnosti skeneru. [4, 27]

Ve strojírenském průmyslu je reverzní inženýrství úzce spojeno s technologií trojrozměrné digitalizace. Digitalizace je disciplínou oboru reverzního inženýrství. V kontextu této práce se jedná o metodu umožňující převod tvarů a rozměrů fyzického předmětu do podoby digitálního 3D modelu, tzv. proces digitalizace. Následně je tento využit k dalšímu zpracování v CAx systémech, kde zastupuje předlohu pro návrh postupu výroby. Digitalizační proces lze rozdělit na dvě části:

- digitalizace - proces získání digitálního modelu skenováním reálné součásti,
- rekonstrukce modelu - oprava a zpracování dat do podoby 3D modelu. [4, 27]

Zařízení určená pro digitalizaci objektů se nazývají skenery nebo digitizéry a jejich přímým digitálním výstupem je tzv. mrak bodů. Tedy soustava bodů, kde každý jeden je plně určen třemi prostorovými souřadnicemi a reprezentuje tak bod na povrchu skenovaného objektu. V moderních skenovacích systémech je umožněn 3D náhled částečně zrekonstruovaného snímaného objektu v reálném čase. [4, 27]

V další fázi jsou data zpracována ve vhodných programech určených k úpravám mraku bodů. Jedná se o operace odstranění parazitních bodů (nejčastěji vzniklých od podpory nebo vlivem šumu), transformace mraků bodů na polygonální síť, oprava nenavazující nebo přesahující sítě, optimalizace tvaru sítě, zahlazení a redukce. Tyto operace mohou být provedeny v programech dodávaných výrobcem skeneru nebo v programech třetích stran (Catia, NX, Rhinoceros, Tebis, Geomagic aj.). Časová náročnost těchto nutných činností dosahuje výrazně vyšších hodnot v porovnání oproti procesu skenování a to i naproti faktu, že značná část těchto operací je automatizována v závislosti na použitém softwaru. [9, 27]

Polygonizace, tedy transformace mraku bodů na polygonický model, je provedena automaticky softwarem na základě křivostní analýzy. Jednotlivé naskenované body tak tvoří v této síti vrcholy polygonů, nejčastěji trojúhelníků. Tímto způsobem vzniklý polygonální model nemusí být vhodný pro další počítačové zpracování, proto je zde snaha o konverzi na model tvořený pomocí NURBS ploch. Tyto hladké matematicky definované plochy jsou vytvořeny nad polygonálním modelem a definovány pomocí jeho hraničních a tvořících křivek tak, aby jej co nejvěrněji aproximovaly. NURBS plocha vhodného řádu nemusí nutně postihovat veškeré detaily plochy původní, proto je nutné najít vhodný kompromis mezi přesností a hladkostí takto vytvořené plochy. Konečným výsledkem konverze může být menší matematická reprezentace původního objektu, neboť geneze ploch je provedena

pouze na základě zadaných profilových křivek a nikoliv mraku bodů. Ve finální fázi následuje export dat do některého z výstupních formátů (STL, STEP, IGES atd.). [9, 27]

Takto získaný 3D model bez historie vzniku je možné dále zpracovat stejným způsobem, jako model vytvořeným konvenční cestou v CAD softwaru. Lze vytvořit 2D výkresovou dokumentaci, vkládat jej do sestav, modifikovat tvarové či rozměrové parametry, provádět statické, dynamické a kinematické analýzy, využít jej pro technologii rapid prototyping nebo generovat dráhy obráběcích nástrojů pro CNC stroje v budoucím procesu výroby. [27]

1.2 Aplikace reverzního inženýrství a digitalizace

Metody reverzního inženýrství a digitalizace jsou často využívány v automobilovém a leteckém průmyslu, pro návrh designu, přesnou montáž nebo při kontrole rozměrů. Platí pravidlo, že se zvyšující se tvarovou složitostí zpracovávaného objektu je použití digitalizace stále výhodnější. [10, 27]

Designér navrhne např. tvar karosérie, podle které je vytvořen fyzický model (modelovací hlína, PUR pěna, dřevo atd.), ačkoli se tento způsob může zdát být zastaralý je v mnoha případech efektivnější než modelování složitých obecných tvarových ploch v CAD prostředí. Designér není nucen nastavovat parametry v CAD softwaru a může se plně soustředit pouze na stránku designu. Takto vytvořený fyzický model je následně převeden do digitální podoby pomocí 3D skeneru a na jeho základě vytvořena např. dutina formy. [10, 27]

Další využití je možné nalézt při inspekci hodnot rozměrů, tvaru a geometrických tolerancí součástí, které by byly pomocí konvenčních měřících metod jen velice složitě zjištělné s dostatečnou přesností a zároveň v krátkém čase. Tak může být výrazně zvýšena produktivita práce, zvláště v oblastech sériové výroby. Naskenovaný 3D model reálného výrobku je zde komparován s jeho originálním CAD modelem, ze kterého výrobní proces vycházel a hodnoceny jsou odchylky v jednotlivých bodech. Grafickým výstupem je škálovatelná barevná mapa. Tohoto způsobu lze využít při výrobě a následné kontrole složitých tvarových nástrojů, zejména z vysoce pevných a tvrdých tepelně zpracovaných nástrojových ocelí. Vysoké požadavky na formy a zápustky jsou dány především z jejich požadované geometrické přesnosti, kvality a integrity výsledného povrchu. [27, 29]

Digitalizace a reverzní inženýrství jsou také jedinečným prostředkem zpětné reprodukce rozměru a tvaru u součástí, ke kterým neexistuje nebo byla ztracena výkresová či digitální

dokumentace. Dále lze těmito metodami zaznamenat veličiny dynamického charakteru např. měření vibrací, deformací, velikosti a způsobu přetvoření plechu při tažení nebo skenování objektu za jejich pohybu. [27]

Široké uplatnění reverzní inženýrství nalézá i mimo oblast strojního průmyslu:

- lékařství - výroba přesně profilovaných protéz, zubních a kloubních náhrad a implantátů,
- filmový a herní průmysl - tvorba realistického pohybu zdigitalizovaného lidského těla,
- digitální rekonstrukce historických památek a archeologických artefaktů bez poškození za použití bezkontaktní digitalizace,
- geologie a geodzie - trojrozměrný digitální záznam přírodní scenérie,
- rapid prototyping - přímá replikace výrobku z modelu,
- skenování povrchu vozovek,
- kriminalistika - trojrozměrný digitální místa činu. [37]

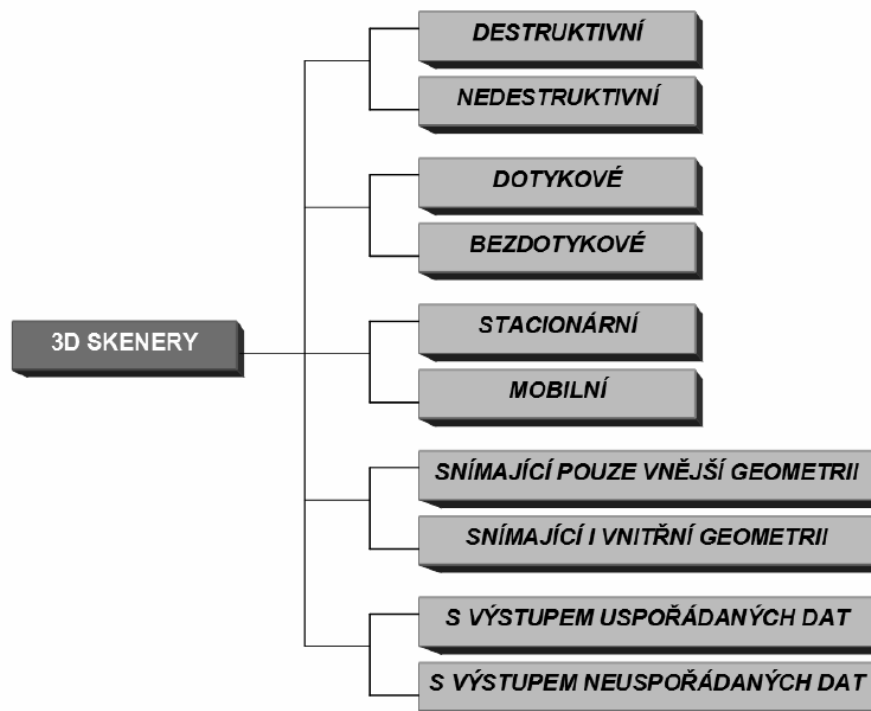
Oblast reverzního inženýrství je silně zakořeněna také v oboru informačních technologií. V oblasti hardwaru se jedná např. o vnitřní úpravy vybavení nebo obcházení přístupových omezení využívaných ve spotřební elektronice. V softwarové oblasti pak analýza zkompilovaného či zdrojového kódu a jeho zpětný rozbor. [35, 37]

2 3D SKENERY

V rámci průmyslové praxe je využívána celá řada zařízení pro účely digitalizace fyzického objektu, která jsou souhrnně nazývána 3D skenery. Digitálním výstupem těchto zařízení je mrak bodů, kterým je reprezentován povrch snímaného objektu. Jednotlivé zařízení se liší ve své konstrukci, využitém fyzikálním principu, v dosahované rychlosti a ceně. Volba typu skeneru závisí na požadavcích, které jsou kladeny na přesnost shody mezi reálným skenovaným objektem a výsledným 3D modelem. [25, 27]

V technické praxi jsou nejvíce rozšířeny skenery optické, laserové a mechanické. U strojních součástí je vyžadována poměrně vysoká přesnost (setiny až tisícinny milimetru), v případě ostatních aplikací nejsou na tento požadavek kladeny tak vysoké nároky. Nejvyšší přesnosti a rychlosti je dosahováno při použití laserových a optických přístrojů, nejnižší pak při použití přístrojů mechanických ručně polohovaných. Důležitým faktorem je také maximální možný skenovací objem, resp. maximální možná velikost skenovaného objektu. [14, 25, 27]

Kromě samotného skeneru má zásadní vliv na konečný výsledek digitalizace i charakter skenovaného objektu. Zejména typ povrchu, složitost tvarů a způsob jejich napojení jsou rozhodujícími faktory úspěšnosti a realizovatelnosti celého procesu. [25]



Obr. 2. Možné rozdělení 3D skenerů. [17]

Výše uvedené metody digitalizace jsou schopny zachytit pouze vnější tvar zkoumaného objektu. Pro zachycení vnitřních skrytých tvarů jsou využívány přístroje, jejichž princip je založen na využití rentgenového záření, ultrazvuku nebo magnetického pole. Speciálním případem metody, která je schopna postihnout vnitřní i vnější geometrii objektu je destruktivní digitalizace, při které dojde k odfrézování jednotlivých vrstev materiálu snímaného objektu. [27]

a) Hardware

- skener – sensorová jednotka, výpočetní jednotka, stojan, stativ,
- počítač – nutný vysoký výpočetní výkon,
- pomůcky – referenční body, kalibrační desky a tyče, modifikátory povrchu, manipulační a upevňovací technika.

b) Software

- obsluha skeneru a řízení snímání,
- zpracování a úprava zdigitalizovaného objektu,
- další činnost CAD, CAE, CAI, FEM atd. [25, 27]

2.1 Destruktivní skenery

Tento typ skenerů není příliš rozšířen, protože během procesu skenování dojde k nenávratné destrukci skenovaného objektu, tento fakt je mnohdy nepřijatelný. Vhodné uplatnění této metody je zejména při digitalizaci objektů se složitou vnitřní strukturou, kterou je tato metoda schopna postihnout a zaznamenat. Před skenováním je nutno skenovaný objekt připravit. Na povrch objektu a do jeho dutin se aplikuje speciální kontrastní látka. Následně je umístěn do podtlakové komory, ze které je odčerpán vzduch aby kontrastní látka dokonale vyplnila skenovaný objekt. V dalším kroku je objekt přemístěn do skenovacího zařízení a upne se na frézovací stůl. Zde je možné využít skenování více součástí najednou, jejich zalitím do bloku pryskyřice. Softwarovým vybavením skeneru je v závislosti na potřebné výsledné přesnosti určena tloušťku odebíraných vrstev. Vlastní proces skenování je proveden vždy po odfrézování jedné vrstvy z bloku materiálu a to pomocí optických či laserových metod. V následném procesu zpracování dat je důležitá funkce aplikované kontrastní látky, kterou je poskytnut digitálně zpracovávanému snímku vysoký kontrast mezi skenovanou součástí a výplňovou látkou. Jednotlivé snímky jsou za pomoci vhodných algoritmů transformovány do 3D zobrazení. Nevýhodou této metody

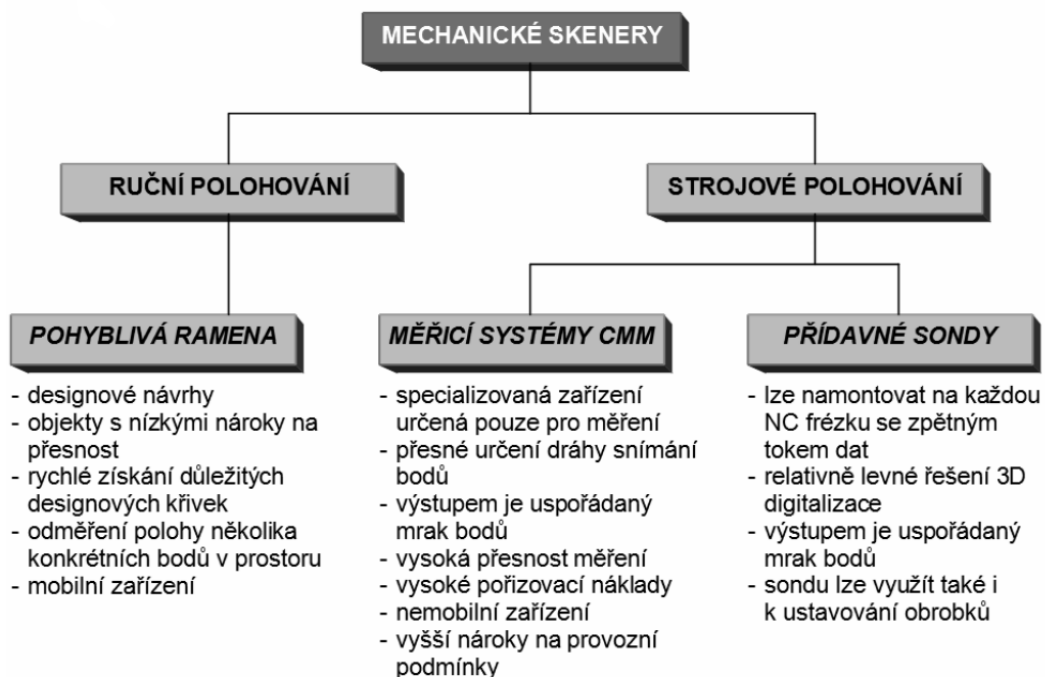
kromě destrukce skenovaného objektu je i fakt, že jeho materiál musí být snadno obrobitelný. [27]

Doba potřebná pro proces skenování závisí na velikosti skenovaného objektu, a požadované kvalitě 3D modelu. V případě zmenšení tloušťky jednotlivých odebíraných vrstev se tak zvyšuje rozlišení výsledného 3D zobrazení ve směru normály k odebíraným rovinným plochám a vice versa. Celý proces skenování touto metodou může trvat v řádu hodin. [27]

2.2 Dotykové skenery

Taktilní metody, mnohdy označované jako kontaktní či mechanické, jsou charakteristické tím, že je zde využito fyzického kontaktu měřícího zařízení – sondy s povrchem měřeného objektu. Z tohoto důvodu nejsou tyto technologie vhodné pro měření a skenování měkkých materiálů, u kterých by nastala značná deformace vlivem dotyku sondy. [25, 27]

Před měřením je vhodné označit na povrchu skenovaného objektu body, které budou předmětem snímání tak, aby se získal přesný digitální obraz. Pro přesné a reprezentativní postihnoutí skenované plochy je třeba značného počtu bodových měření, proto je digitalizace touto metodou u velkých objektů s obecnými plochami velmi časově náročná. Do této kategorie jsou zahrnuty specializované měřící zařízení v podobě měřících ramen, souřadnicových měřících systémů či adaptace CNC strojů. [25, 27]



Obr. 3. Rozdělení dotykových skenerů. [17]

2.2.1 Měřicí ramena

Jedná se o mechanické skenery s ručním polohováním. Základem tohoto měřicího přístroje je polohovatelné rameno s měřicí dotekovou sondou na jeho konci. Sonda je obsluhou postupně ručně vystavena do jednotlivých bodů, ve kterých je provedeno měření prostorových souřadnic. Samotné určení polohy koncového doteku sondy je zajištěno pomocí senzorů úhlového natočení, které jsou umístěny v jednotlivých kloubech ramene. Data o poloze nejsou přenášena do počítače kontinuální formou, ale na vyžádání obsluhujícího pracovníka. Tímto způsobem je získán značný počet bodů na povrchu tělesa, plně určených v prostoru. Nelze takto ovšem získat informace o textuře, ve smyslu barevného provedení povrchu měřeného tělesa. Dosahované přesnosti se pohybují v řádech desetin milimetru a měření je velmi pracné a zdoluhavé. Z tohoto důvodu jsou tyto metody méně často využívány ve strojírenských aplikacích, ale např. v oboru filmového či průmyslového designu. Za jejich nespornou výhodu lze považovat relativně nízkou cenu. [27]



Obr. 4. Měřicí rameno Microscribe od firmy Immersion. [22]

2.2.2 Souřadnicové měřicí systémy – CMM (Coordinate Measuring Machine)

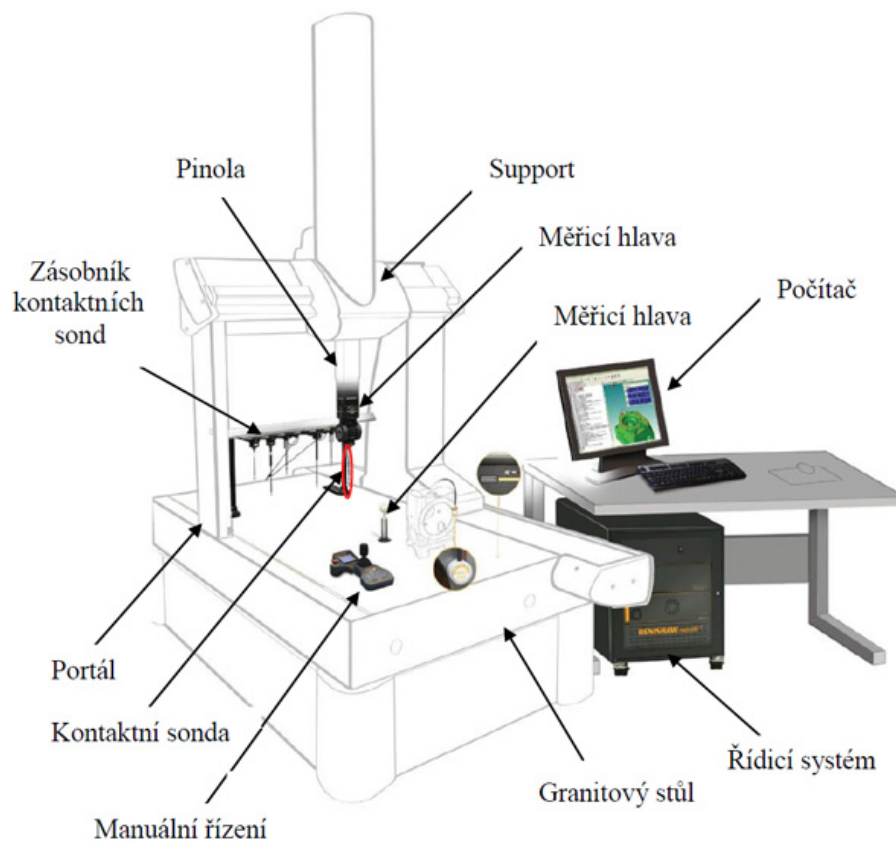
Kontaktní měřicí zařízení CMM jsou primárně určena pro velmi přesnou kontrolu rozměrů. Měřicí soustava je tvořena z NC stroje, kterým je řízen pohyb měřicí sondy připevněné na pohyblivé konzole. U novějších strojů je umožněno vést měřicí sondu po povrchu součástí a zaznamenat tak prostorové souřadnice v jistém intervalu, tím je měření efektivnější, přesnější a rychlejší. Využívány jsou zejména pro měření rozměrů, obrysů, úhlů a děr. [27]

Hlavní části CMM systémů:

- souřadnicový měřicí stroj,
- měřicí sondy,

- výpočetní program,
- měřicí program. [27]

Nevýhodou tohoto typu měřicího přístroje je delší doba měření, daná hlavně pomalým pohybem konzoly v porovnání s časem promítnutí a sejmutí obrazu u optických systému. Nejrychlejší CMM systémy jsou schopny pracovat se vzorkovací frekvencí stovek Hz, oproti laserovým skenerům s vzorkovací frekvencí 10 kHz až 500 kHz. Získaná data jsou v porovnání s ostatními metodami velmi přesná, s přesností řadově i v tisícinách mm. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady, větší zastavěný prostor a větší nároky na pracovní prostředí (konstantní vlhkost, teplota apod.). [27]



Obr. 5. Popis souřadnicového měřicího přístroje. [16]

2.2.3 Adaptace CNC stroje

Pro účely digitalizace a rozměrové inspekce, lze také využít modifikovanou CNC frézku s inverzním tokem dat. Místo obráběcího nástroje je ve vřeteníku zařízení upnuta měřicí sonda s dotykovým hrotem. Tato sonda je v přímém kontaktu se snímanou plochou a její poloha je přes přidruženou elektroniku převáděna na prostorové souřadnice, které jsou zpracovávány počítačem. V rámci CNC stroje může být sonda identifikována jako přidav-

né zařízení a zařazena do katalogu automatické výměny nástrojů. Pro větší objemy dat je vhodnější využít specializovaný souřadnicový měřicí stroj, nebo jednu z dalších metod, o kterých bude pojednáno dále. [27]

2.3 Nedotykové skenery

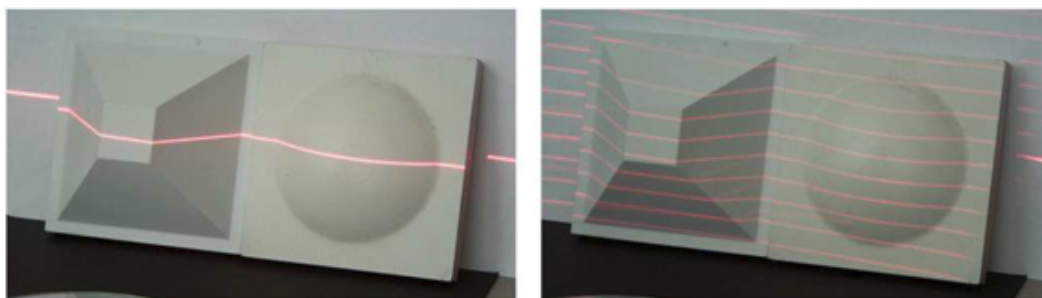
Tato kategorie skenerů zahrnuje metody skenování, které pro svoji funkci nevyžadují fyzický dotyk mezi skenovaným povrchem a skenovací sondou nebo senzorem. Nejčastějším nosičem informace o skenovaném povrchu je zde elektromagnetická vlna z oboru viditelného záření (optické a laserové metody) nebo rentgenového záření (CT), která je po průchodu či odrazu od vyšetřovaného povrchu detekovaná na CCD/CMOS senzoru. Softwarovým zpracováním jsou následně tyto informace transformovány na prostorové body skenovaného tělesa. Mimo elektromagnetického záření je často využíváno i mechanického vlnění - ultrazvuk nebo magnetického pole (MRI). [14, 27]

2.3.1 Laserové skenery

Princip laserových skenerů je založen na projekci laserového paprsku na digitalizovaný povrch skenovaného objektu. Paprsek je po dopadu na povrch odražen a část záření dopadne zpět na senzor. Vyhodnocuje se doba letu, úhel dopadu či jeho fázové posunutí, v závislosti na typu uspořádání skeneru. Z těchto informací je následně softwarově vypočítána vzdálenost a poloha aktuálně skenovaného bodu na povrchu tělesa. O jednotlivých metodách je pojednáno v kapitole 3. Tímto způsobem je získána informace o tvaru povrchu. Pokud je vyžadována i informace o barevné textuře povrchu je nutné zařadit do systému kameru se senzorem typu CCD/CMOS, který je schopen tuto informaci získat. V rámci konečném zpracování je posléze tato barevná textura namapována na povrch 3D modelu naskenované součásti. [22, 27]

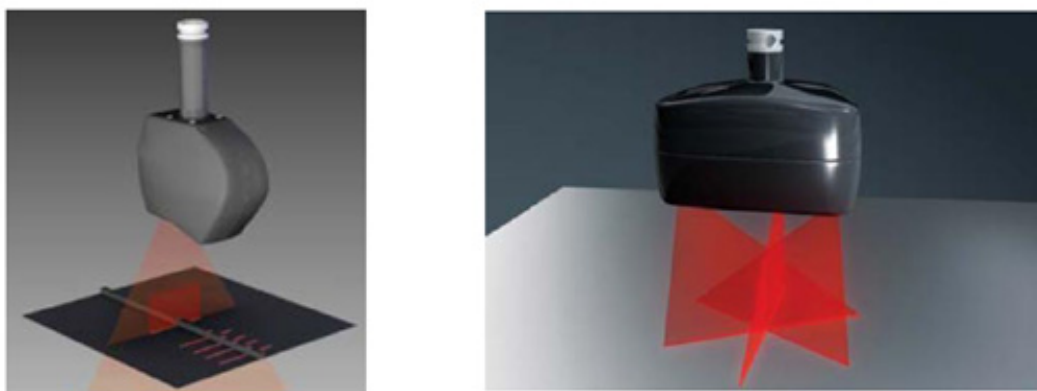
Výhoda laserových oproti optickým skenovacím systémům je dána jejich schopností skenovat malé, hluboké a neprůchozí díry i menší náchylnosti k chybnému určení vzdálenosti při nevodném okolním osvětlení. V praxi je využíváno přístrojů portálového nebo příručního charakteru. V případě portálového typu skenovacího zařízení je skenovací laserová hlava vystavována po vedení a skenovaný objekt je tak umístěn pod ní. Vlivem tohoto uspořádání je způsoben problém se skenováním té části plochy, která je orientována s laserovým paprskem rovnoběžně (osa paprsku v této rovině leží). Příruční laserové přístroje, podobně jako jejich optické alternativy, skenují povrch součásti z mnoha různých úhlů a tato obtíž

se u nich nevyskytuje nebo jen výjimečně. Mezi jejich výhody je řazena vysoká mobilita a možnost použití na akumulátor. [25, 27]



Obr. 6. Příklad skenování rozmítaným laserovým svazkem. [22]

Rychlost skenování je limitována dobou expozice a rychlosti čtení dat ze senzoru. Frekvence snímání bodů se pohybuje řádově v desítkách tisíc až statisících Hz. Pro zvýšení výkonu a přesnosti je laserový svazek rozmítán pomocí zrcadel a na skenovaném objektu tak vznikne viditelný pruh, právě skenované oblasti. V závislosti na konstrukci skeneru může skenovací hlava obsahovat více zdrojů laserových svazků a snímat tak ve více rovinách, např. 3 snímací roviny po 120°. Pro lepší provázání jednotlivých skenování je také možno využít referenčních bodů. [25, 27]

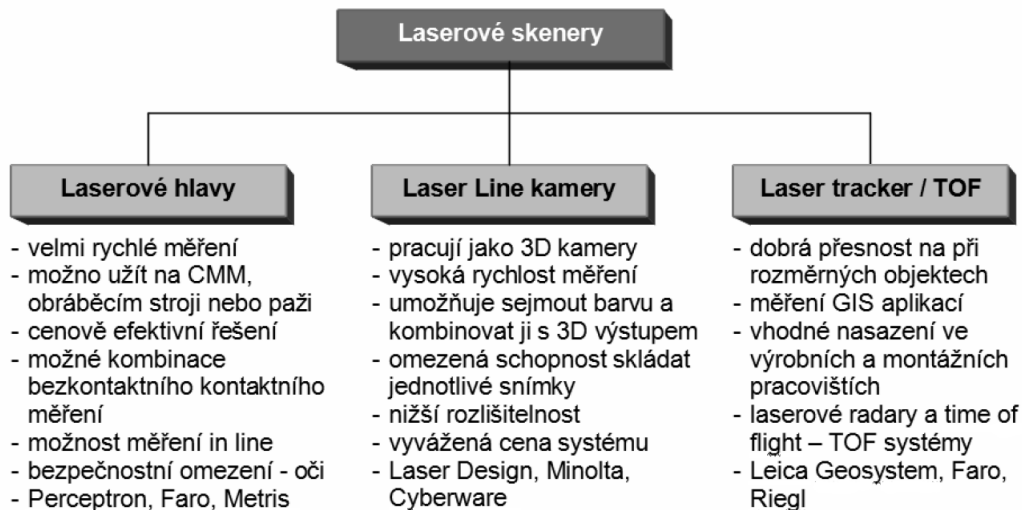


Obr. 7. Laserová skenovací hlava s jednou a třemi osami snímání. [22]

Za nevýhodu této skenovací technologie lze považovat zpravidla vyšší pořizovací náklady a neschopnost skenovat lesklé povrchy. Tento problém nastane v oblasti, kde se velikost mikronerovností povrchu pohybuje v oblasti vlnových délek světelného záření laseru a nastane tak vícenásobný odraz. Vlivem tohoto jevu je paprsek odražen pod příliš velkým úhlem nebo naopak tak, že jeho intenzita přexcituje snímací senzor. V každém případě je tento jev nežádoucí a jeho následky lze částečně kompenzovat aplikací křídového nátěru,

popř. regulací intenzity laserového svazku v závislosti na aktuální odrazivosti skenované plochy. [14, 27]

Kvalita digitalizovaného povrchu tělesa závisí na hustotě s jakou laserový paprsek pokryl plochu reálného tělesa a na následném softwarovém zpracování, takto vzniklého mraku bodů. [27]



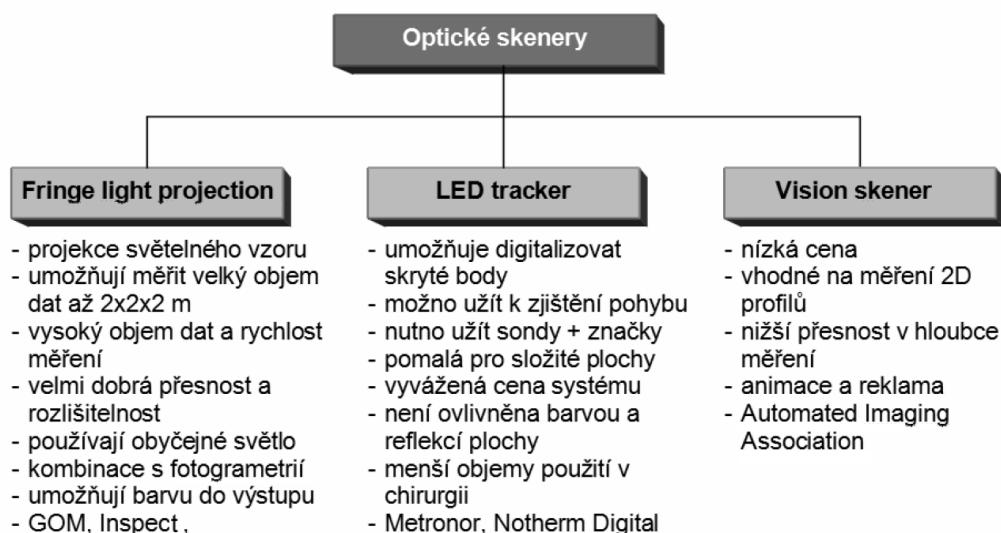
Obr. 8. Rozdělení laserových skenerů. [17]

2.3.2 Optické skenery

Tato zařízení využívají ke skenování metody optické triangulace, fotogrammetrie a promítání vzorů. Digitalizovaný objekt je v návaznosti na danou konstrukci zařízení snímán pomocí jedné nebo dvou digitálních kamer z mnoha různých úhlů. Natočení objektu či skeneru se provede ručně nebo strojově a to pomocí polohovacího zařízení v podobě otočného stolu s krokovým motorem nebo za využití robota. V závislosti na druhu použité technologie může být povrch snímaného objektu před a při samotném skenování zasvěcován barevným či černobílým vzorem pomocí projektoru, za účelem následného určení tvaru a výpočtu hloubkové souřadnice. Zároveň je vhodné snímaný objekt umístit před jednobarevné pozadí a to nejlépe takové, které s ním bude co možná nejvíce kontrastní. Pokud by tato zásada nebyla dodržena bylo by složité, ne-li nemožné, oddělit objekt od okolního prostředí. [15, 20, 26]

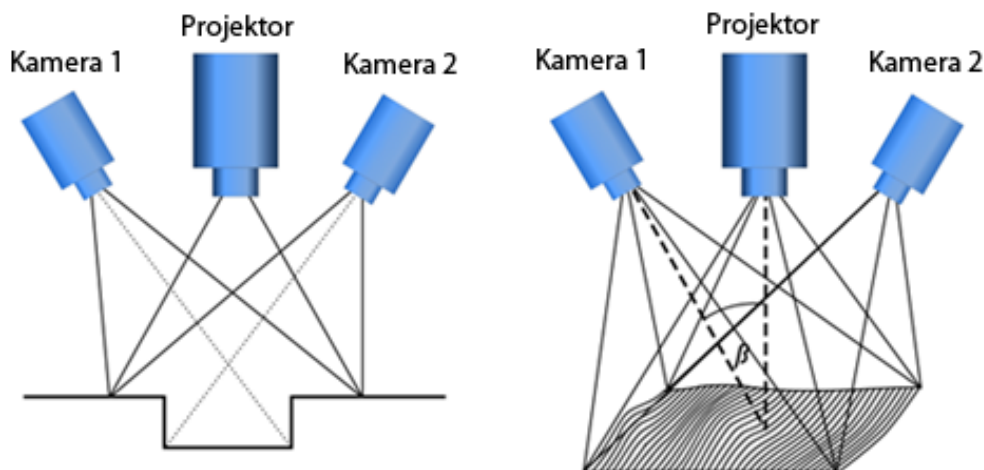
Vypočet 3D modelu je prováděn výkonným výpočetním systémem a softwarem, který na základě optických zobrazovacích rovnic transformuje a rekonstruuje jednotlivé snímky do prostorových souřadnic jednotlivých bodů povrchu zkoumaného tělesa. Pro řádnou trans-

formaci a napojení jednotlivých snímků k sobě je u mnoha optických teorií využito referenčních bodů, kterými je opatřen skenovaný povrch. Jedná se o černobílé značky, které jsou rozmístěny takovým způsobem, aby na každém dalším snímku byl alespoň určitý počet značek ze snímku předchozího. Počet referenčních značek (až tisíce) a počet získaných snímků (až stovky) je odvislý od složitosti a velikosti skenovaného objektu. [20, 27]



Obr. 9. Rozdělení optických skenerů. [17]

Nevýhodou této technologie je citlivost na okolní osvětlení a barevnou texturu povrchu skenovaného objektu, která snižuje rozměrovou kvalitu získaného skenu nebo zcela zamezuje jeho pořízení. Dále je možné se setkat s problémem, kdy je skenovaný povrch příliš lesklý, tmavý nebo transparentní a jeho řádné snímání by mohlo činit potíže. Proto je někdy nutné povrch vhodně osvětlit, popř. na něj aplikovat křídový nátěr. Jisté obtíže mohou být také způsobeny pokud objekt obsahuje hluboké a úzké díry. [20, 27]



Obr. 10. Princip funkce optického skeneru s využitím promítání pruhů. [36]

Výhodou je získaný relativně přesný (v řádech setin milimetru) zdigitalizovaný model s nasnímanou barevnou texturou. Možnost skenovat objekty velikosti osobního automobilu a dále fakt, že skenování bodů je provedeno ve velice krátkém časovém okamžiku najednou a nikoliv sériovou formou. To značně zkracuje celou dobu procesu. [20, 27]

Jedním z vysoce výkonných, mobilních, bezkontaktních, optických skenerů je systém ATOS od německé firmy GOM, který byl využit v experimentální části této práce a jeho popisu se věnuje samostatná kapitola.

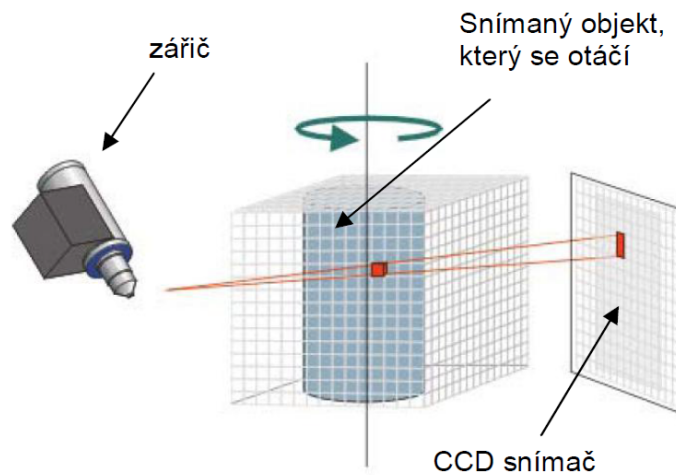
2.3.3 Výpočetní tomografie - CT (Computed Tomography)

Pomocí této nedestruktivní metodou lze získat z jednoho měření prostorové informace o vnější i vnitřní geometrii skenovaného objektu. Výpočetní tomografie je využívána jak v medicínských aplikacích, kde v konkrétních případech zastupuje a vylepšuje klasický rentgen ale i v aplikacích průmyslových. Podle konstrukce zařízení je skenovaný objekt vložen do přístroje, kde je po kruhové trajektorii obíhán zařízením složeným ze zářiče a detektoru, tento model uspořádání je často využíván v oblastí lékařství. Jiným modelem uspořádání je staticky umístěna soustava zářič - detektor a na otočném stole vyšetřovaný objekt, tento systém je naopak využíván při skenování neživých objektů. [15, 34]

Během procesu skenování je snímaný objekt natáčen kolem svislé osy v jednotlivých krocích, mnohdy až 1000 kroků na jednu otáčku. Takto je získáno mnoho 2D průmětů, tzv. rentgenogramů v rozlišení až 1 Mpx, které jsou následně zpracovány výkonným výpočetní systém. [15]

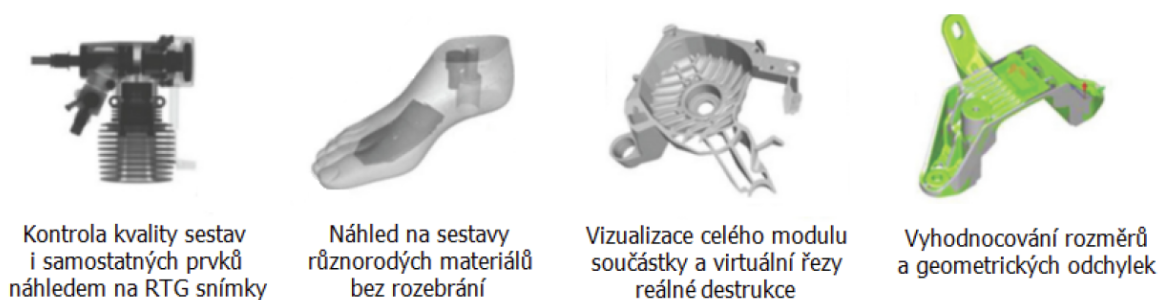
Princip funkce CT je založen na útlumu emitovaného rentgenového záření a následné detekci a vyhodnocení jeho intenzity na detektoru. Útlum intenzity rentgenového záření je mj. ovlivněn hustotou prostředí, kterým prostupuje. Pokud je prostor vyplněn pouze vzduchem je hodnota útlumu nízká a na detektor dopadá vysoká intenzita záření, vyhodnocený bod je světlý. Pokud je záření cloněno předmětem či předměty s vyšší hustotou, tak je jeho energie v těchto předmětech pohlcena a na detektor dopadá nižší intenzita záření, výsledkem je tmavý bod. Kromě hustoty má na utlum záření značný vliv i tloušťka či kumulovaná tloušťka materiálů, jimiž záření prochází. Výstupem skenování a následné obrazové rekonstrukce je mračno prostorových bodů, tzv. voxelů (objemové pixely), které jsou nosiči informace o svém umístění v prostoru a útlumu. [15, 34]

Výhodou této metody je možnost snímání v nepřístupných oblastech pro optickou a laserovou 3D skenovací techniku. Dále možnost snímat prostorové informace o celém objemu měřeného objektu nezávisle na jeho složitosti, odhalovat vnitřní skryté vady materiálu a schopnost ve virtuálním 3D modelu vytvářet řezy v libovolném směru. [15, 34]



Obr. 11. Princip výpočetní tomografie. [34]

Za nevýhodu této technologie může být vnímáno omezení maximálního snímatelného objemu vlivem velikosti skenovací komory a vysoký útlum rentgenového záření v některých materiálech, což tuto ji činí vhodnou zejména pro součásti z plastů a hliníku, popř. oceli, mědi a dalších slitin s vysokou hustotou za podmínky jejich malé tloušťky. V neposlední řadě také nutnost využití ionizujícího záření, které má neblahý vliv na lidské zdraví. [34]



Obr. 12. Příklady možné aplikace výpočetní tomografie. [24]

Další metodou, která umožňuje skenovat vnitřní i vnější plochy je nukleární magnetická rezonance (MRI). V aspektu zpracování výsledků skenování je velice podobná výpočetní tomografii, ale je založeno na zcela jiném fyzikálním principu. Není zde využito elektromagnetického záření, ale geneze velice silných magnetických polí. Nebezpečí pro lidské zdraví je tak redukováno. [34]

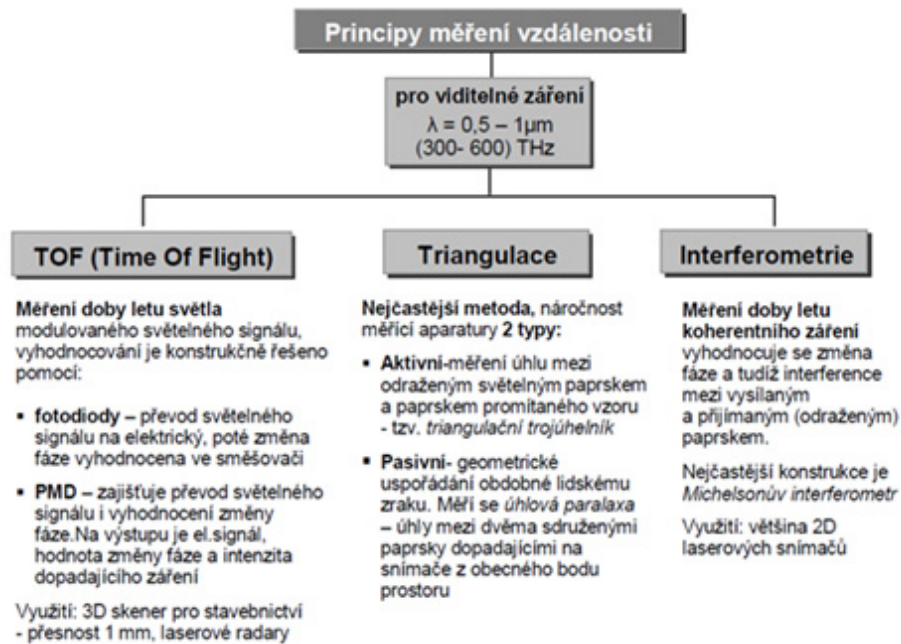
2.3.4 Ultrazvukové skenery

Princip ultrazvukových skenerů je založen na detekci odražené ultrazvukové vlny od vyšetřovaného povrchu. Skenování je prováděno manuálně pomocí ultrazvukové sondy ve tvaru pistole s kovovým hrotem. Hrot je přiložen ke skenovanému povrchu, stisknuta spoušť a následně vyslán ultrazvukový signál, jehož odraz je detekován ultrazvukovými čidly a softwarově dekodován do prostorových souřadnic jednotlivých bodů povrchu skenovaného objektu.

Výhodou ultrazvukových skenerů oproti jiných bezdotykovým skenerům je jejich nižší cena, nevýhodou potom nižší přesnost pohybující se v rámci 0,3 – 0,5 mm. [27]

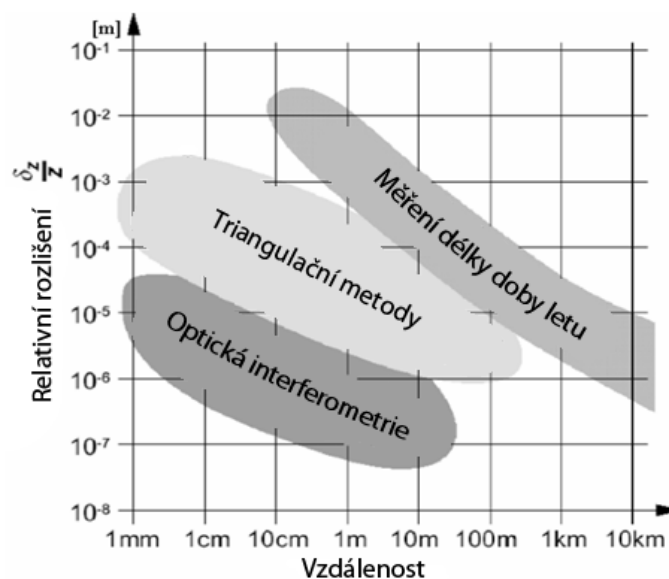
3 METODY URČENÍ TŘETÍHO ROZMĚRU

Výsledkem měření trojrozměrných objektu jsou získaná data o tvaru a rozměrech vyšetřovaných objektů. Skenovaná trojrozměrná scéna je snímána dvourozměrným CCD/CMOS čipem, z tohoto důvodu zde dojde ke ztrátě informace o jedné souřadnici a to zpravidla té hloubkové, tedy vzdálenosti měřeného objektu od senzoru. [27, 30]



Obr. 13. Rozdělení metod pro určení třetího rozměru. [17]

K řešení tohoto problému je u laserových a optických skenovacích přístrojů nejčastěji využíváno metod měření doby letu světla, interferometrie a metody triangulace. [27, 30]



Obr. 14. Graf závislosti relativního rozlišení na měřící vzdálenosti pro jednotlivé metody. [31]

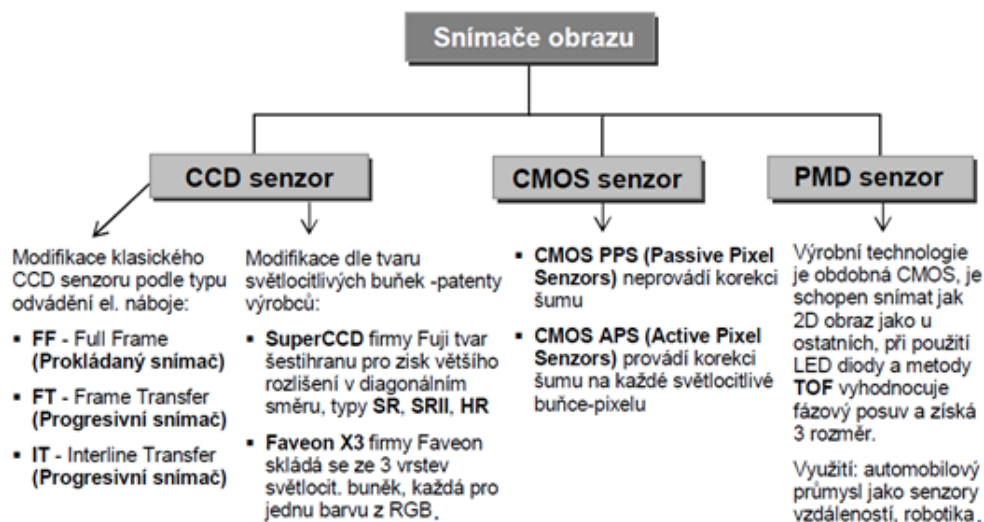
3.1 Měření délky doby letu – TOF (Time of Flight)

Metoda TOF je založena na principu měření doby letu modulovaného světelného paprsku, který je vyslán ze zdroje, odražen od měřené plochy zpět k přijímači, kde je následně detekován senzorem. Světelným zdrojem je nejčastěji laser, kterým je emitováno elektromagnetické záření vhodných fyzikálních vlastností. Vzdálenost senzoru od měřeného objektu lze vypočítat podle vztahu (1), kde konstanta c je rychlost světla ve vakuu a t_c celková doba letu signálu. Úhel mezi zdrojem záření a senzorem je velice malý, nemá proto významný vliv na měření. Jedinou proměnou v rovnici je čas. Z toho vyplývá, že přesnost metody je závislá na přesnosti detekce okamžiku, kdy je odražený signál zaznamenán na senzoru. Doba, za kterou světlo urazí 1 mm délky je rovna přibližně 3,3 ps ($6 \cdot 10^{-12}$ s). Proto je nutné zajistit přesný a stabilní zdroj času. [30]

$$l = \frac{c \cdot t_c}{2} \quad (1)$$

V posledních letech se k měření využívá PMD (Photonic Mixer Device) senzoru. Světelný signál vyslaný ze zdroje je modulován radiofrekvenčním napěťovým signálem z oscilátoru. Po odrazu od zkoumaného objektu vykazuje na straně přijímače posuv fáze, který je úměrný hledané době letu. Porovnáním referenčního signálu, který byl vyslán ze zdroje, a signálu příchozího může být určena hledaná doba letu. [31]

Laser měří vzdálenost bodů čistě ve směru detekce, tedy ve svém úhlu pohledu. Změnou tohoto úhlu, za použití elektronicky vychylovaných zrcadel, je možné skenovat další body a zjišťovat tak jejich prostorové souřadnice. [30, 31]



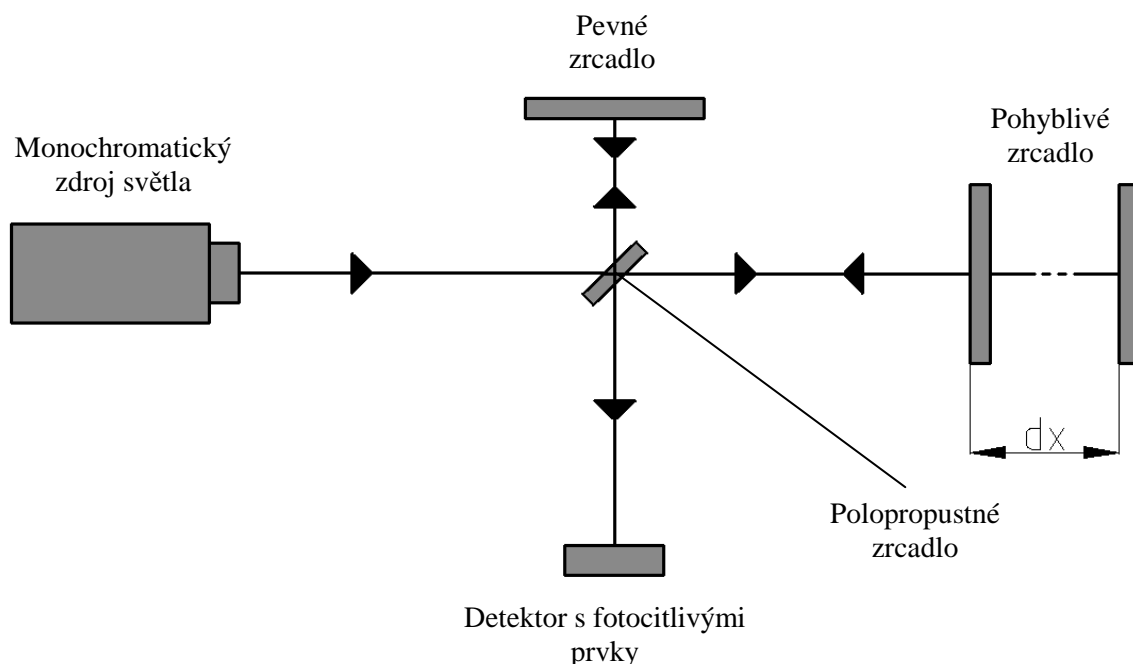
Obr. 15. Rozdělení snímačů využívaných ve 3D skenerech. [17]

Výhodou skenerů využívající tohoto systému je schopnost určování velkých vzdáleností až v řádu kilometrů. Z tohoto důvodu jsou využívány k digitalizaci např. ve stavebnictví (budovy), geologii nebo geodezii (přírodních scénérie). [14, 30]

Za nevýhodu této metody, alespoň pro oblast strojírenských aplikací, lze považovat její nízkou přesnost, pohybující se v řádech milimetrů. [14, 30]

3.2 Optická interferometrie

Metoda optické interferometrie je založena na principu vyhodnocení interferenčního obrazce. Laserový zářič emituje monochromatické koherentní záření, které je rozděleno na skloněném polopropustném zrcadle na větev referenční (známa délka dráhy) a měřící (neznáma, měřená délka). V koncovém bodě obou větví je záření odraženo zpět na polopropustné zrcadlo, kde proběhne interference. Takto vzniklé interferenční obrazce jsou následně zaznamenány snímačem a vyhodnocen jako změna délky. Tato metoda tedy umožňuje měřit relativní vzdálenost bodů zkoumaného povrchu, po provedení kalibrace soustavy i vzdálenost absolutní. [27, 30]



Obr. 16. Princip optické interferometrie - Michelsonův interferometr. [28]

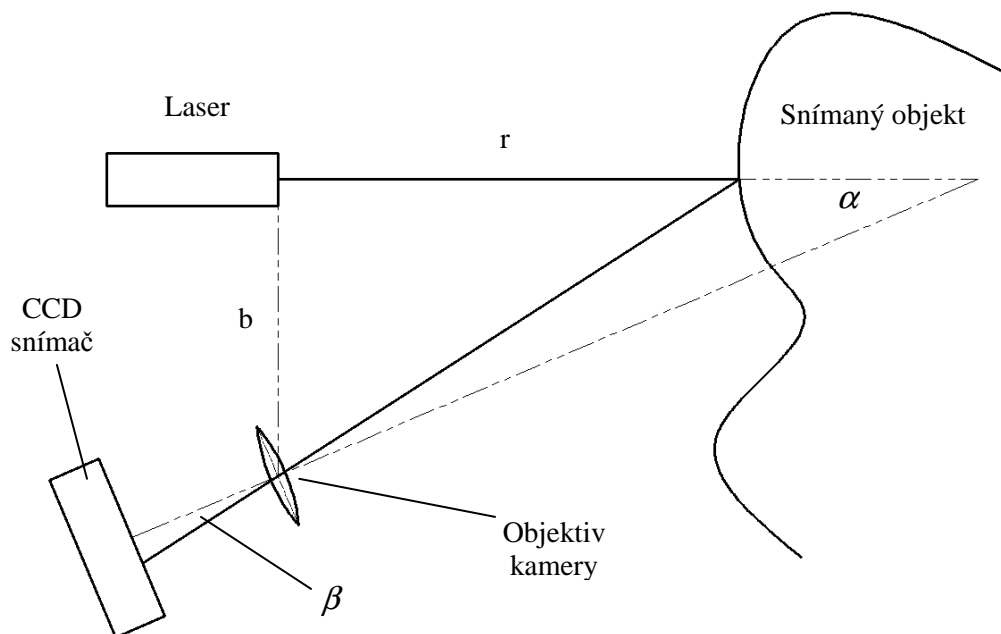
3.3 Triangulační metody

Metody využívající optické triangulace se vyznačují složitou konstrukcí měřicího zařízení a lze je dělit na metody aktivní a pasivní. [30]

3.3.1 Aktivní triangulace

Principem aktivní metody triangulace je založen na osvětlení vyšetřované plochy světelným zdrojem (laser či LED) a sejmutím jejího obrazu pomocí CCD/CMOS snímače. Takto získaný rastrový obraz je následně podroben softwarové fotogrammetrické rekonstrukci. [30]

Záříč, snímač a zobrazený světelný bod na povrchu zkoumané plochy tvoří, tzv. triangulační trojúhelník. Délka spojnice mezi záříčem a snímačem je známa, stejně tak i vrcholový úhel trojúhelníku v místě záříče. Tyto hodnoty jsou konstantní. Vrcholový úhel v místě snímače je proměnný a je určen místem projekce odraženého záření ze zkoumané plochy na CCD/CMOS snímači. [28, 30]

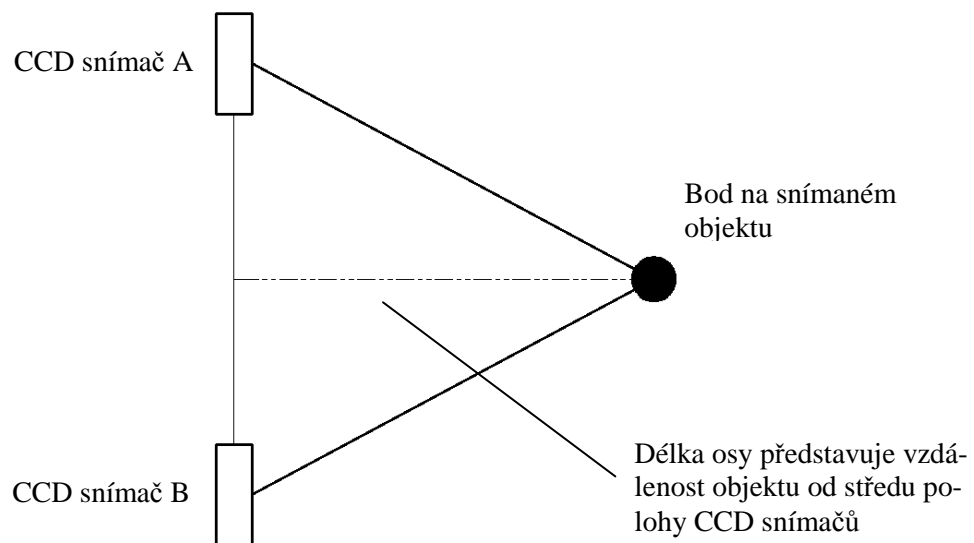


Obr. 17. Princip aktivní triangulace. [28]

Z takto získaných informací lze výpočtem určit hloubkovou souřadnici aktuálně snímaného povrchového bodu. Pro urychlení procesu měření je v některých případech na zkoumaný povrch promítán světelný pruh nebo strukturovaný světelný svazek. Skenery využívající této metody dosahují skenovacího dosahu několika metrů a jejich přesnost se pohybuje v rámci mikrometrů. [28, 30]

3.3.2 Pasivní triangulace

U metody pasivní triangulace není využito žádného aktivního ozáření zkoumaného povrchu ze strany měřícího zařízení. Vyšetřovaný povrchu je snímán dvojicí CCD/CMOS senzorů, vzdálených od sebe o určitou vzdálenost. Takto jsou získány dva perspektivní obrazy. Z úhlu snímaného těmito sdruženými paprsky, tzv. úhlová paralaxa, lze získat vzdálenost od středu pohledu obou snímačů k jednotlivým bodům skenovaného povrchu. Uspořádání systému je inspirováno lidským vizuálním systémem. [28, 30]



Obr. 18. Princip pasivní triangulace. [28]

4 VSTŘIKOVÁNÍ

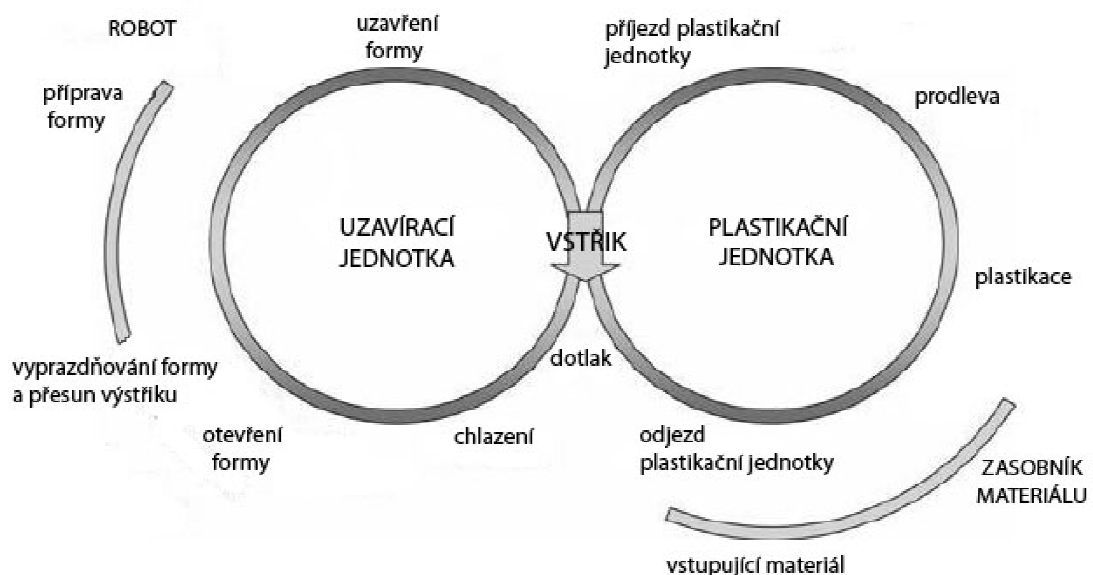
Technologie vstřikování polymerních materiálů je jedna z globálně nejvíce rozšířených technologií pro zpracování polymerů. Tohoto cyklického, fyzikálně - mechanického procesu se zúčastňuje výchozí zpracovávaný materiál, vstřikovací stroj a v pozici nástroje vstřikovací forma. [2]

Během vstřikovacího cyklu je dávka roztaveného zpracovávaného polymeru vstřiknuta pod vysokým tlakem a teplotou do uzavřené a temperované dutiny vstřikovací formy, kde je zchlazena a následně tuhne ve finální výrobek, tzv. výstřik. [2]

Produkty zhotovené technologií vstřikování se vyznačují dobrou rozměrovou stabilitou, tvarovou přesností, reprodukovatelností mechanicko-fyzikálních vlastností a možnou vysokou tvarovou složitostí, která je limitována aspekty zaformování. [2, 33]

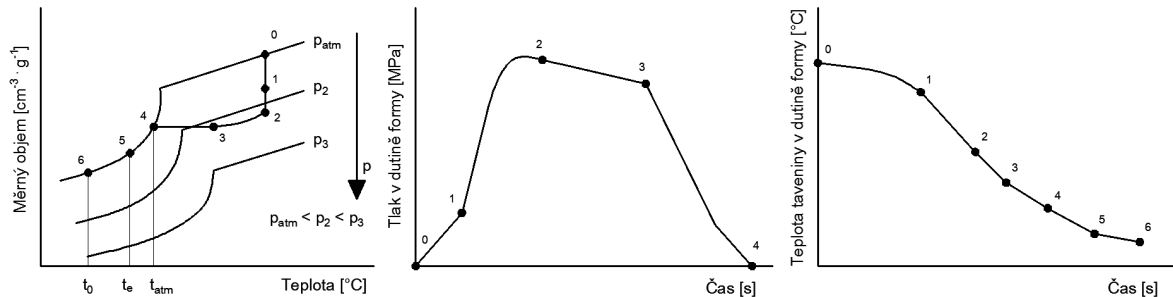
4.1 Vstřikovací cyklus

Pojem vstřikovací cyklus lze definovat jako soustavu přesně definovaných úkonů, které musejí být vykonány pro vytvoření kvalitního dílu v dutině vstřikovací formy. Za počátek vstřikovacího cyklu lze považovat impuls k uzavření vstřikovací formy a za jeho konec okamžik, kdy je forma připravena k uzavření a zpracování další dávky. Během tohoto neizotermního cyklu je polymerní materiál výrazně tepelně namáhán. Celý vstřikovací cyklus lze rozdělit na úkony, které jsou vykonávány plastikační jednotkou nebo uzavírací jednotkou vstřikovacího stroje. [2, 12]



Obr. 19. Průběh vstřikovacího cyklu. [7]

Předpokladem kvalitní výroby je stabilita celého výrobního procesu, která musí být zajištěna takovým způsobem, aby každý následující vstřikovací cyklus měl identický průběh jako cyklus předchozí. Vstřikovací cyklus lze zaznamenat do pV diagramu. [2, 12]



Obr. 20. Diagram pV vstřikovacího cyklu. [12]

interval {0;1} – Objemové plnění.

Vlivem dopředného pohybu šneku je vyvolán vstřikovací tlak na taveninu v plastikační komoře. Ta je tlačena přes odpory vtokového systému až k vtokovým ústím. Dutina formy je úplně vyplňována polymerní taveninou, vzrůstá její tlak a teplota se téměř nemění - izotermická část injekce.

interval {1;2} – Doplnovací fáze.

Tavenina je v dutině formy tlakově komprimována, v bodě 2 je dosaženo maximální hodnoty vstřikovacího tlaku. Teplota taveniny je intenzivně snižována.

bod {2} – Vstřikovací stroj je přepnut z režimu vstřikovacího tlaku na režim dotlaku.

interval {2;3} – Dotlaková fáze.

Tavenina je izobaricky ochlazována. Vlivem mírného snížení vstřikovacího tlaku dochází k objemové kontrakci polymerního materiálu, tzv. smrštění. Tato objemová změna je kompenzována stalým procesem doplňování nové taveniny.

bod {3} – Polymerní materiál zatuhl ve vtokovém ústí a další působení dotlaku je neúčinné, taveninu již není možné do tvarové dutiny dodávat.

interval {3;4} – Izochorický pokles tlaku.

Tlakový pokles při konstantním objemu výstřiku v počáteční fázi. V bodě 4 je vyrovnán tlak v dutině formy s tlakem atmosférickým a povrch výrobku je separován od stěn vstřikovací formy.

interval {4;5} – Izobarické chlazení na vyhazovací teplotu.

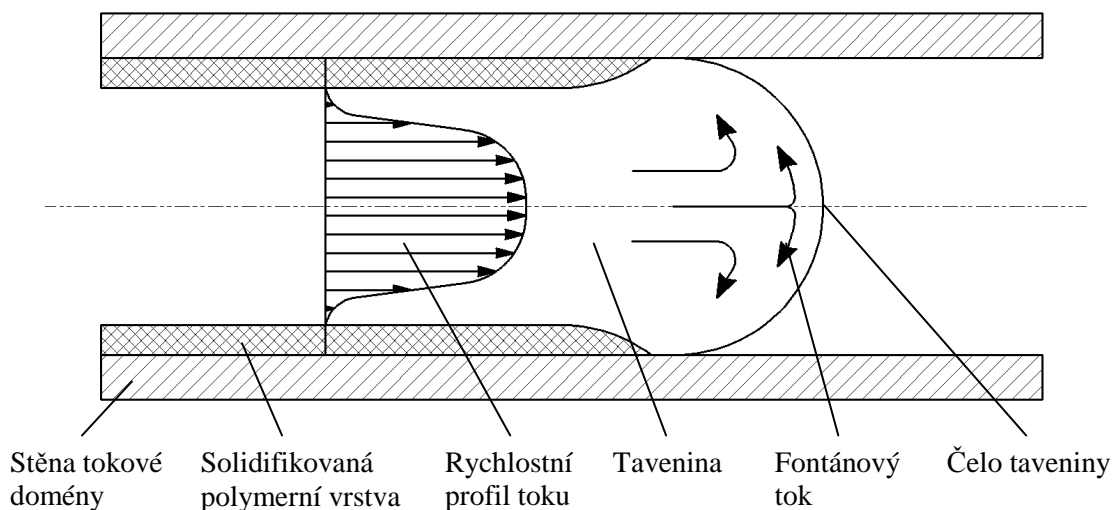
Výrobek se nachází v dutině formy a je za atmosférického tlaku ochlazován až na vyhazovací teplotu.

bod {5} – Výrobek je vyhozen z dutiny vstřikovací formy.

interval {5;6} – Izobarické dochlazení výrobku mimo formu na teplotu okolí. [12]

4.2 Tok taveniny

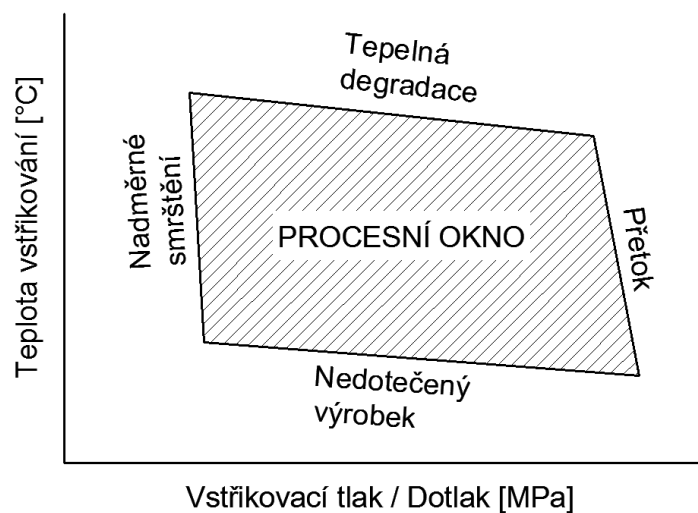
Výsledné vlastnosti vstřikovaného výrobku jsou mj. závislé na typu použitého polymerního materiálu, vstřikovací stroji, vstřikovací formě a temperačním systému. Vtokový systém, zvláště u vícenásobných vstřikovacích forem musí být navrhnout tak, aby bylo zabezpečeno současné vyplnění všech dutin formy ve stejný časový okamžik při stejném tlaku, tzv. vyvážený vtokový systém. Vlivem relativně vysoké viskozity a laminárního proudění polymerní taveniny nenastane efekt skluzu na stěně tokové domény, kterou je rozvaděn do jednotlivých dutin, ale tzv. fontánový typ toku. Čelo taveniny je tak biaxiálně protahováno a nabalováno na stěnu výrazně chladnější tokové domény, kde velice rychle chladne a tuhne. Tím je podpořen tok ve středu tokové domény, který je nyní již tepelně izolován. Tvar rychlostního profilu proudění taveniny je parabolický, s největší rychlostí ve středu tokové domény a nulovou v oblasti okraje. [2, 5, 12]



Obr. 21. Tok taveniny uvnitř tokové domény. [5]

4.3 Procesní rámec

Kvalitní výrobek lze vyrobit pouze při dodržení předepsaných technologických podmínek. Procesním rámcem nebo zpracovatelským oknem je vymezena oblast procesních hodnot pro vytvoření kvalitního a jakostního výrobku. Fakt, že jsou procesní hodnoty stanoveny mimo tento rámec, může vést k výrobě defektního výrobku. V případě příliš vysoké teploty taveniny může dojít k její degradaci v opačném případě, příliš nízké teploty k výrobě nedotečeného výrobku. Vysokými hodnotami dotlaku mohou být způsobeny přetoky a zvýšená hmotnost výrobku v opačném případě, nízké hodnoty dotlaku vysoké smrštění a nízká hmotnost výrobku. [2, 12, 13]



Obr. 22. Vhodná zpracovatelská oblast . [5]

4.4 Klasifikace polymerů

Polymerní materiály jsou chemické, makromolekulární látky obsahující většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, ale i dusíku, chloru a jiných prvků. Za normální teploty jsou v tuhém stavu, za zvýšené teploty mohou být převedeny do stavu kapalného a tak následně vhodnými nástroji formovány do tvaru budoucího výrobku. Vlivem změny teploty tedy nastává výrazná změna jejich fyzikálně - mechanických vlastností. Polymery lze definovat jako látky o molekulové hmotnosti vyšší jak 10^4 , při pohledu z chemického hlediska jsou to látky organické. Molekulová hmotnost je tedy o mnoho řádů vyšší než u ostatních, tzv. nízkomolekulárních látek. Podstatou polymerů je makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu, v jejímž řetězci se jako základní stavební článek řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základními prvky řetězce jsou atomy uhlíku, které mohou být vzájemně vázány a vytvářet tak dlouhé řetězce. V zásadě existují tři druhy po-

lymerních makromolekul: lineární, rozvětvené (typické pro termoplasty) a zesíťované (kaučuky, reaktoplasty). Tyto vysokomolekulární látky jsou vytvářeny polyreakcemi (polymerace, polykondenzace a polyadice). Jedná se v podstatě o velmi jednoduché chemické reakce, které se mnohokrát opakují. Tímto způsobem vznikne z původní nízkomolekulární látky, látka vysokomolekulární, tedy polymer. [2, 32]

4.4.1 Termoplasty

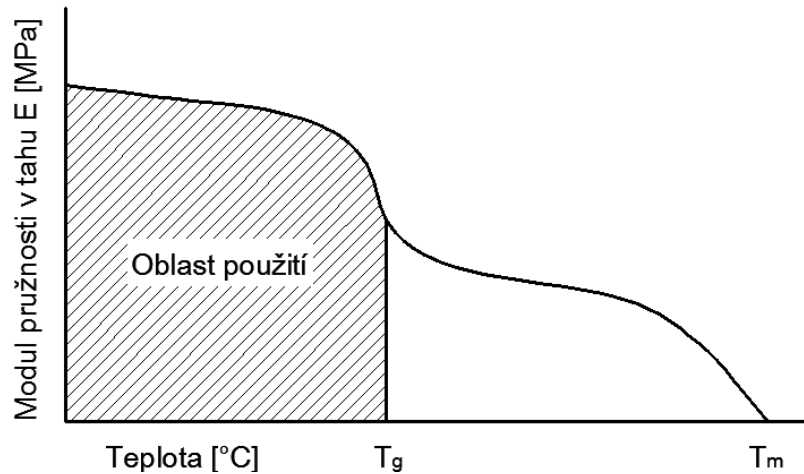
Termoplastické polymerní materiály je možné vlivem tepla opakovaně převést do plastickeho stavu vysoce viskózních newtonských kapalin a následně je relativně snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Přechod zpět do tuhého stavu nastane, pokud jsou ochlazeny pod teplotu tání T_m v případě semikrystalických polymerů, resp. teplotu viskózního toku T_f v případě amorfních polymerů. Vlivem chybějících chemických vazeb mezi jednotlivými makromolekulami a tedy faktu, že nejsou zesíťovány, mohou být opakovaně tepelně zpracovány - fyzikální proces. Mezi termoplasty se řadí většina zpracovávaných polymerů, jako např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA) atd. [2, 32]



Obr. 23. Struktura amorfního (vlevo) a semikrystalického (vpravo) polymeru. [7]

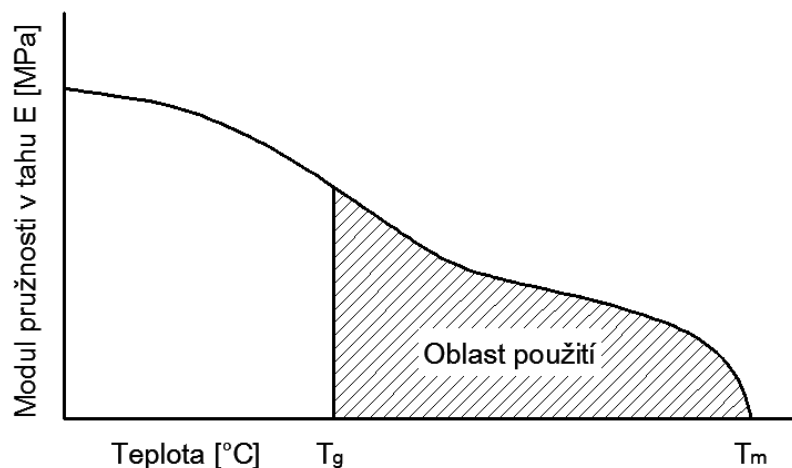
Podle nadmolekulární struktury lze termoplasty dělit následovně:

- amorfní polymery, jejich prostorová struktura uspořádání makromolekul je statistická. Charakteristická je pro ně vysoká pevnost, tvrdost, křehkost, rozpustnost v řadě ředidel a v případě, že neobsahují přidané barviva tak i transparentnost. Oblast použitelnosti se pohybuje do teploty T_g , kde je tento typ polymeru stále v tuhém stavu. S vyšší teplotou jsou oslabeny soudržné síly mezi makromolekulami a nastane přechod do stavu viskózního. Amorfní polymery lze je zpracovat všemi známými technologiemi s výjimkou zvlákňování a jejich hustota není ovlivněna rychlostí chlazení. Patří zde PS, PMMA, PC apod. [2, 32]



Obr. 24. Teplotní oblast použití amorfních polymerů. [2]

- semikrystalické polymery, obsahují lokálně vysoce uspořádanou prostorovou strukturu, uvnitř amorfních oblastí. Vlivem vlastností makromolekulárních látek nedojde k úplné krystalizaci. V krystalických oblastech jsou makromolekuly pevně vázány do lamel a sférolitů. Stupeň krystalinity (běžně 40 % až 90 %), tedy podíl krystalické fáze, je závislý na typu polymeru a technologických podmínkách během procesu zpracování, zejména na rychlosti chlazení. Oblast použitelnosti je zasazena mezi teploty T_g a T_m . Vlastnostmi semikrystalických polymerů jsou houževnatost, dobrá pevnost - modul pružnosti v tahu E se zvyšuje s rostoucím stupněm krystalinity a mléčná zakalenost. Řadíme zde např. PE, PA, PP apod. [2, 32]



Obr. 25. Teplotní oblast použití semikrystalických polymerů. [2]

4.4.2 Reaktoplasty

Jedná se o polymerní materiály, dříve označované jako termosety. Vlivem tepla a tlaku, záření nebo katalyzátorů v podobě síťovacích činidel, je jim během zpracování umožněn

proces zesíťování struktury, tzv. vytvrzení. Nastane tak chemická reakce, kterou je vytvořena hustá prostorová síť původních molekul. Tento děj je nevratný a již vytvrzené reaktoplasty nelze dodatečně roztavit ani rozpustit, dalším působením tepelných účinků by došlo k procesu degradace. Při opačném pohledu je tato vlastnost předurčuje pro použití v aplikacích se značným tepelným zatížením. Do této kategorie lze řadit fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, apod. [2, 32]

4.4.3 Elastomery

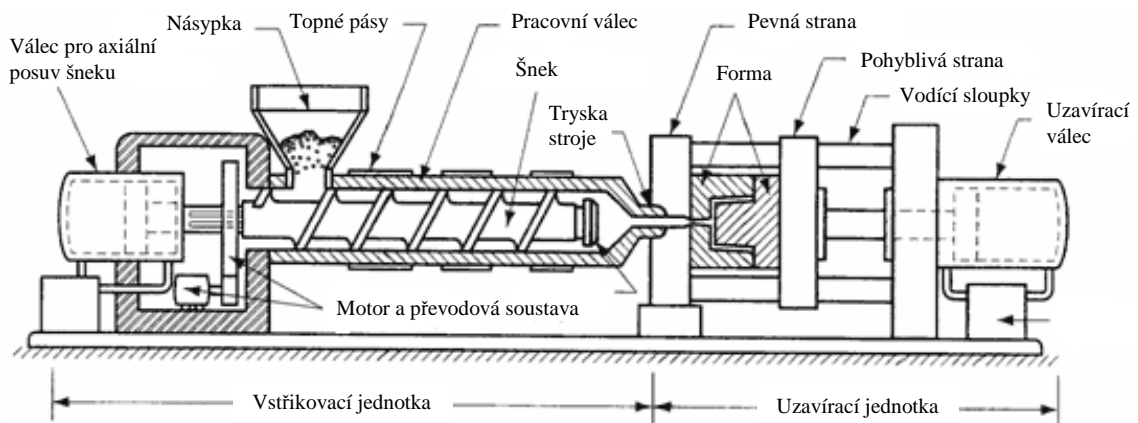
Elastomery jsou za běžných podmínek elastické a i velmi malou silou mohou být značně a vratně přetvářeny bez poškození. Výchozí látkou mohou být přírodní nebo syntetické, základem přírodních elastomerů je přírodní produkt zvaný kaučuk. Vlivem tepla, tlaku, vulkanizačních a pomocných přísad může být převážně plastický základ převeden na převážně elastický produkt (tzv. pryž), tento proces síťování se nazývá vulkanizace. Děj je nevratný a z vulkanizovaného elastomeru již nemůže být roztaven ani rozpuštěn, při vystavení účinkům rozpouštědel může nastat proces botnání. U elastomerů na bázi termoplastů nedojde během procesu zpracování k chemickým změnám struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat. [2, 32]

5 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Proces vstřikování je zajištěn pomocí vstřikovacího stroje. Ve většině případů se jedná o univerzální konstrukci, kterou je umožněno použití různých typů a velikostí vstřikovacích forem. V případě moderních vstřikovacích strojů je možné proces plně automatizovat a zvýšit tak produktivitu výroby. Pořizovací náklady na vstřikovací stroj i vstřikovací formu jsou značné, proto je tato technologie vhodná zejména pro hromadnou a velkosériovou výrobu. Vstřikovací stroj je výrobní zařízení, kterým je umožněno roztavení, plastikace a homogenizací zpracovávané polymerní hmoty, která je následně vstříknuta pod vysokým tlakem a teplotou do uzavřené a temperované dutiny vstřikovací formy, kde je tavenina vytvarována a ochlazena. Materiál je do stroje dodáván nejčastěji ve formě granulátu. [2, 12]

Vstřikovací stroje lze dělit podle:

- typu využití energie (hydraulické, elektrické a kombinované),
- principu (šnekově, pístové),
- orientace (horizontální, vertikální),
- počtu šneků (jednošnekové, vícešnekové),
- rychlosti chodu (pomaloběžné, rychloběžné),
- typu zpracovaného materiálu (termoplasty, reaktoplasty a elastomery),
- typu plastikace (bez předplastikace, s předplastikací). [2, 12]



Obr. 26. Schéma vstřikovacího stroje. [7]

Základní části vstřikovacího stroje:

- vstřikovací jednotka,
- uzavírací jednotka,

- ovládací jednotka. [2]

V současné době jsou v průmyslu využívány především hydraulické, hydraulicko-mechanické a elektro-mechanické stroje, stavebnicového uspořádání s různým stupněm elektronického řízení. [2]

Pro přesné výrobky je od vstřikovacího stroje vyžadována:

- tuhost a pevnost,
- přesnost nastavení, časování a řízení (tlaku, rychlosti, teploty a ostatní parametrů),
- reprodukovatelnost technologických parametrů. [2]

5.1 Uzavírací jednotka

Hlavním účelem uzavírací jednotky je zajistit pohyb související s otevíráním a uzavíráním, popř. vyprázdněním vstřikovací formy během vstřikovacího cyklu. Velikost uzavírací síly je nastavitelná a je přímo závislá na velikosti vstřikovacího tlaku a průmětu plochy dutiny formy, včetně vtokových kanálů do dělicí roviny. Pokud by velikost uzavírací síly během fáze plnění nebyla dostatečně dimenzována, mohlo by nastat pootevření dělicí roviny a polymerní tavenině by byl umožněn únik. Pro urychlení procesu otevírání a zavírání formy musí být uzavírací jednotka schopna kromě silové složky, vyvinout i dostatečnou složku rychlostní. Uzavírací jednotkou je ovládána levá, tedy pohyblivá strana formy. Pravá nebo-li pevná strana formy je umístěna na rámu vstřikovacího stroje. [2, 12]

Hlavní části uzavírací jednotky:

- pevná opěrná deska,
- upínací deska,
- vodící sloupky,
- uzavírací mechanismus. [2]

Možné konstrukční provedení uzavíracích jednotek:

- hydraulické uzavírací jednotky jsou schopny zajistit otevření a uzavření formy pomocí hydraulického tlaku, uzavřená poloha je zajištěna závorou,
- hydraulicko - mechanické jednotky jsou využívány v případě strojů vstřikujících nízkou gramáž taveniny. V konstrukci je využito kloubových mechanismů ovládaných pomocí hydraulického válce. Zajištění uzavřené polohy se zde realizuje hydraulickým válcem s velkým průměrem pístu. Výhodou oproti hydraulickým uzaví-

racím jednotkám je zde vyšší uzavírací síla a možnost snížení rychlosti uzavírání před dosednutím dělicích rovin,

- kombinované. [2]

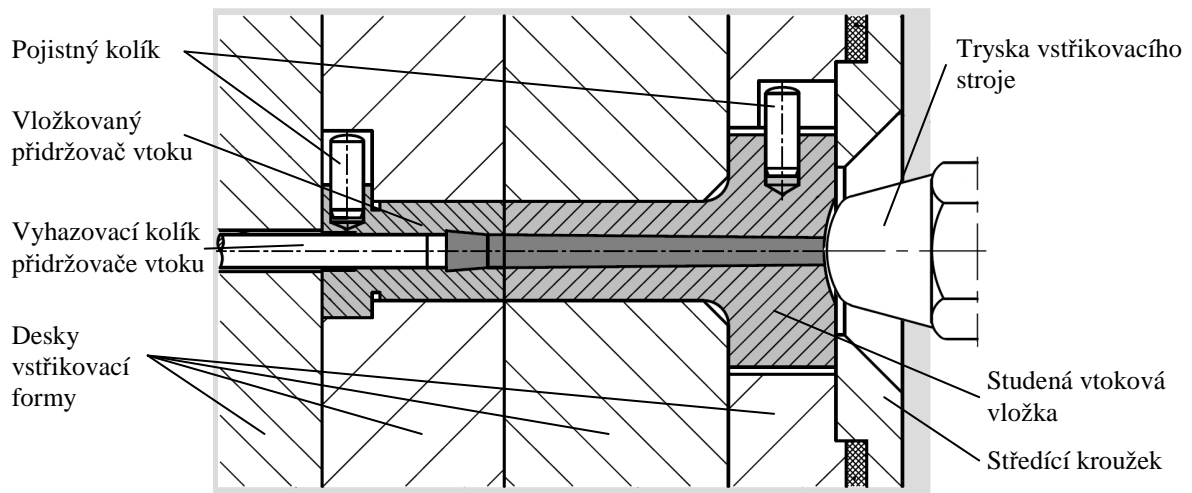
5.2 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka je složena z násypky, pracovního válce se šnekem, trysky a topných pásů. Její funkcí je připravit a dopravit požadovaný objem taveniny v rámci nastavených technologických parametrů do dutiny vstřikovací formy. Vstřikovaný objem polymeru musí být nižší, než je kapacita vstřikovací jednotky během jednomu zdvihu. S ohledem na výrobu korektního výstřiku je nutné zajistit dostatečnou rezervu polymerní taveniny v pracovním válci stroje, pro případné doplnění úbytku materiálu vlivem objemové kontrakce při chlazení. Objem vstřikovaného polymeru v jedné dávce by neměl překročit 90% kapacity vstřikovací jednotky. [2, 5]

Polymerní materiál je, nejčastěji ve formě granulátu, gravitačně odebírán z násypky nebo zásobníku a předáván na vstupní část rotujícího šneku. Následně je transportován, plastifikován a homogenizován pomocí homogenizačních elementů na obvodu šneku přes vstupní, přechodové a výstupní pásma až k jeho špici. Aby zde mohla být tavenina akumulována je nutné vyvodit zpětný axiální pohyb šneku. V okamžiku injekce je připravená dávka taveniny pod vysokým tlakem vehnána přes trysku plastikační jednotky do útrob vstřikovací formy. Pro zamezení zpětného toku taveniny šnekem, vlivem odporu soustavy vstřikovací trysky a vtokového systému formy, je zde využito zpětných ventilů. Vytápění pracovního válce je rozděleno do několika zón s odlišným nastavením teploty a je realizováno pomocí topných patron v podobě měděných pásů umístěných po vnějším obvodu válce. Část tepelné energie je do systému zavedena vlivem disipace v polymerního materiálu. [2, 5]

Tavná komora je zakončena vyhřívanou tryskou, kterou je spojena vstřikovací jednotka s formou. Bezpečné a přesné dosednutí trysky do sedla vtokové vložky formy je zajištěno jejím kulovým zakončením. V zájmu zajištění nižšího přestupu tepla z trysky na vstřikovací formu je možné celou vstřikovací jednotku odsunout. [2, 5]

Vstřikovací trysky mohou být otevřené a uzavíratelné. Otevřené trysky jsou využívány nejčastěji pro vstřikování polymerů s vyšší viskozitou. Použitím uzavíratelných trysek lze zabránit samovolnému výtoku materiálu při jeho plastikaci. Otevření uzavíratelné trysky nastane odjištěním jehlového uzávěru po jejím dosednutí do sedla vtokové vložky. [2, 5]



Obr. 27. Přisunutá vstřikovací tryska stroje na vtokové vložce. [23]

5.3 Ovládaní a řízení vstřikovacího stroje

Vysoká schopnost řízení a snadná obsluha stroje je charakteristickým znakem jeho kvality, stejně jako stálá reprodukovatelnost technologických parametrů výroby. Pokud tyto parametry nepřiměřeně kolísají, projeví se tato nerovnoměrnost na přesnosti a kvalitě výroby výstřiků. Řízení stroje tak musí být zajištěno vhodnými regulačními prvky. [2, 6]

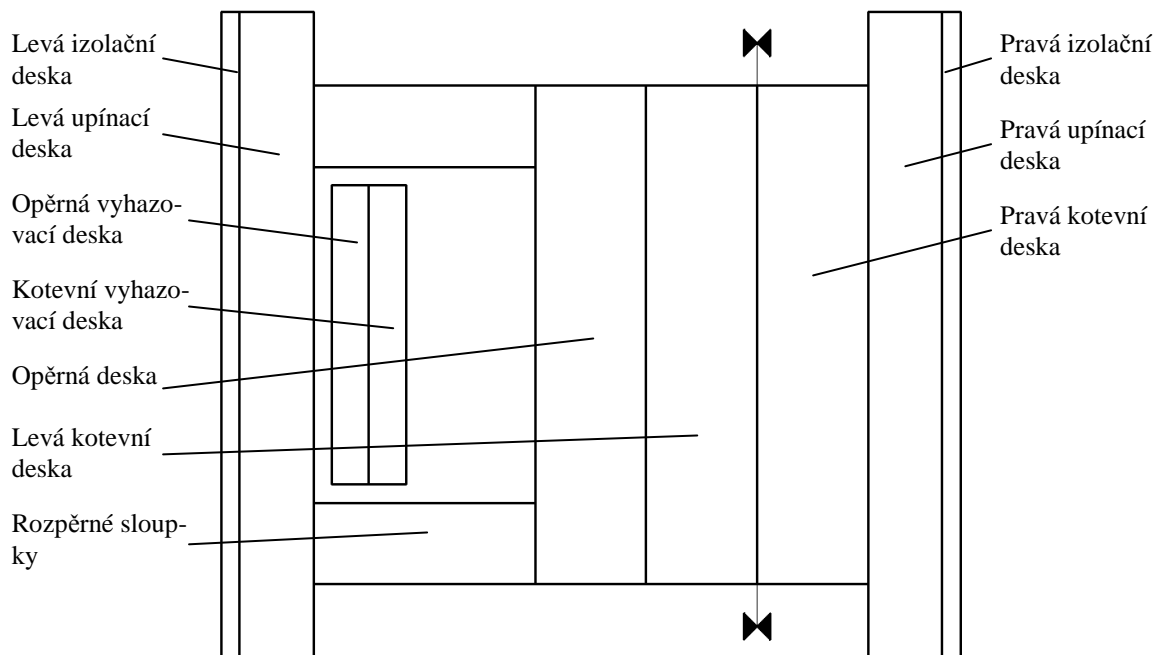
V současnosti jsou vstřikovací stroje řízeny přidruženou elektronickou jednotkou s procesorem. Na místo obvyklé stroje textové formy nastavení technologických parametrů je využíváno nejrůznějších grafických nadstaveb a embedded systémů, které jsou zobrazovány LCD displejem přímo na informačním displeji vstřikovacího stroje. V mnoha případech jsou tyto stroje propojeny rozhraním se stolním počítačem s vyspělým operačním systémem a připojením k lokální počítačové síti, nebo tento počítač mají integrovány přímo ve svém těle. Obsluha tedy není nucena k zjištění podrobných informací o výstřiku přecházet k jinému terminálu. [2, 6]

Přesnost a jakost výstřiků je tedy také dána kvalitním systémem řízení stroje, vybraná nastavení vstřikovacího procesu jsou detekčními čidly v reálném čase zpětně verifikovány a případně dynamicky upravovány v závislosti na vnějších podmínkách. Jedná se např. o řízení teploty jednotlivých pásem tavné komory nebo kontrolu výše i doby působení vstřikovacího tlaku a dotlaku. [2, 6]

6 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je nástroj, jehož účelem je vytvarovat vstřikovaný materiál do tvaru výrobku a zajistit jeho ochlazení. Těleso formy je obvykle tvořeno rámem, středíci, vodiči, spojovacími a tvarovými elementy, dále pak vtokovým, temperačním, vyhazovacím a odvzdušňovacím systémem. Vstřikovací forma je v komplexním pohledu složitým zařízením jak z hlediska návrhu konstrukce tak i výroby. [2, 3]

Při procesu konstrukční a rozměrové analýzy vstřikovací formy je zhodnocen tvar a velikost vstřikovaného výrobku a následně určen způsob jeho vhodného zaformování včetně určení násobnosti celého řešení. Na základě této analýzy může být odhadnuta cena zhotovení a dále využita jako podklad v následném konstrukčním procesu pro návrh jednotlivých systémů formy. V konstrukčním řešení musí být zahrnut aspekt typu vstřikovacího stroje, na kterém bude forma používána. Kvalita návrhu a přesnost výroby vstřikovací formy je promítnuta nejen do rozměrové tolerance budoucího výrobku, ale i do jeho mechanických vlastností a ekonomie celé výroby. [2, 3]



Obr. 28. Schéma tělesa vstřikovací formy.

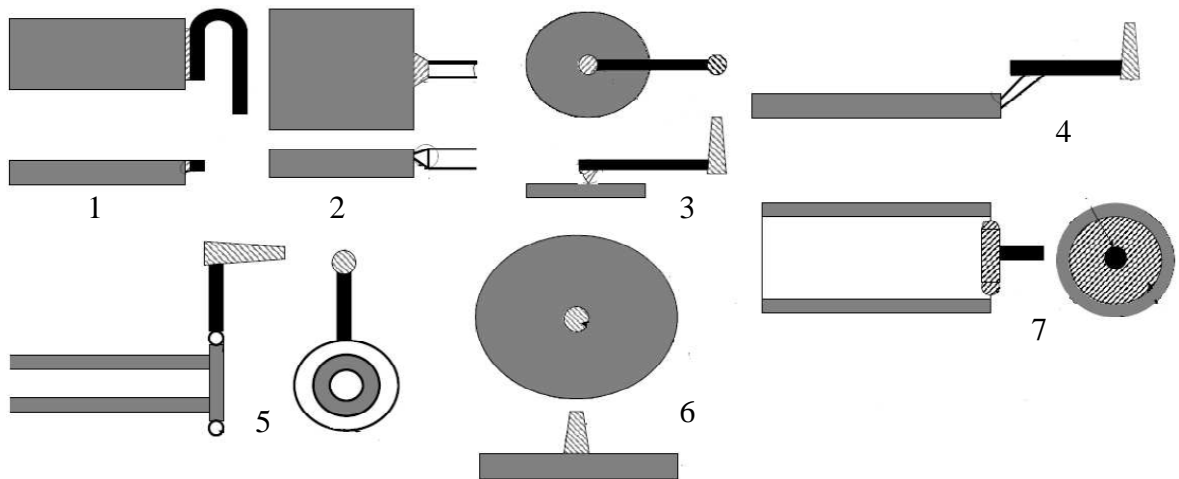
6.1 Vtokový systém

Vtokovým systémem vstřikovací formy je zajištěn transport a vedení polymerní taveniny od vstřikovací jednotky stroje do dutiny vstřikovací formy. Proces plnění by měl být proveden v nejkratším možném čase s minimálními odpory a v případě více dutinového uspo-

řádání by měl být navíc dodržen aspekt rovnoměrného plnění. Návrhem správné geometrie, rozměru, průřezu tokových kanálů a užitím vhodného typu vtokové ústí, lze do značné míry ovlivnit kvalitu i mechanické vlastnosti vyráběného výrobku. Lze charakterizovat dva základní typy vtokových systémů, studený a horký. [1, 2]

6.1.1 Studený vtokový systém

Toková doména v tomto případě není vyhřívána. Tavenina je při styku se stěnou kanálu velmi rychle ochlazena, tím je vytvořena tepelná izolace a podpořen tok v blízkosti osy kanálu. Tlak v systému je postupně zvyšován až na maximální hodnotu při plném objemovém naplnění dutiny formy a následném zatuhnutí vtokového ústí. [1, 2]



Obr. 29. Možné varianty vtokových ústí, 1 - filmový vtok, 2 - vějířovitý vtok, 3 - bodový vtok, 4 - tunelový vtok, 5 - prstencový vtok, 6 - plný kuželový vtok, 7 - membránový vtok. [7]

Studený vtokový systém lze rozdělit na tři sekce (vtokový kanál, rozvodný kanál a vtokové ústí). Vtokovým kanálem, nejčastěji kuželovitého tvaru, je spojena vstřikovací jednotka s tvarovou dutinou nebo rozvodnými kanály v případě více násobného uspořádání. Tavenina je následně distribuována těmito kanály až k vtokovým ústím jednotlivých dutin. Nejvhodnější geometrií průřezu rozvodného kanálu je tvar kruhu, kde jsou uvažovány nejnižší ztráty. Tato geometrie je však náročná z výrobního hlediska. Kompromisním řešením je tak využití lichoběžníkových nebo parabolických geometrií. [1, 2]

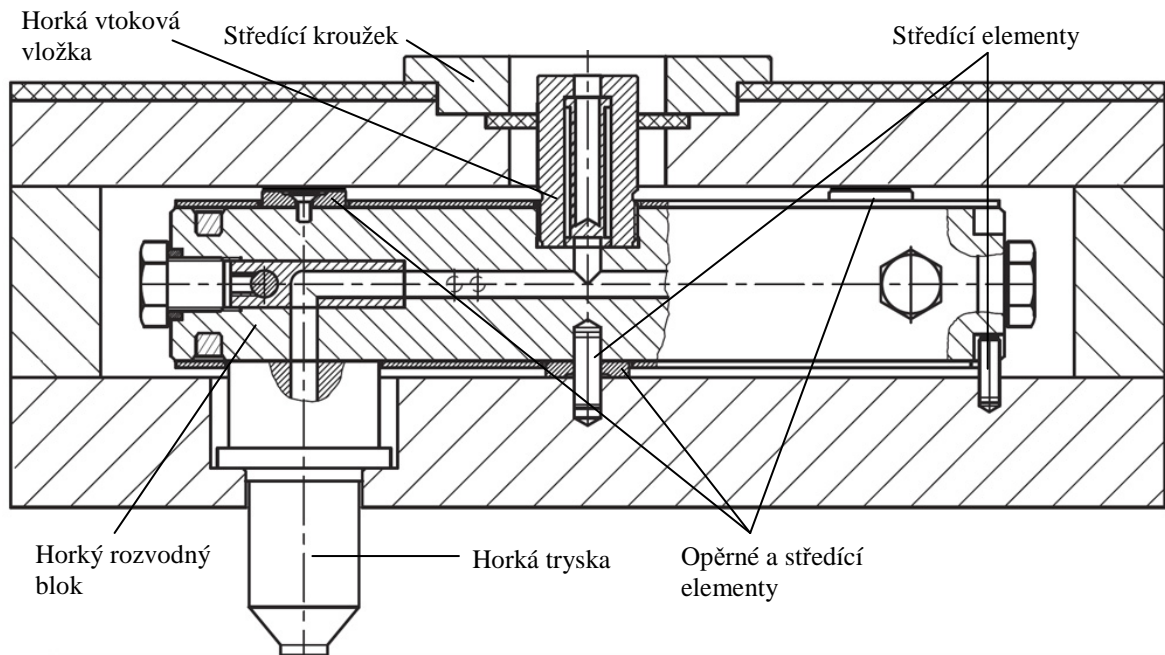
Vtokové ústím je spojen rozvodný kanál s dutinou formy. Správnou volbou jeho typu a následně rozměrů může být kladně ovlivněna kvalita výrobku. Musí umožňovat bezproblémové plnění a doplňování dutiny taveninou a snadné odstranění vtokového systému od

výrobku. Obvykle je nutné při otevírání formy a odformování výrobku vyjmout vtokový kužel z vtokové vložky a přidržet výrobek na levé straně formy. K tomuto účelu jsou zejména vícenásobné formy vybaveny přidržovačem vtoku, který je umístěn v rozvodném kanálu. [1]

Výhodou studených vtokových systémů (oproti horkým) je jejich levnější výroba, údržba i provoz. Nevýhodou naopak větší spotřeba vstříkovaného materiálu a nutná recyklace vtokových zbytků. [1, 2]

6.1.2 Horký vtokový systém

V rámci horkého vtokového systému lze vstříkovaný materiál po celé jeho dráze toku uchovat ve formě taveniny. V současné době jsou využívány komplexní systémy s autonomní regulací teploty vyráběné specializovanými společnostmi. Historicky těmto systémům předcházely technologie zesílených nebo izolovaných vtokových soustav. [1, 2]



Obr. 30. Řez horkým vtokovým systémem. [23]

Horký vtokový systém může být rozdělen do několika částí. Horká vtoková vložka spojuje vstříkovací jednotku s horkým rozvodným blokem. Vyhřívání je zajištěno pomocí topného pasu umístěného kolem jejich vnějšího obvodu nebo topnou patronou uvnitř. Rovněž je zde možné umístit filtr pevných částic. Horkým rozvodným blokem je tavenina následně distribuována k jednotlivým tryskám. Tvar rozvodného bloku je určen trajektoriemi rozvodných kanálů a jeho správná funkce je podmíněna rovnoměrným vytápěním, nejčastěji

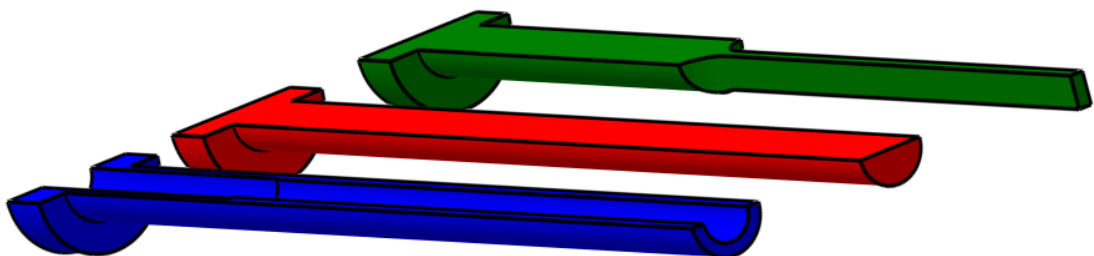
pomocí topných hadů zalitých v mědi. Těleso bloku je izolováno od ostatních částí formy pomocí vzduchového polštáře. Horké trysky jsou výstupním členem systému a je jimi dopravována taveniny z rozvodného bloku do dutiny formy nebo studeného rozvodného kanálu. Vytápění je nejčastěji provedeno pomocí vnitřní topné patrony a podle konstrukce lze rozlišit trysky otevřené, s hrotem a uzavřené. Element vytápěné trysky lze rovněž využít samostatně v pozici vtokového kanálu, viz. předchozí podkapitola. [1, 2]

Veškeré vyhřívané části jsou napojeny na centrální přípoj - patici a dále na zdroj elektrické energie. Nastavení teploty je řízeno pomocí regulátorů a zpětná vazba je získána z teplotních senzorů. [1]

Výhodou horké vtokového systému je kratší čas cyklu, nižší vstřikovací tlak a menší spotřeba vstřikovaného materiálu. Za nevýhody oproti studeným tokovým systémům lze považovat větší energetickou náročnost a nutnost použití regulátorů. [1]

6.2 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém je uveden v činnost po fázi chlazení a jeho účelem je vytlačit výrobek z odformované dutiny formy. Tento proces lze rozdělit na dva úkony. V prvním kroku je vykonán vyhazovacím systémem dopředný pohyb, při kterém dojde k vlastnímu vyhození. V druhém kroku je systém vrácen do původní polohy. Podmínkou korektního provedení procesu vyhození je nutnost setrvání výrobku na levé straně vstřikovací formy po jejím otevření, úkosovitost stěn ve směru vyhození, rovnoměrná aplikace vyhazovací síly, účinek vyhazovačů proti nepohledové ploše, hladký a dostatečně zchlazený povrch výrobku. Pohyb vyhazovacího systému je vyvolán vstřikovacím strojem, zpětný pohyb může být vyvozen např. pružinami či vratnými kolíky. [3]



Obr. 31. Řez ve 3D prizmatickým, válcovým a trubkovým vyhazovacím kolíkem.

Vyhazovací systémy lze dělit na:

- pneumatické (tenkostěnné výrobky větších rozměrů),

- hydraulické (větší vyhazovací síla a pomalejší zdvih),
- mechanické ,

- jednostupňové (zdvih a časový průběh vysunutí všech kolíků je shodný) ,
- vícešupňové (je umožněn časový posun a rozdílná velikost zdvihu sad kolíků),
- válcové kolíky (jednoduché, nejčastější a nejlevnější varianta),
- trubkové kolíky (plošné působení , plocha působnosti je v podobě mezikružní),
- šikmé kolíky (umožněno odformování mělkých zápichů),
- stírací deska (plošné působení, zamezen vznik stop na výrobku). [3]

6.3 Temperační systém

Účelem temperačního systému je zajistit udržení konstantního teplotního pole uvnitř vstřikovací formy. Cílem je dosáhnout optimálně krátkého vstřikovacího cyklu při zachování všech technologických požadavků výroby. Děje se tak ochlazováním, případně vyhříváním celé formy, nebo jen některé její části. Ve fázi vstřikování je tvarová dutina plněna taveninou, která sebou nese teplo. Toto přebytečné teplo, které je akumulováno tělesem formy je nutné odvést temperačním systémem. Některé polymery je nutno zpracovávat při vyšších teplotách, např. PC. V takovém případě jsou tepelné ztráty do okolního prostředí větší než množství tepla, které bylo do systému vneseno taveninou a forma se tak musí vyhřívát. Tato situace nastává rovněž na začátku výroby, kdy je nutné formu nejdříve vyhřát na pracovní teplotu jinak by nemusela být garantována dostatečná kvalita jednotlivých výrobků a jejich reprodukovatelnost. [3, 12]

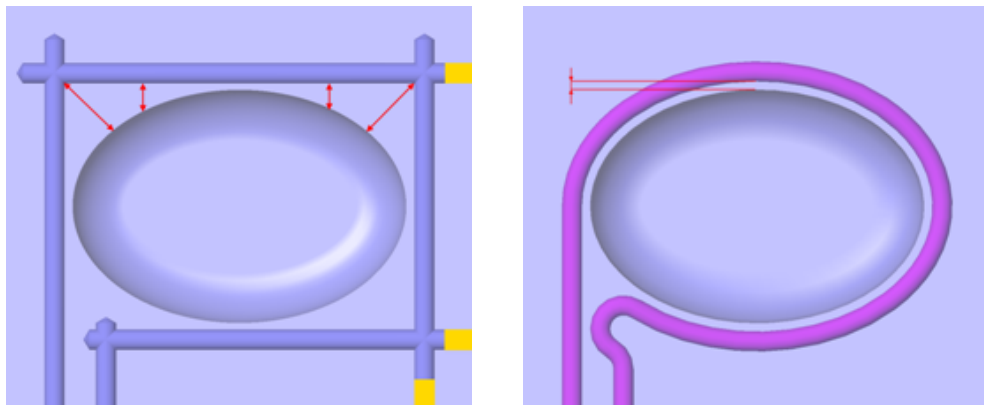
Správným návrhem temperačního systému je možné zajistit optimální tuhnutí a chladnutí výrobku a minimalizaci jeho výsledných deformací. Fáze chlazení je značně časově náročná a může dosahovat až 80 % délky vstřikovacího cyklu. [3, 12]

V temperačních systémech mohou být využity:

- aktivní prostředky, teplo je jimi do formy přiváděno nebo odváděno (kapaliny, vzduch a topné elektrické články),
- pasivní prostředky, působení je zajištěno jejich fyzikálními vlastnostmi (tepelné izolační materiály, tepelně vodivé materiály a heatpipes). [3, 12]

6.3.1 Konformní způsob temperace

Představou konformního chlazení je navrhnout temperační systém takovým způsobem, aby v nejkratší možné vzdálenosti kopíroval povrchový tvar dutiny formy. Takto navrhnutý systém by ovšem při současné tvarové složitosti výrobků nebyl vyrobitelný konvenčními technologiemi. Metodou DMLS lze za využití laseru po vrstvách spékat kovový prášek pro vytvoření kompaktního výrobku, v tomto případě tvárníku nebo tvárnice. Trajektorie temperačního okruhu tak může být optimalizována pro dosažení maximální účinnosti a rovnoměrnosti odvodu tepla. Tato vlastnost se projeví ve výrobním procesu zkrácením vstříkovacího cyklu až o 50% a nižšími deformacemi výrobku. [21]



Obr. 32. Konformní temperační systém - vnitřní geometrie. [19]

6.4 Odvzdušňovací systém

Po uzavření formy je v její tvarové dutině obsažen vzduch. Během fáze vstříku taveniny dojde k jeho kompresi a snaze o únik, pokud tato snaha není naplněna může dojít k poškození výrobku či povrchu dutiny formy. Uzavřený vzduch je při adiabatickém stlačení ohřát na vysokou teplotu a dojde ke vzniku lokálních spálenin, tzv. Dieselův efekt. V opačném případě jím může být nasycena tavenina. Obě zmíněné možnosti jsou hodnoceny jako nežádoucí. Místo akumulace vzduchu je ovlivněno tvarem dutiny a umístěním vtokového ústí. Nejčastěji však nastane v místě oproti ústí vtoku, které je taveninou vyplňováno jako poslední. [3]

Odvzdušnění dutiny formy je možné zajistit zvětšením vůle v oblasti dělicích rovin a vyhazovacího systému nebo pomocí speciálně vytvořených kanálů s vhodným průměrem. Problém zavzdušnění může být pozorován u nových, dobře těsnících vstříkovacích forem a vyřešen dodatečnými vůlemi, které vzniknou jako důsledek provozu. [3]

6.5 Materiály forem

Pro výrobu vstřikovacích forem jsou využívány takové materiály, kterými jsou v optimální míře splněny požadavky na provoz a univerzálnost použití. Vlivem odlišné funkce jednotlivých částí formy a z toho vycházejících materiálových požadavků je využito i různých konstrukčních materiálů. Mezi obvykle materiály, které jsou využívány při výrobě vstřikovacích forem jsou řazeny oceli různých jakostí, slitiny kovů a ostatních materiálů. Materiály tvarových dutin jsou jedny z nejzatíženějších částí vstřikovací formy, vlivem přímého styku se zpracovávaným materiálem a expozicí mechanickému, tepelnému a chemickému zatížení. Z tohoto důvodu je voleno tvrdých, pevných a tepelně zpracovatelných materiálů. V případě rámu vstřikovací formy jsou kladeny požadavky zejména na pevnost a obrobitelnost. [2, 3]

Vybrané konstrukční materiály pro jednotlivé části vstřikovacích forem:

- desky formy, rozpěrky – 11 373, 11 375, 11 500, 11 600, 12 060
- dorazy – 11 600, 11 700,
- tvarové díly forem, vtokové vložky – 19 452, 19 550, 19 663,
- středící elementy, kolíky, pouzdra – 14 220, 14 340,
- vyhazovací kolíky – 19 083, 19 191, 19 312, 19 421. [3]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ

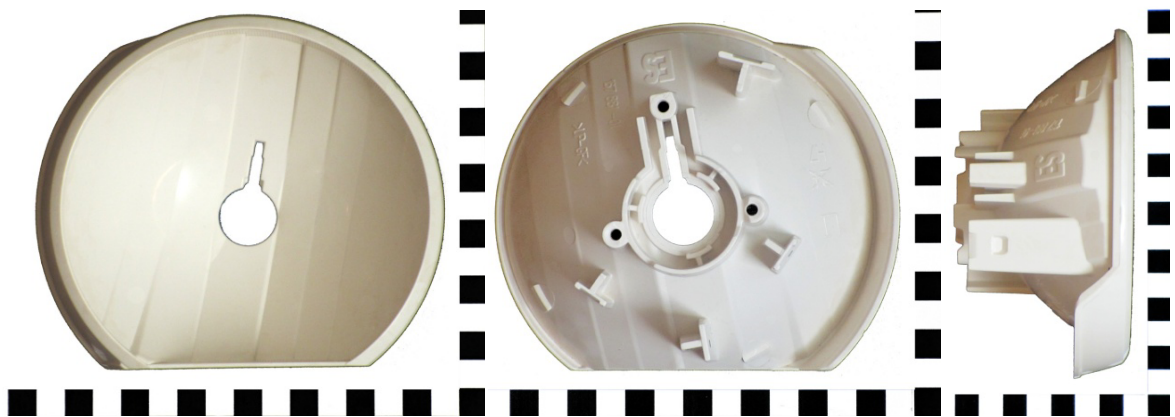
Cílem této diplomové práce je vytvořit konstrukční návrh vstříkovací formy pro výrobu tělesa reflektoru, za podpory metod reverzního inženýrství. Objekt bude nasnímám bezkontaktní, optickou metodou a takto vzniklý digitální model bude porovnán vůči digitálnímu modelu, který byl vytvořen v CAD softwaru. Následně bude zvolen vhodný materiál pro výrobu a provedena konstrukce 3D modelu vstříkovací formy. Správnost návrhu bude ověřena za pomoci tokových, temperačních a deformačních analýz a popř. provedena zpětná korekce. V závěru bude vytvořena 2D výkresová dokumentace sestavy vstříkovací formy.

Cíle diplomové práce:

- vypracovat literární rešerši na dané téma,
- vytvořit digitální 3D model reflektoru s využitím konvenčního měřidla,
- vytvořit digitální 3D model reflektoru s využitím metod reverzního inženýrství,
- popsat proces digitalizace a úprav 3D modelu reflektoru,
- komparovat oba modely vůči sobě,
- vytvořit konstrukční návrh vstříkovací formy,
- podpořit návrh vstříkovací formy tokovými analýzami,
- vytvořit 2D výkresovou dokumentaci sestavy vstříkovací formy,
- popsat návrh vstříkovací formy a vyhodnotit výsledky.

8 HODNOCENÍ PŘEDMĚTNÉHO DÍLU

Předmětným dílem je těleso reflektoru pro silniční vozidlo nspecifikované značky. Hlavní funkční úlohou výsledného dílu je opticky zaostřovat a koncentrovat světelný svazek emitovaný ze zdroje, při požadovaných specifikacích, tedy zajistit aby byl světelný tok distribuován do požadovaných oblastí. Díl je umístěn v přední lampě světlometu, kde je během provozu vystaven teplotnímu zatížení od zdroje světla, z mechanického hlediska není výrazněji namáhán.



Obr. 33. Fotografie tělesa reflektoru, jeden čtverec odpovídá 10 mm.

8.1 Profil vstřikovaného dílu

Výrobek je skořepinového charakteru s přibližnou tloušťkou stěny 2 mm a přibližně kruhovým půdorysem, nad kterým se klene soustava parabolických fazet. Střed dílu je opatřen otvorem pro uchycení zdroje světla. Na zadní straně je umístěna čtveřice pilonů kolmých na půdorys, kterými je díl aretován v protikuse a zabezpečen proti odpojení 2,5 mm hlubokými zápichy, dále trojice děr s průměrem 4 mm a hloubkou 15 mm. Vnější obvod dílu je vyztužen obvodovým lemem a vnitřní vybaven čárovým vroubkováním. Zadní strana je v oblasti středu osazena vyztuženými žebry a také jsou zde umístěny technologické výstupky, jimiž je usnadněno vyhození dílu z dutiny vstřikovací formy. Celkový objem dílu činí 69,75 cm³.

8.2 Materiál dílu

Původní těleso reflektoru bylo vyrobeno z nenasyceného polyesteru zesíleného skleněnými vlákny (UP - GF). Za termoplastický ekvivalent byl zvolen Polyamid 46 s 25 % obsahem skleněných vláken (PA 4.6 GF 25 %). Jedná se o lineární, krystalický (30 % až 50 %), polární, neprůhledný polymer, nažloutlé nebo mléčné barvy. Mechanické vlastnosti jsou zá-

vislé na typu, molekulové hmotnosti a obsahu vody. Vlastnostmi tvrdý, houževnatý, odolný proti ořezu, s dobrými elektroizolačními charakteristikami, nízkou botnavostí a dobrou chemickou stálost proti mnoha typům olejů, tuků, benzínů, alkáliím atd. Kyseliny, zvláště koncentrované, jej rozpouštějí až štěpí. Vlivem nasákavosti a navlhavosti nedochází u polyamidu ke vzniku elektrostatického náboje a k přitahování prachových částic. Po roztavení je dosaženo relativně nízké tavné viskozity ve srovnání s ostatními termoplasty. [12, 18]

Polyamidy plněné skleněnými vlákny vykazují vyšší mechanickou pevnost, nižší nasákavost, menší tepelnou roztažnost a lepší mechanické vlastnosti za zvýšených teplot. [8, 18]

PA 46 je materiál se zvýšenou tepelnou odolností oproti jiným typům polyamidů. Při pracovních teplotách až 180 °C si zachovává vynikající mechanické vlastnosti, proto je často využíván jako substituent kovů v automobilovém průmyslu. Vyžaduje rychlý vstřikovací cyklus. [12, 32]

Vhodný pro výrobu vláken, folií, ložisek, ozubených kol, vaček, ovládacích elementů atd. Lze být snadno zpracován všemi běžnými způsoby vstřikování, vytlačování, litím atd. Dále jej lze svařovat, lepit, potiskovat, pokovovat i fluidně nanášet na kovové materiály. Kompaktní PA lze snadno mechanicky obrábět např. soustružením, řezáním a frézováním.

Před zpracováním je nutné zařadit proces sušení (80 °C, 4 až 8 hodin). [12]

Dodavatelem granulovaného materiálu byla zvolena firma DSM.

Tab. 1. Parametry vstřikovaného materiálu PA 46 (GF25%) - Stanyl TQ261F5. [18]

Název	Hodnota	Jednotka
Obsah skelných vláken	25	%
Modul pružnosti v tahu	8000	MPa
Modul pružnosti v ohybu	7400	MPa
Mez pevnosti v tahu	170	MPa
Tažnost při přetržení	1,8	%
Vrubová houževnatost	10	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$
Teplota tání	295	°C
Navlhavost	2,6	%
Hustota	1340	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

9 REKONSTRUKCE TVARU DÍLU

Pro účely měření byl použit systém ATOS II Triplescan, kterým disponuje Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Byl vyvinut německou firmou GOM, která je řazena mezi přední výrobce optických skenovacích soustav.

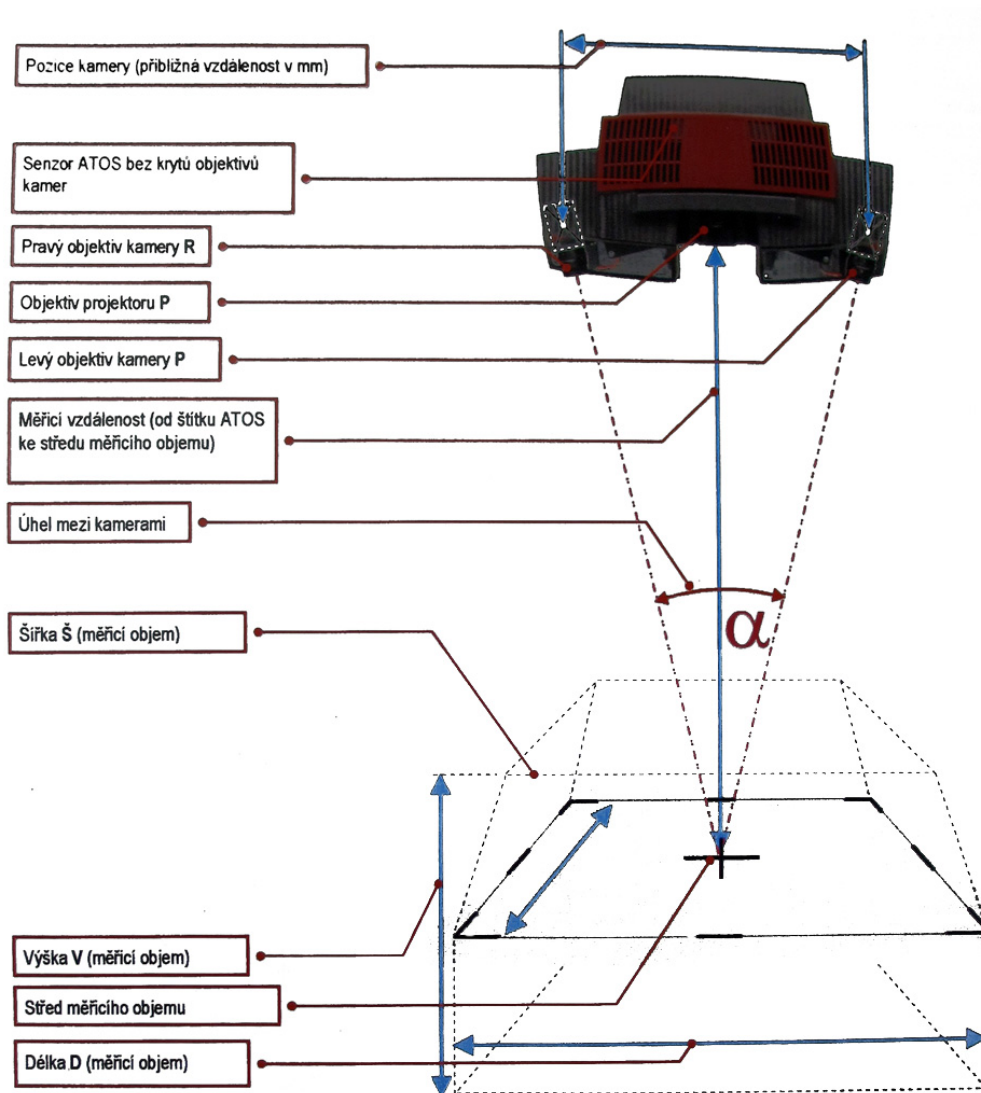
9.1 Popis měřící soustavy

Zařízení ATOS II Triplescan je nedestruktivní, bezkontaktní, optický 3D skener určený pro využití v širokém spektru aplikací. Vlivem vysoké výkonnosti, velkého rozlišení a rozsahu měřících objemů je umožněna efektivní a přesná digitalizace a kontrola kvality. Z hlediska malých rozměrů a nízké hmotnosti je stále dostatečně mobilní. Přístroj je vyráběn v několika modifikacích lišících se zejména rozlišením CCD senzoru a tedy hustotou získaných bodů. V rámci přídatného vybavení je měřící soustava osazena počítačem řízeným rotačním stolem, pro vystavení skenovaného objektu do různých pozic. Pozicování probíhá pomocí ovládacího panelu s joystickem. Možnost vyměnit měřící objemy zajišťuje větší univerzálnost použití. Celá skenovací hlava (senzor) je připevněna na pojízdném stojanu, pomocí kterého lze umístit skener do vhodné polohy vůči snímanému objektu a zajistit bezpečné uchycení. [11]



Obr. 34. Optický 3D skener ATOS II Triplescan. [24]

Obsluhující software ATOS Inspect Professional V7.5 je vytvořen stejným výrobcem jako samotný skener, tímto je umožněna plná hardwarová a softwarová kompatibilita. Uživatelské prostředí pracovní stanice obsahuje dva režimy. V režimu Project/Measurement Mode je možné provést proces snímání a ovládat senzor. Režim Evaluation Mode je poté určen ke zpracování získaných dat. [11]



Obr. 35. Popis optického 3D skeneru ATOS II Triplescan. [11]

Proces měření je založen na principu optické triangulace, fotogrametrie, promítání pruhů a digitálnímu zpracování obrazu. Na povrch měřeného objektu je rastrovým projektorem s LED zdrojem světla promítán pruhový vzor, který je deformován podle aktuální křivosti povrchu měřeného objektu v daném místě. Tento obraz je nasnímán pomocí vzájemně přesazených a pod úhly skloněných stereokamer. Následně je softwarově, pomocí optických zobrazovacích rovnic, vypočtena pozice jednotlivých bodů v prostoru. Kompletní digitální

3D model není u většiny objektů získat na jeden záběr a proto je nutné měřený objekt snímat z různých pohledů. Přesnost měřicího systému je v závislosti na kalibraci v řádu 50 μm . [11, 20, 27]

Kompletní měřicí sestava může být složena do výrobcem dodávaných hliníkových schránek, kde je chráněna proti poškození během transportu na jiné měřicí místo. Transport lze vzhledem k mobilnosti soustavy provést běžným osobním vozidlem.

Složení měřicí soustavy:

- senzor s dvěma kamerami a LED projektorem (rozlišení senzoru 2448×2050 bodů, technologie modrého světla),
- polohovatelný stojan pro nastavení pozice senzoru,
- polohovatelný počítačem řízený pracovní stůl,
- kotouč se samolepícími referenčními body,
- obslužný software ATOS Inspect Professional,
- výkonná pracovní PC stanice (6-jádrový HT Intel Xeon 2,67 GHz; 24 GB RAM),
- napájecí a řídicí jednotka. [11]

9.2 Proces skenování

Optické plochy moderních světlometů jsou tvořeny tzv. fazetami, jejichž přesná poloha a tvar mají zásadní vliv na parametry optického paprsku. Jednou z možností jak získat dostatečně přesný 3D digitální model tak složité plochy jako v případě fazet reflektoru, je využít některé z metod reverzního inženýrství. Lze tak následně provést např. softwarovou kontrolu svítivosti a verifikovat případné deformace tvaru fazet vlivem technologického procesu nebo na základě 3D modelu reflektoru vytvořit dutinu formy pro vznik repliky. Pokud by byl návrh tvořen tradiční cestou v CAD softwaru bylo by obtížné věrně postihnout tvar fazet, protože jsou tvořeny obecnými křivkami a plochami.

9.2.1 Preprocessing

Před procesem vlastního skenování je nutné provést řadu přípravných úkonů. V první řadě je nutné určit vhodný měřicí objem, tzn. velikost 3D oblasti v níž lze skenovat měřený objekt. Pro každý měřicí objem existuje odpovídající sada objektivů pro projektor a jednotlivé kamery. Dále je definována pozice kamer, jejich vzájemná orientace a obrazová charakteristika. Na základě rozměrů měřeného objektu a dostupnosti sad objektivů, byl stanoven vhodný měřicí objem na velikost 170×130×130 mm s technickým označením sady

MV170, kterou je plně pokryta plocha měřeného objektu z daného úhlu pohledu. Tato sada byla následně namontována na měřicí zařízení a provedena kalibrace senzoru. Při procesu kalibrace je nastavena hodnota okolní teploty (22,2 °C) a měřicí zařízení kalibrováno pomocí kalibračních objektů tak, aby byla zajištěna stálost měření - software stanovuje geometrické parametry. V návaznosti na vybranou sadu objektivů bylo nutné použít kalibrační objekt v podobě kalibrační desky z označením CP40/MV170. V součinnosti s ovládacím softwarem byla deska vyrovnána a postupně umístěna do dvanácti definovaných vzdáleností kolmo před senzor a následně i pod úhlem 45°. Korektní měřicí vzdálenost může být vždy determinována pomocí dvou laserových pointerů, kterými je přístroj osazen. Za úspěšný výsledek kalibrace každého kroku je považováno dosažení menší kalibrační odchylky než 0,1 pixelu pro případ kamery a 0,3 pixelu pro případ projektoru. Některé kroky kalibrace musely být opakovány zřejmě z důvodu vibrací, které byly způsobeny od spuštěných technologických strojů umístěných v nižším patře budovy. Následně byla nastavena ve spektrálním módu expozice a to již na vlastním skenovaném objektu tak, aby nedocházelo k přexcitaci senzoru vlivem vysoké intenzity dopadajícího záření, např. vznikem odlesku. Hodnota okolního osvětlení by měla být stejná během procesu kalibrace i skenování.



Obr. 36. Umístění jednotlivých referenčních bodů na povrchu dílu.

V konečném důsledku lze kalibraci považovat za úspěšnou. Pomocnou kalibraci je možné povést i v průběhu měření, začnou-li se objevovat velké odchylky od měření. Správným vykonáním procesu kalibrace je významně ovlivněna přesnost následujícího měření. Výsledek kalibrace byl uložen do kalibračního protokolu.

Povrchová struktura měřeného objektu je důležitým aspektem v procesu skenování, proto byl skenovaný objekt očištěn. V tomto případě není nutné nanášet zmatňující vrstvu pomo-

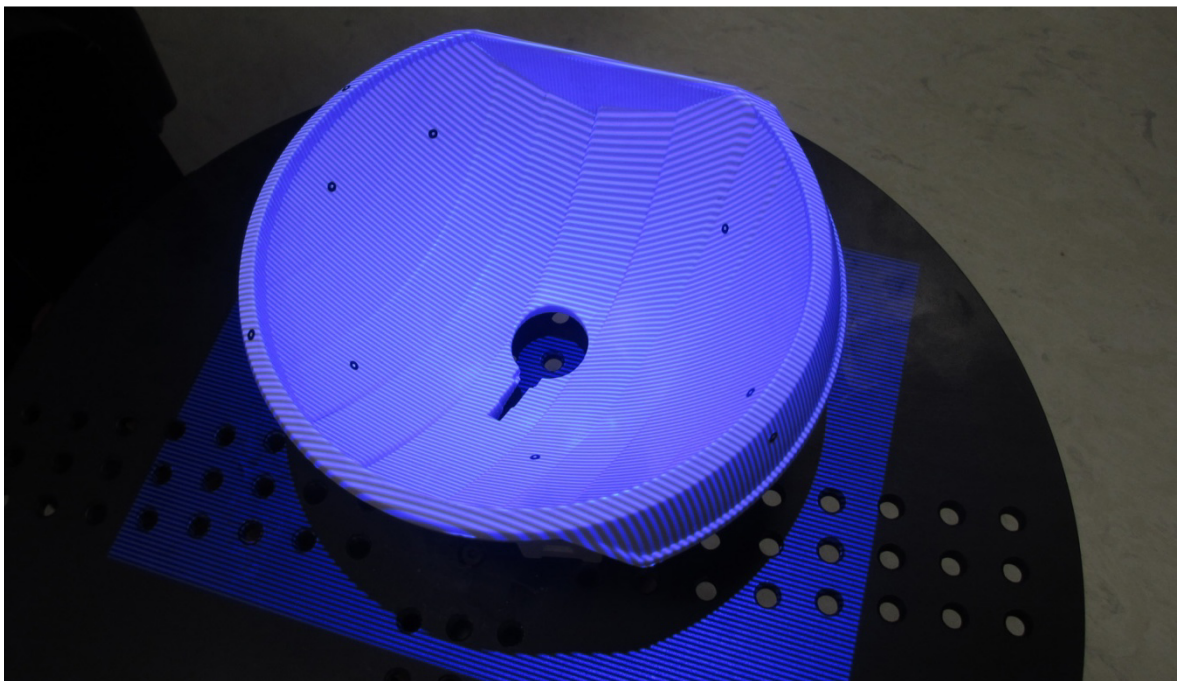
ci spreje, protože povrch měřeného objektu je dostatečně matný a jeho barva kontrastní s černou měřicí podložkou. Následně byl povrch opatřen 29 referenčními značkami o průměru 0,8 mm, které byly nanášeny pomoci chirurgické pinzety a vhodně rozmístěny tak, aby byly pro senzor dobře viditelné a nezdeformované.

Tab. 2. Seznam dostupných měřících objemů - výňatek. [11]

Měřící rozsahy						Kalibrační objekty	
Název	Měřící objem (DxŠxV) v mm	Vzdálenost mezi naměřenými body	Doporučené referenční body	Měřící vzdálenost	Úhel mezi kamerami	Název	Typ
MV 320	320x240x240	0,13 mm	1,5 mm	830 mm	27°	CP40/MV320	Deska
MV 170	170x130x130	0,07 mm	0,8 mm	830 mm	27°	CP40/MV170	Deska
MV 100	100x75x70	45,09 μm	0,8 mm	490 mm	28°	CP40/MV100	Deska

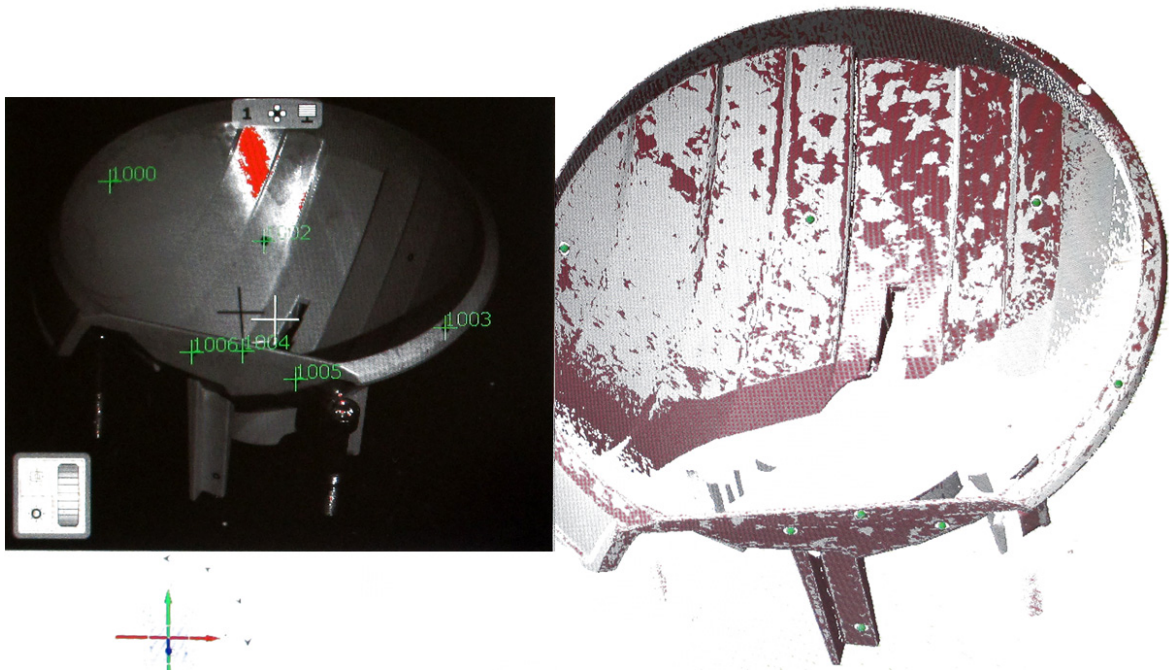
9.2.2 Processing

Měřený objekt byl umístěn na rotační počítačem řízený stůl, který byl ovládán pomoci joysticku. Vlastní podnět pro vytvoření snímku byl přístroji udělen pomoci dálkového ovladače. Senzor byl nastaven do měřicí vzdálenosti a následně byla provedena série snímků. Při prvním snímání je vhodné nasnímat co možná nejvyšší počet referenčních bodů. Po každém snímání byl skenovaný objekt pootočen tak, aby byla zaznamenána ještě nenaskenovaná oblast. Bylo snahou aby každý snímek obsahoval 3 referenční body ze snímku předchozího, v opačném případě by nemuselo nastat pozdější korektní provázání jednotlivých skenů v 3D model.



Obr. 37. Fotografie skenovaného objektu v okamžiku probíhajícího snímání.

Po každém snímku byly řídicím systémem ATOS, který byl přepnut do rozhraní Project/Measurement Mode, rozpoznány a identifikovány referenční body a spočítána 3D poloha snímku s informací o jeho přesnosti přiřazení na skenovaný objekt. Systém je schopen automaticky rozpoznat body, které mají na snímků průměr alespoň 10 pixelů. Po celou dobu skenování byl na obrazovce monitoru zobrazován 3D náhled aktuálně naskenovaných oblastí.

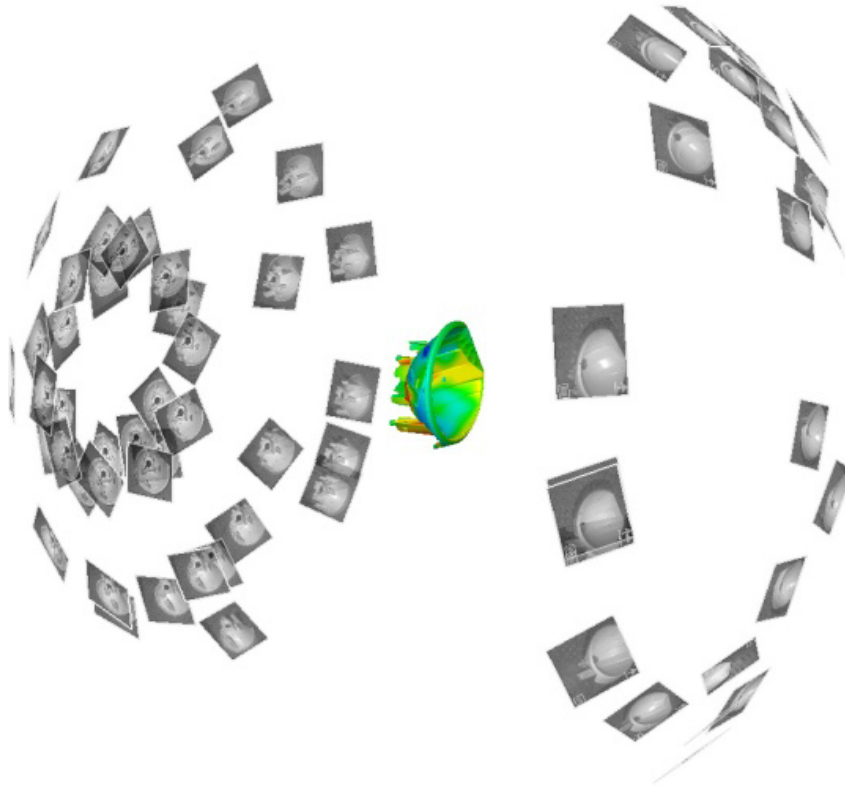


Obr. 38. Pohled na monitor pracovní stanice po v pořadí třetím snímání, vlevo je zobrazen výstup z kamer (zeleně - identifikované referenční body, červeně - přeexponované oblasti) a vpravo 3D náhled již naskenovaných dat (červeně - data získaná v předchozím snímání).

Důležitým aspektem bylo zachovat dobrou viditelnost referenčních bodů kvůli jejich softwarovému rozpoznání. Byl kladen důraz na zachycení detailů i hůře přístupných míst a to pomoci zvýšeného počtu snímků těchto oblastí. V závěru bylo ověřeno zdali je objekt dostatečně nasnímán.

Měření bylo prováděno s opatrností tak, aby nevznikaly rázy a vibrace. Měřicí systém by tuto událost zaznamenal a zobrazil varovnou notifikaci, mohlo by tak dojít ke znehodnocení aktuálního snímku nebo v krajním případě dekalibraci zařízení.

Celkem bylo provedeno 65 dvojic snímků z nejrůznějších úhlů.



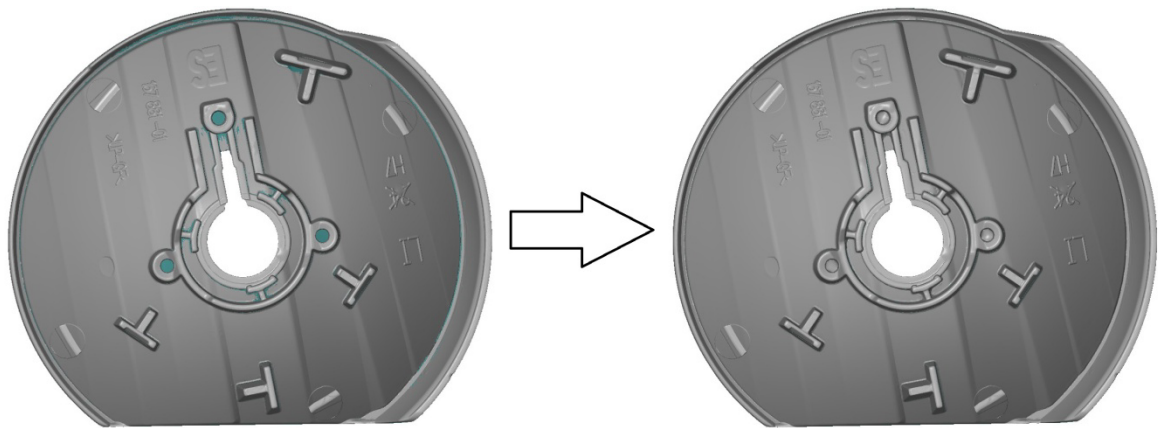
Obr. 39. Vizualizace distribuce jednotlivých snímků.

9.2.3 Postprocessing

Získané snímky byly zpracovány systémem ATOS, který byl přepnut do rozhraní Evaluation. V prvním kroku bylo nutné ze získaných dat v podobě mraku bodů, kde každý jeden byl plně určen v prostoru jen ty body, kterou lze považovat za relevantní. Proběhlo tedy odstranění parazitních bodů, které vznikly naskenováním pozadí, podložky nebo jako vliv šumu. Následně byla provedena polygonizace, tedy transformace zbylých naměřených bodů do formy sítě, která je tvořena nepřekrývajícími se trojúhelníky. Dále bylo nutné zarovnat takto vzniklý model pomocí příkazu Align Project, kterým jsou dat ze všech měření aproximována do jednoho souřadného systému a zahlazeny rozdíly vzniklé vlivem nepřesností mezi jednotlivými měřeními.

Takto vzniklý 3D model trpěl imperfekcemi v podobě děr v síti, které vznikly v místech jež nebyly řádně naskenovány nebo v oblastech, kde byly umístěny referenční body a dalším softwarovým zpracováním mohly být eliminovány. Jedná se zejména o oblasti dna třech děr o malém poloměru a vnitřní strany lemu kolem obvodu reflektoru. Tato úzká místa nemohla být postihnuta touto metodou skenování a bylo nutné je zrekonstruovat ručně. K odstranění těchto vad v rámci software byla použita sada funkcí Close Hole s parametry

volnými tak, aby přidaná síť měla přijatelný tvar z hlediska křivosti i spojitost a zároveň nedošlo k příliš velkému odchylení od původní sítě v okolí. V místech, která vykazovala nerovnoměrnosti vlivem procesu polygonizace byla aplikována funkce Smooth Mesh. Parametrem je zde odchylka od sítě, která je hodnocena jako vada a tudíž vyhlazena. Správnou volbou velikosti hodnoty parametru lze předejít odstranění detailů.



Obr. 40. Původní neopravený model (vlevo) a finální opravený model (vpravo).

Následně byla na finální model aplikována funkce Eliminate Mesh Errors pro odstranění dalších závad v polygonální síti, kterými by mohly být způsobeny další komplikace při budoucím zpracování v jiných softwarech. Takto byly odstraněny protínající se, překrývající se, degenerované a špatně orientované polygony, popř. bezprizorní body.

V závěrečné fázi byl model exportován do transportního formátu STL. Nevýhodou tohoto formátu, alespoň verze využívající ASCII kódování, je velikost výsledného datového souboru, která je závislá na počtu polygonu 3D modelu. V souboru jsou mj. zapsány tvořící koordináty bodů každého polygonu, proto je vhodné redukcí zvolit takový počet polygonů aby nedošlo k výrazné ztrátě detailů 3D modelu. Vyšší počet polygonů také klade větší nároky na výpočetní výkon, a tedy hardware pracovní stanice. Redukce byla provedena funkcí Thin Mesh. Původní zrekonstruovaný model byl tvořen 1 505 394 body, po aplikaci redukce 450 235 body.

9.3 Komparace modelů

Pro účely softwarové komparace tvaru modelů získaných různými metodami byla použita tzv. barevná mapa, na které je aktuální odchylka v daném místě reprezentována barvou podle barevné stupnice. První model byl získán procesem postupného modelování v CAD software, tedy konvenčním metodou. Pro získání jednotlivých rozměrů bylo využito po-

suvné měřidlo. Druhý model byl získán metodou reverzního inženýrství za pomoci digitalizace. Data získaná tímto způsobem byla transformována do podoby 3D modelu. Vzhledem k typu jednotlivých metod, lze za výrazně přesnější považovat metodu digitalizace a model vzniklý tímto způsobem za ideální geometrii. Komparace byla provedena v softwaru ATOS Inspect Professional, do kterého bylo v prvním kroku nutné importovat 3D model vytvořený v programu Catia. Pro proces komparace bylo nutné, aby byly oba modely sjednoceny v jednom souřadném systému a co možná nejpřesněji se překrývaly. V tomto případě byla využita funkce Best Fit, kterou jsou na základě matematické analýzy obě součásti na sebe ustanoveny tak, že vzdálenost mezi odpovídajícími si body na povrchu jednotlivých modelů jsou minimální možné. Následně byla provedena komparační analýza a vygenerována barevná mapa odchylek, která byla namapována na povrchu modelu získaného digitalizací.

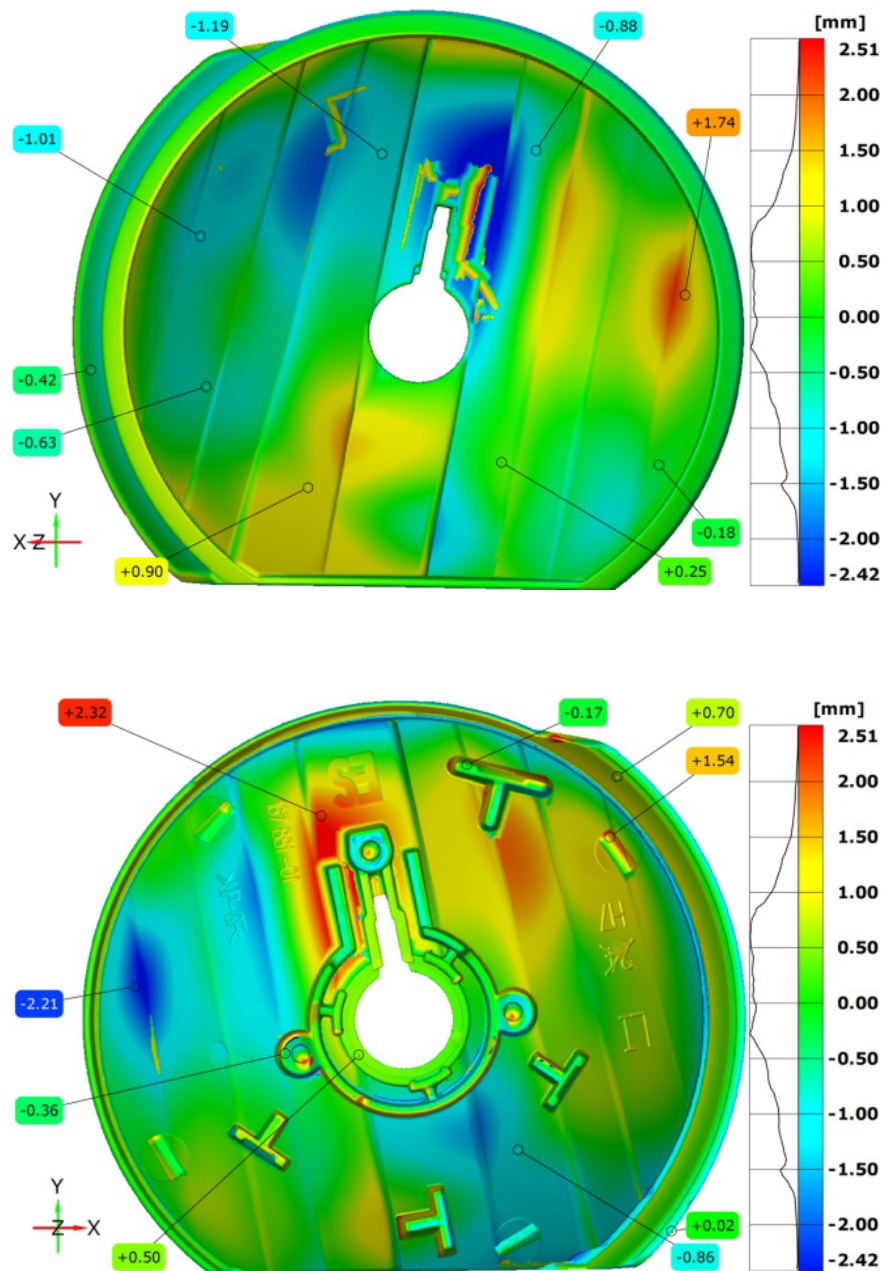
9.3.1 Popis konvenčního způsobu měření

K získání rozměrů, které byly následně zaneseny do CAD softwaru jako rozměrový základ pro 3D model, bylo použito posuvné měřidlo. Tento nástroj byl využit z důvodu jeho rozšířenosti v praxi, nicméně i využitím jiné konvenční metody měření, by bylo vzhledem ke tvarové složitosti měřeného objektu obtížné jeho přesné rozměrové postihnoutí. Pro získání koordinát tvořících křivek parabolických fazet, bylo využito pomocného kovového pravítka a úhloměru. Tak byly získáno 5 až 9 bodů tvořící křivky (v závislosti na její délce) dané fazety, které byly zaměřeny v prostoru a přeneseny do CAD prostředí.

9.3.2 Vyhodnocení komparace

Rozměrová verifikace byla vytvořena za účelem vytvoření představy v jak velké míře se odlišuje model získaný konvenční metodou, od modelu získaného procesem digitalizace. Na obr. 41 je zobrazen barevná mapa odchylek jednotlivých částí ploch reflektoru spolu s histogramem (3σ) výskytu jejich četností. V oblastech funkčních ploch, zejména v oblasti parabolického zrcadla reflektoru, které je tvořeno právě soustavou fazet, dochází k odchylkám od ideálního tvaru. Touto plochou je formován světelný svazek emitovaný zdrojem a i malou odchylkou od ideálního tvaru mohou být výrazně změněny výsledné optické vlastnosti - světlomet bude mít jinou vyzařovací geometrii. Další odchylky funkčních ploch a prvků lze zaznamenat např. v oblasti pylonů, kterými je reflektor aretován v protikuse.

Lze tedy konstatovat, že využití reverzního inženýrství a digitalizace je od určité úrovně složitosti tvarových ploch vhodné, ne-li nutné, zvláště v případech kdy na výrobku není dostatek rozměrových základen, od kterých lze provádět konvenční měření. V praxi by bylo nutné přizpůsobit plochy konvenčně získaného modelu tak, aby bylo dosaženo lepší aproximace ploch modelu zdigitalizovaného. V rámci této práce a využití 3D modelu reflektoru pro ideový návrh vstřikovací formy a její tvarové dutiny, lze sledovat přesnost modelu získaného konvenčním způsobem za dostačující.



Obr. 41. Barevná mapa odchylek CAD modelu od modelu získaného metodou digitalizace.

10 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Na základě charakteristiky modelu, zejména jeho objemu a zadané nutné násobnosti formy, byl pro vstřikování vybrán horizontální vstřikovací stroj od německé firmy Arburg s typovým označením ALLROUNDER 720S (3200 - 1300), který splňuje potřebné rozměrové i procesní parametry.

Zejména se jedná o potřebný plastikační výkon, velikost uzavírací síly a vzdálenost mezi vodícími sloupy. Plastikační výkon zvoleného stroje musí být dostatečný pro vyplnění všech čtyř dutin vstřikovací formy a studeného rozvodného systému, nutně je také započítat rezervu v podobě 10 % z plněného množství. Velikost uzavírací síly vstřikovací formy musí být dostatečně dimenzována tak, aby bylo znemožněno pootevření dělicí roviny vlivem působení vstřikovacího tlaku. Důležitým uváděným parametrem je vzdálenost mezi vodícími sloupy, která musí být dostatečná, aby bylo možno formu do vstřikovacího stroje bezpečně a snadno vložit.

Tab. 3. Technické parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720S. [13]

Název	Hodnota	Jednotka
Maximální uzavírací síla	3200	kN
Maximální vzdálenost otevření	700	mm
Maximální světlost mezi upínacími deskami	1100 - 1400	mm
Minimální výška formy	300 - 700	mm
Rozměry upínací desky	1040 × 1040	mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	720 × 720	mm
Průměr otvoru pro středící kroužek formy	160	mm
Maximální vyhazovací síla	100	kN
Maximální zdvih vyhazovacího systému	250	mm
Celkový výkon stroje	70,5	kW
Průměr šneku	55	mm
Poměr délky a průměru šneku	22	-
Vstřikované množství podle EUROMAPu	1300	-
Maximální objem vstřikované dávky	558	cm ³
Maximální hmotnost vstřikované dávky (PA)	473	g
Maximální vstřikovací tlak	238	MPa
Maximální kroutící moment na šneku	1510	N.m
Maximální přítlačná síla trysky	90	kN
Hmotnost stroje	17700	kg

Tab. 4. Konfrontace požadovaných parametrů ze strany zaformování vůči parametrům zvoleného vstřikovacího stroje.

Parametry vstřikovacího stroje	Hodnota		Výsledky analýz
Objem plastikační dávky	558 [cm ³]	357 [cm ³]	Objem dutin a vtok. systému
Maximální uzavírací síla	3200 [kN]	2741 [kN]	Potřebná uzavírací síla
Vzdálenost mezi vod. sloupky	720 × 720 [mm]	625 × 665 [mm]	Rozměr formy (x, y)



Obr. 42. Vstřikovací stroj Arburg z řady Allrounder.

Vybraný model vstřikovacího stroje je výrobcem dodáván s možností volby průměru šneku a tedy objemem vstřikované dávky. Byl zvolen nejmenší možný průměr šneku o hodnotě 55 mm, který pro tento případ zcela postačuje.

Po komparaci hodnot získaných pomocí tokových analýz s technickými hodnotami vstřikovacího stroje lze konstatovat, že zvolený stroj je vhodný pro tuto aplikaci.

11 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Výsledkem konstrukčního řešení by měla být jednoduchost vstřikovací formy v rámci požadované přesnosti a s tím spojená redukce předvýrobních i výrobních nákladů. Možností jak této skutečnosti dosáhnout je několik. V této práci bylo při konstrukci do značné míry využito normálíí Hasco, jedná se např. o horký vtokový systém, vodící a středící elementy apod. Jinou možností může být využít konečně prvkový simulační software a intuitivního 3D konstruování.

11.1 Požité softwarové vybavení

Softwarové nástroje mohou být důležitým a užitečným prvkem v oblasti prvotního návrhu a tak snížit riziko vytvoření nevhodného konstrukčního řešení. V této práci bylo využito programu Catia V5R18 (modul Part Design, Assembly Design, Mold Tooling Design, Generative Shape Design, Generative Structural Analysis a Drafting) pro návrh, 3D konstrukci a mechanické analýzy a Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013 pro zhodnocení návrhu vtokového a chladicího systému.

11.1.1 DS Catia V5R18 (SP8)

Vývojářem softwaru Catia je francouzská firma Dassault Systèmes a současné době je řazen mezi špičku v konstruktérsko-analytických programech. Velkou předností je jeho vysoká modularita, kde různými typy modulů může být pokryt kompletní životní cyklus výrobků počínaje koncepčním designem, přes konstrukční řešení, mechanické analýzy a simulace až po genezi drah obráběcích nástrojů CNC strojů. To vše v rámci jednotného uživatelského rozhraní. Pro celý systém je příznačná vysoká úroveň průmyslové univerzálnosti, čímž je předurčen pro nasazení ve velice odlišných odvětvích strojírenství. Využití lze nalézt zejména v automobilovém, leteckém nebo spotřebním průmyslu.

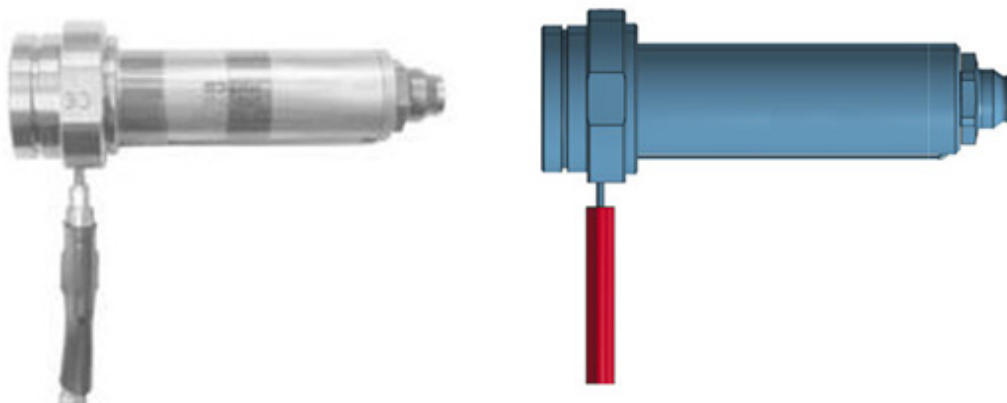
11.1.2 Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013 (SP4)

Simulační software Moldflow Synergy je řešením od původně americké společnosti Autodesk. Použití je zasazeno do oblasti simulací vstřikovacího procesu na digitálním prototypu. Systémem je umožněno navrhnout, vyhodnotit a optimalizovat plastový díl, včetně dílu multikomponentních. Řešit geometrii vtokových a temperačních domén související vstřikovací formy s následnou optimalizací procesních parametrů výrobního cyklu. Spolu s dalšími simulačními programy z této oblasti je používán největšími světovými výrobci

především v automobilovém průmyslu a v oblastech spotřební elektroniky nebo zdravotního materiálu.

11.1.3 Hasco 3D Modul (R1-2013)

Proprietární software německého výrobce normální firmy Hasco GmbH. Obsahem je elektronický katalog velké části produktové řady, která je firmou vyráběna včetně potřebných technických parametrů s možností datového exportu. Přidruženou aplikací Dako je vytvořen můstek mezi elektronickým katalogem a vybraným konstrukčním software. Tak je zajištěn export geometrie jednotlivých produktů do kompatibilních formátů, např. pro programy Catia, Inventor, NX a dalších.



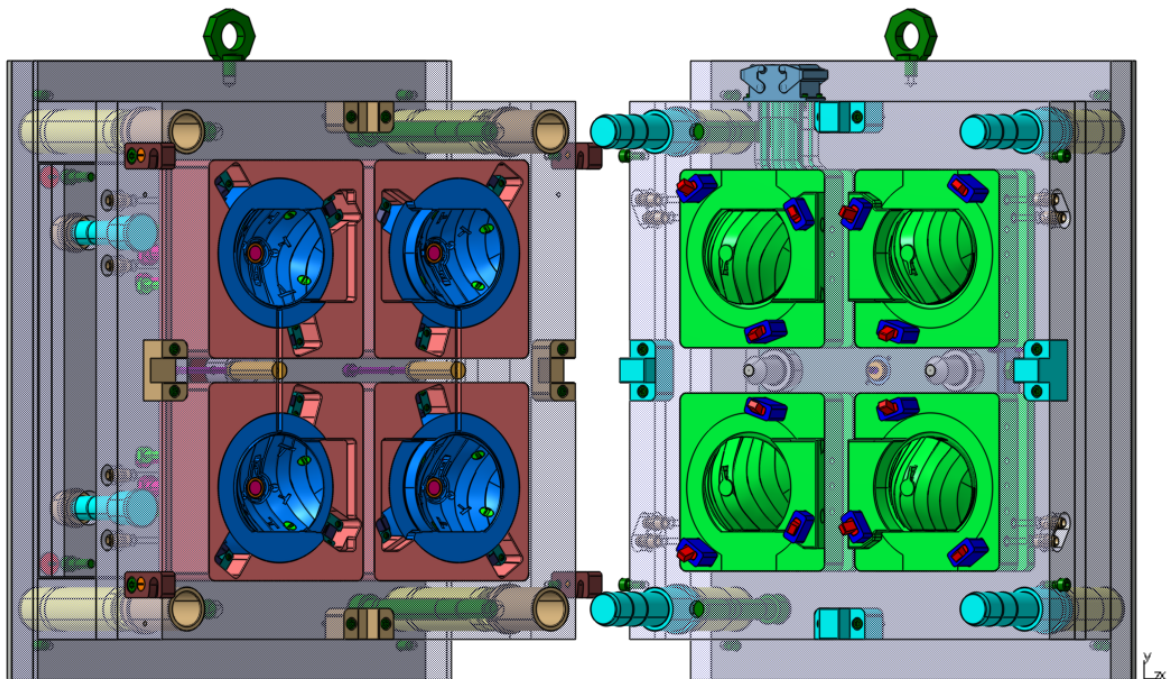
Obr. 43. Srovnání reálné fotografie vstříkovací trysky s exportovaným 3D modelem.

11.1.4 Autodesk Showcase 2013

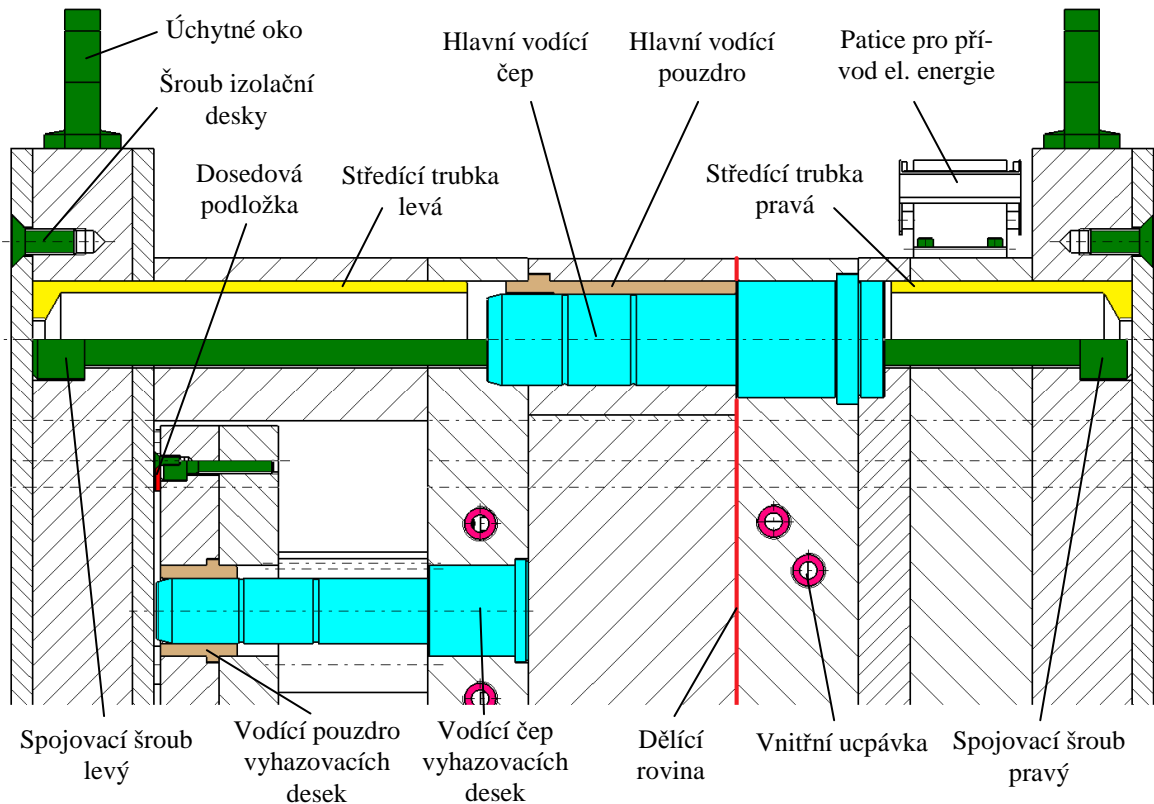
Software Showcase od firmy Autodesk je nástrojem pro vytvoření 3D vizualizace osamostatněných nebo do prostoru vsazených digitálních modelů. Obsahuje podporu pro real-time rendering a vyspělou metodu sledování paprsku (ray tracing), takto je možné vytvořit fotorealisticky vypadající modely, jinak běžně zobrazované v konstrukčních programech.

11.2 Rám formy

S ohledem na požadovanou čtyř násobnost vstřikovací formy, dostupnou možností jednoduchého odformování výrobku, vyhazovací, temperační a vtokový systém byla zvolena konstrukce formy s rozměry (x, y, z) 625, 665 a 526 mm. Rozměr upínacích a izolačních desek byl zvětšen o 100 mm v ose y, pro bezpečné upnutí formy do rámu vstřikovacího stroje pomocí upínek. Během konstrukce byl hojně využíván systém normálí firmy Hasco. Jednotlivé desky pravé a levé strany byly aretovány za použití středících členů (středící trubky, vodící čepy), které byly uloženy v přesných otvorech a desky spojeny pomocí šroubů. Čtveřice hlavních vodících čepů byla umístěna do pravé strany formy spolu s dalšími čtyřmi plochými středícími elementy. Forma byla vybavena středícími kroužky o průměru 160 mm podle specifikace výrobce použitého vstřikovacího stroje. Horní strana upínacích desek byla osazena transportním zařízením v podobě ok se závitem, pomocí kterých může být forma jeřabem přemístěna do vstřikovacího stroje.



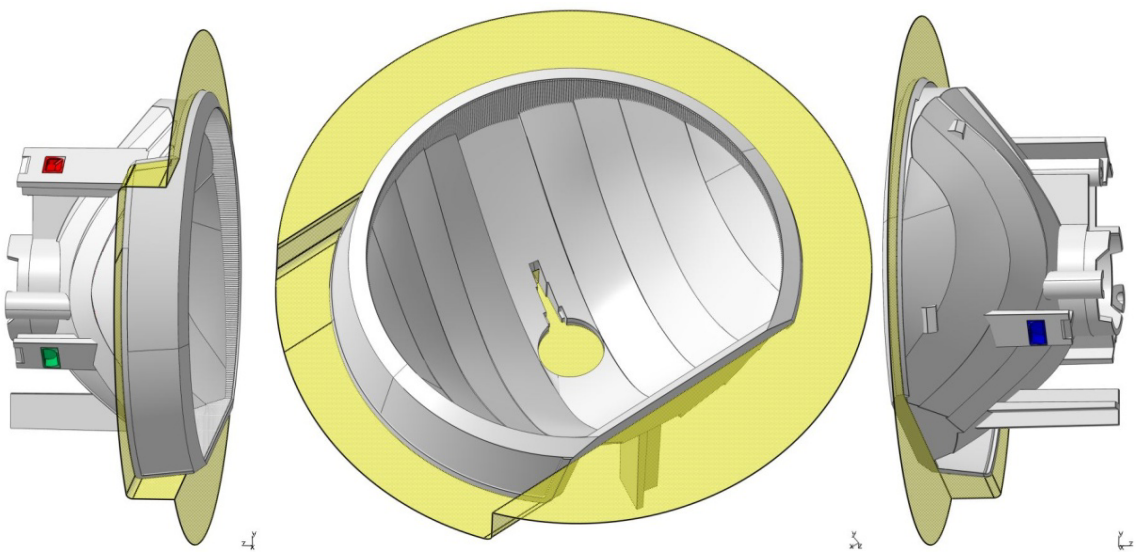
Obr. 44. Pohled do pravé a levé dělicí roviny vstřikovací formy.



Obr. 45. Řez v rovině spojovacích a středících elementů.

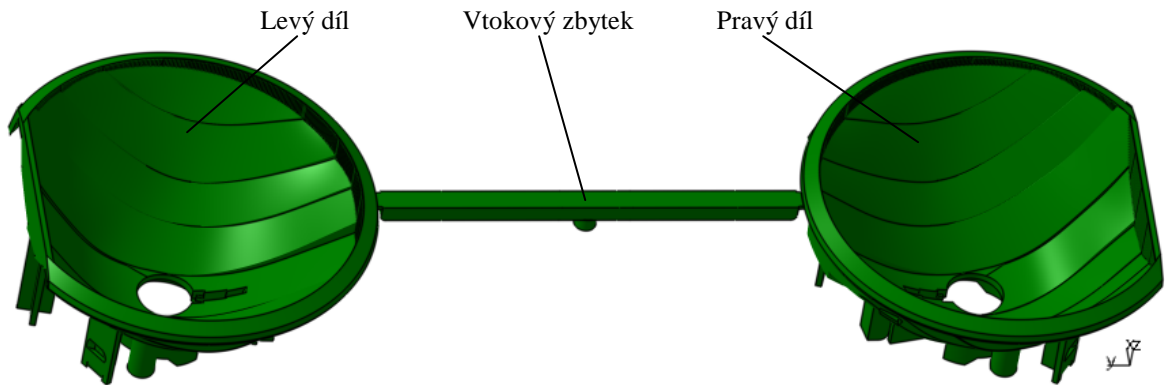
11.3 Zaformování dílu

Jeden výrobek lze zaformovat do kvádrů o délce hran (x , y , z) 143, 124 a 72 mm. Vzhledem k tvaru dílu bylo nutné použít více dělicích rovin. Díl bylo nutné ve formě umístit tak, aby funkční optická plocha byla orientována směrem k vyhadzovačům prosté straně vstřikovací formy, tedy straně pravé a tak bylo zamezeno vzniku vyhadzovacích stop.



Obr. 46. Vyobrazení hlavní dělicí roviny (žlutá) a třech vedlejších dělicích rovin.

Hlavní dělicí rovina byla umístěna do oblasti hrany výrobku (kopíruje obvodovou konturu) tak, aby výrobek zůstal na levé straně formy a bylo ho snadné vyhodit vyhazovacími kolíky. Tři vedlejší dělicí roviny poté do oblasti jednotlivých zapichů, které nemohou být odformovány klasickým způsobem.



Obr. 47. Dva díly spojeny vtokovým zbytkem studeného rozvodného kanálu.

Konstruovaná forma je nástrojem pro výrobu čtyř reflektorů, dvou levých a dvou pravých v jednom cyklu. Model pravého reflektoru je zrcadlovým odrazem levého reflektoru, postup a princip konstrukce jednotlivých částí je stejný, proto tato skutečnost nebude v dalším popisu rozlišována a uváděna.

11.4 Tvarové prvky

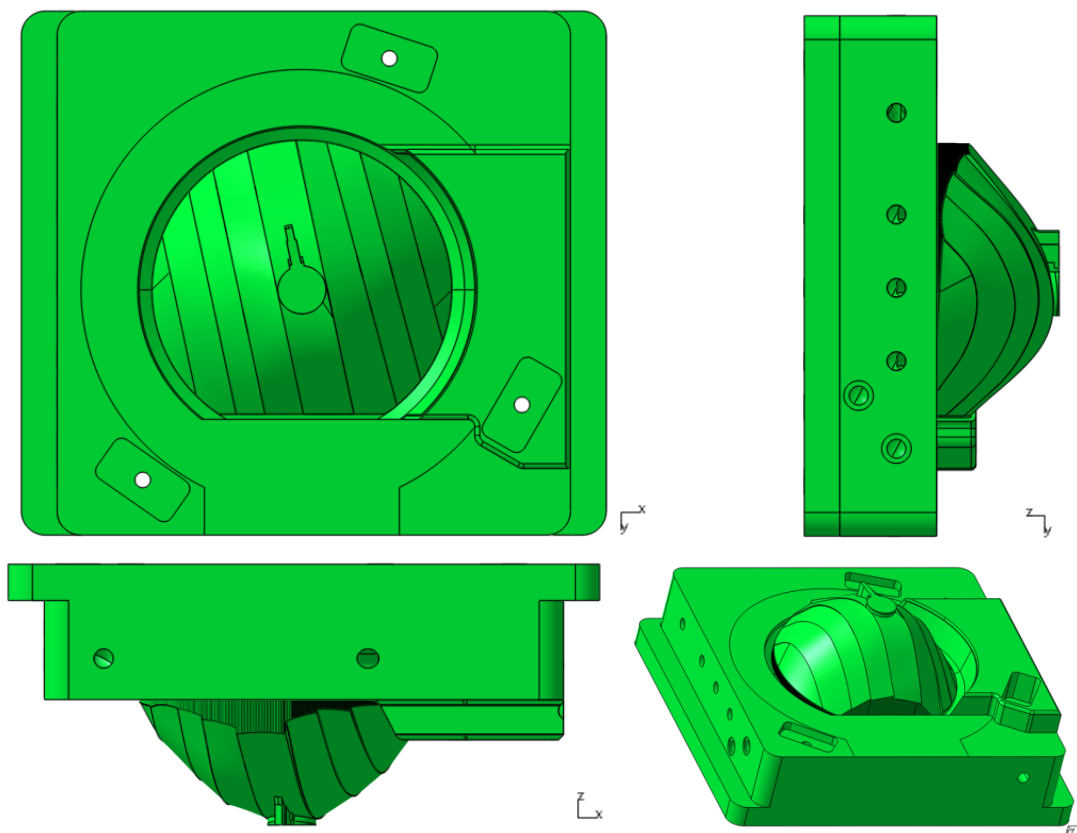
Tvarová dutina uzavřené vstřikovací formy je tvořena jednotlivými tvarovými prvky, jejichž složením vznikne mezi nimi negativní tvar budoucího výrobku. Vlivem vlastností polymerních materiálů, u kterých během procesu chlazení nastane objemová kontrakce určité hodnoty je nutné zavést korekci a velikost tvarové dutiny o tuto hodnotu navýšit. V tomto případě je tvarová dutina tvořena pravou tvarovou vložkou, levou tvarovou vložkou a třemi posuvnými jádry, popř. zde lze zahrnout vyhazovací kolíky s jejich jádra.

11.4.1 Pravá a levá tvarová vložka

Pravá tvarová vložka je umístěna do pravé tvarové desky na pevné straně vstřikovací formy. Její pozice je zajištěna opěrnými patkami (v rovině xy) a opřena o pravou opěrnou desku (v ose z). Tělo je monolitické s vrtanými kanály pro možnost temperace. Okolo tvarové části jsou vytvořena tři obdélníková vybrání pro držáky lomených kolíků.

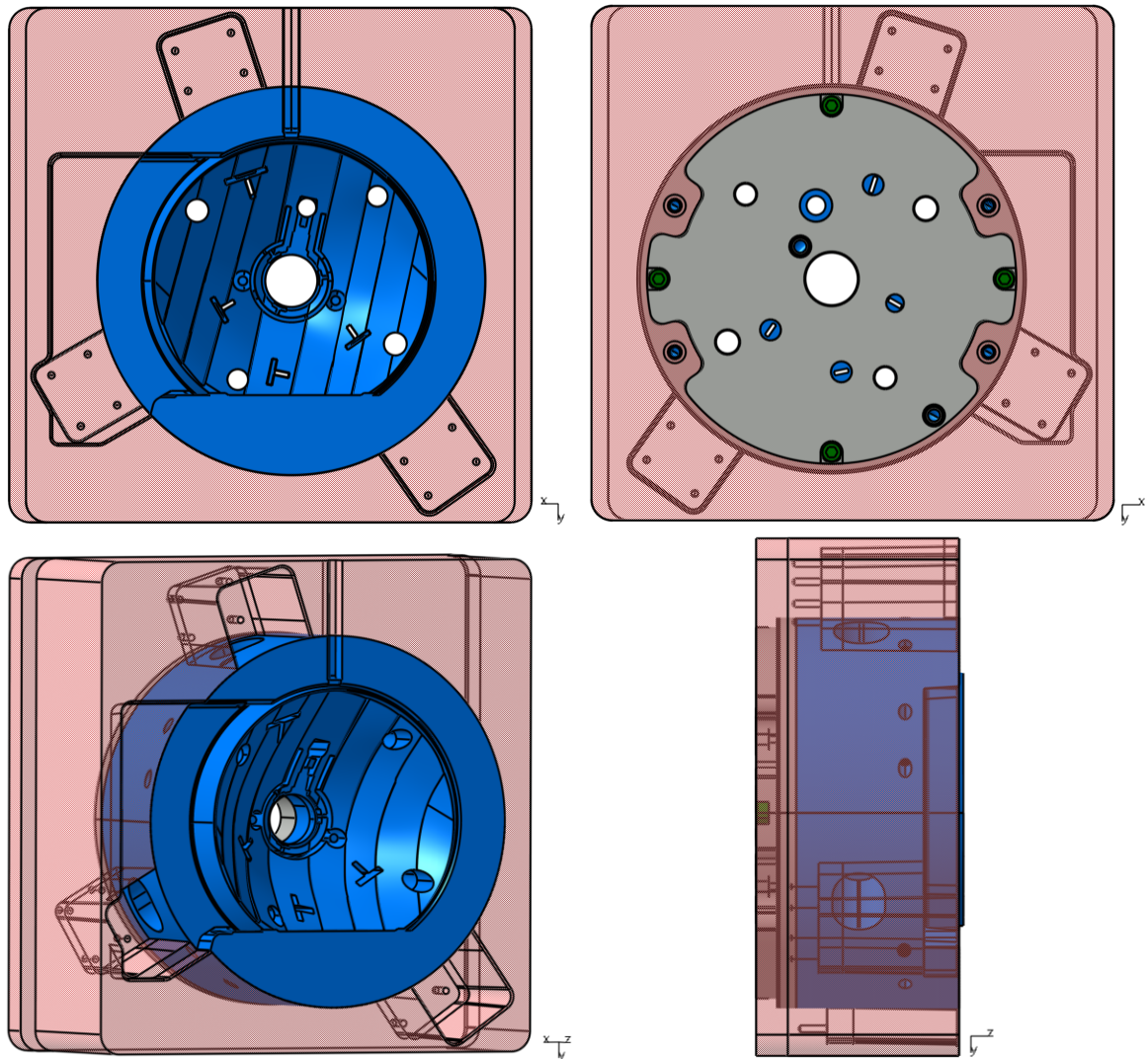
Levá tvarová vložka je umístěna v levé tvarové desce na pohyblivé straně vstřikovací formy a zajištěna ve své poloze obdobným způsobem jako pravá tvarová vložka. Tělo je se-

staveno ze tří částí. Tvarová cylindrická část o průměru 185 mm a výšce 77 mm je vrtána pro účely temperace a dále vybavena otvory pro vyhazovací kolíky a zavedení tvarových jader. Ve spodní straně je vyrobena přídatná temperační drážka, která je uzavřena víkem připevněným čtveřicí šroubů. V horní straně víka je vyroben žlab pro umístění plochého těsnění. Tyto dva elementy jsou vůči sobě středěny pomocí dvojice kolíků v přesně vrtačných dírách a vloženy do patkové části, kde jsou připevněny pomocí čtveřice šroubu a tvarově zajištěny proti rotaci v ose z. Na patkové části je dále vyrobena trojice vybrání pro umístění stejného počtu posuvových kostek. V cylindrické a patkové části je začleněna část studeného rozvodného kanálu.



Obr. 48. Pravá tvarová vložka.

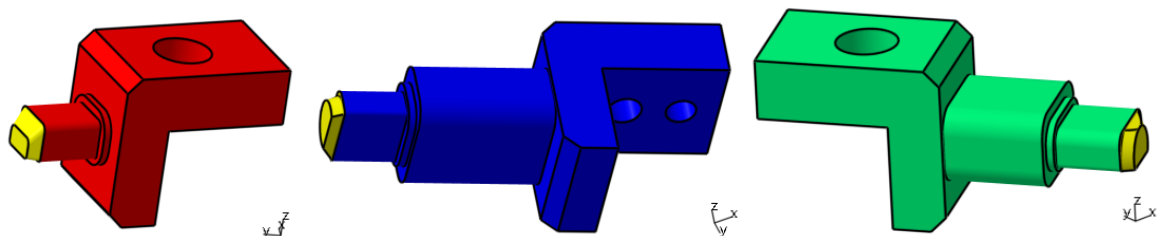
Vložkování bylo voleno s ohledem na snadnou vyměnitelnost v případě poškození tvarových částí. Jednotlivé tvarové prvky, které jsou přímo účastny styku s polymerní taveninou jsou vyrobeny z nástrojové oceli třídy 19, cementovány a kaleny tak, aby byla zajištěna odolnost jejich povrchu proti podmínkám, kterým jsou vystaveny během procesu vstřikování. Pro snadnější vyhození byly stěny kolmé k hlavní dělicí rovině opatřeny úkosem $0,5^\circ$ (již během konstrukce výrobku) a zahrnuta korekce izotopické objemové kontrakce materiálu výrobku o hodnotě 0,6 %.



Obr. 49. Levá tvarová vložka.

11.4.2 Posuvná tvarová jádra

Pro odformování tří bočních relativně mělkých zápichů je využito posuvových kostek, do kterých jsou vsazena jednotlivá tvarová jádra.

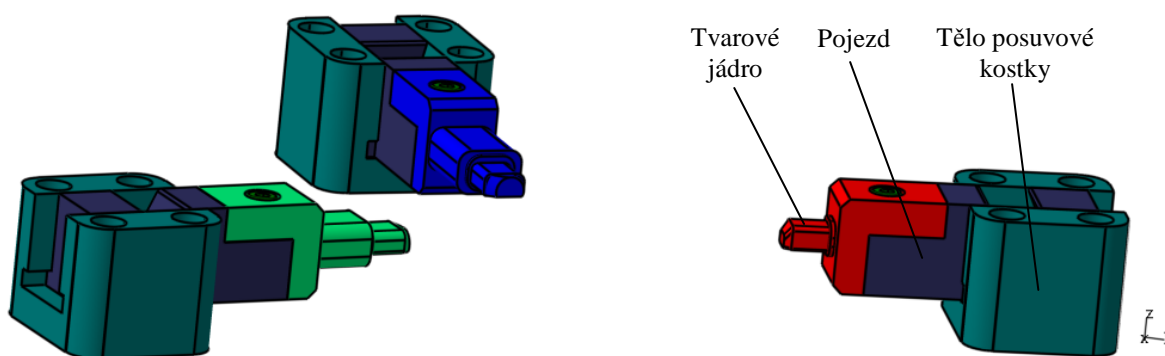


Obr. 50. Trojice tvarových jader, plochy označené žlutou barvou jsou exponovány poly-
merní tavenině.

Konstrukce každého jádra je obdobná. Spojení jádra s posuvovou kostkou je realizováno přes sedlo šroubem M4, s přesným zajištěním polohy pomocí kolíku. Na konci krku je vyrobena plocha s příslušným tvarovým profilem, která je v uzavřeném stavu formy součástí tvarové dutiny a vystavena působení taveniny.

11.5 Odformování dílu

Proces odformování výrobku je v pracovním cyklu vstřikování zařazen za proces chlazení a nastane při otevírání vstřikovací formy. V této sekci je popsáno odformování třech vedlejších dělicích rovin, tedy třech bočních zápichu obdélníkového charakteru a hloubky 2,5 mm.

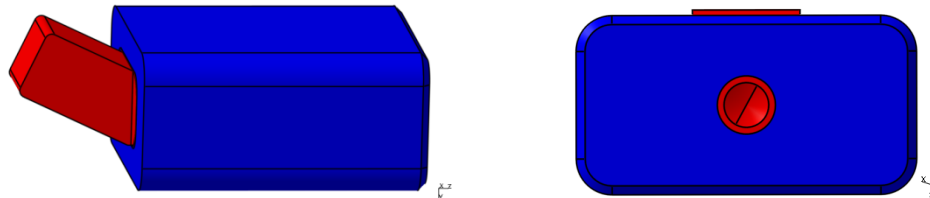


Obr. 51. Rozmístění posuvové kostky v dutině vstřikovací formy.

Odformování je možné realizovat více typy konstrukčních řešení, v tomto případě bylo využito třech posuvových kostek a třech lomených kolíků, s ohledem na vhodnost a ekonomičnost celé konstrukce. Zmíněné části byly použity v podobě normálí firmy Hasco (Z1813), do jejichž sedel byly následně zkonstruovány jednotlivá tvarová jádra. Lomený kolík je umístěn v pravé straně formy v držáku, který je zasazen v osazení vyrobeném v pravé tvarové vložce a zajištěn šroubem. Funkcí držáku je aretovat (v rovině xy) a prodloužit (v ose z) tělo samotného lomeného kolíku. K prodloužení bylo nutno přistoupit z důvodu, že jádra a na ně vázané posuvové kostky jsou zapuštěny do značné hloubky v levé tvarové vložce, kde jsou umístěny. Posuvová kostka je tvořena z pojezdu, jehož poloha při vysunutém jádru je zajištěna pomocí pojistné kuličky a samotného těla, ve kterém je pojezd veden. Tělo posuvové kostky je připevněno čtveřicí šroubů do patkové části levé tvarové vložky.

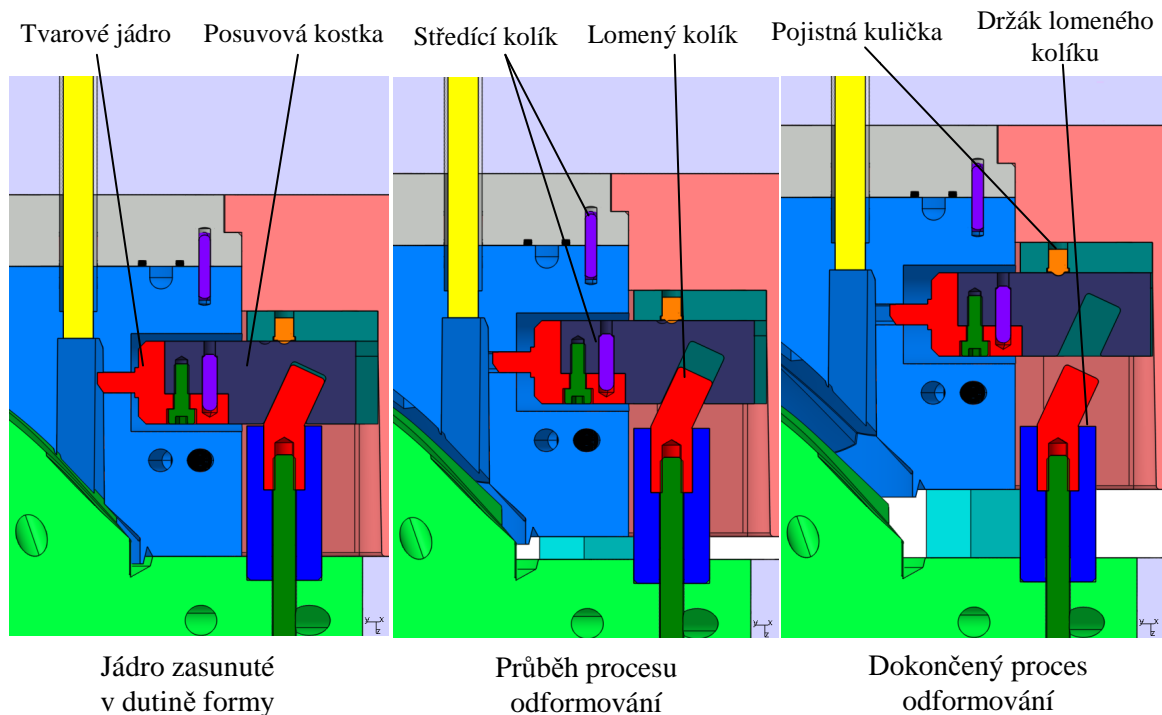
Radiální pohyb (zdvih 4,5 mm) jednotlivých pojezdů s jádry, směrem k cylindrické vložkové části, je vyvozen při uzavírání vstřikovací formy tak, že jsou lomené kolíky zasunuty

do tvarově ekvivalentní drážky v těle pojezdu. Jedná se tedy o čistě mechanické řešení. V tomto případě není nutné použít zámku zavřené posuvové kostky, jako například při použití šikmých kolíků, protože zde nevzniká tak značná vůle. Není tak připuštěna možnost pootevření vedlejších dělicích rovin vlivem přetlaku během fáze plnění. Odformování, tedy zpětný pohyb posuvových kostek, je vyvozen při otevírání vstřikovací formy.



Obr. 52. Lomený kolík zakotvený v držáku.

Předpokladem pro původní návrh systému odformování bylo využití šikmých vyhazovacích kolíků pro odformování bočních zápichů a vyhození dílu z dutiny formy. Tento koncept byl po prvním konstrukčním návrhu zavrhnut, z důvodu přesahu jeho kontury mimo dutinu formy (vznik značně větších stop po vyhazování) při potřebné výšce zdvihu a úhlu pohybu. Zároveň by byly omezeny možnosti temperace levé tvarové vložky.

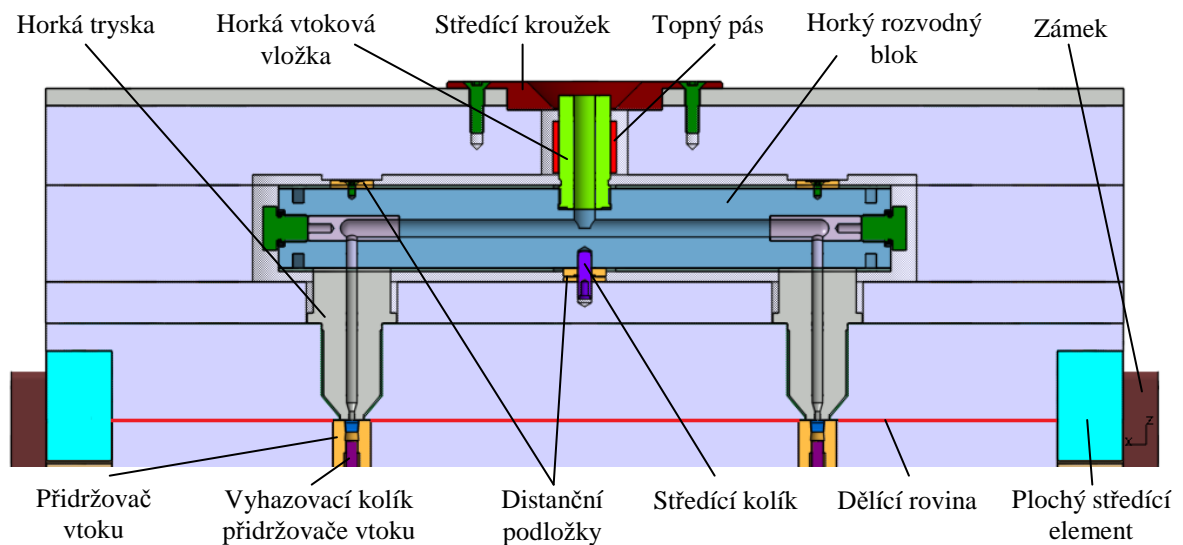


Obr. 53. Postup odformování zápichu během fáze otevírání vstřikovací formy.

11.6 Vtokový systém

Hlavním úkolem vtokového systému je dopravit proud polymerní taveniny od trysky vstřikovacího stroje až k jednotlivým dutinám vstřikovací formy. Vyplňování objemu dutin musí být provedeno v krátkých časech při minimálních hydraulických odporech.

Vzhledem k typu výrobku, způsobu zaformování, násobnosti a úspoře materiálu byl zvolen kombinovaný horký (dvě trysky) a studený (dva rozvodné kanály) vtokový systém.

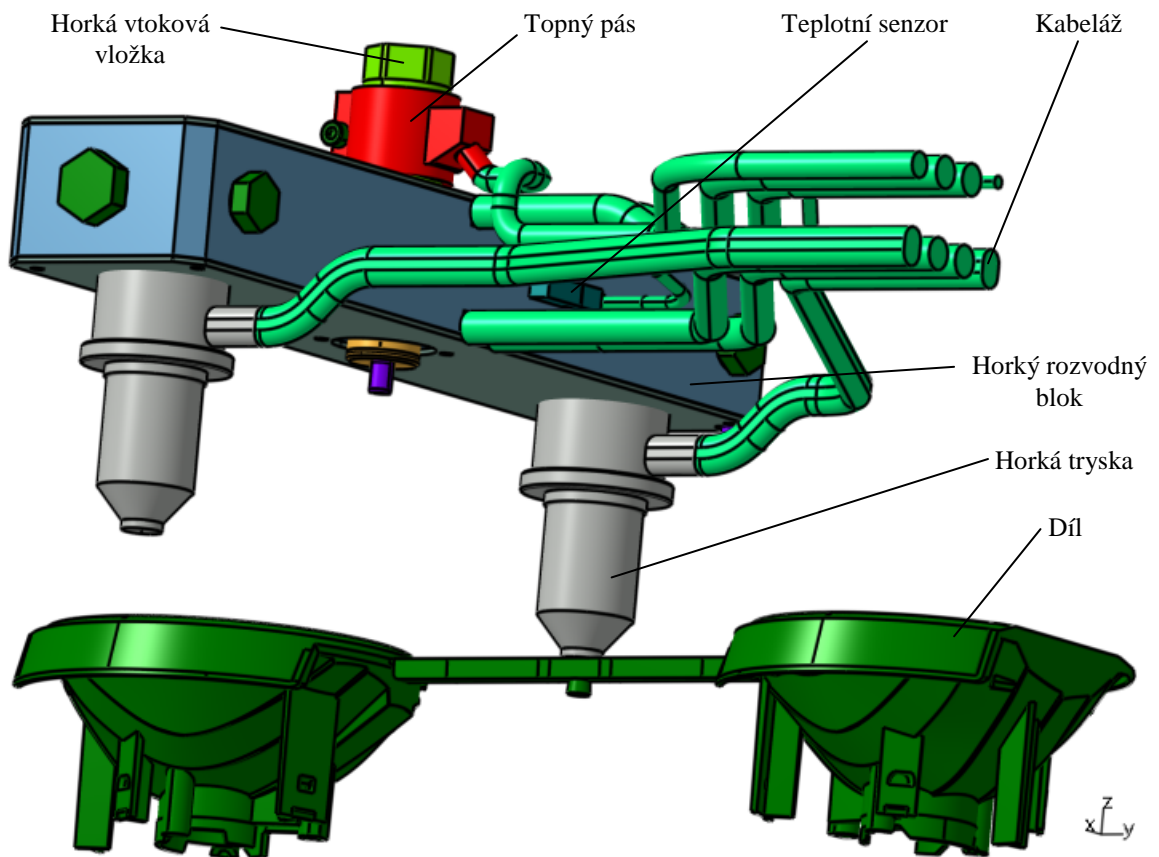


Obr. 54. Umístění horkého vtokového systému v tělese formy (řez rovinou xz).

11.6.1 Horký vtokový systém

Horký vtokový systém, který je sestaven z komponent firmy Hasco, je umístěn v pravé straně vstřikovací formy. Vstup polymerní taveniny z trysky vstřikovacího stroje je zajištěn vtokovou vložkou (Z1055) délky 66 mm a průměrem 12 mm vnitřní cylindrické tokové domény. V zajmu větší homogenity teplotního pole byla tato vybavena vnějším topným pásem (Z1133) o délce 30 mm a tepelným výkonem 120 W. Dále pák filtrem pevných částic. Tavenina je poté vedena do horkého rozvodného bloku (H106), ve kterém je vtoková vložka připojena přes závit, a rozdělena na dva samostatné proudy. Vnitřní průměr cylindrické tokové domény horkého rozvodného bloku činí 10 mm a celková dráha toku 270 mm. Velikost rozvodného bloku byla volena na základě potřebné rozteče trysek, v případě tohoto modelu jej lze osadit maximálně dvěma tryskami s intervalem rozteče 225 až 277 mm. Tepelný výkon bloku je 900 W a je vybaven dvěma topnými hady. Každý z obou taveninových proudů je dále veden k příslušné trysce. Zde byla vybrána horká tryska (2 kusy) z řady Standard Shot (Z104), která je vhodná pro zpracování polyamidu a

hmotnostní dávky až 200 g na jeden zdvih, touto skutečností je v dostatečném rozsahu pokryty nároky této aplikace.



Obr. 55. Osamostatněný rozvodný blok a jeho pozice vzhledem k dílu.

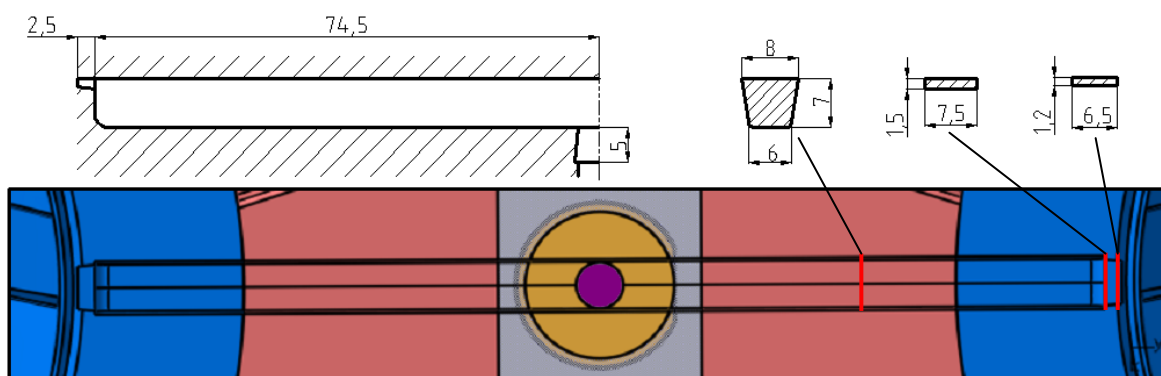
Obě tryska ústí v hlavní dělicí rovině do studeného rozvodného systému, kterým je zajištěna distribuce taveniny k jednotlivým tvarovým dutinám. Vnitřní cylindrická toková doména trysky je 88 mm dlouhá se vstupním průměrem 6 mm, který je v oblasti ústí změněn na 3 mm. Vyhřívání je realizováno pomocí vnitřního topného torpéda o tepelném výkonu 400 W.

Tělo horkého vtokového systému zasahuje přes všech pět desek pravé strany formy. V jednotlivých deskách bylo nutné navrhnout vybraní tak, aby byla vytvořena dostatečně velká mezera od těla jednotlivých částí horkého rozvodného bloku, a zajištěna jeho dostatečná tepelná izolace od rámu formy. Aretace horkého vtokového systému v rámci formy je zajištěna pomocí podpor v oblasti válcového zakončení (v rovině xy) a čela osazení obou trysek (v ose z), na horkém rozvodném bloku poté pomocí centrálního a dvou pomocných kolíků (v rovině xy) a třech podložek (v ose z). Pouze v těchto místech je horký vtokový systém fyzicky spojen s rámem formy. Díry středící systém v rovině xy je třeba vyrob

pomocí přesného vrtání. Napájení jednotlivých částí horkého vtokového systému elektrickou energií je realizováno pomocí kabelů, které jsou umístěny v pomocné opěrné desce a vedeny přímo do patice (Z1227) umístěné na horní stěně pravé strany formy.

11.6.2 Rozvodný kanál

Dva studené rozvodné kanály jsou umístěny v levé části vstřikovací formy a zasahují přes vložku přidržovače vtoku, levou tvarovou desku a levé tvarové vložky až k jednotlivým ústím. Do středu délky každého studeného rozvodného kanálu je distribuována polymerní tavenina pomocí trysky, oproti které je umístěna vložka přidržovače vtoku. Geometrickým tvarem průřezu rozvodného kanálu je rovnoramenný lichoběžník o rozměrech 8, 6, 7 mm (základna v dělicí rovině, základna, výška). Výhodou tohoto řešení je snadná vyrobiteľnost, relativně vysoká hodnota smáčivého průměru a nízké tlakové ztráty po délce kanálu, která je v tomto případě 77 mm k jedné dutině.



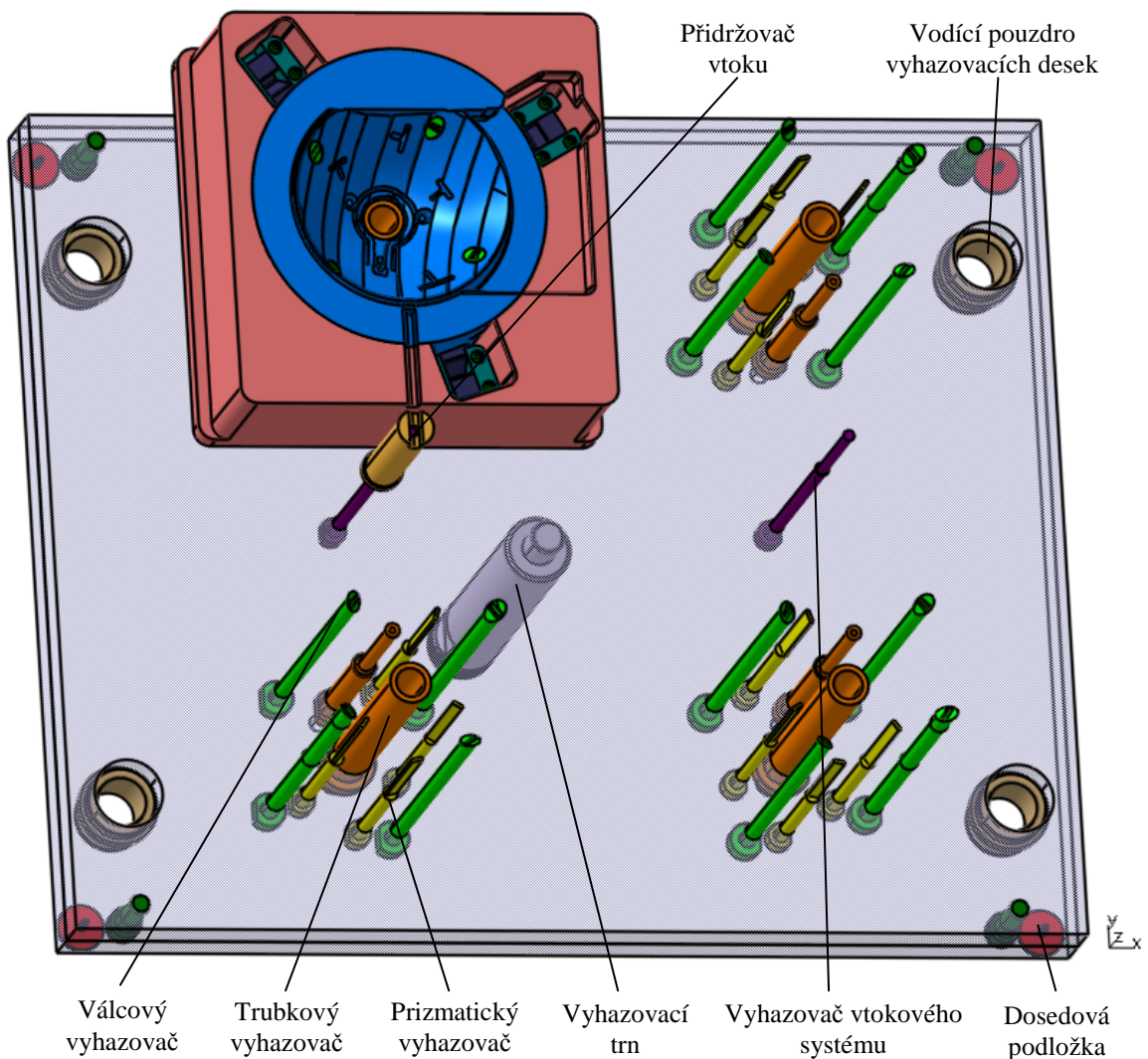
Obr. 56. Detail rozvodného kanálu a vtokových ústí, ve středu obrázku je osazen přidržovač vtoku.

11.6.3 Vtokové ústí

Každé ze čtyř vtokových ústí je spojnicí mezi koncem studeného rozvodného kanálu a jednou tvarovou dutinou. Vzhledem k zaformování dílu a rozvržení jeho funkčních ploch zde byl zvolen filmový typ vtokové ústí o rozměrech části ústí do tvarové dutiny 6,5 a 1,2 mm (délka, výška), s pozicí na výrobku, která byla podpořena analýzou Gating Suitability. U tohoto typu vtokové ústí nenastane automatické oddělení výrobku a rozvodného kanálu během odformování (pravý a levý díl zůstanou spojeny), z tohoto důvodu je tento úkon nutné provést manuálně nebo za využití automatizace.

11.7 Vyhazovací systém

Základním předpokladem pro korektní provedení procesu vyhození výstřiku z dutiny formy je nutnost zajistit aby výrobek zůstal po otevření vstřikovací formy přichycen k její levé straně, kde je umístěn vyhazovací systém. Toho je dosaženo nasmrstěním materiálu výrobku na levou tvarovou vložku během procesu chladnutí a tvarovým stykem, který je proveden pomocí přídržovačů vtokového systému.



Obr. 57. Vyhazovací systém vstřikovací formy.

Vyhazovací systém byl koncipován s využitím deseti vyhazovacích kolíků na jednu dutinu, čtyř válcových, čtyř prizmatických a dvou trubkových. Délka jednotlivých vyhazovačů není stejná, ale je odvislá od jejich umístění. Koncová plocha válcových vyhazovačů, která je ve styku s výrobkem, není triviálního tvaru jako v případě ostatních vyhazovačů (prostá rovina), ale je tvarována do komplexnější plochy. Jádra dvou trubkových vyhazovačů jsou

ukotvena a aretována levou mezi upínací a pomocnou upínací deskou. Na menším trubkovém vyhazovači a jeho jádru, je vytvořeno osazení pro snížení možnosti vzniku vzpěru vlivem jejich nízké hodnoty průměru a vysoké délky. V zájmu redukce frikce během posuvu vyhazovacího systému mezi jednotlivými vyhazovači a deskami, resp. jádry vyhazovačů, jsou díry pro vyhazovače vyrobeny ve větším průměru, resp. jádra v menším průměru, až po vzdálenost 7 mm od povrchu tvarové vložky.

Oblast dvou přídržovačů vtokové systému byla vložkována a vložka ukotvena v levé tvarové desce kde je zabezpečena proti otočení pomocí sražení (není symetrická dle osy z). Ztuhlý polymerní materiál, který je v přídržovači zatečen a držen pomocí podkosu, je vytlačen účinkem válcového vyhazovače vedeného středem přídržovače.

Tab. 5. Přehled použitých vyhazovacích kolíků.

Typ vyhazovacího elementu	Tvar průřezu	Osazení	Rozměry aktivní koncové části [mm]		Délka [mm]	Počet
Válcový	kruh	ne	10		229,7	4
	kruh	ne	11		236,4	4
	kruh	ne	10		232,2	4
	kruh	ne	11		233,3	4
Prizmatický	obdélník	ano	6,8	2	183,2	4
	obdélník	ano	6,8	2	172,1	4
	obdélník	ano	6,8	2	178,1	4
	obdélník	ano	8	2	180,1	4
Trubkový	mezikruží	ne	25	18	186,2	4
	mezikruží	ano	9	4	178,1	4
Válcový (vtokový systém)	kruh	ano	5,8		226,0	2

Veškeré vyhazovací kolíky jsou ukotveny pomocí vybrání mezi dvojicí vyhazovacích desek, kde jsou zároveň pomocí tvarového styku aretovány proti pootočení (značná část z nich není symetrických ve směru osy z). Tyto pohyblivé desky jsou vedeny po čtveřici vodících čepů průměru 30 mm pro rovnoměrný chod. Nutná hodnota délky vyhazovacího zdvihu, založena na výšce výrobku v ose z, byla stanovena na 63 mm a je spolehlivě vyvozena vyhazovacím mechanismem použitého vstřikovacího stroje. Akt vyhození, tedy posun vyhazovacích desek spolu z vyhazovači v ose z, je iniciován ze vstřikovacího stroje přes normovaný trn, který je upevněn do opěrné vyhazovací desky.

Rozmístění, velikost a tvar jednotlivých vyhazovacích kolíků je voleno tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné vyhození při minimalizaci vznik stop po vyhazovačích na povrchu výrobku. Výrobek je v oblastech dotyku válcových vyhazovačů opatřen výstupky, kterými je

umožněno snadnější vyhození. Prizmatické vyhazovače jsou umístěny do základen jednotlivých pilonů a trubkové v oblasti dvou děr.

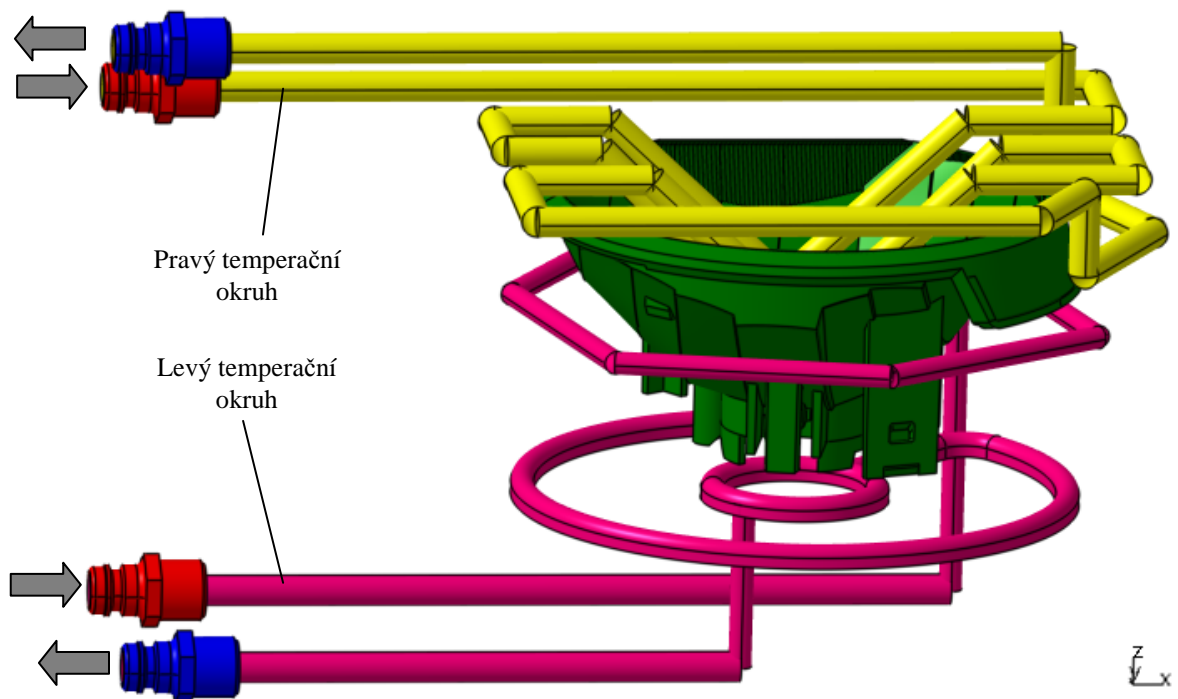
Opěrná vyhazovací deska je osazena dosedacími podložkami, kterými je vymezena výchozí pozice vyhazovacího systému a zároveň jsou konstruovány jako tlumící člen.

Celkový počet vyhazovačů činí 42.

11.8 Temperace

System temperace je užíván k udržování konstantního teplotního pole uvnitř vstřikovací formy. Cílem je dosáhnout optimálně krátkého pracovního cyklu vstřikování, při zachování všech technologických požadavků na výrobu.

Temperační systém pravé i levé strany formy byl koncipován jako čtyř okruhový, kde vždy na jednu tvarovou vložku přináležejí jeden temperační okruh. Geometrický návrh trajektorií kanálů byl tvořen s ohledem na vhodnou hustotu i velikost jednotlivých temperačních sekcí a celkovou mechanickou pevnost částí, ve kterých jsou umístěny. Bylo snahou dodržet minimální vzdálenost os vrтанých kanálů od povrchu tvarových vložek v rámci 1,5 násobku průměru daného kanálu a zároveň jejich polohu a rozmístění s ohledem na výrobní hledisko tak, aby byla věrně kopírována kontura vyráběného dílu.



Obr. 58. Vizualizace geometrie kanálů pravého a levého temperačního okruhu.

Typ temperačního média byl volen na základě zpracovatelských požadavků vstřikovaného materiálu, kde je potřeba zajistit temperaci povrchu dutiny vstřikovací formy na teplotu 115 °C. Z tohoto důvodu je omezeno využití vody v pozici temperačního média, u kterého by byl přesažen bod varu (100 °C v okruhu s atmosférických tlakem) a tím snížena efektivita temperace. Z tohoto důvodu bylo zvoleno olejové temperační medium, které lze využít i v okruzích, ve kterých je vyžadována temperační teplota vyšší než 100 °C. Oproti vodě je olej více viskózní kapalinou (tedy je nutný vyšší tlak v okruhu) s nižším součinitelem přestupu tepla.

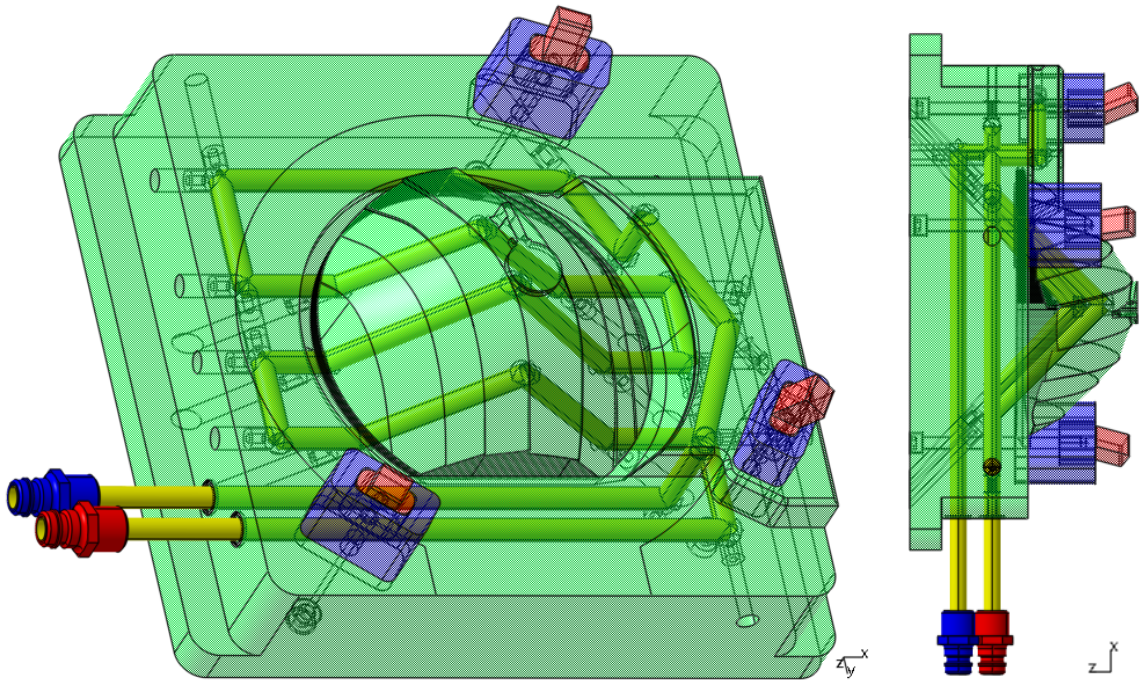
Temperační médium je vedeno do temperačního okruhu soustavou nátrubků, kterými je zajištěno těsné a bezpečné spojení mezi přívodní hadicí a temperačním systémem formy. V tomto případě bylo použito nátrubků se zpětnou klapkou, kterou je zamezeno úniku kapaliny po odpojení jednotlivých hadic. Temperační okruh je tvořen vrtanými kanály skrze tvarovou desku k tvarové vložce, těsnost spojení mezi těmito elementy je zajištěna pomocí těsnícího pryžového O-kroužku nebo pásku, který je uložen do vybrání v tvarové vložce. Vybrání je možné zhotovit i do tvarové desky resp. opěrné desky, která může být vyrobena z lépe obrobitelného materiálu nežli tvarová vložka. Nevýhodou tohoto řešení je horší možnost přístupnosti nástroje pro vytvoření takového vybrání. Soustava temperačních kanálů v tvarových vložkách je opatřena vhodným rozmístěním vnitřních ucpávek (dvě kuželové plochy zajišťující po závitu do sebe – kleština) tak, aby byla zajištěna požadovaná geometrii průtoku. Vnějších ucpávek zde nebylo použito.

Umístění nátrubků pro výstup temperačního média bylo kontrolováno vzhledem k volbě vstřikovacího stroje (prostor mezi sloupky 720 × 720 mm) tak, aby nedošlo ke kolizi hadic s temperačním médiem a sloupků vstřikovacího stroje. Orientace celého temperačního systému a z toho vyplývající poloha přívodních a odvodních hadic pro temperační médium, byla volena jako horizontální ústící na bočních stranách formy.

11.8.1 Temperační systém pravé strany formy

Systém temperace pravé strany formy je tvořen vrtanými kanály kruhového průřezu s průměrem 8 mm. Převážná část okruhu je položena z geometrického hlediska do jedné roviny rovnoběžné s dělicí rovinou. Zjednodušení mohlo být využito s ohledem na tvar vstřikovaného dílu, aniž by tím výrazně utrpěla účinnost temperační okruhů a homogenita teplotního pole vstřikovací formy. Pro dostatečné ochlazení vyduté části dílu bylo využito kanálů, které byly vrtány pod různými úhly k hlavní temperační rovině. Temperace vnější strany

obvodového lemu byla realizována opět pod úhlem vrtanými kanály, jejichž osy byla ustanoveny do přesazené roviny rovnoběžné s hlavní temperační rovinou.



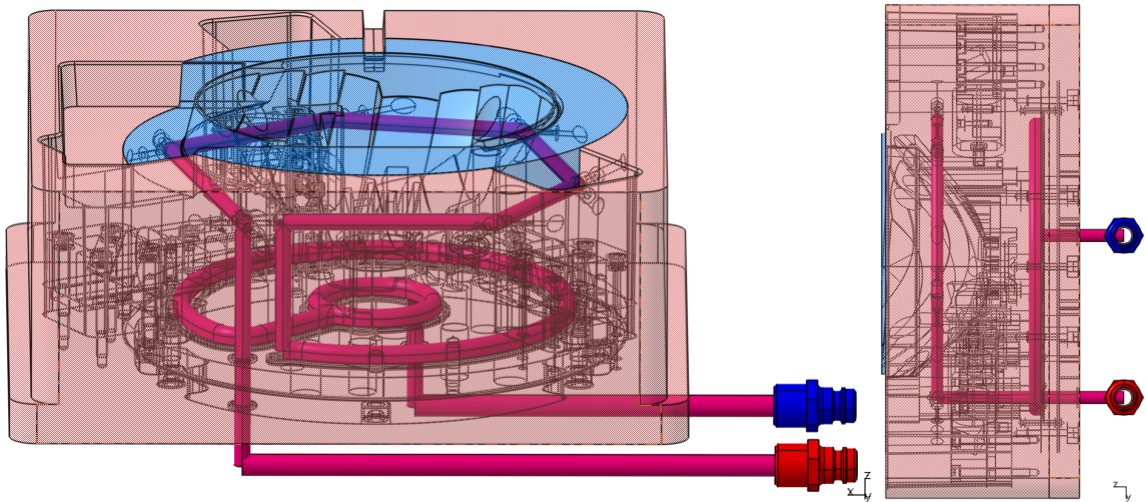
Obr. 59. Temperační systém pravé tvarové vložky, červeně označený nátrubek představuje vstupní kanál, modře označený nátrubek kanál výstupní.

11.8.2 Temperační systém levé strany formy

V případě temperačního systému levé strany formy je nutno brát do úvahy nutnou koexistenci temperačního okruhu a vyhazovacího systému tak, aby zde nenastala kolize. Temperační kanály byly vedeny v dostatečné vzdálenosti od děr pro jednotlivé vyhazovače při stálém zajištění dostatečné pevnosti a tuhosti tvarové vložky. Z důvodu byla do značné míry omezena možná geometrickou složitost temperačního okruhu, který zde lze rozdělit do tří rovin.

Temperační rovina, která je umístěna nejbližší dělicí roviny je tvořena šesti pod úhly vrtanými kanály kruhového průřezu s průměrem 6 mm, tak je zajištěna temperace horní a střední části dílu. Mezilehlá temperační rovina je vytvořena v přídatné části s průřezem kanálů ve tvaru písmene U a průměrem vepsané kružnice 6 mm. Po vstupu temperačního média do vnitřní kruhové části této temperační roviny je jeho objemový tok rozdělen na dva proudy poloviční velikosti nominální hodnoty, které jsou následně opět spojeny v protilehlém bodě. Touto rovinou je obstarána temperace spodní části dílu. Nejevzdálenější temperační rovinou od dělicí roviny je zajištěn pouze přívod a odvod temperačního média

z okruhu a je tvořena vrtanými kanály kruhového průřezu průměru 8 mm. Propojovací kanály (6 mm) jednotlivých temperačních rovin jsou vrtány v ose z.



Obr. 60. Temperační systém levé tvarové vložky, červeně označený nátrubek představuje vstupní kanál, modře označený nátrubek kanál výstupní.

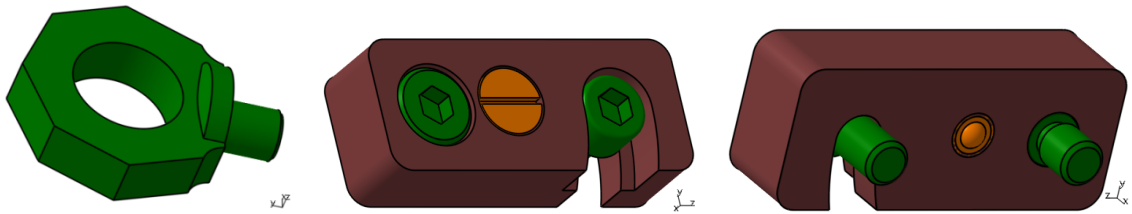
11.9 Odvzdušňovací systém

Tvarová dutina je po uzavření vstřikovací formy vyplněna vzduchem. Po vstříknutí polymerní taveniny je tento plyn velmi rychle komprimován a v případě, že nemá možnost uniknout nastane jeho ohřev na vysokou teplotu. Vlivem tohoto efektu může být poškozen výsledný výrobek formou opálených míst nebo nedotečením periferních částí. Předpokladem konstrukčního návrhu vstřikovací formy je, že unik uzavřeného vzduchu z dutiny formy je podpořen vůlemi mezi jednotlivými vyhazovači, jádry a tvarovou částí nebo v dělicí rovině. Pokud by tento předpoklad během provozu vstřikovací formy nebyl naplněn, bylo by následně nutné zajistit dodatečné zhotovení odvzdušňovacích kanálů vhodného rozměru a umístění.

11.10 Transportní a zabezpečovací systém vstřikovací formy

Těleso vstřikovací formy bylo vybaveno dvěma závěsnými oky pro zvýšení manipulační schopnosti. Oka v podobě normálí s průměrem závitové části odpovídající závit M16 a únosností 4000 kg (axiálně) resp. 1000 kg (radiálně), byla umístěna do středu horní strany (rovina xz) obou upínacích desek. Velikost a tedy únosnost těchto elementů, byla volena na základě přibližné hmotnosti vstřikovací formy, která byla vypočítána jako aproximace monolitickým kvádrem o rozměrech (x, y, z) 625, 665 a 526 mm s hodnotou hustoty oceli

($7860 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$), a stanovena na hodnotu 1720 kg. V tomto odhadu je tedy zahrnuta i určitá míra bezpečnosti.

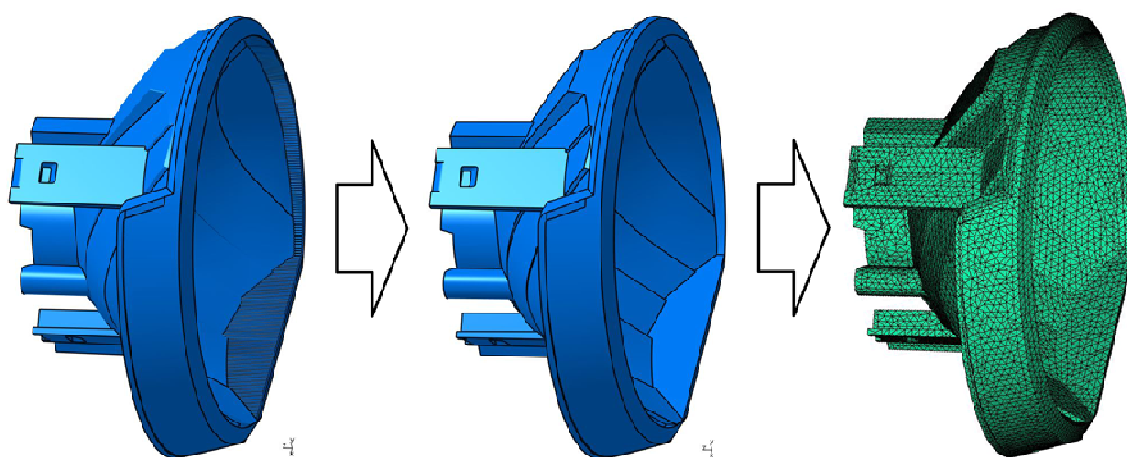


Obr. 61. Závěsné oko a zámek dělicí roviny vstřikovací formy.

Zabezpečení proti otevření vstřikovací formy v dělicích rovině během transportu a nebo zamezení možnému namáhání vodících čepů na ohyb bylo zajištěno pomocí čtveřice zámků na otočném čepu (normálie). Umístěny byly na bočních stranách formy (rovina yz), vždy po dvojicích.

12 TOKOVÉ ANALÝZY

K ověření správnosti návrhu vstřikovací formy z hlediska zpracování polymeru byl použit simulační software Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013, do kterého byl proveden import dat. Jednalo se zejména o model hodnoceného dílu a osy jednotlivých systému teploty a vtoku, které byly s výhodou vymodelovány v softwaru Catia. Následně byl povrch těchto elementů pokryt sítí, která byla manuálně opravena. V rámci zamezení vzniku nekvalitní trojúhelníkové sítě byl model zbaven výrazných rádiusů (do 0,5 mm) a vroubkování v oblasti obvodu.



Obr. 62. Postup přípravy modelu dílu: (zleva) model dílu, model dílu bez uvažovaných rádiusů a model s vytvořenou sítí.

Byly vypočítány analýzy plnění, dotlaku, chlazení a deformace. Vzhledem k symetrii řešení a vyšší názornosti jsou v obrazových materiálech této kapitoly, vyobrazeny pouze výsledky z jedné dutiny vstřikovací formy. Během výpočtu nebyla symetrie uvažována.

Tab. 6. Přehled nastavení základních parametrů finální analýzy č. 13.

Název nastavení	Parametr	Jednotka	Poznámka
Vstřikovaný materiál	DSM Stanyl TQ261F5	-	PA 46 s 25 % SV
Vstřikovací stroj	Generic	-	Uzav. síla 3000 kN
Teplota taveniny	315	°C	-
Teplota povrchu vstřikovací formy	115	°C	-
Vyhazovací teplota	255	°C	-
Temparační médium	Olej	-	-
Teplota temperačního média	110	°C	-
Rychlost průtoku temperačního média	8	l · min ⁻¹	-
Přepnutí na dotlak	99,8	%	Zaplnění dutiny
Doba dotlaku	8	s	-
Velikost dotlaku	90	%	Vstřikovacího tlaku

Celkem bylo provedeno 18 experimentálních analýz s celkovým časem zpracování 406 hodin, ze kterých byla vybraná optimální varianta č. 13. Veškerý přehled, včetně doplňujících informací, byl umístěn do přílohy.

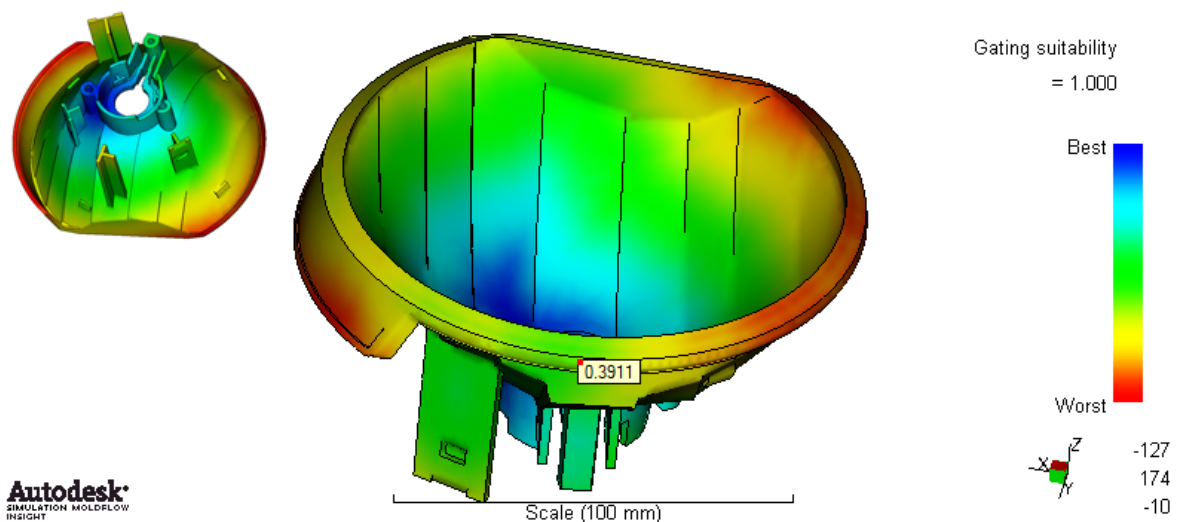
Hustota a poměr stran trojúhelníků konečné prvkové sítě jsou jedny z parametrů, kterými je určeno, zdali průběh výpočtu bude konvergovat, tj. hodnota difference mezi jednotlivými iteracemi výpočtu je klesajícího trendu, nebo naopak divergovat. V neposlední řadě je také hustota sítě v souvislosti s potřebným procesorový časem, který je nutný k výpočtu s analogií, čím hustší konečné prvková síť, tím větší nutný počet výpočtu a tedy delší doba zpracování. Jednotlivými body sítě je určena poloha v rámci modelu, kde byly výpočtem nelineární diferenciální rovnice (popisující chování, např. taveniny) aproximovány funkcemi algebraickými. Z předchozího tedy plyne, že hodnoty žádaných veličin mimo body sítě nejsou exaktní ale byly interpolovány.

12.1 Určení vtokového ústí (Gate Location)

Analýzy umístěné v této sekci nejsou závislé na násobnosti formy ani vtokovém a tepečním systému. Využívány jsou především k prvotnímu odhadu tokového chování taveniny a hodnocení vhodností vtokového ústí.

12.1.1 Vhodnost umístění vtokového ústí (Gating Suitability)

Výsledkem tohoto typu analýzy je zhodnocení vhodnosti umístění vtokového ústí na dílu, z hlediska nejlepšího vyplnění dutiny. Modrou barvou jsou vyobrazeny místa nejvhodnější, červenou naopak místa nejméně vhodná.

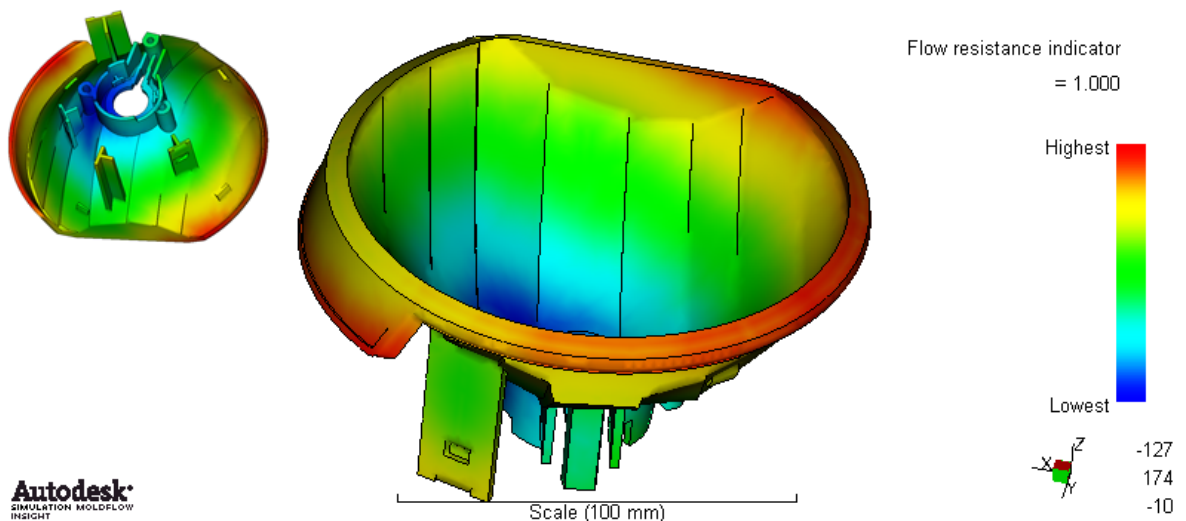


Obr. 63. Výsledek analýzy vhodnosti umístění vtokového ústí.

Za nejvhodnější místo byla stanovena oblast středu dílu, kde jsou ovšem umístěny funkční plochy. Proto bylo zvoleno místo jiné a ústí vtoku zasazeno do obvodu dílu v hlavní dělicí rovině, s indexem vhodnosti 39,11 %. Vzhledem k geometrii této plochy bylo vhodné užít krátkého filmového ústí, jehož stopa nebude po odstranění značně viditelná.

12.1.2 Odpor polymerní taveniny vůči toku (Flow Resistance Indicator)

V rámci výsledků této analýzy je zobrazen odpor taveniny vůči toku při vyplňování dutiny formy. Červenou barvou jsou označeny oblasti s největší hodnotou odporu proti toku, modře zbarvené oblasti s odporem sníženým. Z výsledku je názorné, že oblasti v nichž je indikován vysoký odpor vůči toku jsou soustředěny v okolí obvodu dílu, kde je snížena tloušťka stěny. Naopak v místech dostatečné šířky je tavenina distribuována s odporem menším.



Obr. 64. Výsledek analýzy zhodnocení odporu taveniny vůči toku, bez ohledu na umístění vtokového ústí.

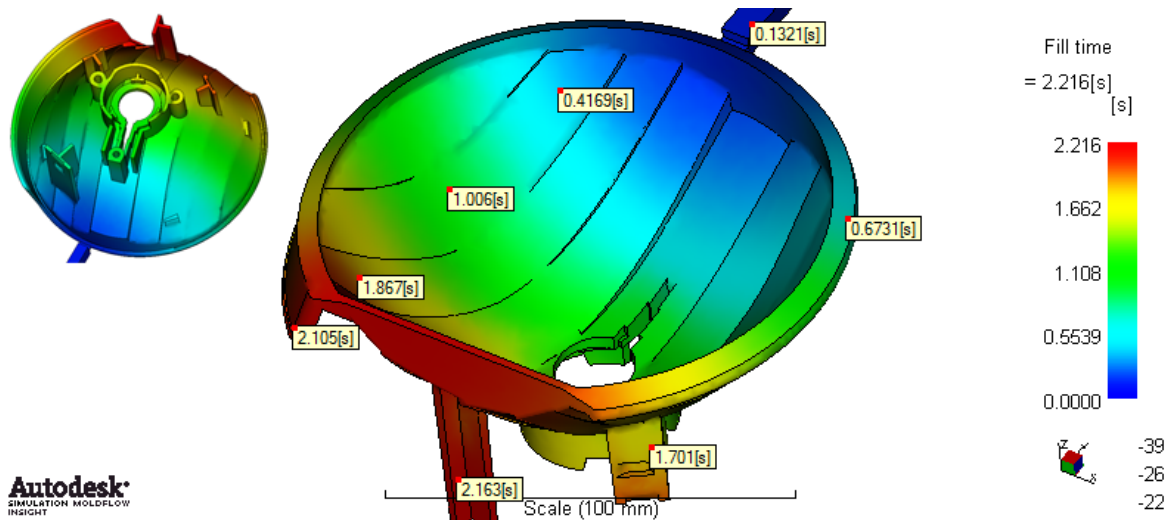
12.2 Plnění a dotlak (Flow)

Typem analýz umístěných v této sekci je hodnocen průběh plnění dutiny vstřikovací formy polymerní taveninou s následným působení fáze dotlaku.

12.2.1 Čas plnění (Fill Time)

Ve výsledku je zobrazena barevná mapa průběhu plnění dutiny formy a studeného rozvodného kanálu v čase. Důležitým prvkem, který je třeba splnit je podmínka rovnoměrného vyplnění všech dutin soustavy se shodným koncovým časem, tzv. vyvážený vtokový sys-

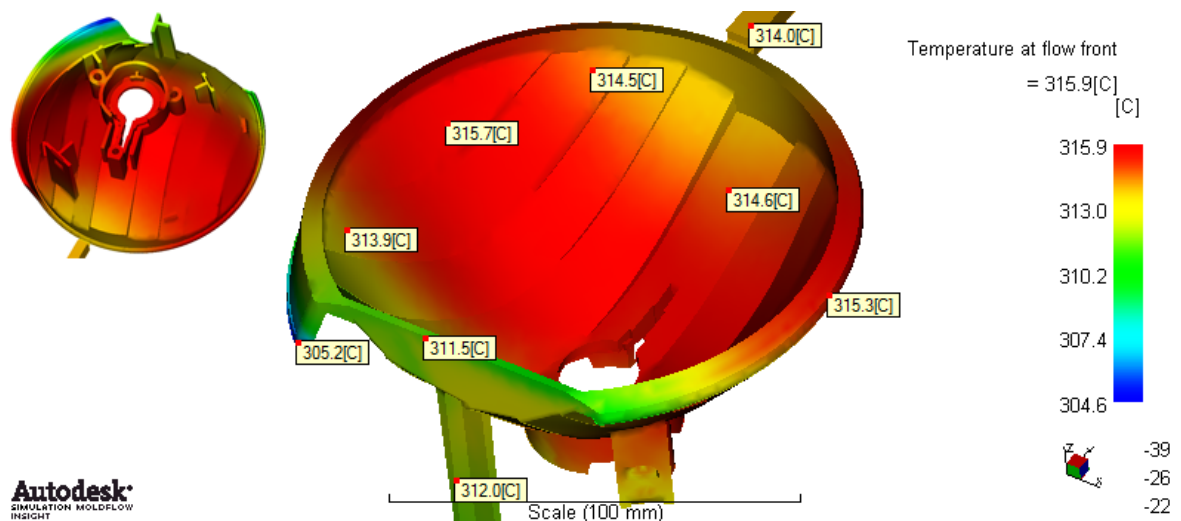
tém. V tomto případě je tento požadavek splněn vlivem symetrie plnicí soustavy a topologie jednotlivých dutin. Čas vyplnění všech dutin formy byl výpočtem stanoven na hodnotu 2,216 s od počátku fáze plnění. Stav zaplnění dutin je úplný bez nedotečených částí a lze tedy usoudit, že rozměry rozvodného kanálu a vtokového ústí z hlediska průtočného množství byly voleny vhodně.



Obr. 65. Výsledek analýzy plnění dutin formy v závislosti na čase.

12.2.2 Teplota na čele toku taveniny (Temperature at Flow Front)

Výstupem této analýzy je mapa hodnot teplot čela taveniny v jednotlivých místech dutiny formy během fáze plnění dutiny formy.



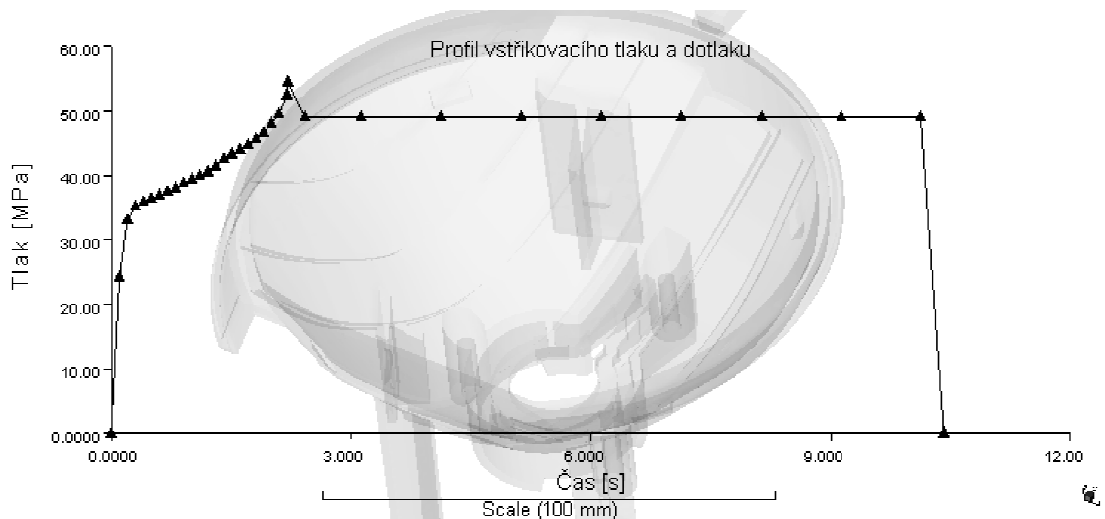
Obr. 66. Výsledek analýzy teploty na čele toku taveniny.

Pokud by tyto teploty byly pro daný polymer příliš vysoké, např. vlivem nadměrné disipace, mohl by nastat jev degradace a výsledný díl by byl znehodnocen optickými a pach-

vými vadami. V opačném případě, nadměrného ochlazení taveniny, by nemusela nastat dostatečná difuze polymerních řetězců v čelech taveniny a v daném místě výsledného dílu by mohla být vykázána snížená mechanická pevnost nebo stoková čára. V tomto případě je během plnění dutiny formy zaznamenán pokles vstřikovací teploty čela taveniny (315 °C) až na minimální teplotu (305 °C) v periferní částí dílu oproti vtoku. Ve střední části dílu je vykázáno nepatrné zvýšení teploty, zřejmě vlivem vysoké rychlosti plnění (disipace tepla). Tento efekt nenastal v případě nastavení doby plnění na 3 s, které ovšem bylo doprovázené vyšším poklesem teplot čela taveniny až na 290 °C.

12.2.3 Tlak v místě vtoku (Pressure at Injection Location: XY plot)

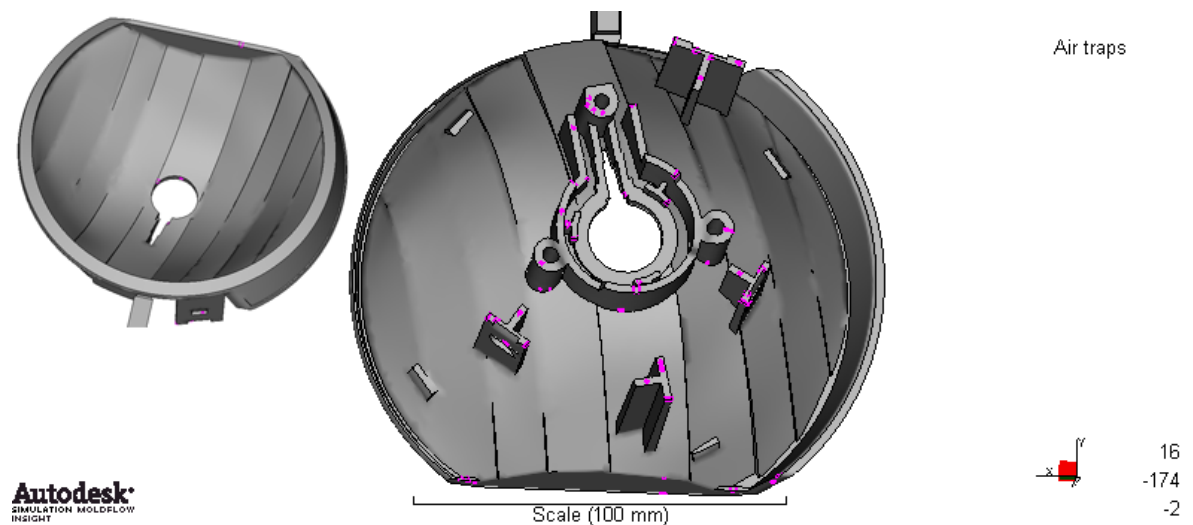
Výsledkem této analýzy je vykreslen průběh vstřikovacího tlaku. Z výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty tlaku je dosaženo v čase 2,21 s (naplněno 99,8 % objemu dutiny) a to hodnoty 54,51 MPa. Poté následuje 8 s fáze dotlaku, která byla nastavena na 90 % nominální hodnoty vstřikovacího tlaku. V rámci experimentu byla také hodnocena 5 s doba dotlaku. V tomto případě uvnitř dílu vzniklo výrazně vyšší smrštění, zejména v oblasti vtoku a okolí (zvýšení z 3,5 % na 8 %). Dále doba dotlaku o hodnotě 12 s, zde již ale nebyl pozorován žádný efekt v oblasti smrštění nebo deformace. Snížením hodnoty velikosti dotlaku na 80 % nominální hodnoty byly nepatrně zvýšeny hodnoty konečného smrštění. Klesající trend v závěrečné části tlakového průběhu je pozvolný vlivem postupného tuhnutí vtokový ústí.



Obr. 67. Výsledek analýzy průběhu tlaku v dutině formy v závislosti na čase.

12.2.4 Vzduchové kapsy (Air Traps)

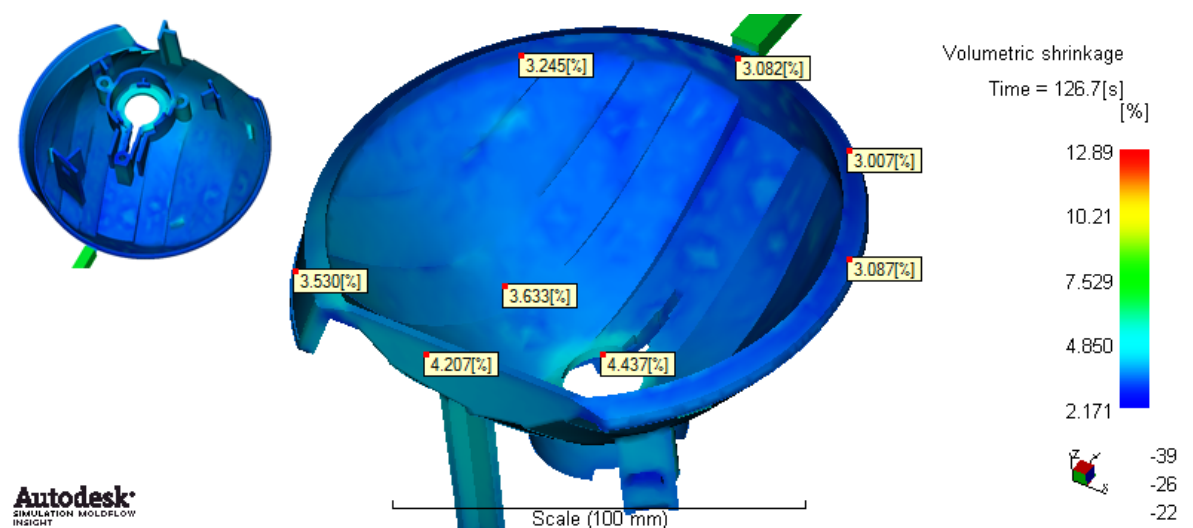
Výsledky této analýzy jsou vhodné k predikci míst uvnitř dutiny formy, kde bude taveninou uzavírán vzduch a může tak nastat znehodnocení povrchu výrobku. Z výsledku lze stanovit, že vzduch bude uzavírán v oblastech, které jsou taveninou vyplněny naposledy. Vzduchové nahromadění je situováno na konce pilonů v zadní části dílu a částečně v oblasti dělicí roviny. Oblasti takto označené byly osazeny vyhazovací kolíky, okolo kterých je vlivem vůle umožněno vzduchu uniknout.



Obr. 68. Výsledek analýzy predikce vzniku oblastí vzduchových kapes.

12.2.5 Objemové smrštění materiálu dílu (Volumetric Shrinkage)

Z výsledků této analýzy je možné získat představu o distribuci hodnot objemového smrštění v těle dílu.

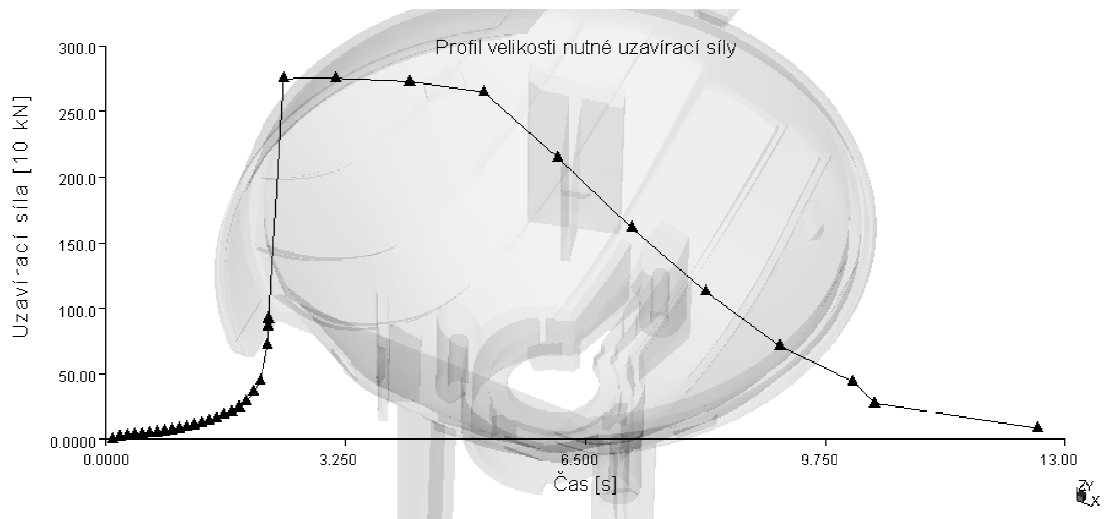


Obr. 69. Výsledek analýzy objemové smrštění materiálu dílu.

Výrobce vstříkovaného materiálu určené smrštění je stanoveno v rozmezí 0,3 až 1,8 %. Tyto hodnoty byly překročeny v řadě oblastí a při konstrukci zanesenou korekcí by tak nebylo možné tento rozdíl pokrýt. Nižších hodnot objemové kontrakce by mohlo být dosaženo např. zvětšením vtokového ústí a tím zvýšení účinnosti dotlakové fáze. V experimentálních simulačních variantách toto bylo provedeno v několika kombinacích (zvětšení rozměrů vtokového ústí i rozvodného kanálu v rámci 1 mm), ovšem bez většího účinku. Bylo by tedy nutné provést značnější rozměrové změny, s následkem v podobě větší stopy po vtokovém ústí na dílu.

12.2.6 Uzavírací síla (Clamp Force: XY plot)

Z výsledků analýzy lze určit, že maximální hodnota uzavírací síly (2741 kN) je vyžadována v čase 3,13 s od počátku plnění a uzavírací jednotka vstříkovacího stroje je tak v tuto chvíli nejvíce namáhána. Uzavírací jednotkou zvoleného vstříkovacího stroje je vyvinuta maximální uzavírací síla až 3200 kN a tak je vyvozeno bezpečné uzavření dělicí roviny vstříkovací formy po celou dobu plnění a dotlaku.



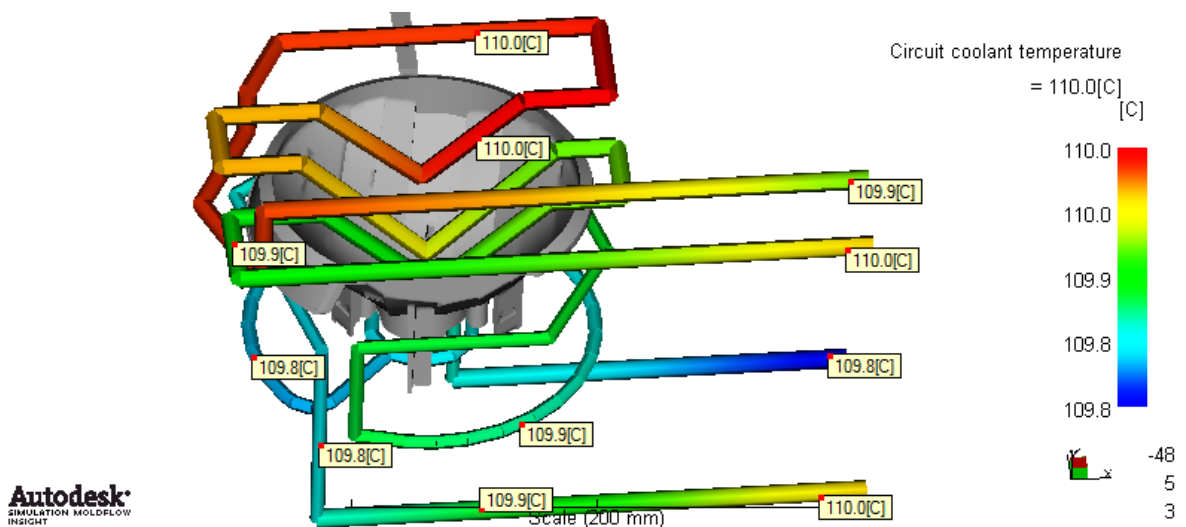
Obr. 70. Výsledek analýzy průběhu velikosti nutné uzavírací síly v závislosti na čase.

12.3 Temperace (Cool)

Analýza rozložení teplotního pole uvnitř formy v oblasti jednotlivých dutin je velice důležitou oblastí. Na základě takto získaného výstupu lze navrhnout optimalizovaný temperační okruh vhodné topologie a tak zajistit rovnoměrné tuhnutí jednotlivých dílů s minimalizací vzniku reziduálních napětí.

12.3.1 Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature)

Teplota teplosměnného média, v tomto případě oleje, byla zvolena podle vstřikovaného materiálu a jeho požadavku na teplotu povrchu tvarové dutiny vstřikovací (115 °C) formy. Na vstupu do temperačního okruhu byla stanovena na hodnotu 110 °C a z výsledků analýzy je zřejmé, že po délce kanálu není zaznamenána její výraznější oscilace. Rozdíl mezi vstupní a výstupní hodnotou teploty temperačního média by neměl být větší než 3 °C, což je v tomto případě splněno. Pokud by se tak nestalo bylo by nutné změnit stávající geometrii temperačních kanálů, tedy učinit zásah do hustoty jejich rozložení, průměru nebo vzdálenosti od dutiny formy.

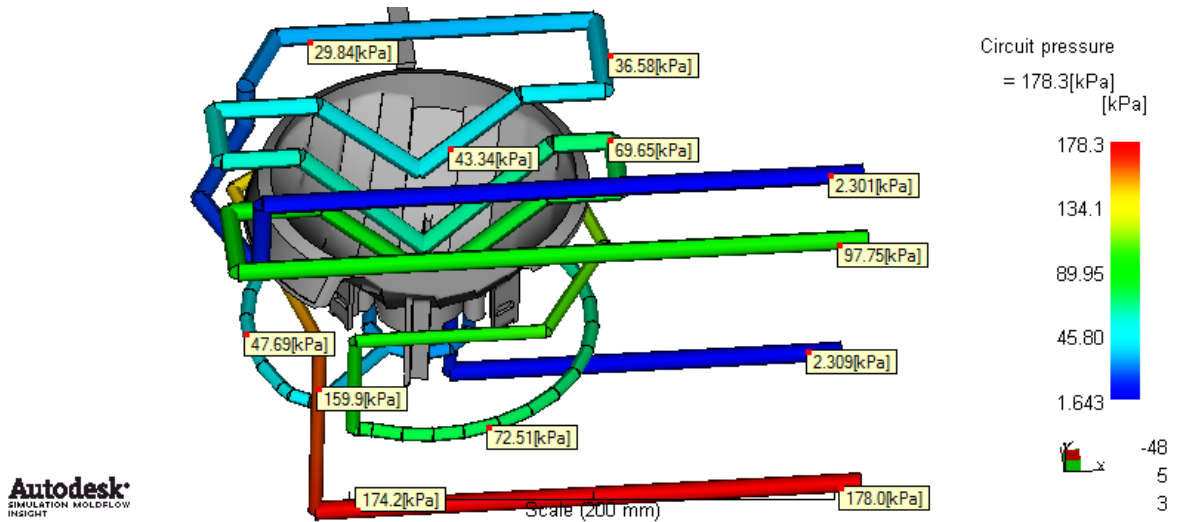


Obr. 71. Výsledek analýzy teploty temperačního média.

12.3.2 Tlakový spád v temperačním okruhu (Circuit Pressure)

V rámci této analýzy je hodnoceno rozložení velikosti tlaku temperačního média po délce temperačního okruhu. Vstupním parametrem je zde rychlost průtoku, která byla stanovena na $8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Z výsledku je patrné, že hodnota tlaku ve vstupní části temperačních okruhů je 178, resp. 98 kPa a vlivem přítomnosti hydraulických odporů (např. pravé úhly, malý průměr kanálu) po délce kanálu je snižován až na výstupní hodnotu 2 kPa. Tato hodnota je

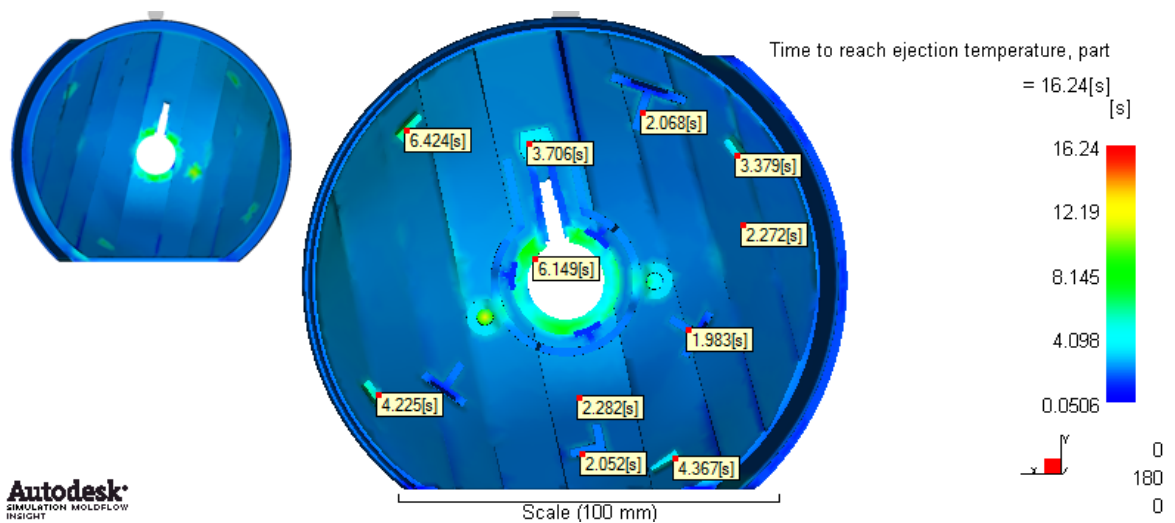
akceptovatelná, protože stále existuje tlakový spád s nenulovou výstupní hodnotou a tak je zajištěn průtok temperačního media temperační doménou. Pro zvýšení tlaku ve výstupní části by byla potřeba zvýšit tlak již v části vstupní.



Obr. 72. Výsledek analýzy tlakového spádu po délce temperačního kanálu.

12.3.3 Čas vyhození (Time to Reach Ejection Temperature)

Zhodnocením výsledků této analýzy lze stanovit po jaké době lze díl bezpečně vyhodit z dutiny formy. Tento údaj je velice důležitý a pokud by nebyl dodržen, mohla by v krajním případě nastat až penetrace vyhazovacích kolíků skrze tělo dílu. V opačném případě nastavení příliš dlouhé prodlevy, by nebylo dosaženo požadované efektivity výroby. Proto je nutné zvolit kompromis mezi hodnotami jednotlivých časů.

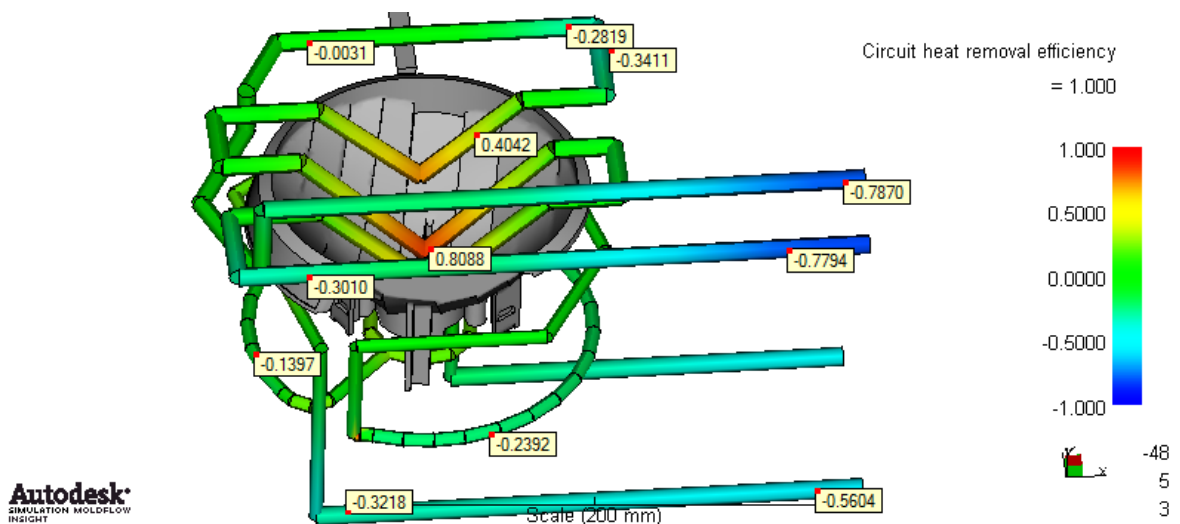


Obr. 73. Výsledek analýzy distribuce hodnot časového intervalu pro dosažení vyhazovací teploty po povrchu dílu.

Působení vyhazovací kolíků je vyvozeno v určitých diskrétních oblastech a údaje z těchto oblastí jsou pro stanovení času vyhození směrodatné. V poli působnosti válcových a trubkových vyhazovacích kolíků je povrch dílu zchlazen na dostatečnou teplotu po 6 s, v oblastech prizmatických vyhazovacích kolíků po uplynutí již 2 s. Studený rozvodný kanál je řádně ochlazen po 14 s a odformován společně s dvojicí dílů, které spojuje. Tímto faktem je ovlivněna mezní čas pro počátek procesu vyhození. Místa na dílu, která nebyla v okamžiku vyhození dostatečně ochlazená se dochladí v zásobníku.

12.3.4 Účinnost temperačního systému (Circuit Heat Removal Efficiency)

Výsledek této analýzy je zaměřen na zhodnocení geometrii temperačního okruhu z hlediska jeho účinnosti při temperaci dutiny formy. Oblasti zvýrazněné červenou barvou jsou temperačním médiem ochlazovány, modře označené oblasti naopak vyhřívány.



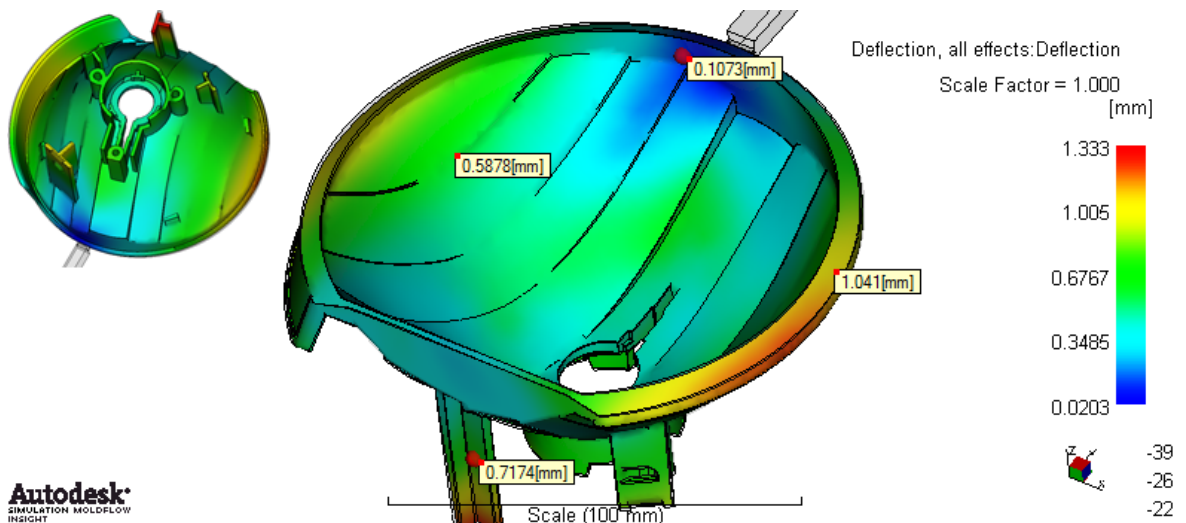
Obr. 74. Výsledky analýzy účinnosti temperačního systému.

Lze tedy konstatovat, že v oblastech blízkých velkým objemům akumulované taveniny nastane ohřev temperačního média, protože jeho teplota (110 °C) je výrazně nižší než teplota vstříkované taveniny (315 °C). V případě geometricky optimálně navrženého temperačního systému, by byl index účinnosti rovnoměrně rozložen v okolí jednotlivých dutin formy. Tento fakt je mnohdy kolizní s možnými výrobními postupy tvarových prvků a jinými nutnými systémy vstříkovací formy.

12.4 Deformace (Warp)

12.4.1 Zprohýbání dílu (Deflection, All Effects)

V této analýze jsou zahrnuty deformace od všech působících vlivů z oblasti smrštění, chlazení nebo orientace. Z výsledku je patrné celkové rozložení deformace po těle dílu. Místa s indikovanou největší odchylkou (až 1,3 mm) jsou soustředěna kolem obvodu dílu a v oblasti konce nejdelšího pilonu. S vysokou hodnotou deformací by nemusela být zajištěna smontovatelnost dílu s jeho protikusem do finální podoby produktu. Řešením by zde mohlo být větší vtokové ústí, kterým by bylo umožněno účinnější dotlaku, optimalizace geometrie rozložení temperačních kanálů nebo změna rozměrů dutiny formy tak, aby se rozměry dílu nejmenší možnou měrou lišily od rozměru 3D modelu.



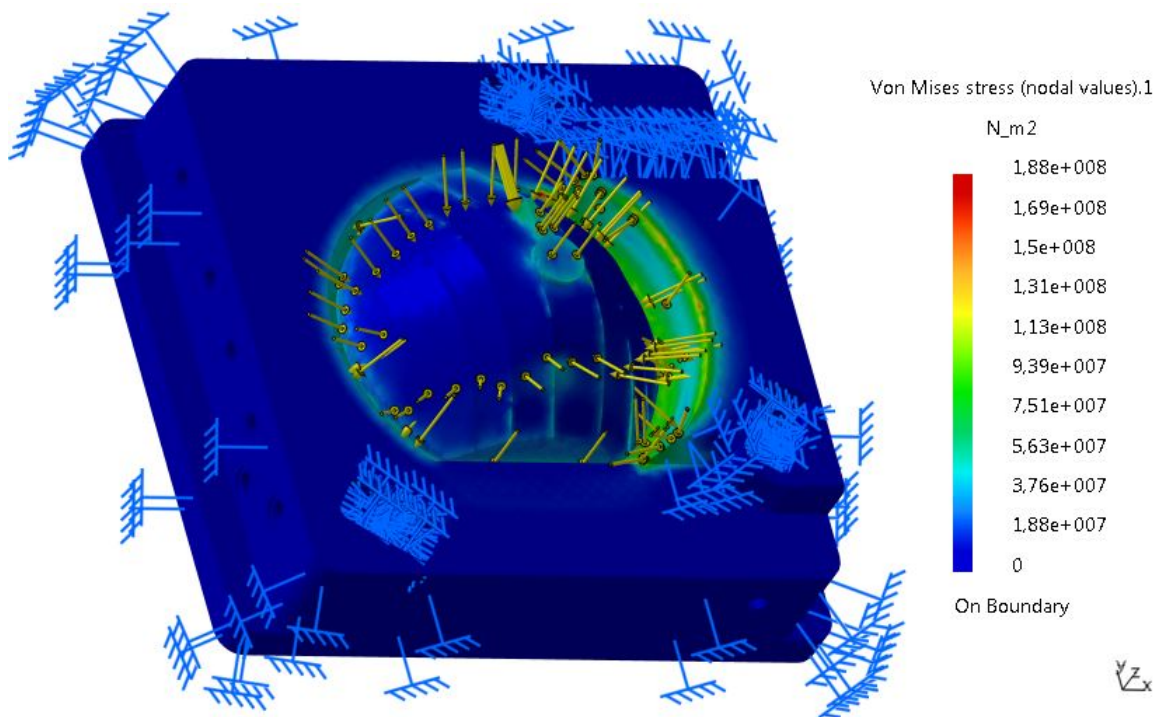
Obr. 75. Výsledky analýzy deformace dílu.

13 MECHANICKÁ ANALÝZA

Polymerní tavenina je formována v tvarové dutině, která je složena z tvarových vložek, jader, popř. vyhazovačů. Touto expozicí je vytvořeno značné mechanické, chemické a tepelné zatížení vůči materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. V praxi je proto nutné ověřit vhodnost konstrukce pro dané procesní podmínky. Z tohoto důvodu byla provedena mechanická analýza působení vstřikovacího tlaku na pravou a levou tvarovou vložku. Mezní hodnota vstřikovacího tlaku uvnitř dutiny formy byla zjištěna simulací procesních podmínek programem Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013 a stanovena na 54,51 MPa (okamžik přepnutí vstřikovacího stroje do režimu dotlaku).

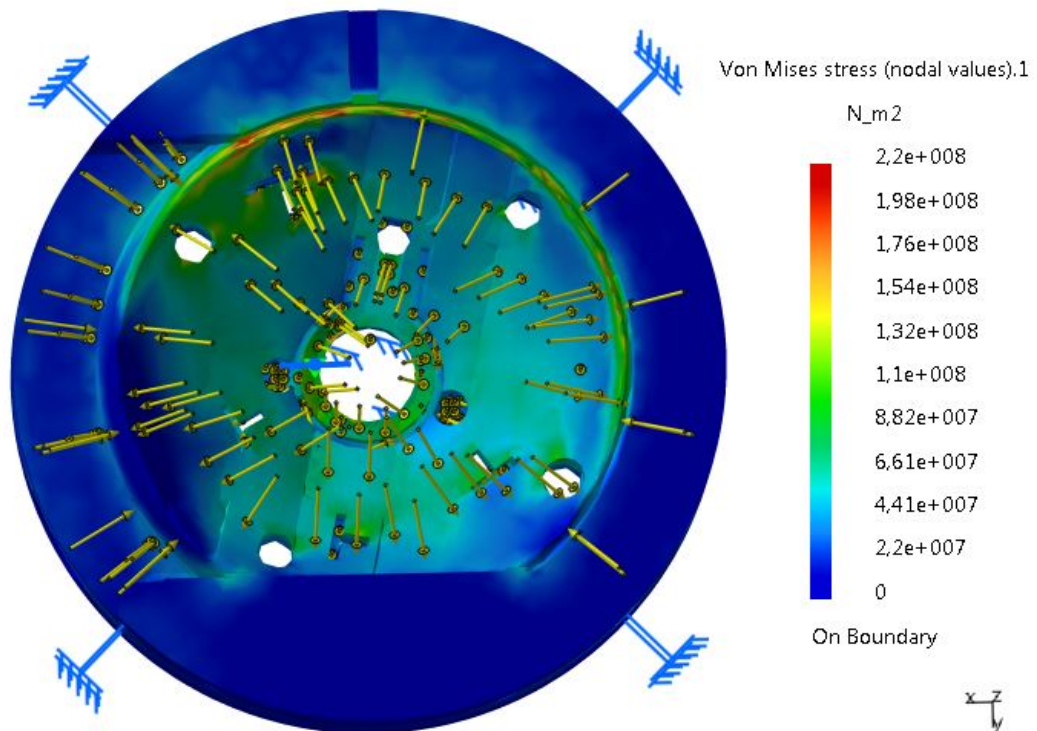
Mechanická analýza byla provedena v programu Catia a příslušném modulu Generative Structural Analysis. Tvarovým vložkám byly nejdříve přiřazeny materiálové parametry (ocel) a v následujícím kroku zavedeny vazby do míst, kde jsou fixovány tvarovou a opěrnou deskou – aproximováno nulovým posuvem a natočením.

Na jednotlivé povrchy, které jsou vystaveny polymerní tavenině bylo zavedeno tlakové napětí nominální hodnoty 55 MPa. Po provedení výpočtu bylo v materiálu tvarových vložek vykázáno vnitřní napětí (Von Mises) v maximální hodnotě 188 MPa (mezní posuv 0,02 mm) pro případ levé tvarové vložky a 220 MPa (mezní posuv 0,03 mm) pro případ cylindrické části pravé tvarové vložky.



Obr. 76. Výsledek deformační analýzy pravé tvarové vložky.

Získané hodnoty jsou výrazně nižší než uváděná pevnost v tlaku pro běžné konstrukční oceli. Materiál tvarových vložek tedy po mechanické stránce vlivem zatížení vstřikovacím tlakem vyhovuje.



Obr. 77. Výsledek deformační analýzy levé tvarové vložky.

Pozn.: Analýzou není postihnuta změna pevnosti materiálu vlivem teplotního pole, které je indukováno vstřikovaným materiálem a temperačním médiem.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem diplomové práce bylo vytvořit vhodný konstrukční návrh čtyřnásobné vstřikovací formy pro plastový díl (PA 4.6 GF 25%). Při konstrukci bylo záměrně využito řady normálí od firmy Hasco s předpokladem pro dobrou návaznost a možnou budoucí vzájemnou vyměnitelnost jednotlivých elementů.

Za účelem vytvoření tvarových vložek vstřikovací formy byla v prvním kroku provedena rozměrová a tvarová softwarová komparace naskenovaného 3D modelu dílu, s konvenčně vytvořeným 3D modelem v CAD prostředí, jehož rozměry byly získány pomocí posuvného měřidla. Na základě výsledku bylo konstatováno, že přesnost konvenčně vytvořeného dílu, s přihlédnutím k jeho tvarové komplexnosti, je v rámci této práce dostačující pro ideový návrh tvarové dutiny vstřikovací formy. V praxi by bylo nutné funkční plochy (zejména v oblasti fazet) zatížené odchylkou upravit tak, aby bylo dosaženo lepší aproximace s plochami modelu zdigitalizovaného.

V následné konstrukční části byla vytvořena vstřikovací forma, jejíž parametry byly voleny tak, aby byla zaručena kompatibilita s voleným vstřikovacím strojem. Zejména se jednalo o vnější rozměry formy, velikost středícího kroužku a splnění nutných procesních parametrů. Volba byla provedena na základě předběžného výpočtu.

Vzhledem k tvaru dílu bylo zvoleno zaformování ve více dělicích rovinách. Hlavní dělicí rovina je odformována prostým otevřením formy, odformování trojice vedlejších dělicích rovin bylo řešeno s využitím posuvových kostek, tvarových jader a lomených kolíků. V prvotním návrhu bylo zvažováno využití šikmých vyhazovačů, toto řešení bylo následně zamítnuto z důvodů nedostatečných prostorových dispozic.

Typ materiálu tvarových vložek, tedy elementů jimiž je tvořena tvarová dutina, byl volen se zřetelem na jejich přímou expozici polymerní tavenině. Byla zvolena nástrojová ocel 19552 s následnou chemickou a tepelnou úpravou pro zvýšení povrchové odolnosti. Vzhledem k objemové kontrakci vstřikovaného materiálu vlivem chlazení, byly rozměry tvarové dutiny patřičně zvětšeny o hodnotu smrštění a tak tento fenomén kompenzován.

Vtokový systém byl zvolen ve formě kombinace horkého a studeného vtoku s horkým rozvodným blokem a dvěma tryskami. Návrh byl založen na zhodnocení rozmístění jednotlivých tvarových dutin a možné úspoře materiálu v každém pracovním cyklu. Jednotlivé trysky byly vyvedeny do příslušného studeného rozvodného kanálu, kterým je polymerní

tavenina přes filmová vtoková ústí dodávána do dvou tvarových dutin. Tento typ ústí byl zvolen vzhledem k charakteru plochy, do které bylo zavedeno s ohledem na minimalizaci vtokových stop.

Systém temperace byl koncipován v podobě vrtaných kanálů a čtyř okruhů pro každou stranu vstřikovací formy. V případě levé tvarové vložky byl temperační kanál rozšířen v dělitelné rovině cylindrické části, vzhledem k nutnosti jeho koexistence s vyhazovacím systémem. Tak bylo zajištěno dostatečné a rovnoměrné teplotní pole uvnitř dutiny vstřikovací formy.

Pro proces vyhození jednotlivých výrobků a studeného rozvodného kanálu z levé tvarové vložky byl konstruován vyhazovací systém se soustavou válcových, prizmatických a trubkových vyhazovačů. Ty byly umístěny ve vhodné pozici a dostatečném počtu v dutině formy, tak aby bylo vyvozeno bezpečné a rovnoměrné vyhození. Zároveň tak byla plněna funkce odvodu dutiny formy, nepatrnou výrobní vůlí mezi jejich tělem a tvarovou vložkou. Pozice výrobku ve formě musela být navržena tak, aby jeho funkční a pohledové plochy nebyly poškozeny činností jednotlivých vyhazovačů.

V závěru konstrukční části byla horní strana vstřikovací formy vybavena úchytným zařízením pro bezpečnou manipulaci během procesu instalace na vstřikovací stroj.

Během návrhu, zejména temperačního a vtokového systému bylo využito podpory simulačního software pro zhodnocení vhodnosti jeho parametrů a případnou optimalizaci včetně analýz plnění, dotlaku, chlazení a deformace. Na základě těchto podmínek byly stanoveny procesní podmínky výroby a se znalostí vstřikovacího tlaku byla provedena mechanická analýza deformace vybraných tvarových částí.

ZÁVĚR

Záměrem této diplomové práce bylo navrhnout a provést konstrukci vhodné vstříkovací formy pro výrobu plastového dílu předního reflektoru nspecifikované značky automobilu, jehož digitální 3D model byl rozměrově kontrolován metodami reverzního inženýrství. Postupný návrh jednotlivých částí tělesa vstříkovací formy byla již od počátku prováděn s ohledem na zásady a pravidla správné konstrukce.

V prvním bloku teoretické části práce byla popsána problematika reverzního inženýrství doplněná zevrubným přehledem typů v dnešní době používaných skenerů s návazností na obecnou problematiku konstrukce vstříkovacích forem a výrobního procesu vstříkován v bloku druhém. Poznatky, které byly získány během tvorby teoretické části byly následně aplikovány na část praktickou, kde bylo provedeno snímání reálného dílu pomocí optického skenovacího zařízení ATOS II Triplescan. Po opravě takto získaného 3D modelu byla provedena jeho rozměrová a tvarová komparace s manuálně vytvořeným CAD modelem.

Na základě CAD modelu následně proběhla konstrukce těla formy. Pro tento účel byl využit konstrukční program Catia V5R18 s propojením na Hasco elektronický katalog normálií. Digitální konstrukce tvarových, spojovacích a dalších elementů vstříkovací formy spolu s jejich kompletací do finální sestavy byla provedena kompletně ve 3D prostředí. Tato data byla následně využita jako podklad pro výrobu 2D výkresové dokumentace sestavy vstříkovací formy. Průběh jednotlivých konstrukčních řešení byl detailně popsán v příslušných kapitolách.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Monografie:

- [1] BEAUMONT, J. *Runner and gating design handbook*. 2nd ed. Munich, Germany: Hanser Publishers, 2007. 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3.
- [2] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů I. díl – Vstřikování termoplastů*. 2. vyd. - Brno: UNIPLAST, 1999. 134 s.
- [3] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů II. díl – Vstřikování termoplastů*. 1. vyd. - Brno: UNIPLAST, 1999. 214 s.
- [4] FERNANDES, K., RAJA, V. *Reverse Engineering an industrial perspective*. London: Springer, 2008. 242 s. ISBN 978-1-84628-855-5.
- [5] OSSWALD, T. A. *Injection molding handbook*. 2nd ed. Munich, Germany: Carl Hanser Publishers, 2008. 764 s. ISBN 978-3-446-40781-7.
- [6] PÖTSCH, G. *Injection molding: an introduction*. 2nd ed. Munich, Germany: Carl Hanser Publishers, 2008. 246 s. ISBN 978-3-446-40635-3.
- [7] ROSATO, D. V., ROSATO, D. V., ROSATO, M. G. *Injection Molding Handbook (3rd Edition)*. NYC, NY, USA: Springer - Verlag, 2000. 1485s. ISBN 978-0-7923-8619-3.
- [8] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. 2. vyd. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. 104 s. ISBN 80-7318-431-1.
- [9] SKARBEEK, W. *Computer Analysis of Images and Patterns*. Springer, 1 edition, 2001. 743 s. ISBN-13: 978-3540425137.
- [10] WANG, W. *Reverse Engineering : Technology of Reinvention*. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011. 311 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [11] *Uživatelská příručka ATOS II/II SO Hardware*, 2. vydání. 2008. 62 s.
- [12] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování plastů*. 1.vyd Praha: BEN – technická literatura, 2009. 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

Internetové zdroje:

- [13] *Arburg* [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupný z WWW < [http:// www.arburg.de](http://www.arburg.de) >.

- [14] BABJAK, Š. *Plánovanie reverzného inžinierstva v procese rýchleho vývoja výrobkov II*. [online]. 2006 [cit. 20013-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/9-2006/pdf/6264.pdf>>.
- [15] CAD.CZ: *Počítačová tomografie pro přesné měření, defektoskopii i reverzní inženýrství* [online]. [cit. 2013-01-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2114-pocitacova-tomografie-pro-presne-mereni-defektoskopii-i-reverzni-inzenyrstvi.html>>.
- [16] ČEPOVÁ, L., PETŘKOVSKÁ, L. *Legislativa ve strojírenské metrologie a přesné měření 3D ploch.. Ostarava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011. 125 s. ISBN 978-80- 248-2514-4*. [online]. [cit. 2013-01-21]. Dostupný z WWW: <http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf>.
- [17] DRÁPELA, M. *Rapid Prototyping and Reverse Engineering* [online]. [cit. 2013-01-25]. Dostupný z WWW: <<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZRI/RE.pdf>>.
- [18] DSM [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupný z WWW: <www.dsm.com/en_US/html/dep/stanyl.htm>.
- [19] DULEBA, B., GREŠKOVIČ, F. *Conformal cooling for plastics injection moulding. Košice: TUKL, 2011*. [online]. [cit. 2013-01-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.it-strojar.sk/articles/00016.pdf>>.
- [20] GOM [online]. [cit. 2013-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.gom.com>>.
- [21] HALAŠKA, P. *Digitální prototyp při vstřikování plastů II* [online]. [cit. 2013-01-16]. Dostupný z WWW: <http://www.smartplast.cz/data/smartplast/halalska_digitalni_prototyp_pri_vstrikovani_plastu_II_cz.pdf>.
- [22] *Handyscan 3D* [online]. [cit. 2013-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.handyscan.cz/index.html>>.
- [23] *Hasco* [online]. [cit. 2013-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://hasco.com>>.
- [24] *MCAE Systems: 3D Digitální technologie* [online]. 2012 [cit. 2013-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.mcae.cz>>.
- [25] *MM Průmyslové spektrum: Digitalizace-její princip a rozdělení* [online]. [cit. 2013-01-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>>.

- [26] *MM Průmyslové spektrum: Optický skener v průmyslové praxi* [online]. [cit. 2013-01-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/opticky-skener-v-prumyslove-praxi.html>>.
- [27] NAVRÁTIL, R. *Reverse Engineering v praxi*. [online]. [cit. 2013-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/index.html>>.
- [28] PIERACCINI, M., GUIDI, G., ATZENI, C. *3D Digitizing of Cultural Heritage*, Journal of Cultural Heritage 2 (2001) s. 63-70, [online]. [cit.2013-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207401011086>>.
- [29] SYŘIŠTĚ, D., SKOPEČEK, T., KAPINUS, V. *Reverzní inženýrství, digitalizace a výroba forem* [online]. 2004 [cit. 2013-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/reverzni-inzenyrstvidigitalizace-a-vyroba-form.html>>.
- [30] TIŠNOVSKÝ, P. *Metody bezkontaktní digitalizace povrchů reálných předmětů*. [online]. 2003. [cit. 2013-01-22]. Dostupný z WWW: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03013/kap_2.htm>.
- [31] VOJÁČEK, A. *PMD senzor & 3D měření vzdálenosti - 1. část* [online]. [cit. 2013-01-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.hw.cz/clanek/2006070301>>.
- [32] *Vstřikování Plastů* [online]. [cit. 2013-01-25]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm>.
- [33] *Vstřikování Plastů* [online]. [cit. 2013-01-25]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm>.
- [34] *Wikipedie. Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, [cit. 2013-01-19]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Computed_tomography>.
- [35] *Wikipedie. Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, [cit. 2013-01-19]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Reverzní_inženýrství>.
- [36] *Wikipedie. Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, [cit. 2013-01-19]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/3d_scanner>.
- [37] *3D Space* [online]. [cit. 2013-01-25]. Dostupný z WWW: <<http://3dspace.site90.net/3d-skenery/3d-skenery.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D, 3D	Two Dimensions (dvourozměrný), Three Dimensions (trojrozměrný).
ASCII	American Standard Code for Information Interchange – výměnný souborový formát.
ATOS	Advanced Topometric Sensor – označení řady 3D optických skenerů.
c	Rychlost světla ve vakuu ($299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporovaný návrh.
CAE	Computer Aided Engineering – počítačem podporovaná konstrukce.
CAE	Computer Aided Engineering – počítačem podporované inženýrství.
CAX	Computer Aided – počítačem podporované.
CCD	Charge Couple Device – typ čipu se světlocitlivými elementy.
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicové měřicí systémy.
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiductor – typ čipu se světlocitlivými elementy.
CNC	Computer Numerical Control – počítačem řízené stroje.
CT	Computed Tomography – výpočetní tomografie.
DMLS	Direct Metal Laser Sintering – spékání kovového prášku laserem.
DSM	Výrobce polymerních materiálů.
E	Modul pružnosti v tahu [MPa].
FEM	Finite Element Method – metoda konečných prvků.
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung - společnost s ručením omezeným.
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik GmbH – výrobce optických měřících zařízení.
IGES	Initial Graphics Exchange Specification – výměnný souborový formát.
l	Vzdálenost senzoru od měřeného objektu [m].
LCD	Liquid Crystal Display – displej z tekutých krystalů.
LED	Light Emitting Diode – světlo emitující dioda.

Mpx	Megapixel – označuje počet světlocitlivých bodů senzoru
MRI	Magnetic Resonance Imaging – magnetická rezonance.
NC	Numerical Control – Číslicové řízení.
NURBS	Non-uniform rational basis spline – aproximační křivka.
PA	Polymerní materiál: polyamid.
PC	Polymerní materiál: polykarbonát.
PC	Polymerní materiál: polykarbonát
PE	Polymerní materiál: polyethylen.
PMD	Photonic Mixer Device – typ distančního senzoru.
PMMA	Polymerní materiál: polymethylmethakrylát.
PP	Polymerní materiál: polypropylen.
PS	Polymerní materiál: polystyren.
pVT	Digram závislosti tlaku, objemu a teploty.
RE	Reverse Engineering – Reverzní inženýrství.
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data – výměnný souborový formát.
STL	STereoLithography – označení výměnného datového formátu.
t_0	Teplota okolí [°C].
t_c	Celková doba letu signálu [s].
t_e	Teplota vyhození [°C].
T_f	Teplota viskózního toku polymerního materiálu [°C].
T_g	Teplota skelného přechodu polymerního materiálu [°C].
T_m	Teplota roztavení polymerního materiálu [°C].
TOF	Time of Flight – délka doby letu.
UP - GF	Polymerní materiál: nenasycený polyester zesílený skleněnými vlákny.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Průběh klasického a reverzního procesu. [27]</i>	11
<i>Obr. 2. Možné rozdělení 3D skenerů. [17]</i>	15
<i>Obr. 3. Rozdělení dotykových skenerů. [17]</i>	17
<i>Obr. 4. Měřící rameno Microscribe od firmy Immersion. [22]</i>	18
<i>Obr. 5. Popis souřadnicového měřicího přístroje. [16]</i>	19
<i>Obr. 6. Příklad skenování rozmítaným laserovým svazkem. [22]</i>	21
<i>Obr. 7. Laserová skenovací hlava s jednou a třemi osami snímání. [22]</i>	21
<i>Obr. 8. Rozdělení laserových skenerů. [17]</i>	22
<i>Obr. 9. Rozdělení optických skenerů. [17]</i>	23
<i>Obr. 10. Princip funkce optického skeneru s využitím promítání pruhů. [36]</i>	23
<i>Obr. 11. Princip výpočetní tomografie. [34]</i>	25
<i>Obr. 12. Příklady možné aplikace výpočetní tomografie. [24]</i>	25
<i>Obr. 13. Rozdělení metod pro určení třetího rozměru. [17]</i>	27
<i>Obr. 14. Graf závislosti relativního rozlišení na</i>	27
<i>Obr. 15. Rozdělení snímačů využívaných ve 3D skenerech. [17]</i>	28
<i>Obr. 16. Princip optické interferometrie - Michelsonův interferometr. [28]</i>	29
<i>Obr. 17. Princip aktivní triangulace. [28]</i>	30
<i>Obr. 18. Princip pasivní triangulace. [28]</i>	31
<i>Obr. 19. Průběh vstřikovacího cyklu. [7]</i>	32
<i>Obr. 20. Diagram pVt vstřikovacího cyklu. [12]</i>	33
<i>Obr. 21. Tok taveniny uvnitř tokové domény. [5]</i>	34
<i>Obr. 22. Vhodná zpracovatelská oblast . [5]</i>	35
<i>Obr. 23. Struktura amorfního (vlevo) a semikrystalického (vpravo) polymeru. [7]</i>	36
<i>Obr. 24. Teplotní oblast použití amorfních polymerů. [2]</i>	37
<i>Obr. 25. Teplotní oblast použití semikrystalických polymerů. [2]</i>	37
<i>Obr. 26. Schéma vstřikovacího stroje. [7]</i>	39
<i>Obr. 27. Přisunutá vstřikovací tryska stoje na vtokové vložce. [23]</i>	42
<i>Obr. 28. Schéma tělesa vstřikovací formy.</i>	43
<i>Obr. 29. Možné varianty vtokových ústí, 1 - filmový vtok, 2 - vějířovitý vtok, 3 - bodový vtok, 4 - tunelový vtok, 5 - prstencový vtok, 6 - plný kuželový vtok, 7 - membránový vtok. [7]</i>	44
<i>Obr. 30. Řez horkým vtokovým systémem. [23]</i>	45

<i>Obr. 31. Řez ve 3D prizmatickém, válcovém a trubkovém vyhazovacím kolíkem.</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 32. Konformní temperační systém - vnitřní geometrie. [19]</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 33. Fotografie tělesa reflektoru, jeden čtverec odpovídá 10 mm.</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34. Optický 3D skener ATOS II Tripluscan. [24]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 35. Popis optického 3D skeneru ATOS II Tripluscan. [11].....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 36. Umístění jednotlivých referenčních bodů na povrchu dílu.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 37. Fotografie skenovaného objektu v okamžiku probíhajícího snímání.</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 38. Pohled na monitor pracovní stanice po v pořadí třetím snímání, vlevo je zobrazen výstup z kamer (zeleně - identifikované referenční body, červeně - přeexponované oblasti) a vpravo 3D náhled již naskenovaných dat (červeně - data získaná v předchozím snímání).</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 39. Vizualizace distribuce jednotlivých snímání.</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 40. Původní neopravený model (vlevo) a finální opravený model (vpravo).</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 41. Barevná mapa odchylek CAD modelu od modelu získaného metodou digitalizace.</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 42. Vstřikovací stroj Arburg z řady Allrounder.</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 43. Srovnání reálné fotografie vstřikovací trysky s exportovaným 3D modelem.</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 44. Pohled do pravé a levé dělicí roviny vstřikovací formy.</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45. Řez v rovině spojovacích a středících elementů.</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 46. Vyobrazení hlavní dělicí roviny (žlutá) a třech vedlejších dělicích rovin.</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 47. Dva díly spojeny vtokovým zbytkem studeného rozvodného kanálu.</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 48. Pravá tvarová vložka.</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 49. Levá tvarová vložka.</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 50. Trojice tvarových jader, plochy označené žlutou barvou jsou exponovány polymerní tavenině.</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 51. Rozmístění posuvový kostek v dutině vstřikovací formy.</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 52. Lomený kolík zakotvený v držáku.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 53. Postup odformování zápichu během fáze otevírání vstřikovací formy.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 54. Umístění horkého vtokového systému v tělese formy (řez rovinou xz).</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 55. Osamostatněný rozvodný blok a jeho pozice vzhledem k dílu.</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 56. Detail rozvodného kanálu a vtokových ústí, ve středu obrázku je osazen přidržovač vtoku.</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 57. Vyhazovací systém vstřikovací formy.</i>	<i>78</i>

<i>Obr. 58. Vizualizace geometrie kanálů pravého a levého temperačního okruhu.</i>	80
<i>Obr. 59. Temperační systém pravé tvarové vložky, červeně označený nátrubek představuje vstupní kanál, modře označený nátrubek kanál výstupní.</i>	82
<i>Obr. 60. Temperační systém levé tvarové vložky, červeně označený nátrubek představuje vstupní kanál, modře označený nátrubek kanál výstupní.</i>	83
<i>Obr. 61. Závěsné oko a zámek dělicí roviny vstříkovací formy.</i>	84
<i>Obr. 62. Postup přípravy modelu dílu: (zleva) model dílu, model dílu bez uvažovaných rádiusů a model s vytvořenou sítí.</i>	85
<i>Obr. 63. Výsledek analýzy vhodnosti umístění vtokového ústí.</i>	86
<i>Obr. 64. Výsledek analýzy zhodnocení odporu taveniny vůči toku, bez ohledu na umístění vtokového ústí.</i>	87
<i>Obr. 65. Výsledek analýzy plnění dutin formy v závislosti na čase.</i>	88
<i>Obr. 66. Výsledek analýzy teploty na čele toku taveniny.</i>	88
<i>Obr. 67. Výsledek analýzy průběhu tlaku v dutině formy v závislosti na čase.</i>	89
<i>Obr. 68. Výsledek analýzy predikce vzniku oblastí vzduchový kapes.</i>	90
<i>Obr. 69. Výsledek analýzy objemové smrštění materiálu dílu.</i>	90
<i>Obr. 70. Výsledek analýzy průběhu velikosti nutné uzavírací síly v závislosti na čase.</i>	91
<i>Obr. 71. Výsledek analýzy teploty temperačního média.</i>	92
<i>Obr. 72. Výsledek analýzy tlakového spádu po délce temperačního kanálu.</i>	93
<i>Obr. 73. Výsledek analýzy distribuce hodnot časového intervalu pro dosažení vyhazovací teploty po povrchu dílu.</i>	93
<i>Obr. 74. Výsledky analýzy účinnosti temperačního systému.</i>	94
<i>Obr. 75. Výsledky analýzy deformace dílu.</i>	95
<i>Obr. 76. Výsledek deformační analýzy pravé tvarové vložky.</i>	96
<i>Obr. 77. Výsledek deformační analýzy levé tvarové vložky.</i>	97

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Parametry vstřikovaného materiálu PA 46 (GF25%) - Stanyl TQ261F5. [18]</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 2. Seznam dostupných měřících objemů - výňatek. [11]</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 3. Technické parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 720S. [13]</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 4. Konfrontace požadovaných parametrů ze strany zaformování vůči parametrům zvoleného vstřikovacího stroje.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 5. Přehled použitých vyhazovacích kolíků.</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 6. Přehled nastavení základních parametrů finální analýzy č. 13.....</i>	<i>85</i>

PŘÍLOHA P 1: TECHNICKÁ DATA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

ARBURG ALLROUNDER 720S

Technische Daten

720 S

Maschinentyp		720 S	720 S	720 S
EUROMAP-Größenangabe ¹⁾		3200-1300	3200-2100	3200-3200
Schließeinheit				
Schließkraft	max. kN	3200	3200	3200
Zufahrkraft	max. kN	130	130	130
Öffnungskraft/ erhöht	max. kN	100 / 800	100 / 800	100 / 800
Öffnungsweg	max. mm	700	700	700
Werkzeugeinbauhöhe	min. mm	300-700	300-700	300-700
Abstand zwischen den Aufspannplatten	max. mm	1000-1400	1000-1400	1000-1400
Lichter Säulenabstand	mm	720 x 720	720 x 720	720 x 720
Werkzeugaufspannplatten (b x h)	mm	1040 x 1040	1040 x 1040	1040 x 1040
Gewicht bew. Wkz.-Hälfte	max. kg	3600	3600	3600
Auswerferkraft	max. kN	100	100	100
Auswerferweg	max. mm	250	250	250
Hydraulik, Antrieb, Sonstiges				
Antriebsleistung der Hydraulikpumpe	kW	45	55	55
Trockenlaufzeit bei Öffnungshub ³⁾	s-mm	3,5-504	3,5-504	3,5-504
Installierte Gesamtleistung ²⁾	kW	70,5	89	96
Farbe: Kunststoffbeschichtung Struktur lichtgrau / mintgrün / rapsgeb				
Schaltschrank				
Sicherheitsvorschrift		DIN EN 60204	DIN EN 60204	DIN EN 60204
Steckdosenkombination (1 Schuko, 1 Cekon)		1 x 16 A	1 x 16 A	1 x 16 A
Spritzeinheit				
Schneckendurchmesser	mm	55 / 60 / 70	60 / 70 / 80	70 / 80 / 90
Wirksame Schneckenlänge	L/D	22 / 20 / 17	23 / 20 / 17,5	23 / 20 / 18
Schneckenweg	max. mm	235	280	320
Rechnerisches Hubvolumen	max. cm ³	558 / 664 / 904	792 / 1078 / 1407	1232 / 1608 / 2036
Schussgewicht	max. g PS	510 / 607 / 826	723 / 984 / 1286	1125 / 1469 / 1860
Materialdurchsatz ⁴⁾	max. kg/h PS	86 / 96 / 115	125 / 145 / 175	185 / 215 / 250
	max. kg/h BA 6.6	43 / 48 / 58	62 / 74 / 88	93 / 110 / 125
Spritzdruck ⁴⁾	max. bar	2380 / 2000 / 1470	2500 / 2000 / 1530	2500 / 2000 / 1580
Einspritzstrom ⁴⁾	max. cm ³ /s	238 / 284 / 388	224 / 306 / 400	290 / 380 / 482
Einspritzstrom mit Speicher	max. cm ³ /s	714 / 848 / 1156	1132 / 1540 / 2012	1188 / 1552 / 1964
Staudruck positiv / negativ	max. bar	350 / 190	350 / 200	350 / 200
Schneckenumfangsgeschwindigkeit	max. m/min	40 / 43 / 51	43 / 51 / 58	47 / 54 / 61
Schneckenmoment	max. Nm	1510 / 1640 / 1920	2140 / 2500 / 2550	3140 / 3510 / 3510
Düsenanlagekraft	max. kN	90	110	110
Düsenabhebeweg	max. mm	550	675	675
Installierte Zylinderheizleistung / Heizzonen	kW	21,9 / 7	30,3 / 7	37,3 / 7
Installierte Düsenheizleistung	kW	1,0	1,1	1,1
Horizontale Einspritzposition	max. mm	--	---	--
Maße und Gewichte der Basismaschine				
Ölfüllung	l	390	490	590
Nettogewicht	kg	17000	17700	19200
Elektrischer Anschluss (Vorsicherung) ⁵⁾	Motor + Heizung	A	200	200
Elektrischer Anschluss (Vorsicherung) ⁵⁾³⁾	Motor	A	125	125
	Heizung	A	50	63

1) 1. Zahl: Schließkraft (kN); 2. Zahl: max. Hubvolumen (cm³) x max. Spritzdruck (kbar)

2) Werte beziehen sich auf 400 W/50 Hz. Die Last ist weitgehend symmetrisch auf die 3 Phasen verteilt. Der angegebene Wert bezieht sich auf die Basismaschine

3) Es können wahlweise eine oder zwei getrennte Zuleitungen angeschlossen werden (Motor + Steuerung/Heizung). Durch Optionen kann sich der Anschlusswert erhöhen

4) Bestimmte Kombinationen der Maschinenausbauten können zwei getrennte Zuleitungen zwingend erforderlich machen

5) Kombination aus max. Spritzdruck und max. Einspritzstrom (max. Einspritzleistung) können sich gegenseitig ausschließen, abhängig von der ausstattungsbedingten Motorleistung

6) Nach EUROMAP für Grundmaschine

7) Abweichungen je nach Prozesseinstellungen und Materialtyp sind möglich

Die Angaben der technischen Daten entsprechen dem Stand bei Drucklegung. Im Interesse ständiger Weiterentwicklung behalten wir uns Änderungen vor.

PŘÍLOHA P 3: PŘEHLED NASTAVENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH TOKOVÝCH ANALÝZ

č.p.	Popis analýzy	Rozměry vtokového ústí [mm]	Rozměry rozvodného kanálu [mm]	Průměrné množství temp. média [$l \cdot min^{-1}$]	Hodnota dotlaku [%]	Doba působení dotlaku [s]	Doba plnění [s]	Vstříkovací stroj	Doba zpracování analýzy [hod]
1.	Změna dotlaku	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	12	2	a	21,4
2.	Změna dotlaku	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	5	2	a	23,6
3.	Změna průtoku temperace	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	12	90	8	2	a	18,5
4.	Standardní nastavení	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	2	a	23,4
5.	Změna průtoku temperace	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	6	90	8	2	b	26,1
6.	Změna průtoku temperace	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	4	90	8	2	b	21,3
7.	Změna teploty temperace (105 °C)	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	2	b	16,5
8.	Změna doby plnění	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	3	b	21,7
9.	Změna doby plnění (x)	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	3	b	21,8
10.	Změna dotlaku	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	80	8	2	b	33,5
11.	Dotlak nekonstantní hodnoty	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90-80	8	2	b	23,4
12.	Změna stroje	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	2	c	24,5
13.	Finální nastavení	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	2	b	23,4
14.	Změna rozměru rozvodného kanálu	7,5; 1,5; 6,5; 1,2	12; 9; 7	8	90	8	2	a	20,0
15.	Změna rozměru vtokového ústí	7,5; 1,8; 6,6; 1,5	8; 6; 7	8	90	8	2	b	21,9
16.	Změna rozměru vtokového ústí	7,5; 1,8; 6,6; 1,5	8; 6; 7	8	90	8	3	b	22,5
17.	Změna rozměru vtokového ústí	7,5; 1,5; 7; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	2	b	20,8
18.	Změna rozměru vtokového ústí (x)	7,5; 1,5; 7; 1,2	8; 6; 7	8	90	8	3	b	21,4
									405,8

Legenda:

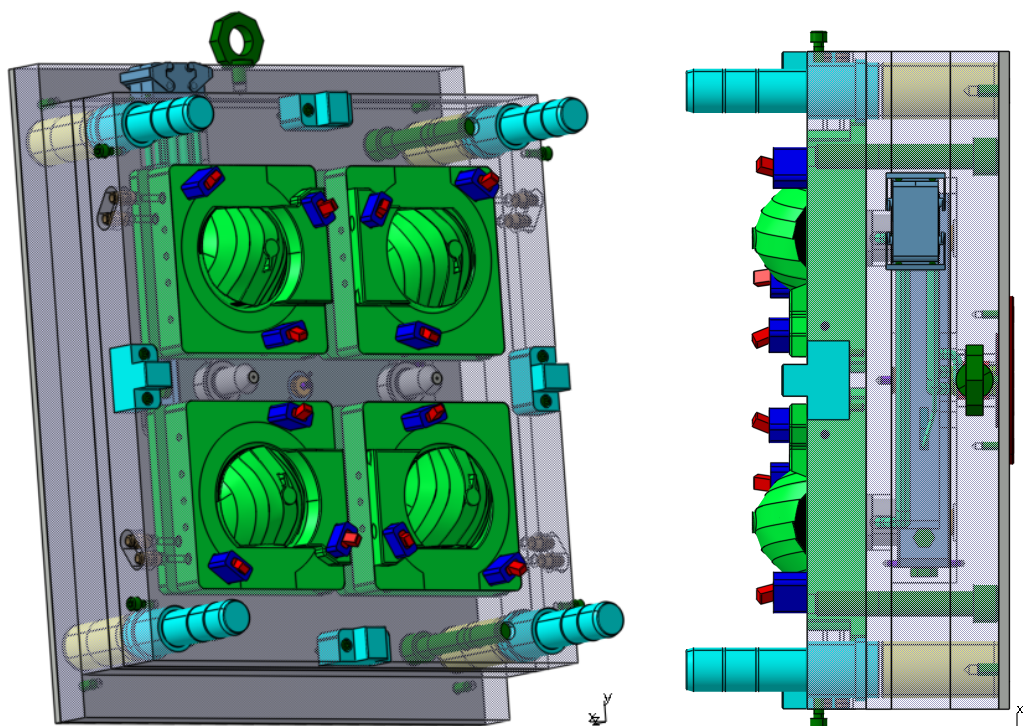
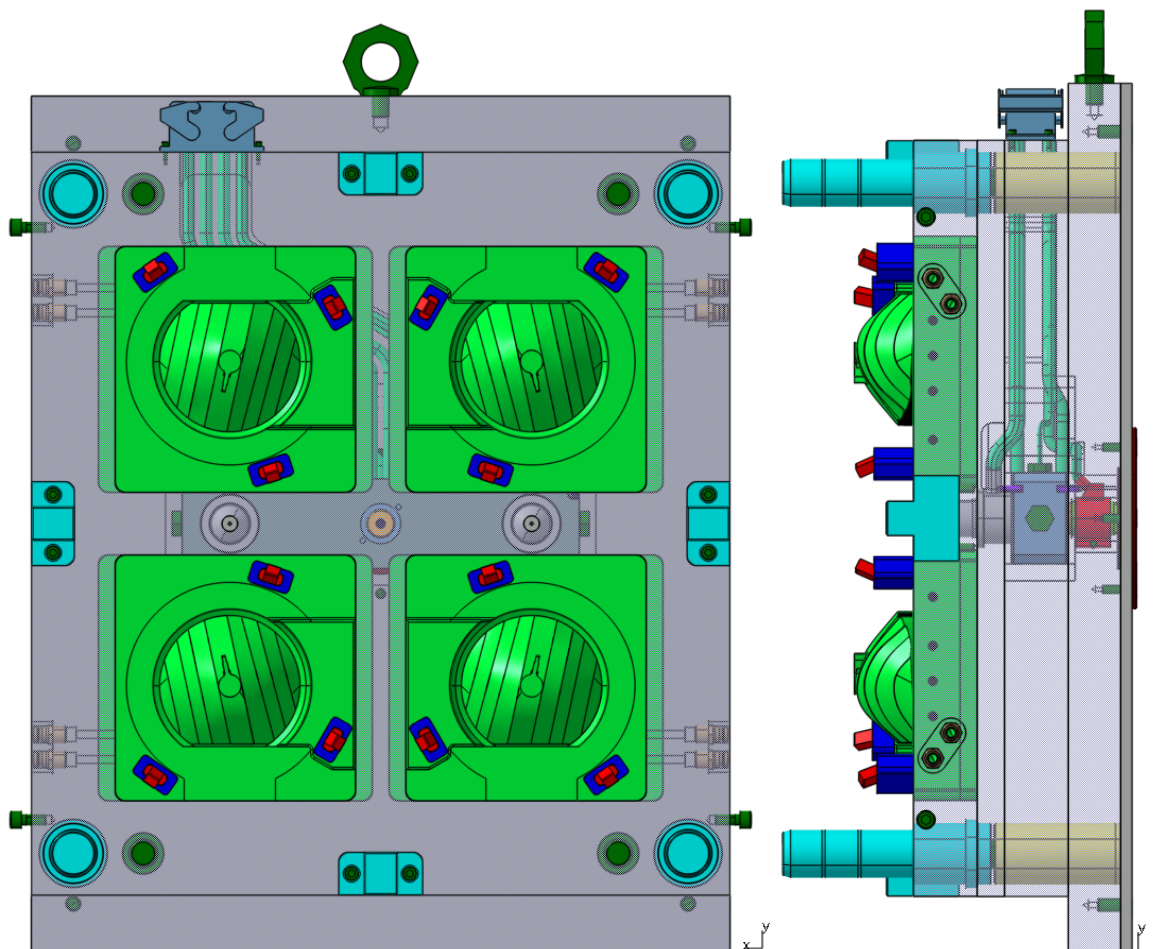
Rozměry vtokového ústí - hrana na straně rozvodného kanálu (rovina xy); hrana na straně rozvodného kanálu (osa z); hrana na straně dutiny formy (rovina xy); hrana na straně dutiny formy (osa z).

Rozměry rozvodného kanálu - základna v dělicí rovině; zapuštěná základna; výška.

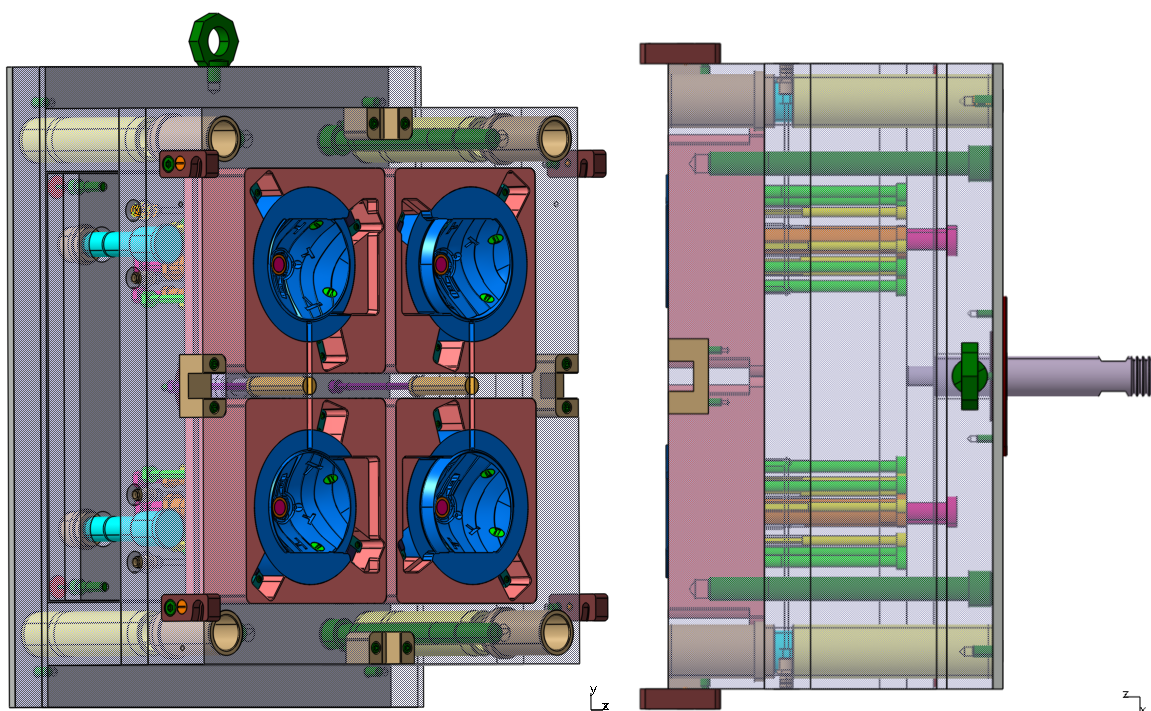
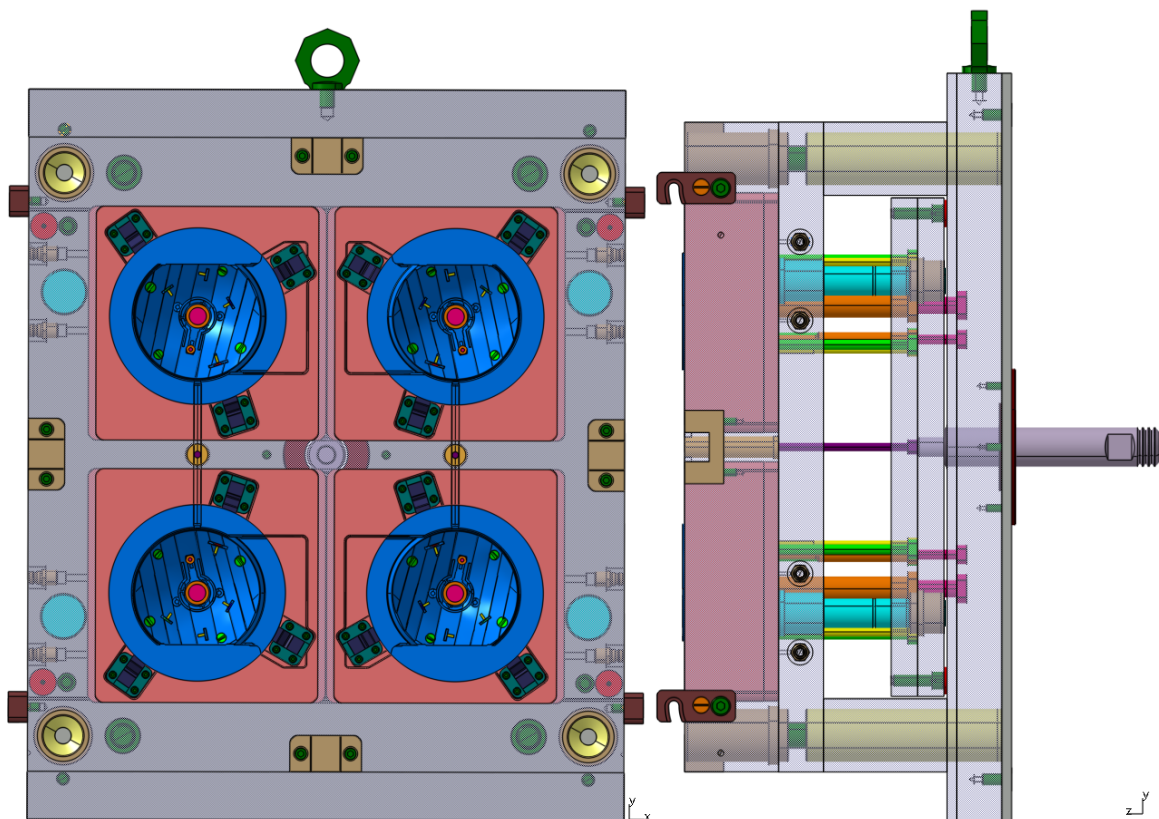
Vstříkovací stroj - a: Arburg Allrounder 620S (16,4 oz), b: Generic 300 tons, c: Van Dorn Demag HT-300-720 STD (14,7 oz).

(x) - představuje navýšení počtu iterací výpočtu teploty taveniny, na hodnotu 400 (původně 200).

PŘÍLOHA P 4: POHLED NA PRAVOU STRANU VSTŘIKOVACÍ FORMY VE 3D



PŘÍLOHA P 5: POHLED NA LEVOU STRANU VSTŘIKOVACÍ FORMY VE 3D



**PŘÍLOHA P 6: RENDEROVANÝ POHLED NA DÍL BEZ
ODDĚLENÉHO VTOKOVÉHO ZBYTKU**

