



OPTIMALIZACE PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ PROGRAMEM VARIMOS

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Bc. Jan Dostál**
Vedoucí práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Dostál**
Osobní číslo: **S11000893**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie**
Název tématu: **Optimalizace parametrů vstřikování programem Varimos**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rozbor vlivu technologických parametrů na tvar vstřikovaného dílu.
2. Rozbor problematiky optimalizace technologických parametrů.
3. Výběr dílu a nástroje pro optimalizaci v programu Varimos.
4. Provedení simulačních výpočtů.
5. Provedení experimentálních měření při změně technologických parametrů.
6. Vyhodnocení výsledků a doporučení pro výrobu.



Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] Johannaber, F., Michaeli, W. Handbuch Spritzgießen. München: Carl Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22966-3.
- [2] Michaeli, W. Plastics Processing: An Introduction. Munich: Hanser Publ., 1995. ISBN 9781569901441.
- [3] SHOEMAKER, J.: Moldflow Design Guide: A Resource for Plastic Engineers. Cincinnati: Hanser, 2006. ISBN-13:978-1-56990-403-9.
- [4] Manuál programu Cadmould 3D.
- [5] Manuál programu Varimos.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **27. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **6. ledna 2015**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
dekan



Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 3. prosince 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Optimalizace parametrů vstřikování programem Varimos

Parameter optimization of plastic injection by software Varimos

Anotace

Práce se zabývá problematikou optimalizace procesu vstřikování plastů pomocí softwaru Varimos.

Úkolem práce je pomocí softwaru Varimos optimalizovat technologické parametry vstřikování zkušebního vylisku, na základě optimalizací vyrobit zkušební vylisky, digitalizovat je a porovnat s jejich 3D CAD modelem. Cílem je ověřit kvalitu výsledků optimalizací a zhodnotit tak přínos softwaru Varimos pro průmyslovou praxi.

Klíčová slova

Vstřikování, optimalizace, vylisky, Varimos, Cadmould, CAE, DOE, digitalizace, GOM Inspect.

Annotation

The work deals with the optimization of injection molding process using software Varimos.

The challenge is to work with the software Varimos optimize the process parameters of injection for the test molding, based on optimizing make test moldings, digitize them and compare with their 3D CAD model. The aim is to verify the quality of the results of optimization, thereby realizing the benefits of software Varimos for industrial practice.

Keywords

Injection, optimization, moldings, Varimos, Cadmould, CAE, DOE, digitization, GOM Inspect.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mne podporovali a pomáhali při vzniku této diplomové práce.

Jmenovitě společnosti STEINEL Technik s.r.o. a panu Ing. Petru Sůvovi za možnost využití softwarů Cadmould a Varimos a za pomoc při práci s nimi i za cenné rady a připomínky. Společnostem MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o. a T-Mobile Czech Republic a.s. (pobočka Mladá Boleslav) za digitalizaci zkušebních výlisků.

Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Bobkovi, Ph.D. za pomoc s výrobou zkušebních výlisků a Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D. jako vedoucímu této diplomové práce.

Poděkování směřuji také celé mé rodině a přátelům za podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

Obsah

1.	Úvod	11
2.	Teoretická část	13
2.1.	Polymery.....	13
2.1.1.	Rozdělení polymerů podle teplotního chování.....	14
2.1.2.	Rozdělení polymerů dle nadmolekulární struktury.....	14
2.1.3.	Vliv nadmolekulární struktury na smrštění a deformace	16
2.1.4.	Druhy přísad a jejich vliv na smrštění materiálu	17
2.2.	Optimalizace technologických parametrů pomocí CAE	18
2.2.1.	Základní princip fungování CAE pro vstřikování plastů	18
2.2.2.	Získané výsledky	19
2.2.3.	Cadmould® 3D-F.....	20
2.2.4.	Autodesk® Simulation Moldflow®.....	22
2.2.5.	Modlex3D	22
2.2.6.	Varimos	22
2.3.	Vliv fází vstřikovacího procesu na kvalitu a tvar výlisků.....	30
2.3.1.	Plastikace	30
2.3.2.	Plnění dutiny formy a kompresní fáze plnění.....	30
2.3.3.	Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak	31
2.3.4.	Dotlaková fáze	31
2.3.5.	Fáze chlazení	32
2.4.	Vady výlisků.....	33
2.4.1.	Studené spoje.....	33
2.4.2.	Diesel efekt, uzavřený vzduch	34
2.4.3.	Nedostříknutý výlisek.....	35
2.4.4.	Delaminace (odlupování povrchové vrstvy).....	36
2.4.5.	Přetoky	36
2.4.6.	Propadliny (lunkry).....	37
2.4.7.	Šmouhy vlivem orientace vláken	37
2.4.8.	Deformace, smrštění	38
3.	Experimentální část	40
3.1.	Zkušební výlisek	40
3.2.	Materiál výlisku	41
3.3.	Vstřikovací forma.....	42
3.4.	Úvodní simulace v Cadmould® 3D-F	43
3.4.1.	Import výlisku, tvorba výpočtové sítě.....	44



3.4.2.	Vtokový a temperační systém.....	45
3.4.3.	Volba materiálu výlisku, simulace vložek tvárníku a tvárnice	47
3.4.4.	Volba technologických podmínek vstřikování	47
3.4.5.	Výsledky úvodní simulace v Cadmould® 3D-F.....	48
3.5.	Optimalizace technologických podmínek ve Varimos.....	48
3.5.1.	Zadání variovaných parametrů a tvarových podmínek	49
3.5.2.	Aplikace smrštění	50
3.5.3.	Volba plánu výpočtů	51
3.5.4.	Provedení výpočtů	52
3.5.5.	Výsledky optimalizací ve Varimos	52
3.6.	Vstřikování zkušební série výlisků	62
3.7.	Digitalizace výlisků	63
4.	Vyhodnocení.....	65
4.1.	Vyhodnocení varianty č. I	68
4.2.	Vyhodnocení varianty č. II	70
4.3.	Vyhodnocení varianty č. III	73
4.4.	Vyhodnocení varianty č. IV	75
5.	Diskuze výsledků	78
5.1.	Diskuze výsledků varianty č. I.....	78
5.2.	Diskuze výsledků varianty č. II.....	80
5.3.	Diskuze výsledků varianty č. III.....	83
5.4.	Diskuze výsledků varianty č. IV	85
5.5.	Shrnutí diskuze	87
6.	Závěr	89

Seznam zkratk a symbolů

CAE	Computer Aided Engineering, počítačem podporované konstruování, speciální software určený pro technické výpočty a ověřování konstrukce (simulace, testování, analýzy ...).
Cadmould® 3D-F	CAE software sloužící k simulaci a analýze procesu vstřikování plastů.
Varimos	Virtual And Real Injection Moulding Optimisation System, doplňkový modul softwaru Cadmould® 3D-F umožňující do určité míry automatickou optimalizaci vstřikovacího procesu ve virtuálním prostoru.
GOM Inspect V8	Volně dostupný software pro 3D inspekci mraku bodů a zpracování sítě umožňující rozměrovou analýzu 3D mraku bodů získaných z optických skenerů, laserových skenerů a dalších zdrojů.
CATIA	Computer Aided Three Dimensional Interactive Application, 3D CAD systém počítačového návrhu konstrukce.
Solid Edge ST6	3D CAD systém počítačového návrhu konstrukce.
3D CAD data	Forma uchování výsledků (práce) CAD softwarů.
CAD software	Systém počítačového návrhu konstrukce.
DOE	Desing of experiment, návrh experimentu, metoda umožňující rychlé nalezení výsledku, aniž by bylo třeba provádět obrovské množství výpočtů.
Izotropie	Sledovaná vlastnosti materiálu je nezávislá na směru, sledovaná vlastnost je ve všech směrech stejná.
2K vstřikování	Technologie vstřikování umožňující na jednom výlisku kombinovat více druhů či barev vstřikovaných materiálů.
Flow rate [cm^3/s]	Objemový průtok taveniny plastu.
Flow mass [g/s]	Hmotnostní průtok taveniny plastu.

Max. pressure [<i>bar</i>]	Maximální tlak procesu vstřikování.
T_m [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota tání plastu, nejedná se o jednu hodnotu ale o interval (vzhledem k rozdílné délce makromolekul polymeru).
T_g [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota skelného přechodu, nejedná se o jednu hodnotu ale o interval (vzhledem k rozdílné délce makromolekul polymeru).
ITT	Obecná zkratka pro index toku taveniny termoplastu.
$MFR_{(230;2,16)}$	Melt flow rate, hmotnostní index toku taveniny termoplastu za daných podmínek (teplota, zatížení).
Pre-processing	„Předzpracování“, příprava výpočtového modelu.
Processing	„Zpracování“, provedení výpočtu.
Post-processing	Prezentace výpočtů a práce s nimi.
STL	CAD datový formát souborů.
STP	CAD datový formát souborů.
Digitalizace	Převod reálného výlisku do digitální podoby.
Digitalizovaná data	Data získaná digitalizací reálného výlisku.
IGS	CAD datový formát souborů.
RM1	Datový formát softwaru Cadmould® 3D-F.
Virtuální výlisek	Výlisek, vzešlý z výpočtů modulu Varimos.
Reálný výlisek	Vylisovaný zkušební výlisek.
Výpočet A, B, C	Označení pro výpočty (optimalizace) provedené v modulu Varimos.
Varianta I, II, III, IV	Jednotlivé kombinace technologických podmínek vzešlých z výpočtu C modulu Varimos.

1. Úvod

V současném silně konkurenčním prostředí je v oblasti vstřikování plastů kladen stále větší důraz na co největší finanční efektivitu. Tento trend bude i nadále pokračovat. Je obecně známo, že v současné době je v české republice velká část plastikářských podniků víceméně závislá na dodávkách do automobilového průmyslu, ať už přímo výrobcům automobilů nebo jejich primárním dodavatelům a tak i u těchto firem je efektivita a snižování nákladů na pořadu dne.

Jeden z praktických způsobů, jak snížit náklady je i používání CAE softwarů. V oblasti zpracování plastů získávají CAE softwary stále větší místo právě z důvodu úspory celkových nákladů při vývoji dílu. V dnešní době jsou ale CAE softwary určené pro vstřikování plastů v určitém smyslu značně omezeným nástrojem. Uživatel sice může velice přesně nadefinovat veškeré podmínky vstřikování, definuje velice přesně temperační systém, softwary dokáží pracovat i s horkým vtokovým systémem, lze simulovat kaskádové vstřikování, 2K vstřikování a podobně. Podstatným nedostatkem těchto softwarů je to, že danou simulaci (výpočet) provedou vždy pouze pro uživatelem zadané konkrétní podmínky. Na základě těchto podmínek dostane uživatel dnes už velice obsáhlé a přehledné výsledky.

Problém je ale v tom, že výsledky jsou vztaženy vždy pouze ke konkrétnímu uživatelem definovanému zadání. Pokud se stane, že výsledky simulace nejsou žádoucí, nezbyde uživateli než předefinovat podmínky simulace a celou simulaci nechat „spočítat“ znovu, což je časově neefektivní.

Cílem této diplomové práce bylo na zkušebním plastovém výlisku otestovat CAE software Cadmould® 3D-F s novým nástavbovým modulem Varimos určeným k optimalizaci vstřikování plastů. Tento software oproti dnes na trhu běžně rozšířeným přistupuje k problému simulací odlišným způsobem. Nástavbový modul Varimos „nepočítá“ úlohu pouze pro konkrétní jedno zadání, ale provádí takzvané variování. Velice zjednodušeně řečeno, pomocí výpočtů hledá vzhledem k uživatelem definovaným omezením ideální řešení (hledá takovou kombinaci technologických podmínek, aby byl simulovaný výlisek z hlediska uživatele kvalitní). Tento software tak de-facto provádí virtuálně téměř to samé, co reálně provádí seřizovač/technolog při ožívování nové či modifikované vstřikovací formy.

Tím, že se fáze „odladění“ (optimalizace) procesu přesouvá z reality do virtuálního prostředí, lze na základě virtuálního „ladění“ efektivně optimalizovat výlisek i vstřikovací formu ještě před započítáním jejich výroby a dopředu znát jejich chování. Zároveň se tím podstatně zkracuje čas nutný k zavedení vstřikovací formy do ostré výroby.

Modul Varimos neposkytuje pouze jeden výsledek – optimální technologické podmínky, umožňuje i velice efektivně a rychle s výsledky pracovat a zjistit tak například jak se bude výlisek chovat, pokud teplota

taveniny oproti optimálně navržené poklesne například o 10 [°C]. Uživatel tak získá velice dobrý přehled o chování výlisku za měnících se podmínek (zná, jak se výlisek bude chovat při kolísání technologických parametrů). A zná tuto informaci ještě, než je forma upnuta na vstřikovacím stroji. Tím se opět podstatně zkracuje čas na „oživení“ formy a teoreticky tak odpadá ztrátový čas, kdy se při „oživování“ experimentuje s technologickými podmínkami a hledá optimum.

Jak již bylo výše uvedeno, cílem této práce bylo ověřit a zhodnotit, zda a jak dobře dokáže nadstavbový modul Varimos optimalizovat technologické podmínky.

V teoretické části byl hlavní prostor věnován právě výše popsanému CAE softwaru, jelikož byl pro diplomovou práci stěžejní. Cadmould® 3D-F byl zde podrobněji popsán a prostor byl také věnován modulu Varimos se snahou o vysvětlení základního principu jeho fungování. Vzhledem k tomu, že podle optimalizovaných technologických podmínek ze softwaru Varimos byly vyrobeny reálné zkušební výlisky, byla část věnována také polymerům s důrazem na polymer použitý při výrobě. Důležité vzhledem k charakteru práce byly také možnosti predikce vad vstřikovaných výlisků společně s technologickými podmínkami mající na ně vliv, čemuž byl také věnován prostor.

V praktické části byl popsán a proveden experiment. Experiment byl proveden s jednodušším zkušebním výliskem nepocházejícím z automobilového průmyslu. Pro daný výlisek bylo s výhodou využito dostupnosti vstřikovací formy na TUL. Experiment spočíval v přípravě a importu dat do Cadmould® 3D-F a provedení úvodních standardních simulací k lepšímu pochopení chování výlisku. Výsledky z úvodní simulace byly použity pro optimalizaci v softwaru Varimos. Vzhledem k tomu, že diplomová práce měla za účel de-facto otestovat schopnosti Varimos, bylo provedeno několik variant optimalizací. Přesně podle těchto podmínek byly vyrobeny výlisky a porovnány s 3D CAD daty a vyhodnocena úspěšnost softwaru Varimos.

V diskuzi byly podrobněji rozebrány jednotlivé výsledky i důvody případných neshod. V závěru práce bylo provedeno stručné shrnutí nashromážděných poznatků a přínosů modulu Varimos průmyslové praxi.

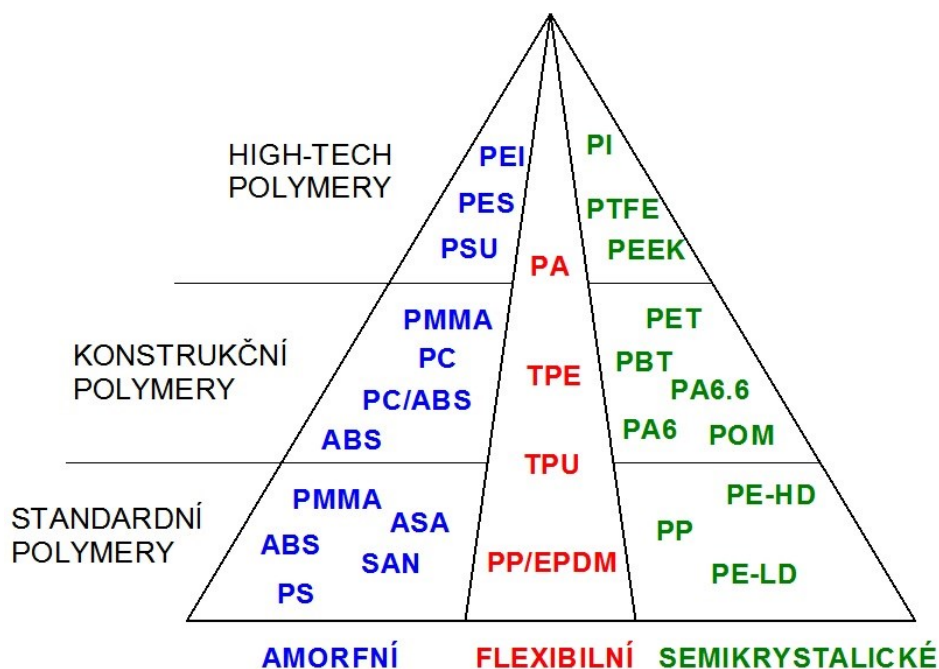
2. Teoretická část

V teoretické části byl hlavní prostor věnován právě CAE softwarům, jelikož byly pro diplomovou práci stěžejní. Software Cadmould® 3D-F byl zde podrobněji popsán a prostor byl také věnován modulu Varimos se snahou o vysvětlení základního principu jeho fungování. Vzhledem k tomu, že podle optimalizovaných technologických podmínek ze softwaru Varimos byly vyrobeny reálné kontrolní výlisky, byla část věnována také polymerům s důrazem na polymer použitý při výrobě, jeho složení a vlivu přísad na jeho chování. Důležité vzhledem k charakteru práce byly také možnosti predikce vad vstříkovaných výlisků společně s technologickými podmínkami mající na ně vliv, čemuž byl také věnován prostor.

2.1. Polymery

Polymery jsou jedny ze základních materiálů používaných v technické praxi. Jsou definovány jako makromolekulární látky mající molekulovou hmotnost větší jak 10^4 [g/mol] v převážné většině syntetického původu, vznikající mnohokrát se opakujícími chemickými reakcemi (polyreakcemi) z monomerů.

Podle tvaru makromolekul bylo polymery možné rozdělit na polymery s lineárním, rozvětveným nebo zesíťovaným tvarem makromolekul. Jedno z nejzákladnějších rozdělení polymerů znázorňoval obrázek č. 1 níže, který rozděloval polymery dle aplikačních možností a nadmolekulární struktury.



Obr. 1: Rozdělení polymerů podle nadmolekulární struktury [1]

Pro účely této diplomové práce bylo důležité rozdělení polymerů podle chování za měnících se teplot okolí a podle nadmolekulární struktury. Toto rozdělení sloužilo jako opora pro praktickou část této práce.

2.1.1. Rozdělení polymerů podle teplotního chování

Podle chování za měnících se teplot okolí lze rozeznat termoplasty, reaktoplasty, termoplastické elastomery a elastomery. Dále zde bylo pojednání omezeno pouze na termoplasty, jelikož byla tato skupina pro vstřikování používána nejvíce a s jejím zástupcem bylo pracováno v praktické části této diplomové práce.

Termoplasty jsou polymery, které při zvyšující se teplotě postupně přecházejí do plastického stavu, ve kterém je možné je zpracovávat (tvářet vstřikováním, vytlačováním a podobně). Do pevného stavu přecházejí postupně snižováním teploty na teplotu, jež je pro daný konkrétní materiál typická. Tomuto teplotnímu cyklu je možné (na rozdíl od reaktoplastů a elastomerů) vystavovat termoplasty opakovaně, jelikož při změně teplot nastávají ve struktuře termoplastu pouze fyzikální změny. Mění se vzdálenost mezi makromolekulami, mění se jejich tvar a v důsledku i mezimolekulární síly ve hmotě. Nedochází při tom ale k zásadním chemickým změnám. Zástupci nejběžnějších termoplastů byli uvedeni v tabulce č. 1, včetně jejich nadmolekulární struktury za běžných podmínek.

Tab. 1: tabulka základních termoplastů

Zkratka	Dlouhý název	Nadmolekulární struktura
PP	polypropylen	semikrystalický
PE	polyethylen	semikrystalický
PS	polystyren	amorfní
PVC	polyvinylchlorid	amorfní
PMMA	polymethylmetaakrylát	amorfní
PC	polykarbonát	amorfní
PA	polyamid	semikrystalický
ABS	akrylonitrilbutadienstyren	amorfní
POM	polyoxymethylen	semikrystalický
PET	polyethylentereftalát	semikrystalický
PTFE	polytetrafluorethylen	semikrystalický

2.1.2. Rozdělení polymerů dle nadmolekulární struktury

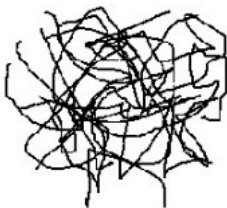
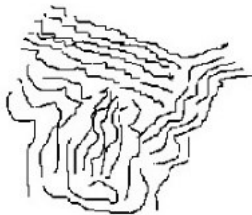
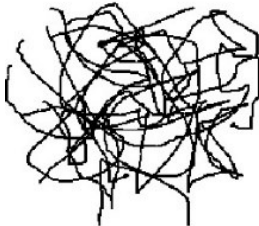
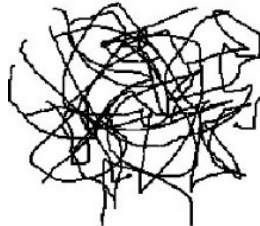
Obrázek č. 1 a tabulka č. 1 se dotýkaly důležitého rozdělení polymerů podle nadmolekulární struktury, a to na polymery amorfní (neuspořádané) a na polymery částečně krystalické (semikrystalické, částečně uspořádané).

Sklon k semikrystalicitě mají makromolekuly lineární (tvarově jednoduché, které se snadněji uspořádávají). Makromolekuly v semikrystalickém polymeru v tuhém stavu jsou uspořádány do takzvaných lamel (reálně pod působícím napětím se lamely deformují do spirálového tvaru). Skládáním deformovaných lamel pak vznikají kulovité útvary (sférolity), ve kterých jsou lamely uspořádány rovnoměrně od jejich středů směrem ven. Mezi takto uspořádanými lamelami jsou amorfní oblasti. Přechodem do

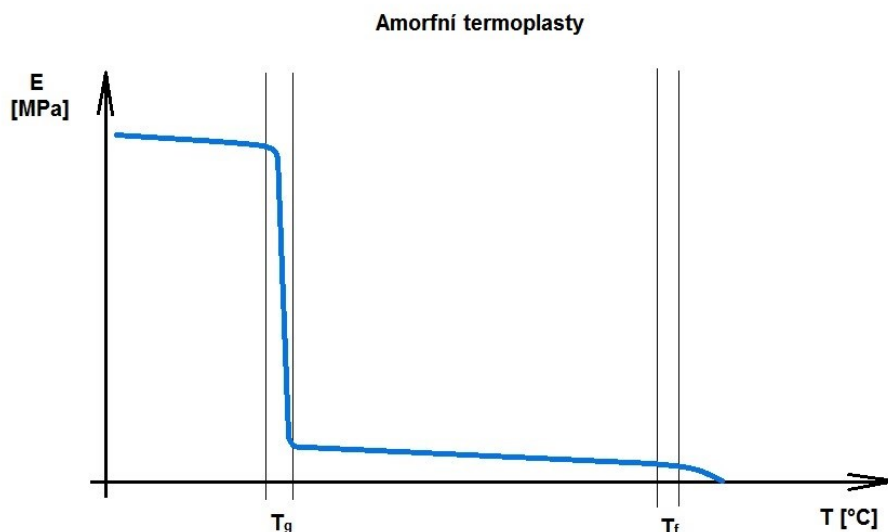
taveniny se i semikrystalické polymery stávají amorfni, makromolekuly se sbalí do kulovitých tvarů.

U amorfni termoplastů jsou makromolekuly neuspořádané, připomínající shluk, viz tabulka č. 2. Neuspořádanost vzniká v důsledku složitosti makromolekuly. Makromolekuly amorfni polymerů nejsou tak tvarově jednoduché jako u semikrystalických polymerů.

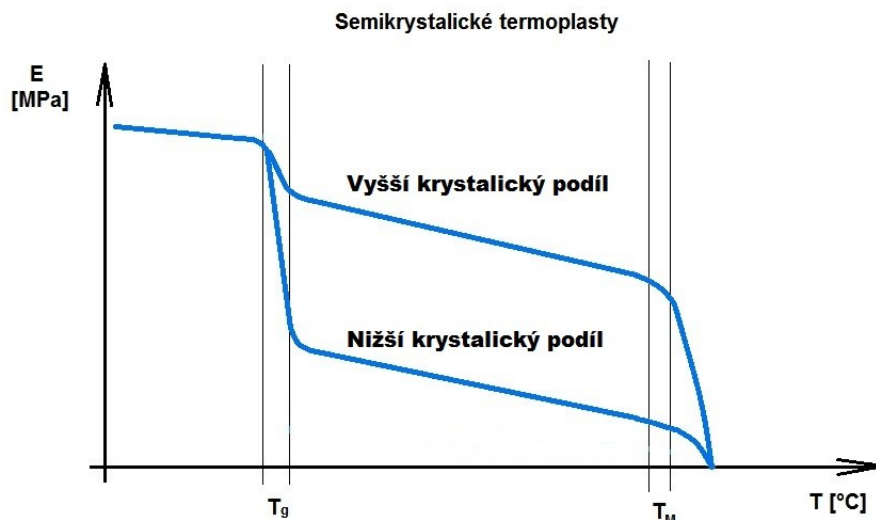
Tab. 2: Rozdílný stav makromolekul za měnících se teplotních podmínek u amorfni a semikrystalických polymerů [2]

Stav	Uspořádání makromolekul amorfni termoplastů	Uspořádání makromolekul semikrystalických termoplastů
Tuhý		
Tavenina		

S rozdílným nadmolekulárním uspořádáním také úzce souvisí teplotní odolnost a použitelnost jednotlivých termoplastů. Změnu mechanických vlastností amorfni a semikrystalických polymerů s měnící se teplotou popisoval obrázek č. 2 a obrázek č. 3.



Obr. 2 :Změna mechanických vlastností amorfni polymerů s měnící se teplotou



Obr. 3: Změna mechanických vlastností semikrystalických polymerů s měnící se teplotou

Obecně platí, že amorfní termoplasty (PS, PC, ABS, ...) lze používat maximálně do teploty skelného přechodu T_g (cca $90 [^{\circ}C]$), reálně však do teploty o cca $(10 \div 20) [^{\circ}C]$ nižší. Nad teplotou $T_g [^{\circ}C]$ prudce klesají mechanické vlastnosti amorfních termoplastů. Semikrystalické termoplasty lze používat teoreticky až do teplot $T_m [^{\circ}C]$ (teplota tání, rozdílná pro jednotlivé typy), reálně však do teploty o $(30 \div 40) [^{\circ}C]$ nižší.

Pro zlepšení vlastností polymerů jsou do nich běžně přidávány přísady jako vyztužující/nevyztužující plniva, teplotní a světelné stabilizátory, barviva, zjasňující látky, nadouvadla, antistatika, antioxidanty, maziva, retardéry hoření, minerální plniva a podobně.

2.1.3. Vliv nadmolekulární struktury na smrštění a deformace

Smrštění je objemová změna výlisku vznikající při tuhnutí v důsledku teplotního procesu (např. v důsledku vstřikování). Deformací rozumíme změnu tvaru výlisku, která je často důsledkem smrštění. [3]

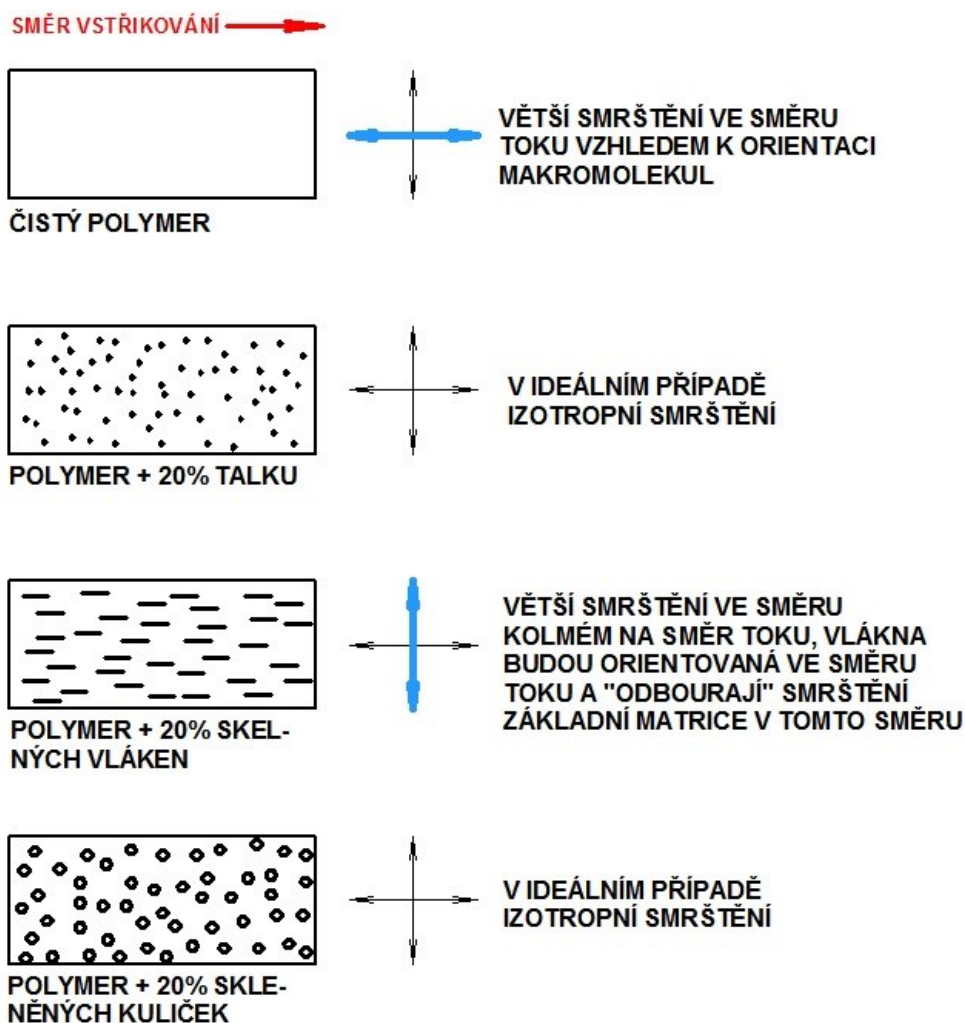
Obecně platí, že větší smrštění vykazuje semikrystalický polymer než polymer amorfní. Je to způsobeno nadmolekulární strukturou semikrystalického polymeru. Každá látka má snahu se dostat do svého rovnovážného stavu, stejně tak polymery. Pro semikrystalický polymer je rovnovážný stav takový, kdy má určitý (typicky pro daný typ) krystalický podíl a tohoto podílu se snaží dosáhnout. Jelikož mají makromolekuly semikrystalického polymeru jednodušší tvar, snadněji se při krystalizaci uspořádávají do menšího objemu => klesá měrný objem (roste hustota materiálu) => materiál smršťuje => důsledek krystalizace. U amorfních polymerů ke krystalizaci nedochází. V důsledku složitějšího tvaru jejich makromolekul vykazují tyto materiály nízké smrštění.

Pro úplnost zde bylo uvedeno, že na smrštění nemá vliv pouze nadmolekulární struktura materiálu, ale i podmínky při jeho zpracování, respektive hodnoty a průběhy zpracovatelských (technologických) podmínek, i další aspekty jako mechanické překážky v nástroji, vlastnosti plniva a podobně. [3]

2.1.4. Druhy přísad a jejich vliv na smrštění materiálu

Základní polymer vzniklý polyreakcí je pro účely vstřikování nutné ještě upravit, přidat přísady. Vzhledem k charakteru této diplomové práce zde byl podrobněji rozebrán pouze jeden druh přísad, a sice plniva. Plniva se obecně rozdělují na vyztužující (vláknitá plniva) a nevyztužující (minerální plniva, skelné kuličky). Pokud polymer obsahuje plniva, kromě jejich vlivu na ITT, mechanické vlastnosti, zpracovatelské vlastnosti, užitnou hodnotu, estetický dojem a podobně je zde podstatný vliv na smrštění. Nezáleží pouze na druhu plniva a na jeho tvaru, ale i na množství plniva v polymerní matici.

Vliv tvaru plniva na smrštění a anizotropii smrštění je nejlépe patrný z obrázku č. 4 níže.



Obr. 4: Zobecněné porovnání vlivu jednotlivých druhů plniv na smrštění a anizotropii smrštění. Modře zvýrazněn očekávaný směr většího smrštění

2.2. Optimalizace technologických parametrů pomocí CAE

Zkratka CAE (Computer Aided Engineering) znamená počítačem podporované konstruování. Jedná se o speciální software určený pro technické výpočty a ověřování konstrukce (simulace, testování, analýzy, ...). Cílem takových softwarů je optimalizovat budoucí výrobek a včas odhalit případné vady již v předvýrobní fázi, snížit budoucí náklady na úpravu konstrukce výrobku a výrobních nástrojů v průběhu sériové výroby, zkrátit čas uvedení výrobku na trh, snížit výrobní náklady a podobně.

V praktické části této práce bylo použito softwarů určených k simulaci a optimalizaci vstřikování plastů. V této oblasti se z hlediska uživatele nabízely dva základní přístupy výrobců těchto softwarů.

Prvním přístupem (možností) byl simulační software implementovaný přímo do CAD systému uživatele. Simulační software byl implementovaný jako další doplňkový modul. Zástupcem takového řešení byl například SolidWorks Plastics implementovaný v SolidWorks, SimpoEdge implementovaný v Solid Edge nebo SimpoePro implementovaný v systému Creo (Pro/Engineer). Takovýto přístup byl vhodný hlavně pro uživatele požadující spíše jednodušší (nižší) úroveň výsledků simulací. Výhodou byla práce v prostředí CAD softwaru, na který byl uživatel zvyklý. [4]

Druhou možností byly samostatně pracující plně nezávislé softwary. Pro praktickou část této diplomové práce vzhledem k jejímu charakteru byl takový typ simulačního softwaru stěžejní, proto zde byli zástupci této kategorie popsáni podrobněji. Jako zástupci byly vybrány tři základní produkty, a to Cadmould® 3D-F od společnosti Simcon GmbH, Autodesk Simulation Moldflow od společnosti Autodesk a Moldex3D od společnosti CoreTech System Co., Ltd. [5, 6, 7]

2.2.1. Základní princip fungování CAE pro vstřikování plastů

Princip fungování těchto softwarů byl vždy obdobný a dal se v zásadě rozdělit na tři základní kroky.

Pre-processing:

Fáze pre-processingu se týká přípravy výpočtu. Do této fáze je uživatel nejvíce zapojen. Uživatel musí vložit 3D CAD model výlisku v příslušném datovém formátu a na jeho základě nechat vygenerovat výpočtovou síť, případně vygenerovanou síť upravit tak, aby jí byl 3D CAD model výlisku dobře pokryt i v kritických místech.

Každý z níže uvedených softwarů tvořil síť lehce odlišným způsobem. Princip tvorby výpočtové sítě byl popsán v praktické části diplomové práce pouze u softwaru Cadmould® 3D-F, jelikož ten byl pro diplomovou práci stěžejní.

Uživatel dále stanovuje technologické podmínky, zvolí materiál výlisku z databáze materiálů (součást softwaru) a stanoví další podmínky, jako jsou

geometrie a vlastnosti vtokové a temperační soustavy, materiál nástroje a podobně.

Processing:

Na základě pre-processingových dat převede software úlohu na soustavu matematických rovnic, které následně řeší. Čas výpočtu je závislý na hustotě a typu výpočtové sítě a hardwaru uživatele. Tyto softwary umožňovaly výpočtově náročné úlohy „rozeslat“ na ostatní počítače propojené v počítačové síti a zrychlit tak výpočty, tzn. k výpočtu byla využita kapacita okolních počítačů během noci nebo víkendu, kdy nebyly vytíženy. [5]

Post-processing:

Software prezentuje uživateli srozumitelnou formou výsledky výpočtů kombinací grafů a 3D vizualizace případně animace časového průběhu sledované veličiny. Rozsah výsledků byl blíže popsán v kapitole 2.2.2.

2.2.2. Získané výsledky

Výsledky získávané ze simulačních softwarů vstřikování byly pro přehlednost rozděleny do čtyř skupin a uvedeny v odstavcích této podkapitoly níže. Uvedené výsledky bylo možno získat ze všech softwarů popsaných v kapitolách 2.2.3., 2.2.4., a 2.2.5.

Získané výsledky se při porovnání mezi softwary mohly lišit (dáno použitím různých typů výpočtových sítí). Při použití všech doplňkových modulů bylo možno získat ještě další výsledky simulací (uvedeno vždy u konkrétního softwaru).

Analýza plnění:

Slouží k celkovému posouzení designu plastových výlisků. Provádí analýzu zatékání taveniny do tvarové dutiny formy. Umožňuje tak posouzení a následné úpravy tloušťky stěn a případně tvaru výlisku, eventuální přemístění žeber a dalších konstrukčních prvků. Umožňuje uživateli optimalizaci i návrh nové polohy a tvaru vtoku a tím vede k optimalizaci celého budoucího nástroje.

Zároveň slouží k predikci a odhalení možných vad v kritických místech jako jsou studené spoje, uzavřený vzduch, umožňuje analýzu orientace skleněných vláken, vybalancování celé vtokové soustavy a vede k optimalizaci technologických parametrů. [5]

Analýza dotlaku:

Slouží k posouzení dotlakové fáze procesu. Vede k optimalizaci velikosti a doby dotlaku na základě analýzy rozložení průběhů teplot a tlaků. Umožňuje odhalit oblasti, kde je již tavenina zatuhlá a podobně a lépe tak pochopit, kde dotlak v jednotlivých časových úsecích působí a kde už ne. [5]

Analýza chlazení:

Slouží k posouzení fáze chlazení vylisku. Zjišťuje poměry v dutině nástroje a vede uživatele k úpravám geometrie, uspořádání a podmínek chladicí soustavy. [5]

Analýza smrštění a deformací:

Slouží k posouzení kvality vylisku a kvality vstřikovacího procesu při simulovaných podmínkách. Vede ke stanovení velikosti smrštění a deformace celkové, nebo i v jednotlivých osách vylisku. Umožňuje porovnání simulovaného vylisku se vstupním 3D CAD modelem k lepšímu pochopení rozdílů. Umožňuje měřit a kontrolovat deformace na jednotlivých plochách vylisku, kontrolovat odchylky vybraných bodů na povrchu, odhalit změny křivosti ploch, zkoumat rovinnost důležitých ploch a podobně. [8]

2.2.3. Cadmould® 3D-F

V praktické části této diplomové práce byl pro základní analýzy použit CAE software Cadmould® 3D-F.

Cadmould® 3D-F je CAE software, který analyzuje proces vstřikování plastů. Cadmould® 3D-F připraví zcela automaticky 3D výpočtový model, založený na vlastní patentované metodě. Uvedené řešení umožní přesné rozlišení měnících se materiálových veličin (teplot, smykových rychlostí atd.) po tloušťce stěn (i těch nejslabších), což je nutným předpokladem pro přesný výpočet komplexních proudových stavů v různých místech konstrukce. Výpočty u všech modulů Cadmould® 3D-F jsou teplotně závislé, respektující stlačitelnost tavenin a zohledňující strukturně-viskózní chování tavenin plastů. Výpočtová přesnost softwaru Cadmould® 3D-F je velmi vysoká, přitom výpočty probíhají rychle. Software Cadmould® 3D-F se vyznačuje jednoduchým pracovním prostředím, které vyžaduje běžný systém Windows XP/Vista/Win 7/8. [5]

Jako vstupní data do Cadmould® 3D-F je použit 3D CAD model vylisku ve formátu STL. Takový formát modelu (zejména používaný jako vstupní formát pro software 3D tiskáren) lze dnes běžně získat přímo z CAD softwaru, ve kterém byl 3D CAD model vylisku navržen. Nejrozšířenější CAD softwary jako je CATIA, Inventor nebo Solid Edge tento formát podporují. Pro případnou úpravu chyb STL formátu slouží například software DeskArtes 3Data Expert Series. [5]

Software Cadmould® 3D-F se skládal z modulů, které byly ve zkratce popsány (vzhledem k použití softwaru v praktické části práce) v odstavci níže. V principu však platilo, že oproti základnímu modulu Cadmould® 3D-F Essential obsahujícímu ty naprosto nejzákladnější analýzy byly další moduly vždy rozšířeny o nějakou další schopnost (analýzu) a z toho vyplývající další výsledky. [1]

Cadmould® 3D-F umožňuje provádět co do množství a rozsahu výsledků dva druhy simulací. Jednak umožňuje simulovat vstřikování pouze na 3D CAD modelu výlisku bez okolních částí vstřikovací formy. Pak uživatel pouze zadává umístění vtoku, vstřikovaný materiál a technologické podmínky vstřikování. Tento druh simulace slouží k získání základní představy o chování daného výlisku při vstřikování. Výhoda tohoto postupu spočívá v jeho rychlosti a relativní jednoduchosti.

Pro hlubší a přesnější výsledky simulace musí uživatel do simulace zahrnout s 3D CAD modelem výlisku i jeho okolí, které proces ovlivňuje. Okolím je v tomto případě myšlen temperační systém vstřikovací formy, vtokové (plnicí) kanály či trysky, vložky v tvárníku a tvárnici a podobně. Cadmould® 3D-F umožňoval jednak přímé modelování tohoto okolí, umožňoval ale i tyto prvky importovat z CAD softwaru uživatele. Uživatel importoval z CAD softwaru do Cadmould® 3D-F skupinu úseček (úsečka o délce odpovídající délce kanálu ležící v ose kanálu), kterým pak po importu pouze přiřadil rozměr (průměr kanálu) a vytvořil tak velice rychle a efektivně například celý temperační systém formy. Podobným způsobem mohl být vytvořen i vtokový systém. Potřebné úsečky se do Cadmould® 3D-F importovali ve formátu IGS, který podporovala většina CAD softwarů. Této možnosti bylo využito i v praktické části diplomové práce.

Cadmould moduly:

Základním modulem Cadmould® 3D-F byl Cadmould® 3D-F Essential. Obsahoval tyto nejzákladnější funkce: průběh plnění, teplotu na čele proudící taveniny, tlakové rozložení ve tvarové dutině formy během plnění, plnicí problémy, dobu do odformování. Jednalo se o nejzákladnější modul sloužící pro jednoduché rychlé výpočty. Do tohoto modulu bylo možné implementovat další moduly rodiny Cadmould®. [5]

Další moduly rozšiřovaly analytické možnosti softwaru. Modul RAPID umožňoval automaticky určit polohy a počet vtoků, analýzu studených spojů, vstřikovacího tlaku a doby chlazení. Modul FILL rozšiřoval možnosti analýz vícenásobných a sdružených forem a s tím související dimenzování a vybalancování vtokových kanálů. Modul CASCADIC INJECTION analyzoval sekvenční (kaskádové) vstřikování. Modul PACK analyzoval dotlakovou fázi vstřikovacího cyklu. Modul FIBER počítal orientaci plniva s krátkými i dlouhými vlákny. Modul COOL analyzoval teploty na povrchu tvarových dutin. Modul WARP analyzoval smrštění a deformace, umožňoval měření vzdáleností dvou bodů na povrchu dílu po smrštění a deformaci, měření odchylek od rovinnosti, přímosti, kruhovitosti a naklonění stěn. Modul 2K & Insert sloužil k vyhodnocení vstřikování se záhlaví a vícekomponentního vstřikování. Modul RUBBER analyzoval zpracování pryžových směsí a LSR. Modul THERMOSETS simuloval plnění dílů z reaktoplastů. Modul INJECTION COMPRESSION byl doplňujícím modulem pro analýzu procesu vstřikování do pootevřené formy. Modul BATCH1 byl operátor pro řízení výpočtů zadaných

úloh, který umožňoval využít hardware a software k provádění hromadných výpočtů. [5]

2.2.4. Autodesk® Simulation Moldflow®

Autodesk® Simulation Moldflow® je simulační software pro vstřikování plastů jako součást řešení Autodesk® pro Digital Prototyping, poskytuje nástroje, které pomáhají výrobcům predikovat, vyhodnotit a optimalizovat technologický design plastových dílů a vstřikovacích forem. [6, 9]

Tento produkt bylo stejně jako výše popsany Cadmould® 3D-F možné pořídit v několika úrovních, dle toho co daný uživatel vyžadoval. Primárně byl systém rozdělen na Autodesk® Simulation Moldflow® Insight a Autodesk® Simulation Moldflow® Adviser. Oba tyto softwary měly obdobné funkce. Software Autodesk® Simulation Moldflow® Insight poskytoval oproti Autodesk® Simulation Moldflow® Adviser možnost hloubkově řešit, vyhodnocovat a optimalizovat plastový díl. [9]

Výsledky z Autodesk® Simulation Moldflow® byly v podobném rozsahu jako z Cadmould® 3D-F. Autodesk® Simulation Moldflow® obsahoval navíc modul analýza deformací jader vstřikovacích forem, simulace zapouzdření s nedostatečným zaplněním (pro drobné elektrokomponenty) a analýzu dvojlohu na povrchu vylisku. [6]

2.2.5. Moldex3D

Moldex3D je plně 3D CAE simulační software pro vstřikování plastů. Moldex3D dokáže do hloubky simulovat proces vstřikování, optimalizovat design výrobku, zhodnotit výrobitelnost, umožňuje zkrácení doby vstupu výrobku na trh. Výsledky slouží k optimalizaci designu produktu a zpracovatelských podmínek. [7]

Řada produktů Moldex 3D se skládala ze třech základních softwarů, dle toho jak uživatel zamýšlí software používat. [7]

Moldex3D/Solid sloužil ke komplexní optimalizaci i tvarově komplikovaných dílů a forem a dílů s extrémní změnou tloušťky stěny. Moldex3D/eDesign byl určen k rychlému ověřování designu produktu v postupných krocích poskytoval efektivní řešení při vývoji designu produktu a formy. Moldex3D/Shell byl vhodný pro ploché i velkorozměrové díly s rovnoměrnou tloušťkou stěny. [7]

Tyto tři základní softwary se tak jako více zmíněné skládaly z modulů.

2.2.6. Varimos

VARIMOS = Virtual And Real Injection Moulding Optimisation System byla softwarová nastavba (doplňkový modul) Cadmould® 3D-F umožňující do určité míry automatickou optimalizaci vstřikovacího procesu ve virtuálním prostoru.

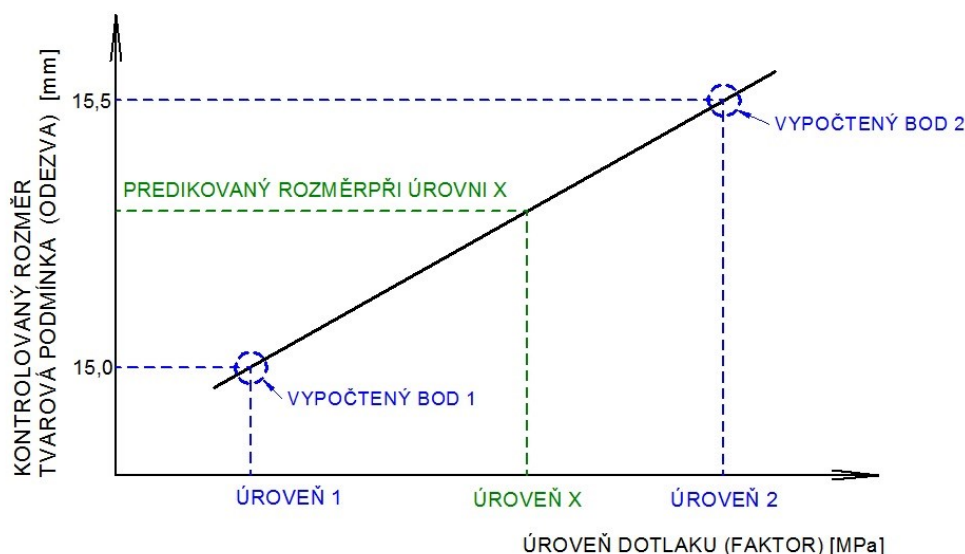
Cílem Varimos bylo co možná nejvíce snížit čas a s tím spojené náklady při ožiování nové či modifikované vstřikovací formy a to tím, že poskytl informace o chování výlisku za měnících se technologických podmínek, aniž by musel uživatel provádět testy přímo na vstřikovací formě. [8, 10, 11, 12]

Princip DOE:

Základním stavebním kamenem výpočtů a simulací ve Varimos byla metoda označovaná jako DOE – Design of experiment (návrh experimentu). Jednalo se v principu o jednoduchou metodu umožňující poměrně rychlé nalezení výsledku, aniž by bylo třeba provádět obrovské množství výpočtů (veškeré experimenty). Princip DOE byl vysvětlen na konkrétních příkladech přímo ze vstřikování plastů. [13]

Do procesu vstřikování plastů vstupuje řada proměnných jako například teplota taveniny, teplota stěny nástroje, vstřikovací tlak, doba plnění dutiny nástroje a další, které byly pro potřeby DOE označeny jako faktory. Nastavení určitých hodnot (v DOE úrovni) těchto a dalších vstupních proměnných (faktorů) vede k výsledku, k plastovému výlisku s určitými parametry jako délkové rozměry, hmotnost, rovinnost stěn a podobně, které byly označeny jako odezvy. Tzn. faktory do procesu vstupující způsobují odezvy. Konkrétní hodnota (číslo), například konkrétní teplota taveniny byla nazvána úrovní. [13]

V DOE je využito skutečnosti, že mnohé závislosti mezi faktorem a odezvou při vstřikování plastů vykazují lineární charakteristiku. Například vztah mezi velikostí dotlaku a rozměrem výlisku. Stačilo provést experiment (výpočet) pouze s dvěma úrovněmi faktoru (velikostí dotlaku) a zjistit úroveň odezvy (rozměr výlisku). Pak pro jakoukoliv další úroveň faktoru nacházející se v intervalu mezi oběma již testovanými nebyl problém jednoduše odečíst úroveň odezvy, jak bylo ukázáno na obrázku č. 5. [13]



Obr. 5: Příklad rychlého určení velikosti odezvy (rozměr výlisku) s využitím linearit v intervalu mezi dvěma testovanými úrovněmi faktoru (velikost dotlaku), nejjednodušší příklad DOE pro vstřikování plastů [13]

Výpočty Varimos na základě DOE:

Základního principu DOE (popsáno výše) využíval i modul Varimos. Varimos umožňoval uživateli zadat omezující podmínky důležité z hlediska výlisku jako například důležité délkové rozměry, rovinnost pohledových ploch, zachování důležitých úhlů mezi stěnami výlisku, dodržení hmotnosti výlisku, velikosti průměrného smrštění a podobně. De-facto parametrů, které by byly sledovány při ožiování a seřizování formy v provozu. Tyto parametry byly z hlediska DOE označeny jako odezvy.

Technologické parametry (faktory) se „variovaly“. Variování znamenalo to, že daný faktor (například teplota taveniny, čas plnění dutiny formy, čas ochlazování a dotlaku ...) nebyl zadáván v preprocesingové fázi jako jedna konkrétní hodnota (úroveň, jak tomu bylo v běžných simulacích vstřikování zvykem), ale jako „základní“ úroveň s určitým intervalem (toleranční pásmem), ve kterém byl uživatel (technolog, konstruktér nástroje, ...) ochoten či měl možnost se pohybovat. Příklad takového zadání byl na obrázku č. 6.

Parameter	Basic Level (s)	Tolerance Range (s)
Filling Time [s]	2.000	0.500
Pressure-Controlled Filling [%]	99.0	
Melt Temperature [°C]	240.0	10.0
Element-Based WT for Filling & Cooling [°C]	240.0	10.0
Ejection Temperature [°C]	25.0 / 3:	
Packing Time [s]	5.000	1.000
Cooling Time [s]	20.000	5.000

"Základní" úrovně faktorů

Toleranční pole "základní" úrovně

Čas plnění dutiny formy

Bod přepnutí na dotlak

Teplota taveniny

Teplota horkého vtokového systému

Teplota při vyhazování

Čas dotlaku

Čas ochlazování

Obr. 6: Dialogové okno sloužící k zadání a zároveň i variování technologických parametrů. V levém sloupci dialogového okna zadávána „základní“ úroveň faktorů, kterou uživatel preferoval (zjištěná například na základě úvodní simulace či ze zkušeností s podobnými výlisky). V pravém sloupci dialogového okna zadání tolerančního pásma (okrajové úrovně, na jaké až úroveň faktoru byl ochoten uživatel zajít)

Například pro faktor času plnění dutiny formy by uživatel při standardní simulaci zadal pouze jednu úroveň, například defaultně navrhnoutou 2 [s]. Tím by byly výsledky simulace vztaženy pouze k této konkrétní úrovni. Pokud by výsledky simulace z nějakého důvodu nevyhovovaly a uživatel by usoudil, že to bylo způsobeno právě nevhodnou volbou úrovně času plnění dutiny formy, musel by nastavit novou úroveň (nové číslo) a celou simulaci zopakovat. To

by prováděl „krok po kroku“ tak dlouho, než by dosáhl požadovaného výsledku, což by bylo značně časově náročné.

Díky modulu Varimos uživatel například úroveň času plnění dutiny formy varioval, tzn., zadával úroveň například $2 \pm 0,5$ [s]. Tímto způsobem nezískával pouze jeden výsledek (odezvu), ale hned tři. Jednak pro „základní“ úroveň faktoru 2 [s], ale i pro okrajovou úroveň 1,5 [s] a 2,5 [s]. Z těchto výsledků software určil na principu DOE odezvu nejen pro tři úrovně faktorů 1,5 [s], 2 [s] a 2,5 [s] ale i pro všechny úrovně nalézající se v intervalu mezi okrajovými, jelikož z výsledků na základě principu DOE byla závislost mezi faktorem a odezvou známá.

V praxi Varimos (stejně tak jako seřizovač při ožívování nové formy) nevarioval pouze jeden faktor, ale několik faktorů. Tím, jak vzrůstal počet faktorů, zákonitě rostl i počet nutných experimentů (výpočtů). Teoreticky nutný počet experimentů na základě „úplného DOE“ byl dán dle vztahu v tabulce č. 3 níže. Princip „úplného scénáře výpočtů“ s pěti faktory ve třech úrovních byl v tabulce č. 4.

Tab. 3: Vztah sloužící pro určení teoreticky nutného počtu experimentů „úplného DOE“ [13]

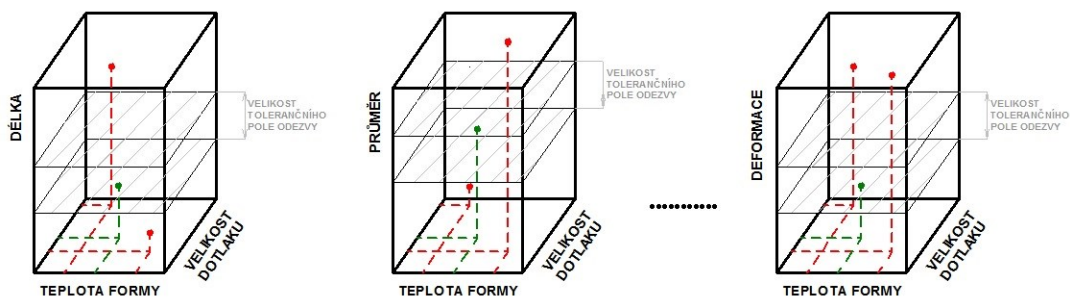
$n = l^f$ [–]
n [–] ...počet nutných experimentů (výpočtů)
l [–] ...počet úrovní faktorů
f [–] ...počet faktorů

Tab. 4: Příklad úplného výpočtového scénáře Varimos [13]

Čas plnění dutiny formy	Teplota taveniny	Teplota stěny formy	Čas dotlaku	Čas chlazení	Varianta výpočtu číslo
•	•	•	•	•	1
•	+	+	+	+	2
•	•	+	+	+	3
•	•	•	+	+	4
•	•	•	•	+	5
-	+	+	+	+	7
•	-	-	-	-	XXX
					↓
					243
•		značí „základní“ úroveň faktoru z levého sloupce dialogového okna z obrázku č. 6			
+		značí horní okraj úroveň tolerančního pásma faktoru			
-		značí dolní okraj úroveň tolerančního pásma faktoru			

Varimos však neprováděl výpočet pro scénář stanovený na principu „úplného DOE“ jako byl například v tabulce č. 4. Varimos pracoval s algoritmem, který porovnával jednotlivé varianty výpočtů a určil (vybral) pouze ty nejdůležitější a nejlépe popisující daný výlisek. Vytvořil tak „zjednodušený výpočtový scénář“ ve kterém nebylo 243 variant výpočtů, jako bylo ukázáno v tabulce č. 4, ale například pouze 10, které nejlépe popisovali chování výlisku.

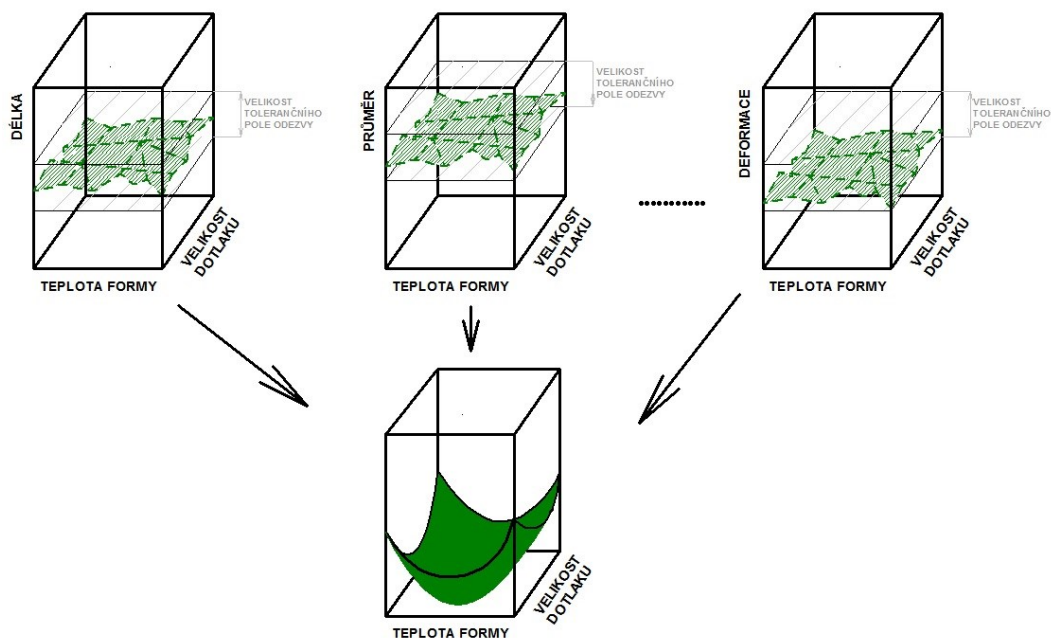
Jak již bylo zmíněno, pokud by k optimalizaci vstřikovacího procesu nebylo použito Varimosu, muselo by být využito principu „krok po kroku“. Bylo by nutné provést pro každou kombinaci úrovní faktorů simulaci a vyhodnotit zda je odezva v toleranci. Tento postup by bylo nutné stále opakovat než by bylo nalezeno optimální řešení, jak bylo naznačeno na obrázku č. 7. Zelený bod označoval nalezení takové kombinace úrovní dvou faktorů (velikost dotlaku, teplota formy), při které byla odezva (délka, průměr, ..., deformace) v toleranci. Červené body označovali „neúspěšné pokusy“. Jak bylo z obrázku patrné, byla nakonec „krok po kroku“ nalezena taková kombinace úrovní faktorů, která by zaručila všechny požadované odezvy v toleranci (zelený bod). Uživatel ale nezískal žádné informace o okolí tohoto zeleného bodu. Jelikož při vstřikování plastů není možné udržet přesně úrovně všech technologických podmínek (faktorů) po celou dobu procesu konstantní (technologické podmínky kolísají) bylo účelné znát i vliv kolísání technologických podmínek (faktorů) na odezvy. Z toho vyplývá, že by bylo ideální nalézt takový zelený bod, který bude co nejbližše středem všech tolerančních pásem odezev. Tím by bylo zaručeno, že proces bude stabilní (robustní).



Obr. 7: Nalezení optimálních technologických parametrů principem „krok po kroku“. Červené body označují kombinaci úrovní faktorů (velikost dotlaku a teplota formy) nacházejících se mimo toleranční pásmo odezvy (délka, průměr, ... deformace). Zelený bod označuje nalezenou kombinaci úrovní faktorů, pro které jsou všechny odezvy v tolerančním pásmu. Tento způsob ale téměř neumožňuje nalézt takovou kombinaci úrovní faktorů, aby byl zelený bod vždy přibližně ve středu tolerančního pásma každé jednotlivé sledované odezvy [14]

Díky „zjednodušenému výpočtovému scénáři“ popsanému výše nezískal Varimos pouze výše popsany zelený bod, ale jeho výsledkem byla plocha. Veškeré body ležící na této ploše byly kombinace úrovní faktorů. Pro jakýkoliv bod plochy bylo zaručeno, že odezva bude v toleranci, jak bylo vidět na

obrázku č. 8. Pro každou sledovanou odezvu získal Varimos takovouto plochu. Vzájemným „složením“ vznikla „výsledková plocha“, kde každý bod na této ploše znamenal optimální nastavení úrovní faktorů pro výrobu takového výlisku, který bude mít všechny sledované odezvy v toleranci a co možná nejblíže středu tolerančních pásem.



Obr. 8: Výsledky optimalizací získané moduem Varimos. Zelené šrafované plochy představují možné kombinace úrovní faktorů, při kterých budou odezvy ležet ve svých tolerančních pásmech. „Složením“ těchto ploch vznikne výsledková plocha. Body na ploše jsou kombinací úrovní faktorů, při kterých budou vždy všechny odezvy ve svých tolerančních pásmech[14]

Post-processing, výsledky Varimos:

Po výpočtech bylo uživateli zobrazeno dialogové okno, takzvané „technologické okno“, kde bylo uživateli přehledně zobrazeno, kde se při konkrétním nastavení variovaných parametrů (úrovní faktorů) nacházel, zda to pro něj z hlediska požadavků na výrobek bylo (úrovní odezvy) přípustné či ne. [10, 12]

Na základě odborných znalostí ze vstřikování plastů mohl být počet nutných experimentů značně snížen, a to díky tomu, že interakce mezi některými faktory byly vzhledem k odezvě nevýznamné. Například nebylo pro konkrétní výlisek nutné variovat všechny technologické parametry a podobně. [13]

Tuto skutečnost bylo možno zohlednit i po výpočtech v dialogovém okně „technologického okna“ zvýšením, či naopak snížením priority určité odezvy. Například kladl-li uživatel důraz na přesné dodržení výšky výlisku (vzhledem k funkčnosti) a prioritu této odezvy zvýšil a zároveň ožeil přesnou hmotnost výlisku a dané odezvě prioritu snížil nebo ji z dialogu technologického okna úplně vyřadil.

Dialog „technologického okna“ pouze vyhledával a zobrazoval výsledek, nedocházelo už k žádným výpočtům, výpočty byly provedeny, úrovně odezvy pro všechny úrovně faktorů známi, tudíž byla práce s tabulkou velice rychlá a efektivní. Uživatel s „technologickým oknem“ pracoval jako s „živým“, tzn., mohl s jednotlivými parametry v tabulce pohybovat a okamžitě viděl, jak se daná změna projeví na ostatních parametrech. Zde se s výhodou uplatnil princip DOE. [11, 12, 13]

Výsledky poskytnuté softwarem Varimos pro proces vstřikování plastů lze shrnout do několika hlavních kategorií: nalezení faktoru nejvíce ovlivňující hodnotu odezvy na výlisku, nalezení neoptimálnější úrovně faktorů pro co nejstabilnější a nej kvalitnější proces vstřikování, predikce stability vstřikování v intervalu úrovní testovaných faktorů. [13]

Přínosy Varimos pro průmyslovou praxi:

Díky možnosti takto kombinovat jednotlivé faktory a určovat jejich prioritu pro konkrétní vstřikovací proces de facto prováděl uživatel softwaru virtuálně to samé, co by seřizovač/technolog prováděl reálně při náběhu výroby a seřizování vstřikolisu („oživení“ nástroje). Díky virtuální části Varimos se tak podstatně zkracuje potenciálně dlouhý a ekonomicky nákladný proces náběhu výroby. Zároveň se i zrychluje eventuální převedení výroby ze stroje na stroj, z továrny do továrny a podobně. [11, 12]

Nalezenou optimální variantu technologických podmínek umožňuje Varimos zpátky exportovat do Cadmould® 3D-F. Po simulaci této ideální varianty dostane technolog též přehled, zda nemá tato varianta negativní vliv na jiné parametry výlisku neoptimalizované ve Varimos. Technolog tak získá naprostou jistotu nalezení ideální varianty, což jiné podobné softwary neumožňují.

Výstupy z Cadmould 3D-F® s nadstavbovým modulem Varimos:

CAD model výlisku a přiléhajícího okolí optimalizovaný simulací. Tj. stejný výsledek jako u běžné simulace vstřikování. Například pomocí postupných simulací „krok po kroku“ se uživatel dopracuje k úpravám tloušťky stěn, přidání/odebrání žeber, změně geometrie vtoků případně jejich přemístění, změně geometrie chladicí soustavy a podobně. [11, 12]

K takto upravenému (optimalizovanému) CAD modelu a jeho okolí získá uživatel i optimalizované parametry vstřikovacího procesu a hlavně představu o tom, v jakých hodnotách technologických parametrů se může bezpečně pohybovat. Například, že teplota taveniny má být 235 ± 5 [°C] a že pokud výrazněji změni teplotou stěny formy, pravděpodobně bude vyrábět zmetky a podobně. [11, 12]

Uživatel získá praktický výstup v podobě protokolu obsahujícího optimální technologický proces pro simulovaný výlisek. [11, 12]

Prací s tabulkou výsledků může uživatel získat cenný přehled, jak se změna konkrétního faktoru (například teploty taveniny) projeví v kvalitě výlisku, aniž by musel provádět praktické zkoušky na vstřikolisu.

Výsledkem Varimos není tedy jen optimalizovaný výlisek, potažmo 3D CAD model, ale i optimalizovaná technologie a úspora strojního času.

Reálná část Varimos:

Na virtuální část systému Varimos navazuje část „reálná“. Nositelem reálné části byl přístroj Varimos (viz. obrázek č. 9). Toto zařízení bylo propojeno s řídicím softwarem vstřikolisu a dokázalo vstřikolis ovládat (měnit technologické podmínky bez zásahu vnější obsluhy). Přístroj pak po celou dobu výroby sledoval na základě parametrů z teplotního snímače a snímače tlaku v dutině formy stabilitu procesu a na základě optimalizace provedené ve virtuální části Varimos zanesené do přístroje Varimos prováděl úpravy technologických podmínek v reálném čase. Přístroj tak de-facto prováděl to samé co seřizovač. [11]



Obr. 9: Přístroj Varimos [11]

2.3. Vliv fází vstřikovacího procesu na kvalitu a tvar výlisků

Vzhledem k tomu, že cílem diplomové práce byla optimalizace výlisku pouze s možností změn vstřikovacích parametrů (vstřikovací forma a tím pádem i design výlisku byl daný a nebylo ho možno změnit), tato kapitola sloužila jako opora závěrů v praktické části práce. Byly zde obecně popsány možné vlivy jednotlivých fází vstřikovacího procesu na kvalitu a tvar výlisku.

Proces vstřikování není kontinuální, ale cyklicky se opakuje. Jeden cyklus lze rozdělit na několik základních fází: uzavření formy a vyvolání uzavírací síly, plnění dutiny formy, přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak, dotlak, chlazení výlisku ve formě při probíhající plastikaci, otevření formy a vyhození výlisku jak je vidět na obrázku č. 10 níže. Poté se proces znovu opakuje.

Z hlediska kvality vstřikování je nejdůležitější zajistit opakovatelnost všech parametrů, které do procesu vstupují, tak aby každý vstřikovací cyklus byl z hlediska nastavení stejný.

2.3.1. Plastikace

Úkolem plastikace je připravit teplotně co nejhomogennější dávku taveniny s rovnoměrnou distribucí přísad v každém cyklu. Zároveň je nutno zajistit opakovatelnost plastifikace, tak aby při každém cyklu proběhla plastifikace stejně a dodaná tavenina měla stejné vlastnosti jako v předchozím cyklu. [3]

K plastifikaci se využívá maximum času, který je k dispozici. Většinou je to čas o cca 2 [s] kratší než doba chlazení výlisku ve formě. Právě interval chlazení výlisku se k plastifikaci využívá. V případě nutnosti lze plastifikační čas prodloužit. Důležitá je i doba „pobyту“ taveniny v plastifikační komoře vzhledem k nebezpečí degradace taveniny či poškození plniv. [3]

Na plastifikaci má vliv teplota taveniny (správné nastavení topných pásem), otáčky šneku. Tím je ovlivněna orientace makromolekul v tavenině a tak výsledné smrštění výlisku. Z hlediska kvality výsledného výlisku obecně platí, čím vyšší je teplota taveniny, tím vyšší je výrobní smrštění, zároveň ale klesá smrštění povýrobní (zejména u semikrystalických materiálů), výlisek je izotropnější, klesá nebezpečí studených spojů a nedostříknutí výlisků, lépe se „vykreslí“ dezén formy, mizí tokové čáry a podobně. [3]

2.3.2. Plnění dutiny formy a kompresní fáze plnění

Tuto fázi vstřikovacího cyklu ovlivňují parametry jako rychlost vstřikování a její profil, vstřikovací tlak, teplota formy, teplota taveniny, přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak a doba vstřikování. [3]

Vstřikovací rychlost ve spojitosti s teplotou taveniny a teplotou formy má zásadní vliv na jakost povrchu výlisku, vrásnění a podobně. Vstřikovací rychlost v kombinaci s velikostí vstřikovacího tlaku má vliv na nedostříknutí výlisku či naopak na přetoky.

Vstřikovací tlak lze v praxi nastavit pouze na jednu hodnotu, vstřikovací rychlost lze nastavit jak konstantní tak v určitém profilu po dráze šneku a ovlivnit tak vlastnosti výlisku. [3]

Z hlediska vlivu na kvalitu výlisku obecně platí, že konstantní a co možná nejvyšší vstřikovací rychlost vede k dlouhé dráze toku taveniny (dobrá zatékavost), rovnoměrnějším podmínkám při chlazení a podobně. Snížení rychlosti vstřikování se používá jako prevence proti degradaci taveniny průtokem malého ústí vtoku či jako prevence diesel efektu a přítomnosti vzduchu ve výlisku. Profilová rychlost plnění vede k zamezení jettingu a efektu gramofonové desky při nevhodně umístěném vtoku. Při příliš nízké vstřikovací rychlosti může docházet k rychlému chladnutí taveniny a vzniku studených spojů, naopak při příliš vysoké rychlosti vstřikování může docházet k tepelné degradaci materiálu či poškození plniva nebo přetokům. [3]

2.3.3. Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak

Bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak od sebe odděluje fázi plnění dutiny formy (ovlivnění nedostříknutí respektive přetoky) a fázi dotlaku (ovlivnění rozměrové a tvarové přesnosti výlisků). V zásadě existují čtyři způsoby, jak řídit přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak. Nejlepší výsledky z hlediska kvality výlisku má přepnutí podle tlaku v dutině vstřikovací formy či tlaku v horkém vtokovém systému. Přepnutí podle tlaku v hydraulice a podle dráhy šneku nemá tak dobré výsledky. Přepnutí podle času vstřikování je používáno pouze jako bezpečnostní pojistka. [3]

Pozdní přepnutí na dotlak může mít za následek vysoký tlak v dutině formy a s tím spojený vznik přetoků, vysoké vnitřní pnutí ve výlisku, vysoké zatížení uzavírací jednotky a všech pohyblivých částí vstřikovací formy. Brzké přepnutí na dotlak způsobí nezaplnění dutiny formy, nízkou hmotnost výlisku, staženiny, propadliny a podobně. [3]

2.3.4. Dotlaková fáze

Tato fáze má největší vliv na rozměrovou a tvarovou přesnost výlisků (smrštění) a anizotropii výlisku, úplné vyplnění tvarů, vykreslení dezénů a podobně. Dotlaková fáze se řídí dvěma parametry: dobou a velikostí (profilem) dotlaku. Nastavení dotlakové fáze musí být provedeno tak, aby se v dotlakové fázi odstranily propadliny, lunkry a dokonale se otiskl dezén formy. Efektivitu dotlakové fáze ovlivňuje i umístění a velikost vtoku, pokud bude vtok daleko od kritických míst a zaústěn do tenké stěny, nebude na tyto kritická místa dotlak působit, zároveň pokud bude průřez vtoku příliš malý, ústí vtoku zatuhne dříve než objem výlisku a dotlak na výlisek nebude vůbec působit.

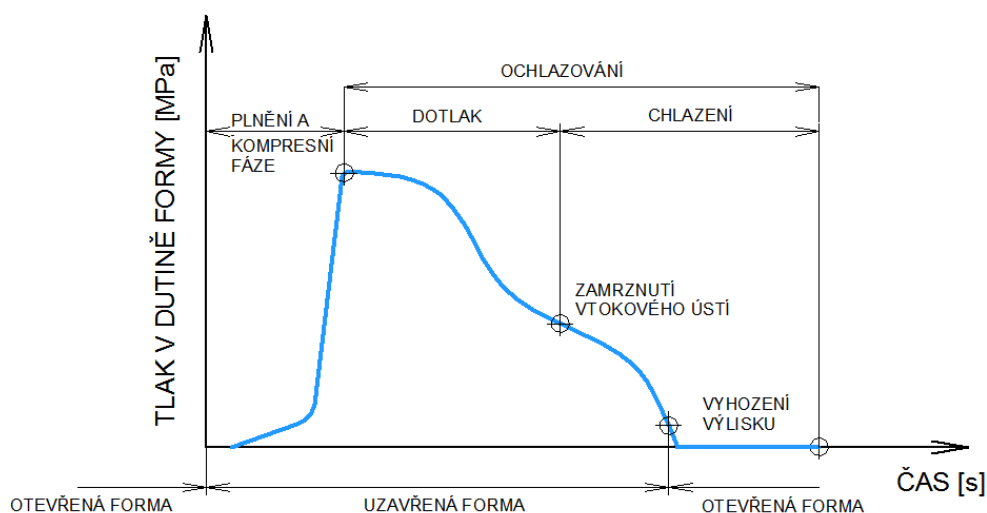
Dotlaková fáze má také podstatný vliv na velikost vnitřního pnutí ve výlisku, v případě profilovaného dotlaku se sestupnou tendencí lze získat výlisky s nízkým vnitřním pnutím. Najít správnou hodnotu a profil dotlaku je možné například vážením výlisků či kontrolou jejich rozměrů. [3]

2.3.5. Fáze chlazení

Obecně bývá rozlišován úsek chlazení, kterým je rozuměn čas od ukončení dotlakové fáze po vyhození výlisku z formy a úsek ochlazování, což je čas chlazení včetně času dotlakové fáze jak bylo vidět na obrázku č 10. [3]

Hlavní parametry, které ovlivňují ochlazování je teplota formy, doba chlazení a teplota při vyhození výlisku z formy. [3]

Fáze ochlazování má vliv na smrštění výlisku hlavně u semikrystalických polymerů. Obecně platí, že fáze ochlazování by měla být pouze tak dlouhá, aby při vyhazování výlisku z formy nedošlo k jeho poškození přetržením, otiskem vyhazovačů či nedošlo k jeho deformaci. Největší vliv na ochlazování má tloušťka stěny výlisku. Čím delší je čas chlazení a čím vyšší je teplota stěny formy, tím má semikrystalický polymer vyšší krystalický podíl, tzn. má vyšší okamžité výrobní smrštění, což vede pozitivně ke snížení dodatečného povýrobního smrštění. Teplota formy má také vliv na lesk výlisku. [3]



Obr. 10: Grafické zobrazení závislosti tlaku v dutině formy na čase (fáze vstřikovacího cyklu) [3]

2.4. Vady výlisků

Do vstřikovacího procesu a jeho správného nastavení vstupuje řada proměnných. Při nesprávném odladění procesu, nástroje či stroje nebo materiálu a podobně vznikají ve výliscích vady. Vadami pro účel této diplomové práce byly rozuměny odchylky požadovaných vlastností od správného či vzorového výlisku. Vady výlisků byly rozděleny do dvou základních skupin. [3]

Vady zjevné:

Vady zjevné jsou vady identifikovatelné snadno bez speciálních zařízení pouhým okem či porovnáním se vzorovým výliskem. Tyto vady lze dále členit na vady tvaru (nedostříknuté díly, propadliny, zvlnění, deformace, přetoky, otřepy, odchylky rozměru a podobně) a vady povrchu (nízký lesk, matná místa, stopy vlhkosti, neatisklý dezén, efekt gramofonové desky, delaminace, stříbření, spálená místa a podobně). [3]

Vady skryté:

Vady skryté, obvykle nelze vizuálně pouhým okem odhalit. Jedná se o vady typu vnitřní pnutí, bubliny, lunkry, anizotropie mechanických vlastností a podobně. [3]

Vzhledem k charakteru této diplomové práce byly v následujících podkapitolách podrobněji popsány vady zjistitelné v předvýrobní fázi pomocí simulačního softwaru včetně opatření vedoucích k odstranění těchto vad v předvýrobní fázi. Pro úplnost byly také stručně popsány způsoby jak tyto vady odstranit ve výrobní fázi.

2.4.1. Studené spoje

Studené spoje se vyskytují v místech, kde je tavenina plastu nucena obtékat překážku (například kovový zálisek, tvarové jádro a podobně) nebo v případě, kdy je použito pro plnění jedné dutiny formy více vtoků. Jednoduše v místech, kde se setkají dvě nebo více čel taveniny. V takových místech pak může technolog očekávat dva scénáře. [3, 15]

Pokud se setkají ještě „teplá“ čela taveniny, dojde de facto ke svaření obou čel „natupo“. Mechanické vlastnosti se v daném místě mírně zhorší a také se zhorší vzhled výlisku v tomto místě.

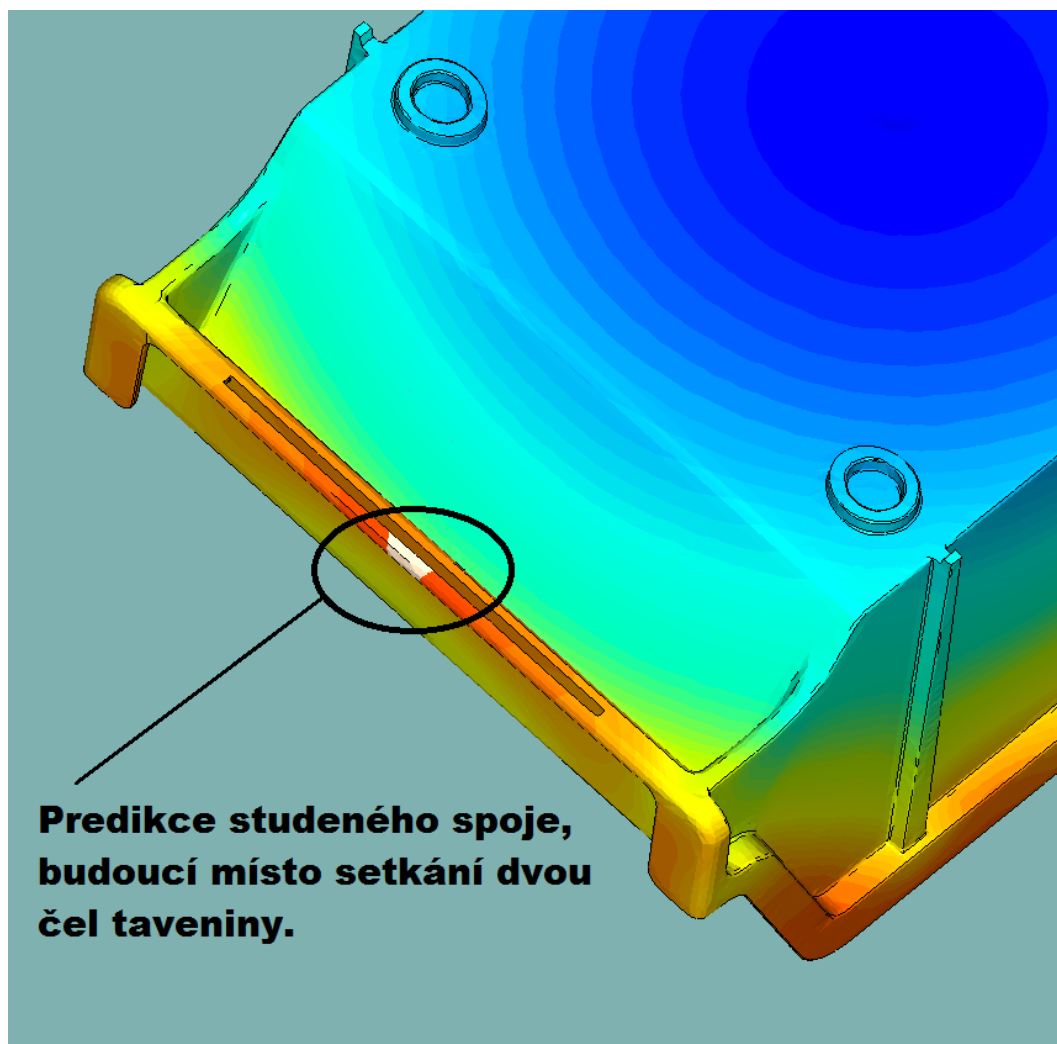
Pokud se setkají „studená“ čela taveniny, dojde k výraznému zhoršení vzhledu a mechanických vlastností výlisku.

Odhalit studený spoj je možné již v předvýrobní fázi pomocí simulace vstřikování analýzou plnění ukazatelem teploty na čele taveniny v jednotlivých časech plnění dutiny formy jak je vidět na obrázku č. 11. Ohraničené barvy ukazují čelo taveniny ve stejném čase a objasňují způsob tečení. [16]

V předvýrobní fázi lze studený spoj odstranit přemístěním vtoků a změnou jeho geometrie, případně změnou počtu vtoků, jelikož ještě není technolog vázán hotovou vstřikovací formou. Zde je možné i na základě

změnového řízení uvažovat o případné změně materiálu výlisku nebo problematické místo ve formě vybavit speciální temperační vložkou zvyšující teplotu v místě studeného spoje.

Ve výrobní fázi lze odstranit studený spoj zvýšením teploty taveniny, případně teploty formy, zvýšením rychlosti vstřikování a snažit se tak docílit spojení „teplých“ čel taveniny.



Obr. 11: Analýza plnění dutiny formy. Červená barva zobrazuje čela taveniny ve stejném čase a objasňuje způsob plnění dutiny formy. Z tohoto snímku lze usuzovat na nebezpečí vzniku studeného spoje z důvodu setkání obou čel taveniny. Dvě čela taveniny vznikla v důsledku tvarového řešení výlisku a polohy vtokového ústí

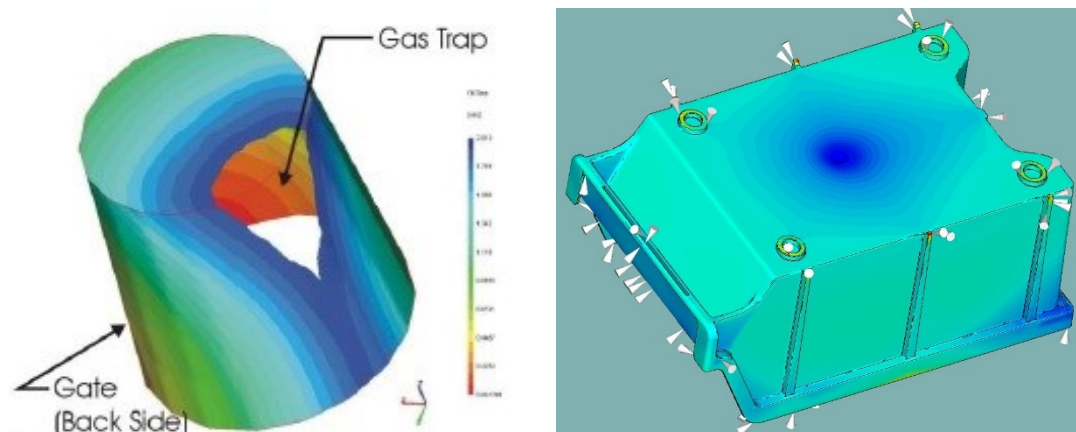
2.4.2. Diesel efekt, uzavřený vzduch

Vada s názvem Diesel efekt se vyskytuje v místech s nedostatečným odvzdušněním dutiny formy (vzduch nestačí před postupující taveninou včas uniknout). Do takových (z hlediska odvzdušnění „mrtvých“) míst čelo taveniny natlačí vzduch. Teplá tavenina vzduch ohřívá a zároveň stlačuje. Nakonec dojde k tomu, že vzduch a v něm nahromaděné plyny v důsledku vysoké

teploty spálí plast ve své blízkosti. Tato vada je zřetelná na první pohled, dané místo je na výlisku zčernalé, ožehlé. [3, 15]

Predikovat lze tuto vadu již v předvýrobní fázi v simulačním programu pomocí „ukazatele“ uzavřeného vzduchu jako na obrázku č. 12. [15]

Odstranit diesel efekt v předvýrobní fázi lze změnou umístění vtoku (pokud se hromadí vzduch „uvnitř“ výlisku) nebo úpravou odvzdušnění (pokud se vzduch nachází na okraji výlisku). Dále změnou materiálu za materiál s horší tekutostí, snížit vstřikovací tlak a rychlost v simulaci tak, aby měl vzduch čas uniknout. V sériové výrobě pak kontrola čistoty odvzdušnění, snížení uzavírací síly stroje.



Obr. 12: Ukazatel hromadění vzduchu. Místa se sklonem k „hromadění“ vzduchu označena bílými jehlany [15]

2.4.3. Nedostříknutý výlisek

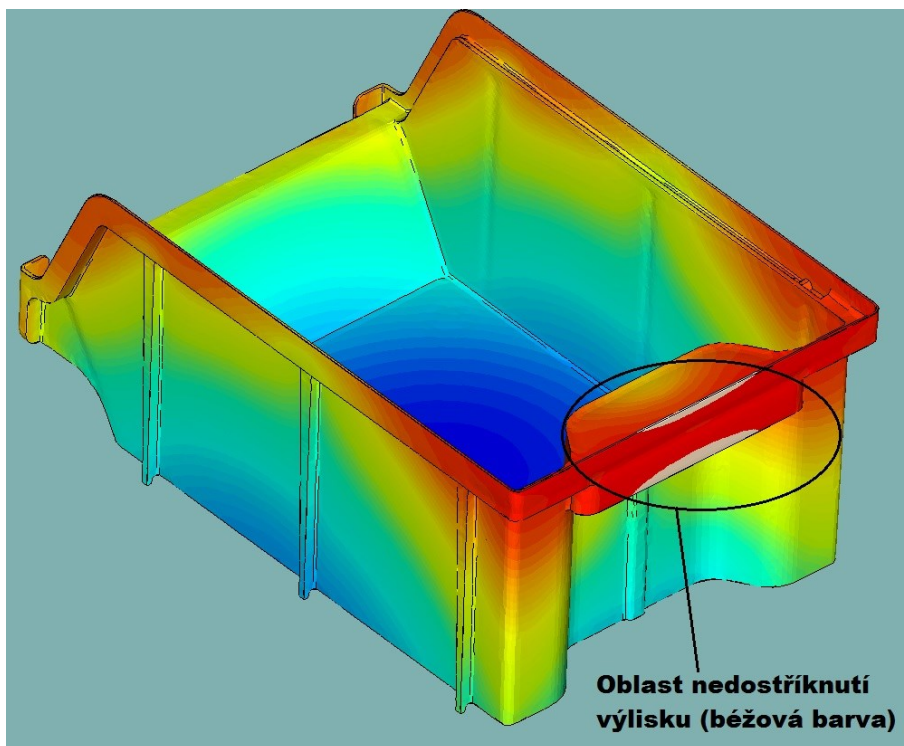
Vyskytuje se hlavně v místech vzdálených od vtoku, kde tavenina ztuhne dříve než má možnost zcela vyplnit dutinu formy. Vada je na výlisku patrná na první pohled. Na nedostříknutí výlisku se může podílet celá řada vlivů, z hlediska materiálu množství a druh přísad a jeho tekutost, z hlediska dílu jeho tvarová složitost a tloušťka stěn, z hlediska nástroje počet a vhodné rozmístění a geometrie vtoků a způsob odvzdušnění, z hlediska technologie teplota taveniny, vstřikovací tlak a dotlak, z hlediska vstřikolisu velikost dávky a polštáře.

Simulace vstřikování toto odhalí jako nedostatečné zaplnění dutiny formy, podmínky simulace je možno dle výše uvedeného upravit a nedostříknutí tak postupně odstranit. [15]

Na nedostříknutí může mít vliv i nevhodná poloha vtokového ústí. Pokud ještě není zahájena výroba formy, lze nechat určení vhodné polohy vtokového ústí na simulačním softwaru, případně pokud existuje nějaké konstrukční omezení, lze i zadat na výlisku plochy či místa kde může být vtokové ústí umístěno. Software na základě toho sám určí nejvhodnější polohu. [15]

V praxi by mělo být nedostříknutí vyřešeno již při ožívování vstřikovací formy. Při postupu ožívování bez dotlaku by mělo být postupným zvyšováním

velikosti vstřikované dávky nalezeno optimální množství taveniny, kdy je vyplněna celá dutina formy. Po nastavení dotlaku pak seřizena i velikosti polštáře.



Obr. 13: Nedostříknutí v místě okraje výlisku

2.4.4. Delaminace (odlupování povrchové vrstvy)

Vzniká nespojením povrchové vrstvy výlisku s jádrem výlisku v důsledku nerovnoměrných tokových a chladicích podmínek. Dochází k uvolňování jednotlivých vrstev. Příčinou může být příliš vysoká teplota taveniny a zároveň příliš nízká teplota stěny formy, případně i nedostatečně vysušený materiál, přísady či znečištění materiálu. Ze simulace lze delaminaci vytušit z podílu zamrzlé vrstvy v [%] z tloušťky stěny výlisku. [3, 15]

2.4.5. Přetoky

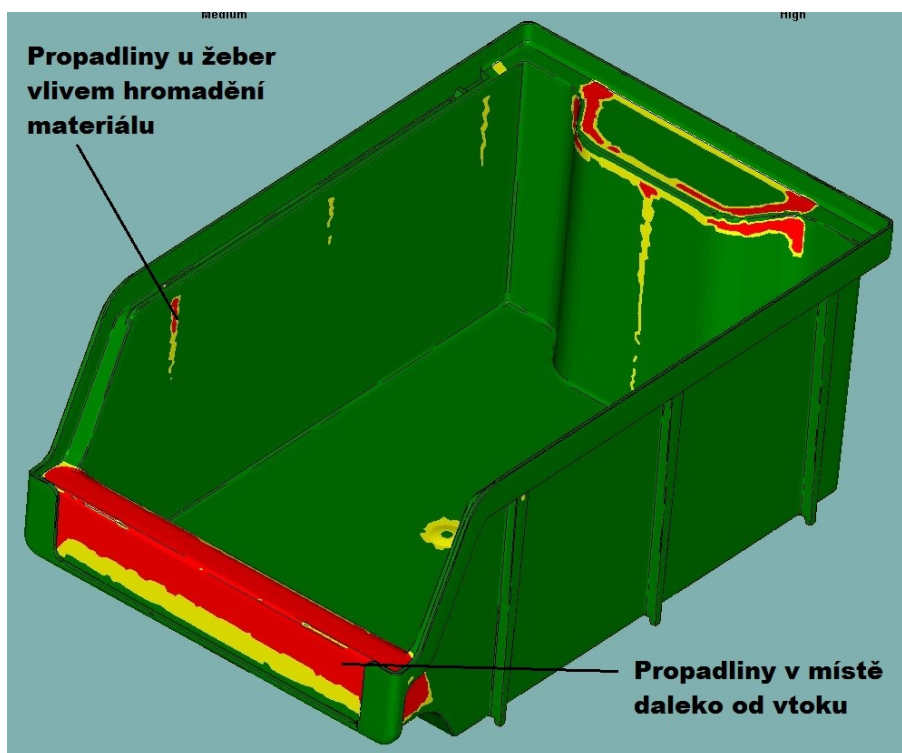
Přetoky se objevují v místech spár formy, tj. v místech dělicí roviny, okolo vyhazovačů, pohyblivých čelistí, vložek a odvzdušňovacích elementů. Vznikají hlavně v důsledku vysokého ITT taveniny plastu, malé uzavírací síly, vysoké teploty taveniny, vysoké vstřikovací rychlosti a vysokého vstřikovacího tlaku a dotlaku. Mohou vznikat i v důsledku špatného „spasování“ jednotlivých částí tvarové dutiny formy či jejího opotřebení.

Simulací lze částečně odhalit sklon k přetokům pomocí ukazatele tlaku v dutině formy na konci plnění. Pokud je tento tlak příliš vysoký, lze usuzovat na sklon k přetokům. Toto lze odstranit již v simulaci úpravou výše uvedených hodnot a provedením nové simulace. Nesmí pochopitelně vést úprava technologických parametrů k výskytu jiné vady. [3, 15]

2.4.6. Propadliny (lunkry)

Propadliny se objevují v místech nahromadění materiálu na výlisku, tj. většinou v místech tlustých stěn, napojení stěny a žebra nebo jiného tvarového prvku. Příčinou tohoto jevu je nerovnoměrný odvod tepla a s tím související nerovnoměrné smrštění.

Propadliny lze pomocí simulací snadno odhalit ukazatelem sink marks jak bylo patrné z obrázku č. 14. Software je zobrazí jednak plošně jako oblasti propadlin, dokáže je zobrazit i prostorově. Pak lze eliminovat propadliny úpravou dotlakové fáze, změnou materiálu, úpravou teploty formy a podobně. Pokud propadliny odhalí simulace ještě v předvýrobní fázi, lze je eliminovat úpravou konstrukce dílu (tloušťky stěn), změnou napojení žebra, změnou místa a geometrie vtoku. V softwaru Cadmould® 3D-F lze provést změnu tloušťky stěny přímo při simulaci a není tedy nutné se „vracet“ do CAD softwaru. [15]



Obr. 14: Plošné zobrazení propadlin. Propadliny jsou logicky hlavně v místech hromadění materiálu (napojení stěn a žebra) a v místech daleko od vtoku s horším působením dotlaku

2.4.7. Šmouhy vlivem orientace vláken

Vada, která se projevuje „kovovým“ odrazem povrchu výlisku, případně drsným povrchem. Je to v důsledku plniva (skelných vláken) vytlačených proudem taveniny k povrchu formy kde jsou nedokonale obalena rychle zatuhlou taveninou. Tyto šmouhy „kovového“ vzhledu lze eliminovat zvýšením teploty formy, teploty taveniny, zvýšit dotlak tak, aby došlo o obalení vláken ještě před zatuhnutím taveniny, případně změnou délky vláken z

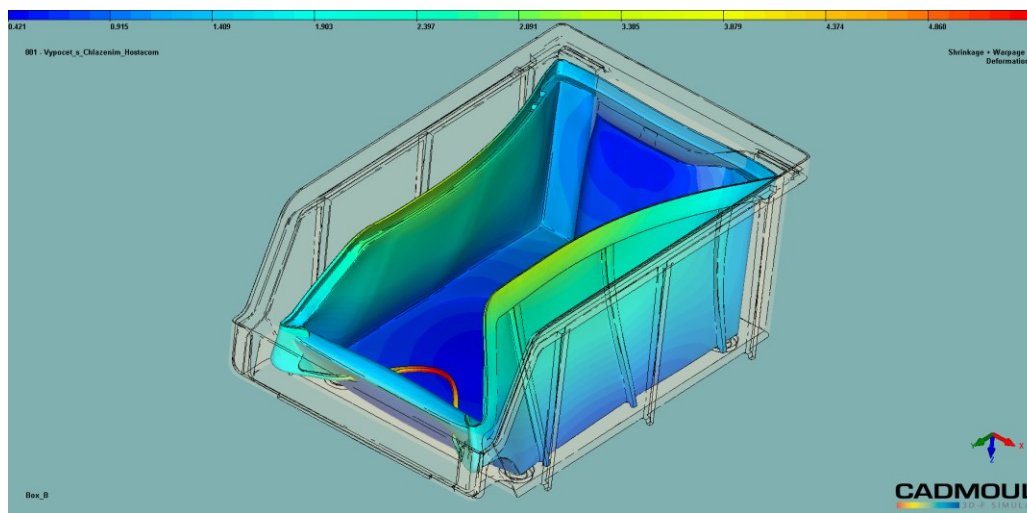
dlouhých na krátká. Simulační programy dnes obsahují i moduly k analýze orientace vláken ve výlisku, ze kterých se dají odhadnout místa se sklonem ke šmouhám. [15]

2.4.8. Deformace, smrštění

Cílem každého výrobce plastových výlisků z termoplastů je, aby výlisek měl požadovaný tvar a rozměry. Deformace plastových výlisků vznikají velmi často v důsledku smrštění jako následného jevu při vstřikování plastů. Simulační softwary vstřikování plastů představují velice dobrý způsob k analýze a z ní vzešlému potlačení deformací budoucího výlisku. [15, 16, 17]

Analýza celkové deformace představuje jeden ze základních modulů simulačních softwarů. Před posouzením deformací je nutné nastavit souřadný systém, vůči kterému se zobrazené deformace budou počítat. [15, 16, 17]

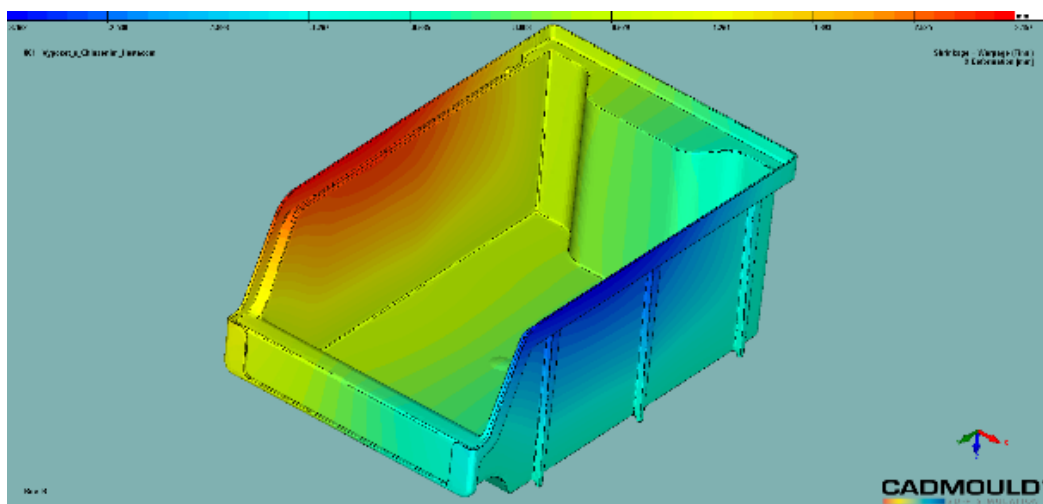
Základním výsledkem z deformační analýzy jsou tvar a rozměry výlisku dosažené za konkrétních technologických a dalších podmínek porovnaný s ideálním výliskem. Deformace se pak zobrazují jako barevná mapa na výlisku. S výhodou lze použít změnu měřítka, tj. pokud jsou výsledné deformace příliš malé a na modelu nezřetelné, lze je změnou měřítka lépe „vykreslit“ jak je vidět na obrázku č. 15.



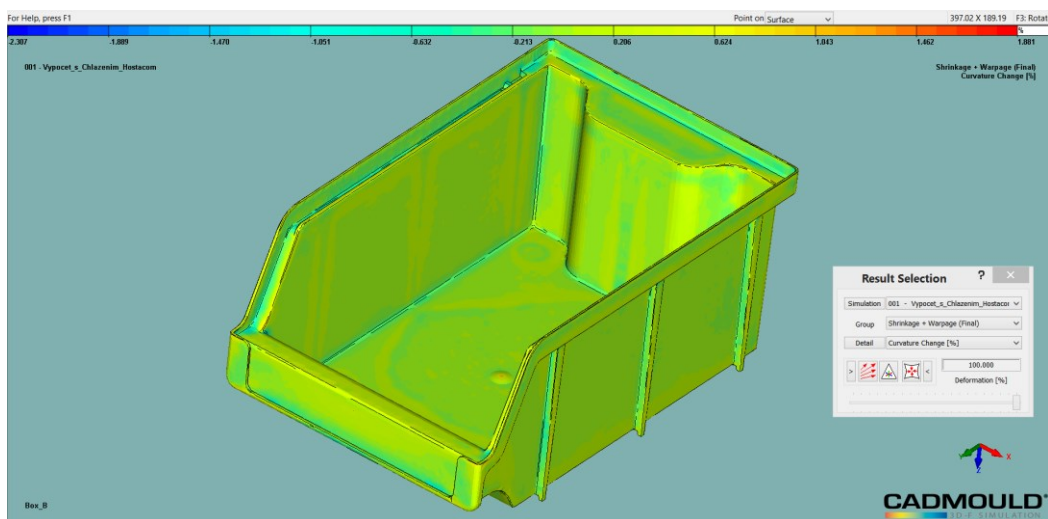
Obr. 15: Porovnání 3D CAD dat výlisku s výliskem a aplikovanými deformacemi při desetinásobném zvětšení deformací

Zobrazení deformací lze rovněž omezit a zobrazit pouze deformace v jedné ose jako na obrázku č. 16. K podrobnějšímu prozkoumání slouží nástroje pro kontrolu rovinnosti ploch, nástroje pro měření odchylky dvou boků, kontrolu křivosti (viz. obrázek č. 17) a podobně. [15, 16, 17]

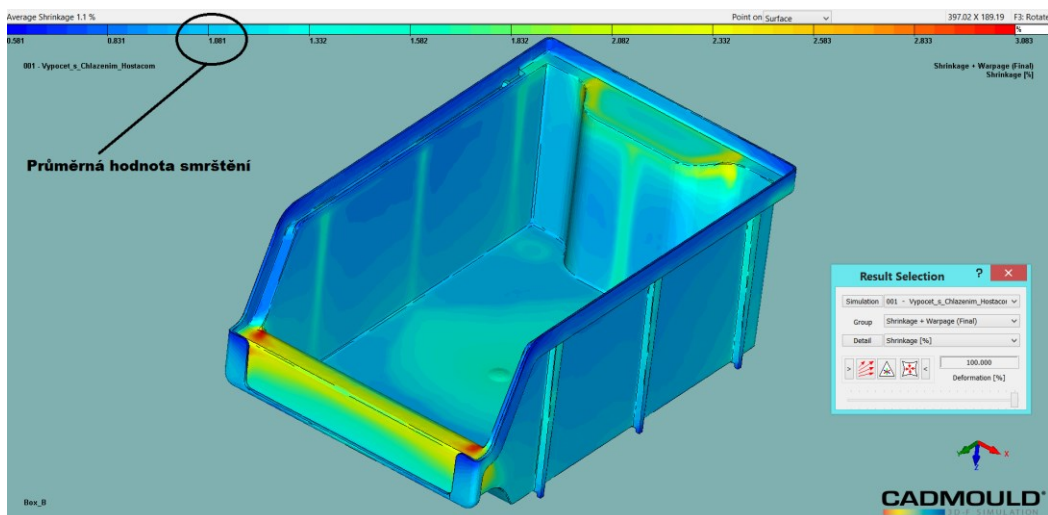
Software rovněž dokáže zanalyzovat výrobní smrštění výlisku. Dle kvality těchto výsledků má pak uživatel možnost toto zohlednit v rozměrech tvarové dutiny formy (viz. obrázek č. 18). [15, 16, 17]



Obr. 16: Deformace v jednom směru



Obr. 17: Analýza změn křivosti



Obr. 18: Určení velikosti smrštění důležité pro konstrukci nástroje. Software rovněž dokáže určit průměrné smrštění. Uživatel tak dostane přehled o chování výlisku a může lépe navrhnout rozměry tvarové dutiny formy

3. Experimentální část

V experimentální části diplomové práce byly provedeny simulace vstřikování plastů na konkrétním plastovém zkušebním výlisku popsáném v kapitole 3.1. Simulace byly provedeny v softwaru Cadmould® 3D-F. Výsledky z těchto úvodních simulací byly použity jako vstupní informace do softwaru Varimos, pomocí něhož byly nalezeny optimální technologické podmínky pro vstřikování uvedeného zkušebního výlisku s dodržením definovaných tvarových podmínek (parametrů) popsáných v kapitole 3.1. Následně byly dle nasimulovaných optimálních technologických podmínek výlisky vyrobeny a bylo provedeno porovnání vyrobených výlisků s 3D CAD modelem výlisku a hledány rozdíly v tvaru a rozměru v definovaných místech.

Cílem experimentu bylo zjistit, zda software Varimos dokázal efektivně optimalizovat technologické podmínky vstřikování zkušebního výlisku a zjistit tak, jak efektivním může být nástrojem pro úsporu času při ožívování nové či modifikované vstřikovací formy do „ostré“ výroby.

Na této části práce bylo spolupracováno s firmou STEINEL Technik s.r.o. Firma umožnila ve své pobočce v Liberci provádět simulace vstřikování v softwaru Cadmould® 3D-F a následné optimalizace v modulu Varimos. Oba tyto softwary měla firma k dispozici. Výroba zkušebních výlisků proběhla na TUL. Digitalizace zkušebního výlisku byla provedena ve společnosti MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o. a T-Mobile Czech Republic a.s. (pobočka Mladá Boleslav).

3.1. Zkušební výlisek

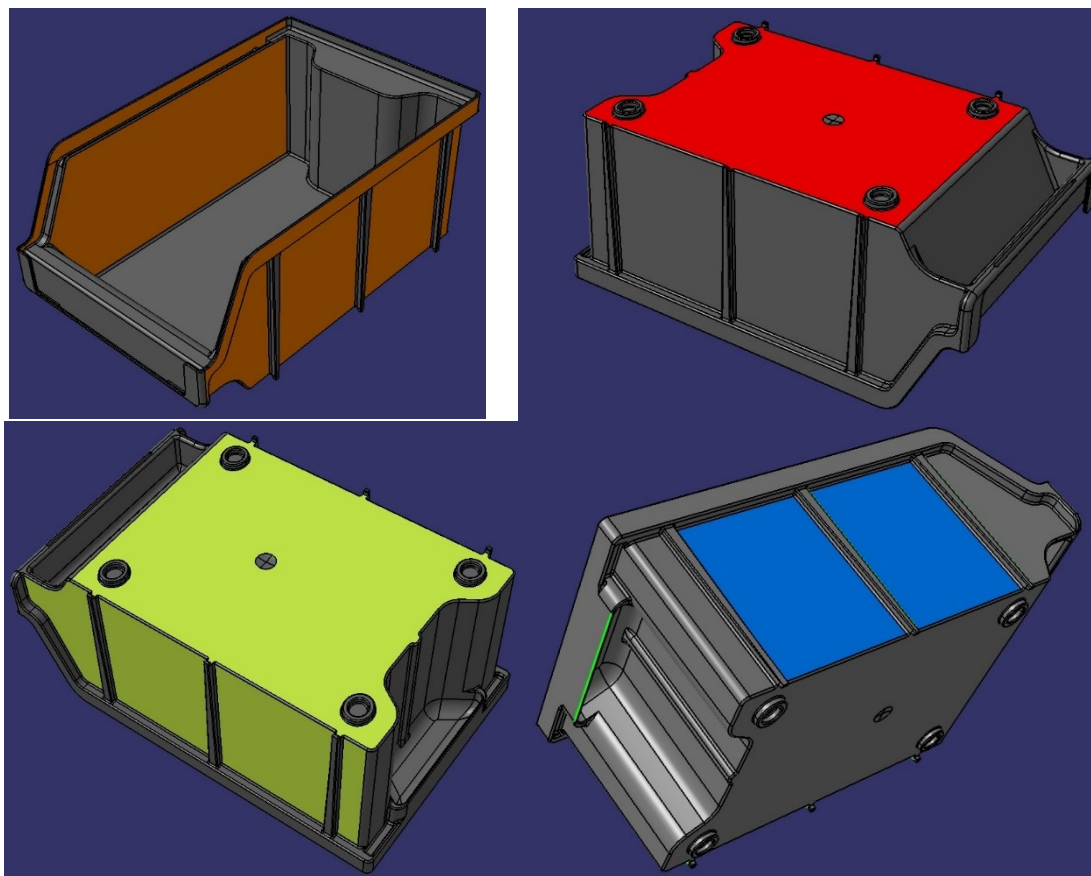
Za zkušební výlisek byla zvolena nádoba (bedýnka, krabička) používaná například pro skladování spojovacího materiálu. Tento zkušební výlisek byl zvolen z několika důvodů:

- Pro tento výlisek byla dostupná 3D CAD data na TUL. Tato data zároveň nebyla v režimu utajení, jak tomu bývá u aktuálních projektů v automotive.
- Pro tento výlisek byla na TUL dostupná vstřikovací forma i data 3D CAD data vstřikovací formy.
- Výlisek díky svému tvaru umožňoval zadat do softwaru Varimos několik tvarových podmínek.

Zkušební výlisky byly vyrobeny z polypropylenu Hostacom M4U02 (materiál podrobněji popsán v kapitole 3.2.). Hmotnost výlisku dle 3D CAD dat byla cca 160 [g], základní rozměry 192x122x85 [mm], hlavní tloušťka stěny 1,85 [mm]. Stěny výlisku nebyly na dno výlisku kolmé vzhledem k možnosti zaformování a vyhazování výlisku, což bylo patrné v kapitole 3.3. Výlisek byl v několika pohledech na obrázku č. 19.

Barvy v jednotlivých pohledech označují zamýšlené definované tvarové podmínky pro software Varimos. Oranžová barva značila tvarovou podmínku

požadující dodržení vzdálenosti mezi oběma bočními stěnami (kdyby nebyla dodržena, nebylo by možné vrstvení výlisků na sebe). Červená barva značila tvarovou podmínku na rovinnost dna výlisku. Žlutá barva značila tvarovou podmínku pro zachování úhlu mezi dnem a boční stěnou/stěnami. Modrá barva značila podmínku na rovinnost bočních stěn výlisku.



Obr. 19: Barevné označení ploch, které byly vzhledem k tvaru a účelu výlisku zvoleny jako důležité. Tyto plochy a závislosti mezi nimi byly zadány do Varimos jako tvarové podmínky. Pomocí modulu Varimos pak byly hledány takové kombinace technologických podmínek, aby bylo dodrženo co nejvíce zvolených tvarových podmínek

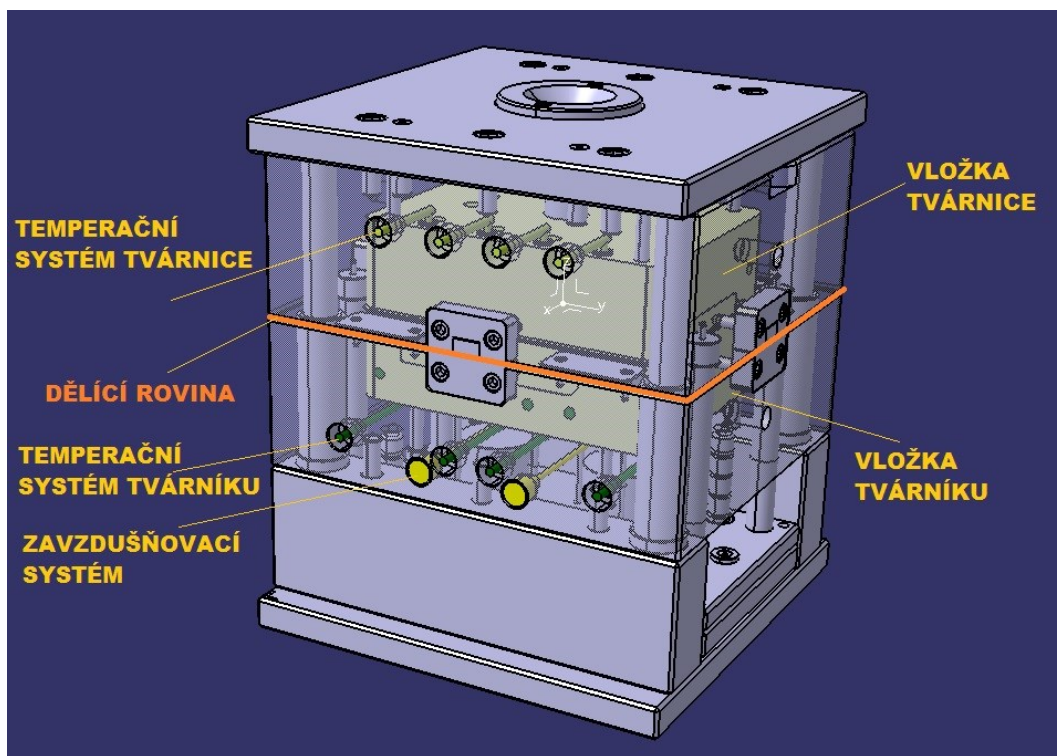
3.2. Materiál výlisku

Výlisek byl vyráběn z polypropylenu Hostacom M4U02 od výrobce Liondellbasell. Jedná se o termoplast, z hlediska chemické příbuznosti je zařazován k polyolefinům. Tento materiál byl plněný minerálními plnivem ze 40 [%]. Hmotnostní index toku $MFR_{(230/2,16)} = 16 [g/10min]$, modul pružnosti v tahu 4 000 [MPa]. Výlisky z tohoto materiálu by měly vykazovat vyšší tuhost a nižší a izotropnější smrštění než stejné výlisky z neplněného polypropyleny (podrobněji v kapitole 2.1.4.). Výrobcem nebyl tento materiál doporučován pro aplikace ve farmaceuty a pro styk s pitnou vodou. Materiálový list je v příloze č. 1. Materiál byl zvolen z důvodu jeho aktuální dostupnosti na TUL a jeho zařazení v databance materiálů v Cadmould® 3D-F. [18]

3.3. Vstřikovací forma

Vstřikovací forma k výlisku popsanému v kapitole 3.1 byla dostupná na TUL. Z hlediska konstrukce se jednalo o formu jednonásobnou. Forma měla pouze jednu hlavní dělicí rovinu. Výlisek byl jednoduššího tvaru a byl zaformován tak, že ve formě nebylo zapotřebí použít žádná boční jádra a podobně. Dutina formy byla tvořena dvěma vyjímatelnými vložkami, jedna vložka tvořila tvárnici, druhá tvárník. Obě vložky byly vyrobeny z nástrojové oceli W.Nr.1.2344.

Forma byla temperována pomocí čtyř standardních temperačních okruhů. Kanály byly kruhového průřezu vrtané, mezi deskou tvárnice a vyjímatelnou vložkou utěsněny pomocí O-kroužků. V tvárnici byly dva nezávislé temperační okruhy, stejně tak v tvárníku. Průměr kanálů temperačního okruhu 8 [mm] ve všech místech. Součástí temperačních okruhů byly i kanály o průměru 13 [mm] opatřené plochými kovovými přepážkami. Tyto kanály sloužily jako takzvané fontánky pro rovnoměrnější chlazení formy.

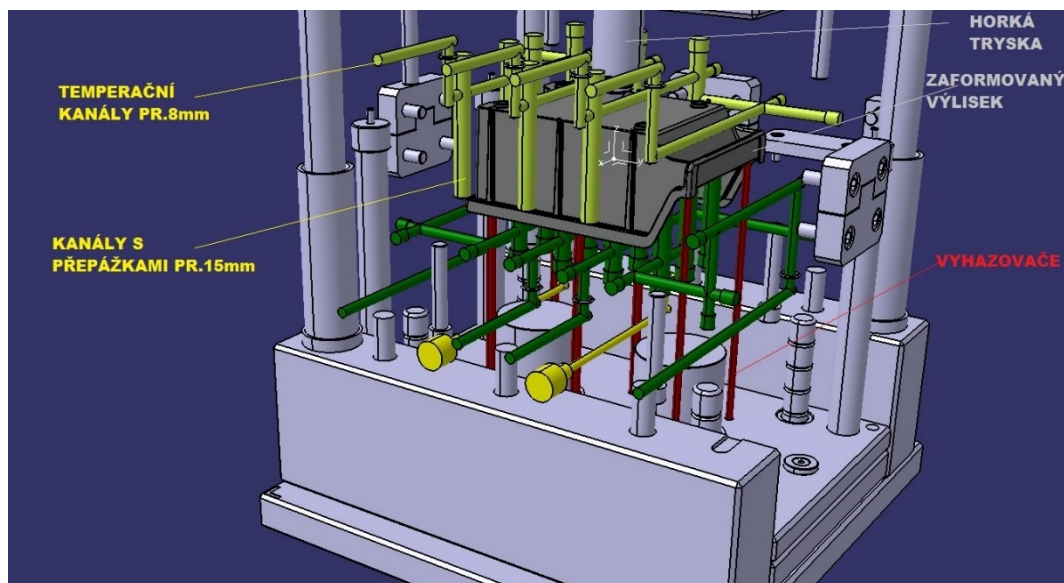


Obr. 20: Uspořádání vstřikovací formy. Žlutě označena vložka tvárníku a tvárnice. Oranžovou barvou naznačena dělicí rovina formy

Vtokový systém formy byl tvořen pouze jednou vytápěnou tryskou od firmy YUDO. Směr vstřikování byl kolmo na dělicí rovinu.

Vyhazování výlisku bylo zajištěno pomocí šesti vyhazovačů kruhového průřezu uchycených ve vyhazovací desce. Pro eliminaci poškození a deformace výlisku při vyhazování od vyhazovačů byla forma opatřena dvěma

zavzdušňovacími ventilkami, které při vyhazování eliminovali vznikající podtlak mezi dnem výlisku a stěnou vložky tvárníku.



Obr. 21: Uspořádání vstřikovací formy. Světle zelená označena temperace tvárnice, tmavě zelená temperace tvárníku. Na obrázku je patrné i zaformování výlisku a důvod použití přepážek k chlazení. Červeně jsou označeny mechanické vyhazovače, sytě žlutě zavzdušňovací systém

3.4. Úvodní simulace v Cadmould® 3D-F

V následující podkapitole je na praktickém příkladu z experimentální části diplomové práce objasněn jednak postup experimentu, jednat také logika a posloupnost jednotlivých kroků nutných k dosažení výsledků v Cadmould® 3D-F a Varimos.

Je nutné si uvědomit, že Varimos byl pouze nadstavbový modul Cadmould® 3D-F. Cadmould® 3D-F bylo bez problému možné používat zcela samostatně, ovšem neprovedl by automaticky optimalizaci technologického procesu. Z toho důvodu prakticky vždy před „použitím“ Varimos bylo nutné pracovat v Cadmould® 3D-F. V Cadmould® 3D-F musel uživatel provést „úvodní“ simulaci. Tato simulace by měla co nejvíce odpovídat reálnému stavu, to znamená, měl by v preprocenssingové části této „úvodní“ simulace uživatel co nejpresněji popsat proces (čas plnění dutiny formy, materiál formy, teplotu chladiva v temperačních okruzích, velikost průtoku chladiva, zapojení temperačních okruhů, popsat přesně geometrii vtokového systému a podobně), a to z toho důvodu, že pro správnou funkci Varimos bylo nutné znát co možná nejpresněji průměrné smrštění výlisku. Tuto hodnotu bylo nejlépe možno získat právě „úvodní“ simulací v Cadmould® 3D-F. Prvním krokem byla tedy „úvodní simulace v Cadmould® 3D-F.

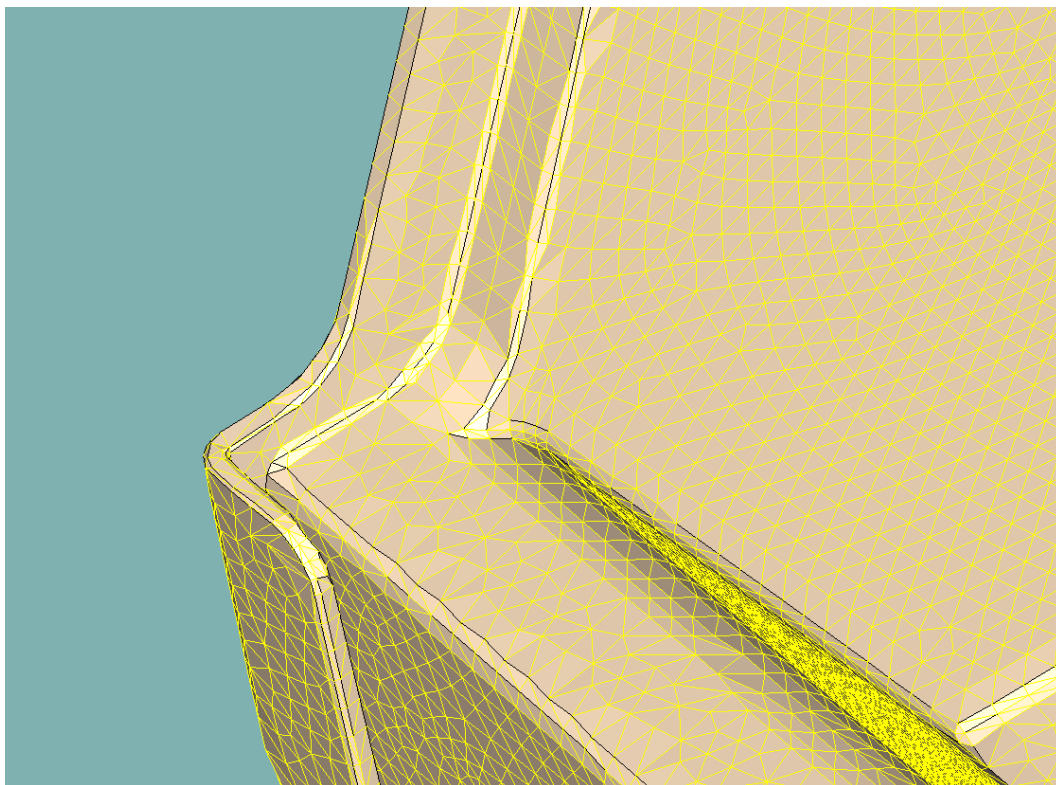
Jak bylo uvedeno v teoretické části diplomové práce, před započítím samotných simulací (výpočtů) Cadmould® 3D-F bylo nutné projít preprocessingovou částí, do které byl uživatel nejvíce zapojen. Bylo třeba nadefinovat veškeré podmínky simulací. Výhodou Cadmould® 3D-F bylo to,

že tento software měl relativně jednoduché prostředí s jednou hlavní lištou, na které byly pracovní ikony uspořádány zleva doprava tak, jak měl uživatel v definování simulace logicky postupovat.

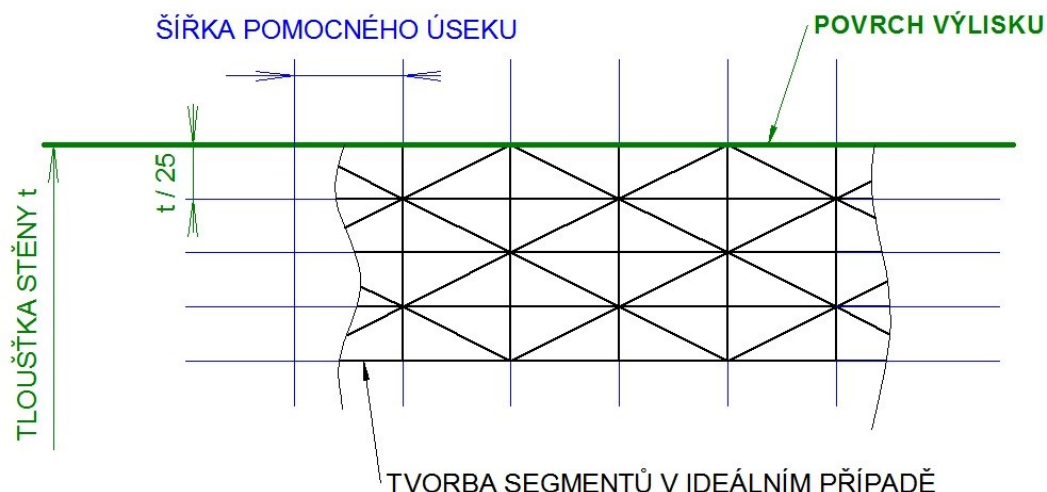
3.4.1. Import výlisku, tvorba výpočtové sítě

Prvním krokem bylo vložení 3D CAD modelu výlisku. Model byl importován do Cadmould® 3D-F ve formátu STL, jak již bylo popsáno v teoretické části diplomové práce.

Dalším krokem po vložení modelu byla tvorba výpočtové sítě. Výrobce Cadmould® 3D-F, společnost Simcon, vyvinula pro Cadmould® 3D-F svou vlastní metodu, která byla patentována. Základní princip sítě byl naznačen na obrázku č. 22 a č. 23. Při tvorbě sítě Cadmould® 3D-F postupoval tak, že stěnu modelu v tloušťce rozdělil na 25 stejně tlustých vrstev. Stěnu dále rozdělil na „pomocné úseky“ směřující v ideálním případě kolmo na vrstvy. Tím došlo k vytvoření uzlových bodů, mezi kterými byly vytvářeny jednotlivé elementy. Vznikla tak výpočtová síť. Jediné, co mohl uživatel ovlivnit, byla šířka pomocných úseků, čímž byla regulována hustota sítě. Vliv hustoty sítě na kvalitu a rychlost výpočtů byl popsán v teoretické části diplomové práce.



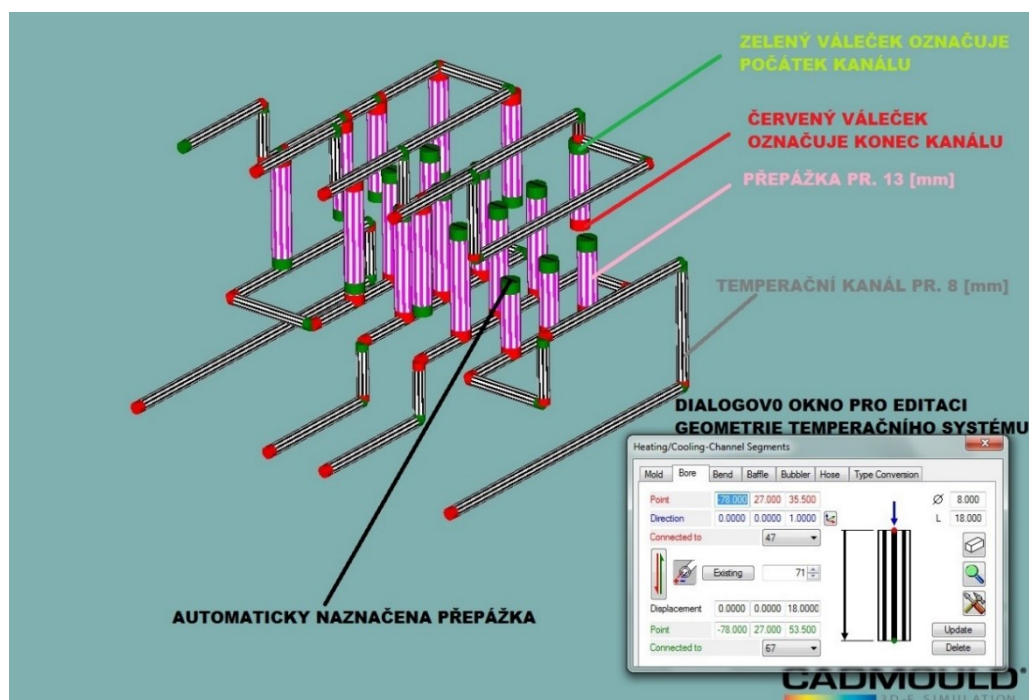
Obr. 22: Model výlisku. Na povrchu viditelná výpočtová síť



Obr. 23: Naznačen princip tvorby výpočtové sítě (pohled do „ideální“ stěny výlisku v řezu)

3.4.2. Vtokový a temperační systém

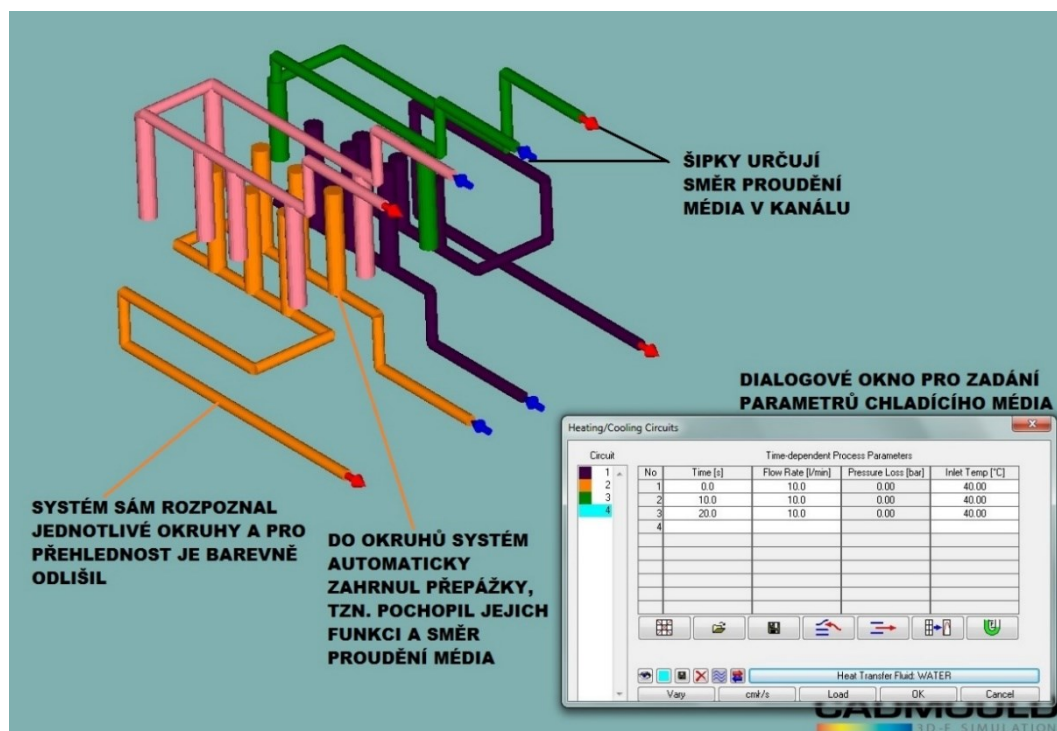
Po vytvoření sítě následovala tvorba geometrie vtokového systému. Zde měl uživatel v zásadě dvě možnosti. Mohl modelovat vtokový systém přímo v Cadmould® 3D-F pomocí dialogového okna, kde zadal postupně polohu a délku jednotlivých kanálů, volil i tvar a rozměry průřezu.



Obr. 24: Úprava geometrie importovaného temperačního systému. Temperační systém v upraveném stavu. Pomocí okna na obrázku provedena úprava temperačního systému, upraven průměr a typ kanálů, provedena změna orientace některých kanálů s přepážkou tak, aby červený konec (začátek kanálu) vždy navazoval na zbytek okruhu. V opačném případě by Cadmould® 3D-F v daném okruhu hlásil chybu a nebylo by možno definovat směr průtoku chladicího média okruhem

Rychlejším způsobem byl import vtokového systému ve formě jednotlivých úsečků ve formátu IGS. Tento princip byl podrobněji popsán v teoretické části diplomové práce a byl patrný z obrázku č. 24. Tohoto způsobu bylo s výhodou využito, jelikož vstřikovací forma a její 3D CAD model byl již hotov, nebylo problémem dané úsečky vytvořit v softwaru Catia dostupném na TUL. Byla takto vytvořena otevřená horká tryska, což byl celý vtokový systém vstřikovací formy. Na začátek trysky byl pak umístěn vtok, aby Cadmould® 3D-F rozpoznal směr plnění taveninou.

Stejným způsobem byl vytvořen i temperační systém formy. Byl importován soubor ve formátu IGS s úsečkami. Soubor obsahoval úsečky nutné pro všechny čtyři okruhy temperačního systému. Cadmould® 3D-F jednotlivé okruhy sám rozpoznal. U takto importovaného temperačního systému bylo nutné při importu zadat průměr kanálu. Obvykle zadává uživatel rozměr, který se vyskytuje nejčastěji, v tomto případě tedy 8 [mm]. V dialogovém okně pro úpravy temperačního systému bylo následně nutné upravit orientaci některých kanálů. Bylo též nutné vybrat a označit kanály, ve kterých se nachází přepážky, jelikož Cadmould® 3D-F rozpoznal pouze některé, zároveň bylo nutné změnit průměr těchto kanálů z 8 [mm] na jejich skutečných 13 [mm]. Výše popsané je patrné z obrázku č. 24.



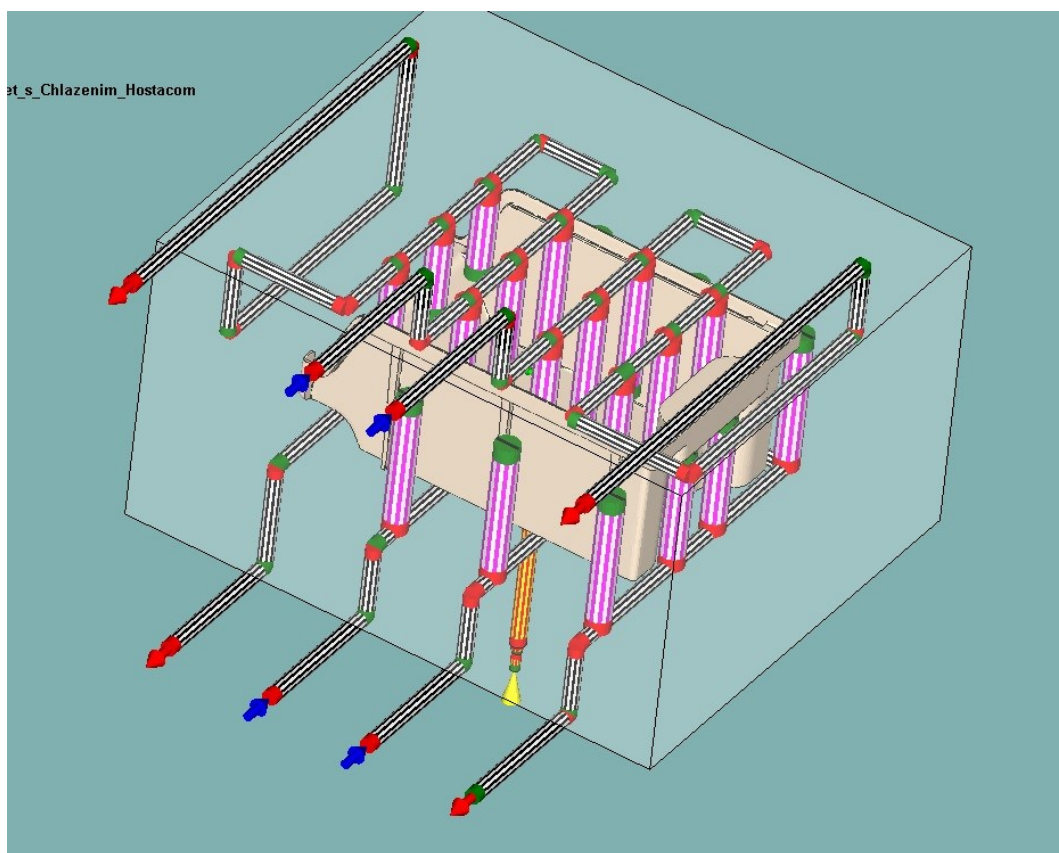
Obr. 25: Dialogové okno pro definování chladicího média, směru průtoku média a jeho parametrů při průtoku kanály. Na obrázku bylo též patrné, že po úpravě orientace Cadmould® 3D-F bez problému rozpoznal jednotlivé okruhy a umožnil zvolit směr průtoku chladicího média (označeno malou modrou a červenou šipkou). Jako chladicí médium zvolena voda

Bylo též nutné v dalším dialogovém okně určit pro každý kanál směr průtoku chladicího média, typ média, velikost průtoku a teplotu média. Výše popsané bylo patrné z obrázku č. 25.

3.4.3. Volba materiálu výlisku, simulace vložek tvárníku a tvárnice

Jako materiál zvolen Hostacom M4U02 blíže popsany v kapitole 3.2. Materiál byl zvolen z důvodu jeho aktuální dostupnosti na TUL a zároveň jeho přítomnosti v databance materiálů v Cadmould® 3D-F. Dialogové okno s volbou materiálu bylo na obrázku č. 27.

Pro simulaci co nejvěrnější realitě byly nasimulovány vložky tvárníku a tvárnice z materiálu W.Nr.1.2344 jak bylo vidět z obrázku č. 26

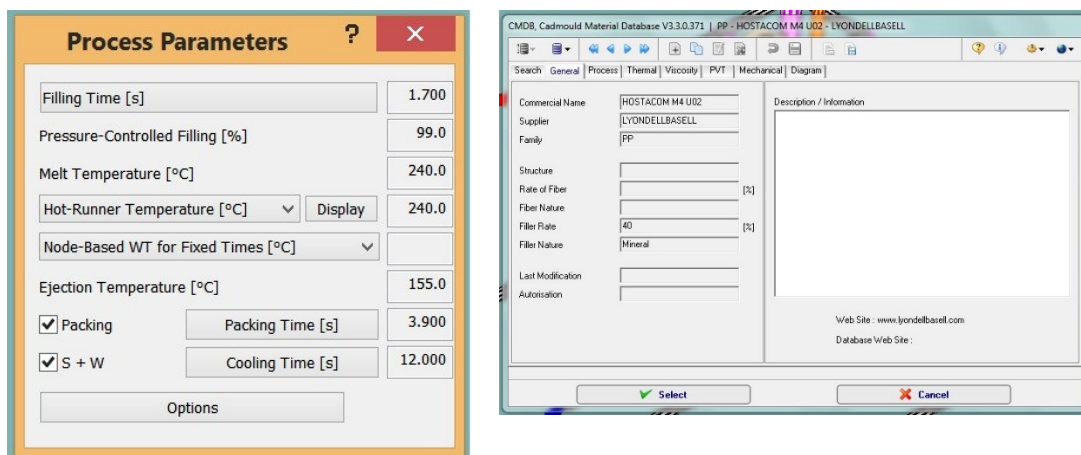


Obr. 26: Nasimulování dutiny vstříkovací formy

3.4.4. Volba technologických podmínek vstřikování

V úvodní simulaci bez okolí byly technologické podmínky ponechány jako defaultní, tzn. navržené Cadmould® 3D-F. Poté byly technologické podmínky upraveny právě dle výsledků úvodní simulace. Na obrázku č. 27 bylo dialogové okno sloužící k volbě technologických podmínek vstřikování. Technologické podmínky na obrázku č. 27 vzešli ze zkušeností z úvodních simulací. V dialogovém okně na obrázku č. 27 je zadáván čas plnění dutiny formy, úroveň přepnutí na dotlak, teplota taveniny, teplota horkého vtokového systému, teplota stěny formy, teplota výlisku při vyhození z formy, čas dotlaku

a čas chlazení. Plnění a dotlak byl defaultně nastaven jako konstantní hodnota po celou dobu časového úseku. Lze ale nadefinovat vlastní průběh plnění a dotlakové fáze a to jak skokovou tak i plynulou změnou.



Obr. 27: Zadání technologických podmínek, volba materiálu

3.4.5. Výsledky úvodní simulace v Cadmould® 3D-F

Jak již bylo uvedeno v úvodu podkapitoly 3.4, úvodní simulace v Cadmould® 3D-F byla provedena hlavně z důvodu přesného zjištění průměrného smrštění výlisku. Tuto hodnotu bylo totiž třeba zadat v preprocessingové části Varimos. Hodnota průměrného smrštění nebyla ale to jediné, co zle z úvodní simulace zjistit.

Vzhledem k tomu, že vstřikovací forma byla již na TUL používána, ale přesné technologické podmínky, za kterých v minulosti forma pracovala, nebyly známě, byly pomocí úvodních simulací tyto podmínky zjištěny a částečně optimalizovány. Například kontrolou Reynoldsova čísla optimalizován průtok temperačního okruhu, byla rozpoznána místa největších deformací výlisku z ukazatele celkových deformací a ukazatele změny křivosti, z ukazatele kvality výlisku byla určena místa budoucích propadlin a podobně, z analýzy plnění byl zjištěn pokles teploty taveniny na začátku a konci plnění, z analýzy dotlakové fáze byly zjištěny oblasti působení dotlaku v jednotlivých časových úsecích a podobně.

Výsledkem úvodních simulací v Cadmould® 3D-F byla částečná optimalizace technologických podmínek ještě před započítáním výpočtů ve Varimos. Zároveň úvodní simulace velice dobře posloužily k pochopení, jak se asi bude reálný výlisek chovat a kde jsou jeho „slabá“ místa. Díky tomu bylo možné lépe navrhnout tvarové a rozměrové parametry a okrajové úrovně technologických podmínek, jak bylo popsáno v kapitole 3.5 níže.

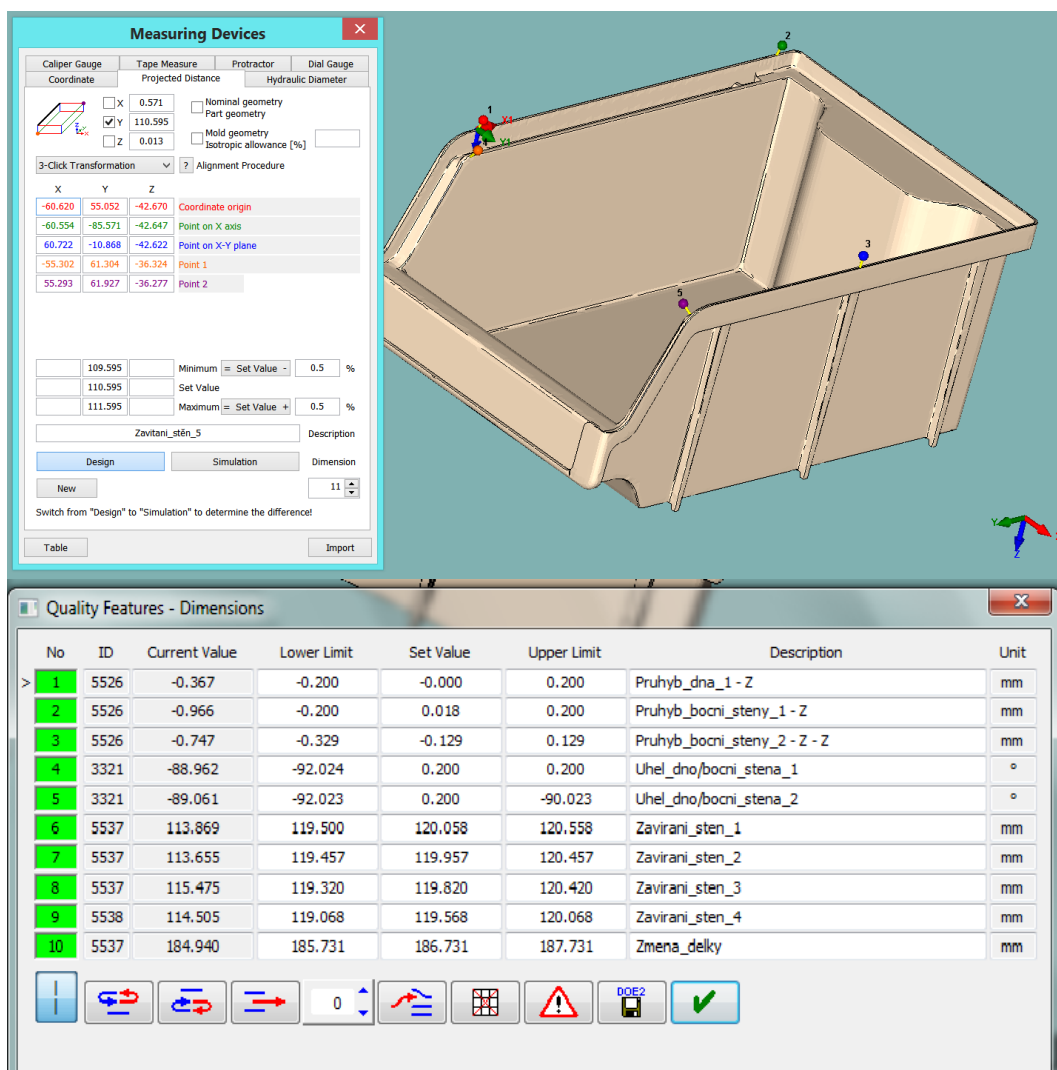
3.5. Optimalizace technologických podmínek ve Varimos

Na základě úvodní simulace v Cadmould® 3D-F byl získán přehled o chování simulovaného výlisku, byla získána vstupní informace pro software Varimos (hodnota průměrného smrštění 1,1 [%]).

3.5.1. Zadání variovaných parametrů a tvarových podmínek

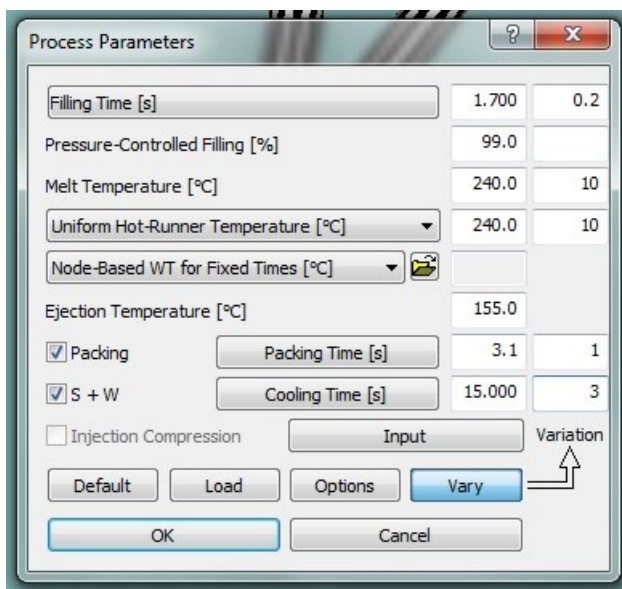
V Cadmould® 3D-F bylo nejprve nutné zadat tvarové a rozměrové parametry, které uživatel požaduje dodržet (důležitá místa z hlediska tvaru a funkce výlisku a podobně). Tyto parametry byly popsány blíže v kapitole 3.1. Tyto parametry byly zadávány například pomocí vzdáleností bodů od sebe nebo pomocí úhlů mezi povrchy a podobně. K této i ostatním podmínkám bylo nutné také zadat toleranci podmínky. Takovýchto podmínek bylo možné zadat několik a nebylo tudíž nutné provádět více výpočtů ve Varimos. Na obrázku č. 28 byl ukázán principiální zadání podmínky na vzdálenost (pracovně označeno jako zavírání bočních stěn) obou bočních stěn.

Soubor takto definovaných podmínek byl pracovně nazván jako tvarové podmínky a pod tímto označením se budou v dalším textu vyskytovat.



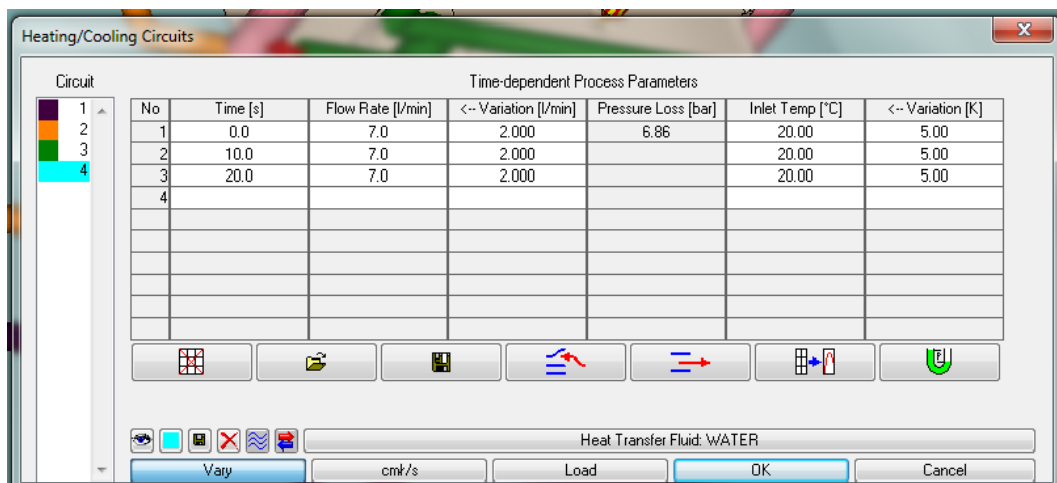
Obr. 28: Zadání tvarové podmínky Zavírání bočních stěn se zadáním tolerance tvarové podmínky. Body 1, 2 a 3 určují rovinu. Body 4 a 5 určují vzdálenost. Zatržený směr Y v dialogovém okně určuje směr měření (kolmá vzdálenost mezi stěnami). Dole dialogové okno s přehledovou tabulkou zadanych variací

Dále bylo nutné zadat variace technologických podmínek. Po konzultaci ve firmě STEINEL Technik s.r.o. bylo rozhodnuto variovat téměř veškeré technologické podmínky. Úrovně technologických podmínek a jejich variace byly zvoleny na základě výsledků a znalostí z „úvodních“ simulací. Jak bylo vidět na obrázku č. 29 níže, byl variován čas plnění dutiny formy s hodnotou $1,7 \pm 0,2$ [s], teplota taveniny i teplota horkého vtokového systému s hodnotou 240 ± 10 [°C], čas dotlaku $3,1 \pm 1$ [s] a čas ochlazování 15 ± 3 [s].



Obr. 29: Variované technologické podmínky

Na základě konzultace bylo rozhodnuto i o variování podmínek temperačního systému jak je vidět na obrázku č. 30. Variována byla teplota chladicí kapaliny i velikost jejího průtoku.

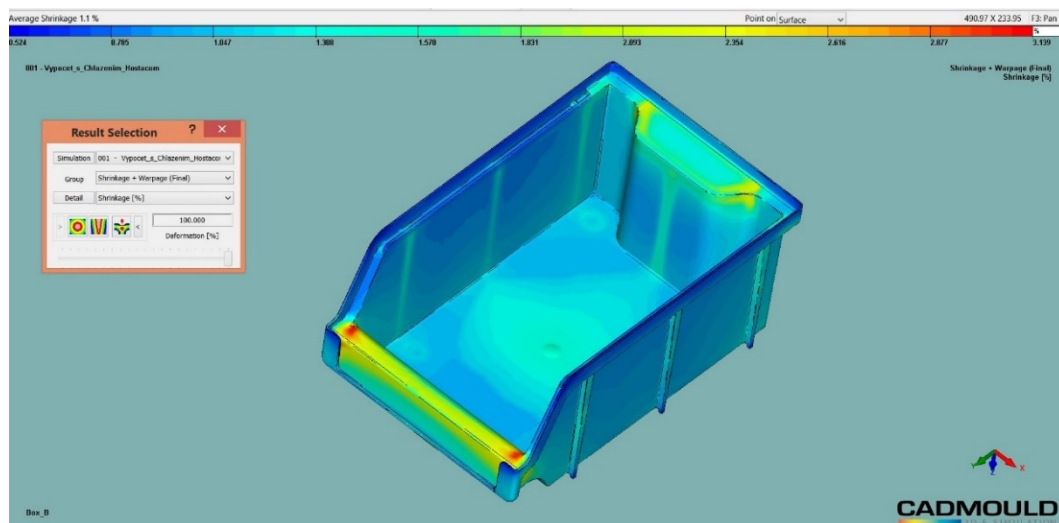


Obr. 30: Variované parametry čtvrtého okruhu temperačního systému

3.5.2. Aplikace smrštění

Na 3D CAD model výlisku ve formátu STL bylo dle výsledků úvodních simulací aplikováno smrštění, tzn. díl byl zvětšen o 1,1 [%]. Právě takové průměrné smrštění vyšlo z úvodní simulace, jak bylo vidět na obrázku č. 31.

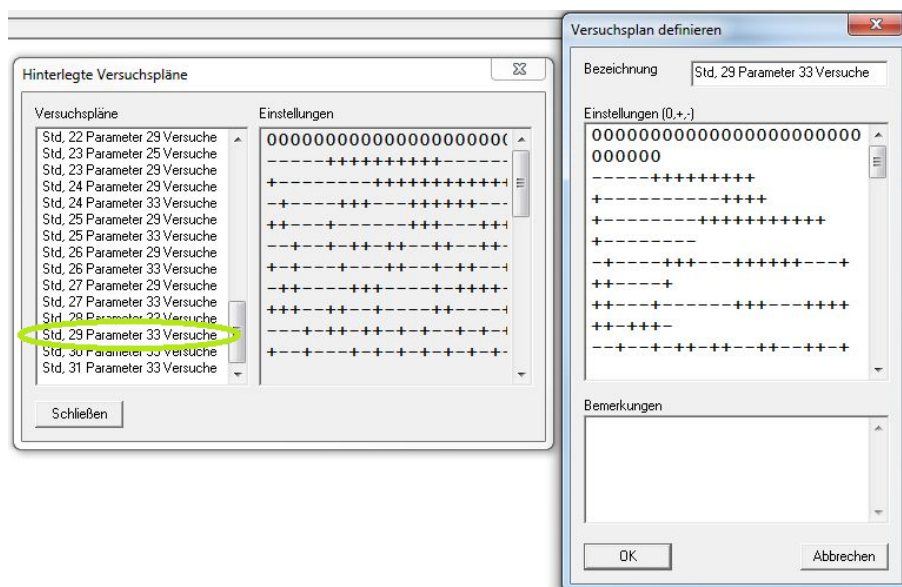
Po aplikaci smrštění byly updatovány zadané tvarové podmínky, tak aby se přizpůsobily zvětšenému modelu výlisku.



Obr. 31: Zjištění hodnoty průměrného smrštění výlisku ze simulace v Cadmould® 3D-F

3.5.3. Volba plánu výpočtů

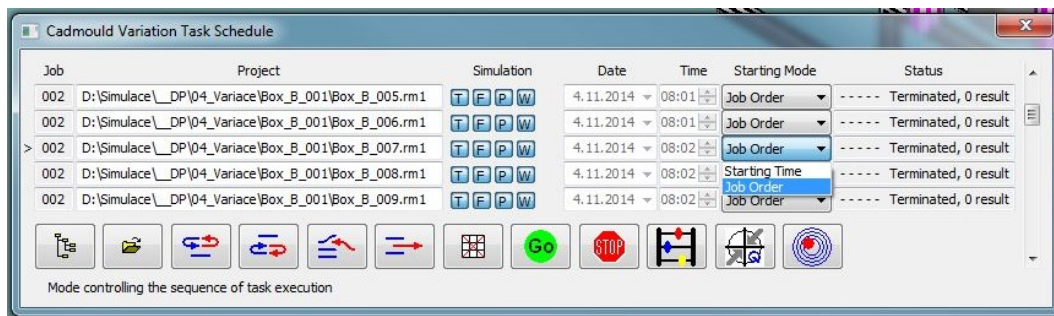
Nadefinování plánu výpočtů byla první operace prováděná čistě v modulu Varimos. Na základě počtu nadefinovaných faktorů, kterých bylo v tomto případě 29, software na principu DOE určil nutný počet variant výpočtů, v tomto případě 33. Ostatní varianty software z výpočtů předem vyřadil. Základní princip práce Varimos na základě DOE a princip „zjednodušeného výpočtového scénáře“ variant byl popsán v kapitole 2.2.6. Do přílohy č. 2 byl vložen reálný výpočtový plán s 29 faktory a 33 výpočtovými variantami defaultně navržený a použitý, na obrázku č. 32 bylo pro úplnost dialogové okno s navrženým výpočtovým plánem.



Obr. 32: Dialogové okno výpočtového plánu v modulu Varimos

3.5.4. Provedení výpočtů

Po zadání veškerých nutných kroků popsanych v předchozích kapitolách bylo softwarem zobrazeno dialogové okno shrnující všechny varianty výpočtů. Každou variantu výpočtu software ukládal jako samostatný výsledkový soubor ve formátu RM1. V této tabulce šlo rovněž „načasovat“ spouštění jednotlivých výpočtů a využít tak lépe kapacitu dostupných počítačů.



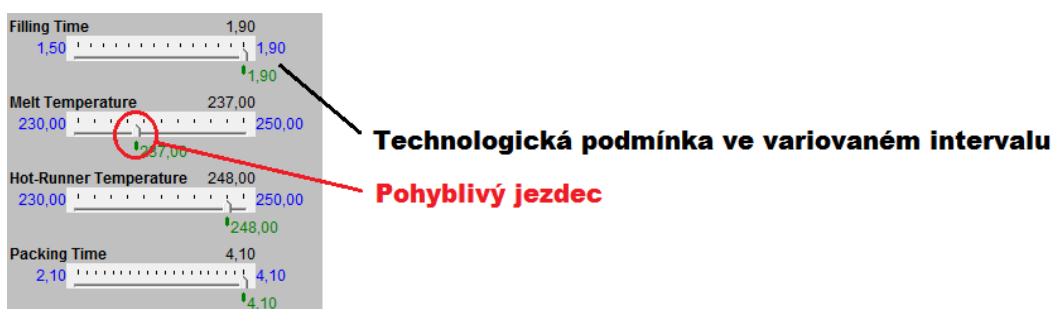
Obr. 33: Dialogové okno shrnutí a nastavení spouštění výpočtů jednotlivých variant (BATCH modul)

3.5.5. Výsledky optimalizací ve Varimos

Tvarové podmínky požadovali minimální změnu vzdálenosti obou bočních stěn vůči sobě, dodržení rovinnosti dna výlisku, zachování úhlu mezi dnem a boční stěnou/stěnami, dodržení rovinnosti bočních stěn. Toto vše bylo zahrnuto do jednoho výpočtu.

Architektura technologického okna Varimos:

Varimos prezentoval uživateli výsledky formou tzv. technologického okna na obrázku č. 36. Toto technologické okno bylo dialogové okno, ve kterém uživatel přehledně viděl výsledky a zároveň s nimi zde pracoval.



Obr. 34: Výřez levé části technologického okna. V levé části pod sebou jednotlivé variované technologické podmínky se stupnicí ve variovaném intervalu. Na stupnici pohyblivý jezdec umožňující práci s technologickým oknem

Okno bylo svisle rozděleno na dvě části. V levé byly jednotlivě pod sebou pouze variované technologické podmínky v příslušném intervalu, tak jak byly zadány. Například, bylo zadáno variovat teplotu chladicí kapaliny 20 ± 5 [°C], byla tedy zobrazena stupnice chladicí kapaliny v rozmezí od 15 [°C] do 25 [°C],

obdobně pro ostatní variované technologické podmínky. Na této stupnici se nacházel „jezdec“. Výřez z levé části technologického okna na obrázku č. 34. Tímto jezdce měl uživatel možnost pohybovat a s technologickým oknem pracovat (vysvětleno níže).



Obr. 35: Výřez pravé části technologického okna s popisem významu jednotlivých symbolů a barev

V pravé části technologického okna byly jednotlivé tvarové podmínky (nadefinované uživatelem i defaultně nastavené). U jednotlivých tvarových podmínek byl vždy žlutým bodem zobrazen požadovaný rozměr v modrém tolerančním poli (zadaná tvarová podmínka a její tolerance) a zeleným bodem a pásmem skutečný rozměr vypočtený modulem Varimos s rozptylem. Pokud byl bod a pásmo červené, znamenalo to, že modul Varimos vypočítal rozměr mimo toleranční pole. Bílé body určovaly prioritu daného tvarového parametru. Bez bílého bodu = podmínka bez priority z výpočtu vyřazena, jeden bílý bod = standardní priorita, dva bílé body = nejvyšší priorita. Výše uvedené bylo patrné z výřezu na obrázku č. 35.

Práce s technologickým oknem Varimos:

Po dokončení výpočtu Varimos zobrazil technologické okno uvedené například na obrázku č. 36. V takovém okně měla vždy každá podmínka z pravé části přiřazenu standardní prioritu (jeden bílý bod). Jezdce u technologických podmínek byly nastaveny tak, aby byly splněny všechny tvarové podmínky a byly v toleranci. Varimos tak našel optimální variantu technologických podmínek.

Uživatel s tímto technologickým oknem mohl pracovat jako s „živým“, tzn., jakmile provedl změnu určitého technologického parametru pohybem jezdce, okamžitě viděl, jak tato změna „zahýbala“ s tvarovými podmínkami a podobně. Zároveň šlo jednotlivým tvarovým podmínkám zvyšovat/snižovat prioritu což také ovlivnilo výsledky. Například pokud vzhledem k zadání Varimos nenašel automatiky takové technologické podmínky, aby všude byly zelené body, mohl uživatel u některých tvarových podmínek, které pro něj nebyly tolik důležité prioritu snížit (z výpočtu je vyřadit) a najít tak optimální řešení. Varimos okamžitě zobrazil nový stav, což byla hlavní výhoda živého technologického okna a Varimosu založeného na principu DOE.

Výsledky optimalizací:

Na obrázku č. 36 bylo technologické okno zobrazující výsledky optimalizace popsané v kapitolách výše. Jak bylo patrné, ani při práci s tímto oknem nebylo možno nalézt takové technologické parametry, aby byly všechny tvarové podmínky dodrženy. U většiny technologických podmínek byl červený bod, byly tedy mimo modré toleranční pole.



Obr. 36: Technologické okno Varimos

Z výše uvedeného vyplývalo, že zadání nebylo splněno a bylo nutné provést nový optimalizační výpočet. Pro přehlednost byl dále výpočet na obrázku č. 36 v textu označován jako výpočet A.

Výpočet A (technologické okno z obrázku č. 36) ale měl svůj význam, jelikož prací s ním bylo zjištěno, jaké technologické podmínky měly na sledované tvarové podmínky vliv, které měly vliv větší a které menší a které neměly téměř žádný vliv. Zároveň byla získána i lepší představa o tom, jaké toleranční pole přiřadit jednotlivým tvarovým podmínkám. Například bylo i zjištěno, jak se chovají jednotlivé tvarové parametry s postupně se měnící (rostoucí/klesající) teplotou taveniny a podobně. Nakonec byla prací s technologickým nalezena „nejoptimálnější možná“ varianta technologických podmínek, tak aby červený bod byl vždy co nejblíže modrému tolerančnímu poli (sice byly červené body mimo toleranční pole ale zároveň tolerančnímu poli co nejblíže). Toto bylo vidět na obrázku č. 36. Z něj bylo patrné, že čas plnění dutiny formy, čas dotlaku a čas chlazení by vyžadovali posunout interval

směrem k delším časům. Od těchto a dalších poznatků pak vycházelo nadefinování nového výpočtu B.

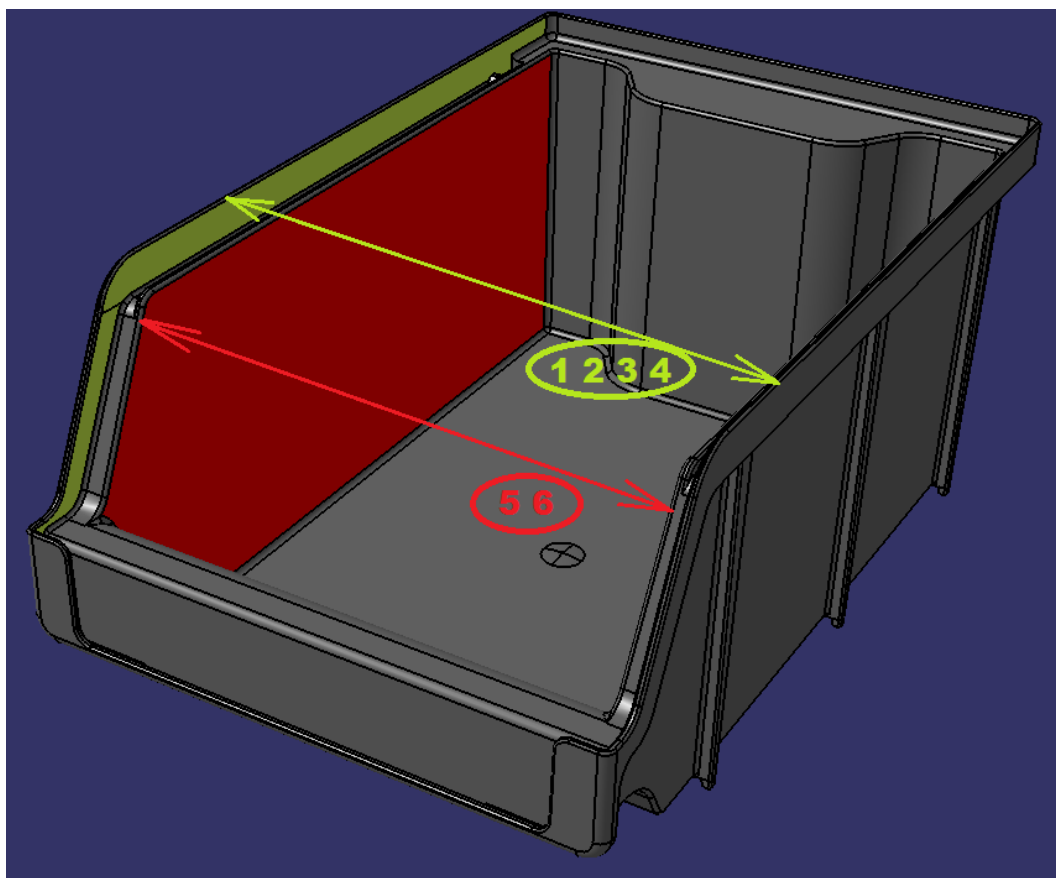
Tab. 5: Porovnání Variací mezi prvním a druhým optimalizačním výpočtem ve Varimos

-	Výpočet A	Výpočet B	Výpočet C
Technologické podmínky:			
Čas plnění [s]	$1,7 \pm 0,2$	$2 \pm 0,5$	$2,5 \pm 1$
Teplota taveniny [°C]	240 ± 10	240 ± 10	240 ± 10
Teplota vtokového systému [°C]	240 ± 10	240 ± 10	240 ± 10
Čas dotlaku [s]	$3,1 \pm 1$	5 ± 1	7 ± 2
Čas chlazení [s]	15 ± 3	20 ± 5	25 ± 5
Chladicí okruh č. 1:			
Průtok [l/min]	10 ± 2	7 (bez variace)	7 (bez variace)
Teplota chladiwa [°C]	20 ± 5	12 (bez variace)	12 (bez variace)
Chladicí okruh č. 2:			
Průtok [l/min]	10 ± 2	7 (bez variace)	7 (bez variace)
Teplota chladiwa [°C]	20 ± 5	12 (bez variace)	12 (bez variace)
Chladicí okruh č. 3:			
Průtok [l/min]	6 ± 2	7 (bez variace)	7 (bez variace)
Teplota chladiwa [°C]	20 ± 5	12 (bez variace)	12 (bez variace)
Chladicí okruh č. 4:			
Průtok [l/min]	10 ± 2	7 (bez variace)	7 (bez variace)
Teplota chladiwa [°C]	20 ± 5	12 (bez variace)	12 (bez variace)
Toleranční pásma tvarových podmínek:			
Průhyb dna [mm]	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$
Průhyb boční stěny 1 [mm]	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$
Průhyb boční stěny 2 [mm]	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$
Úhel dno/boční stěna 1 [°]	$\pm 0,2$	± 1	± 1
Úhel dno/boční stěna 2 [°]	$\pm 0,2$	± 1	± 1
Zavírání stěn 1 [mm]	$\pm 0,5$	$\pm 0,75$	$\pm 0,75$
Zavírání stěn 2 [mm]	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Zavírání stěn 3 [mm]	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Zavírání stěn 4 [mm]	$\pm 0,5$	$\pm 0,75$	$\pm 0,75$
Změna délky [mm]	± 1	± 1	± 1
Zavírání stěn 5 [mm]	(nezavedeno)	(nezavedeno)	$\pm 1,5$
Zavírání stěn 6 [mm]	(nezavedeno)	(nezavedeno)	$\pm 1,5$

Na základě cenných informací z výpočtu A byl nadefinován nový optimalizační výpočet B. Oproti výpočtu A doznal změn přehledně uvedených v tabulce č. 5 výše.

Díky upravenému zadání výpočtu B bylo docíleno lepších výsledků. Stále ale nebylo docíleno optimálního řešení. Sice tvarové podmínky ležely blíže svému tolerančnímu poli, nicméně se většina tvarových podmínek stále ještě nacházela mimo svá modrá toleranční pole. Z toho důvodu bylo přistoupeno k optimalizačnímu výpočtu C. Vzájemné porovnání zadání výpočtů A, B a C je opět v tabulce č. 5 výše.

Do optimalizačního výpočtu C byly přidány dvě další tvarové podmínky, a sice zavírání stěn 5 a zavírání stěn 6. Tvarové podmínky zavírání stěn 1 až 4 byly definovány na ne úplně vhodných místech, a sice jako vzdálenost mezi zelenými rovinami jak bylo vidět na obrázku č. 37. Část zkušebního výlisku označená zelenou rovnou byla na deformace nejvíce náchylná (byly zde deformace největší). Proto byly nadefinovány další dvě tvarové podmínky zavírání stěn 5 a zavírání stěn 6 jako vzdálenost mezi červenými plochami. Tyto plochy nebyly na deformace tolik náchylné a zároveň taková definice stále splňovala podmínku na funkčnost výlisku a možnost vrstvení výlisků na sebe.



Obr. 37: Princip zadání nových tvarových podmínek zavírání bočních stěn 5 a zavírání bočních stěn 6

Z tabulky č. 5 také vyplývalo, že se značně snížil počet faktorů, a sice z 29 (výpočet A) na 5 (výpočet B a C) jelikož nebyly variovány technologické parametry temperačních kanálů, tím se i podstatně zkrátil čas výpočtu (10 variant výpočtů namísto 33).

Výsledné optimalizované technologické podmínky z výpočtu C:

Výpočtem C bylo dosaženo nejlepších výsledků. Přesto ale nebyla nalezena taková „ideální kombinace“ technologických podmínek, aby ležely všechny tvarové podmínky (rozměry a velikosti úhlů) ve svých tolerančních polích. Takové řešení s velkou pravděpodobností ani nebylo možné nalézt.

K výsledkům v technologickém okně Varimos tím pádem nemohlo být přistupováno tak, že se hledaly takové technologické podmínky, kdy budou všechny nadefinované tvarové podmínky v toleranci. K výsledkům v technologickém okně bylo přistoupeno následujícím způsobem.

Pomocí technologického okna byly vždy zjištěny nejlepší technologické podmínky pro jednu nebo skupinu podobných tvarových podmínek s tím, že ostatním nebyla přikládána důležitost (priorita). Tento přístup lze přirovnat k zadání z průmyslové praxe typu: nalézt optimální technologické podmínky tak, aby deformace dna výlisku byla maximálně $0,5 [mm]$ ve směru X a podobně.

Podle výše uvedeného přístupu byly prací s prioritami v technologickém okně výpočtu C nalezeny čtyři varianty technologických podmínek, a sice pro minimální průhyb dna výlisku, pro změnu vzdálenosti mezi bočními stěnami výlisku, pro minimální průhyb bočních stěn výlisku a varianta ideálních technologických podmínek Varimos pro kombinaci všech nadefinovaných podmínek se standardní prioritou. Veškeré informace o variantách byly přehledně shrnuty v tabulkách č. 6, č. 7, č. 8 a č. 9 níže. Výstupní protokoly těchto variant z Varimos byly součástí přílohy pod č. 5a, č. 5b, č. 5c a č. 5d.

Každá varianta technologických podmínek uvedených v tabulkách č. 6 až č. 9 byla nakonec ještě samostatně nasimulována v Cadmould® 3D-F. Cílem bylo zjistit, zda při dané kombinaci technologických podmínek nebudou simulací zjištěny nějaké zásadní skutečnosti bránící výrobě výlisků.

Tab. 6: Varianta I technologických podmínek

Varianta I: Dodržení tvarové podmínky Průhyb dna výlisku $\pm 0,4$ [mm].	
Výsledek: Nalezeny takové technologické podmínky, kdy rozměr ležel ve svém tolerančním poli.	
Technologické podmínky:	
Čas plnění [s]	1,5
Flow rate [cm^3/s]	88,1
Flow mass [g/s]	91,7
Max. pressure [bar]	400
Teplota taveniny [$^{\circ}C$]	260
Teplota horkého vtokového systému [$^{\circ}C$]	260
Čas dotlaku [s]	8,2
Čas chlazení [s]	20
Chladicí okruh č. 1:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 2:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 3:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 4:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Poznámky: Při této variantě by měla ležet v tolerančním poli i podmínka na Průhyb boční stěny 2. Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Průhyb boční stěny 1 a podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2.	
Trendy: • S rostoucím dobou chlazení = větší průhyb dna výlisku. • S rostoucím časem dotlaku do cca 8 [s] byl rozměr blíže středu tolerančního pásma. Větší čas dotlaku pak už neměl vliv. • Čím nižší teplota taveniny, tím více se blížil rozměr okraji tolerančního pásma, naprosto minimální vliv. • Čím delší byl čas plnění, tím byl rozměr blíže okraji tolerančního pásma.	

Tab. 7: Varianta II technologických podmínek

Varianta II:	Dodržení tvarové podmínky Zavírání stěn 5 a 6 ± 1,5 [mm].	
Výsledek:	Nenalezeny takové technologické podmínky, aby rozměr ležel ve svém tolerančním poli. Nalézt takové technologické podmínky, aby výlisek ležel (ve své současné podobě a v současné podobě formy) v „rozumně velkém“ tolerančním poli nebylo možné bez modifikace formy a výlisku. Nalezeny takové technologické podmínky, kdy byl rozměr výlisku nejblíže svému tolerančnímu poli, ale neležel v něm.	
Technologické podmínky:		
Čas plnění [s]		3,5
Flow rate [cm³/s]		37,8
Flow mass [g/s]		39,8
Max. pressure [bar]		400
Teplota taveniny [°C]		240
Teplota horkého vtokového systému [°C]		258
Čas dotlaku [s]		8
Čas chlazení [s]		30
Chladicí okruh č. 1:		
Průtok [l/min]		7
Teplota chladiva [°C]		12
Chladicí okruh č. 2:		
Průtok [l/min]		7
Teplota chladiva [°C]		12
Chladicí okruh č. 3:		
Průtok [l/min]		7
Teplota chladiva [°C]		12
Chladicí okruh č. 4:		
Průtok [l/min]		7
Teplota chladiva [°C]		12
Poznámky:		
Při této variantě by měla ležet v tolerančním poli podmínka Průhyb boční stěny 1 i Průhyb boční stěny 2 a podmínka Průhyb dna 1. Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2.		
Trendy:		
• Se zkracujícím se časem chlazení se rozměr oddaluje od svého tolerančního pole. • S klesajícím časem plnění se rozměry oddalují od středu tolerančního pole. • Změna ostatních technologických parametrů nemá významný vliv.		

Tab. 8: Varianta III technologických podmínek

Varianta III: Dodržení tvarové podmínky Průhyb boční stěny 1 a 2 $\pm 0,4$ [mm].	
Výsledek: Nalezeny takové technologické podmínky, že rozměry ležely ve svých tolerančních polích.	
Technologické podmínky:	
Čas plnění [s]	3,5
Flow rate [cm^3/s]	37,8
Flow mass [g/s]	39,8
Max. pressure [bar]	400
Teplota taveniny [$^{\circ}C$]	248
Teplota horkého vtokového systému [$^{\circ}C$]	260
Čas dotlaku [s]	9
Čas chlazení [s]	30
Chladicí okruh č. 1:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 2:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 3:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 4:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Poznámky: Při této variantě by měla ležet v tolerančním poli i podmínka Průhyb dna výlisku 1. Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2.	
Trendy: • S rostoucím časem plnění se rozměr přibližoval středu tolerančního pole. U podmínky 1 byl vliv větší, u podmínky 2 zanedbatelný. • Ideální teplota taveniny byla v okolí 248 [$^{\circ}C$], vyšší i nižší teploty od této rozměr oddalovaly od středu tolerančního pásma. • Kratší čas chlazení odchyloval podmínku Průhyb boční stěny 1 od středu tolerančního pásma. • Měnicí se čas a teplota horkého vtokového systému a dotlak neměla na rozměry vliv.	

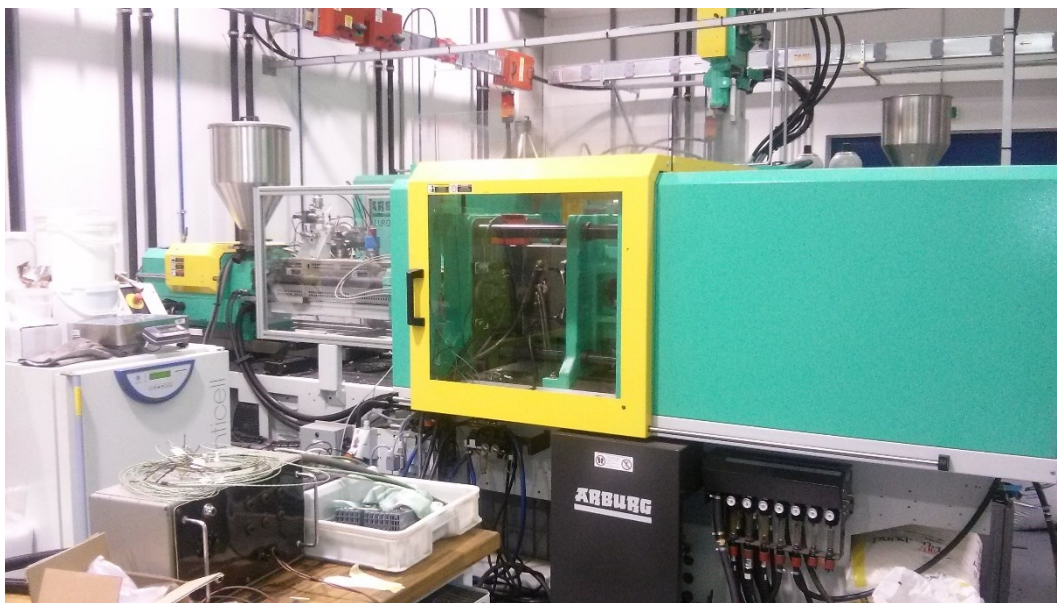
Tab. 9: Varianta IV technologických podmínek

Varianta IV: Varianta navržená modulem Varimos při zachování standardní priority u všech tvarových (nedefinovaných i defaultních).	
Výsledek: Nenalezeny takové technologické podmínky, kdy všechny tvarové podmínky ležely ve svých tolerančních polích. Nalézt takové technologické podmínky, aby výlisek ležel (ve své současné podobě a v současné podobě formy) v „rozumně velkém“ tolerančním poli nebylo možné bez modifikace formy a výlisku.	
Technologické podmínky:	
Čas plnění [s]	3,2
Flow rate [cm^3/s]	41,3
Flow mass [g/s]	42,6
Max. pressure [bar]	400
Teplota taveniny [$^{\circ}C$]	260
Teplota horkého vtokového systému [$^{\circ}C$]	240
Čas dotlaku [s]	9
Čas chlazení [s]	30
Chladicí okruh č. 1:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 2:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 3:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Chladicí okruh č. 4:	
Průtok [l/min]	7
Teplota chladiva [$^{\circ}C$]	12
Poznámky: V tolerančních polích ležela podmínka Průhyb dna 1 a podmínky Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2. Podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2 ležely blízko okraje svého tolerančního pásma.	
Trendy:	
- Výrazný vliv měl dotlak – krátký čas dotlaku zhoršoval rovinnost dna a průhyb bočních stěn. Zároveň ale zlepšoval úhel dno/boční stěna 1 a 2. - Nižší teplota taveniny zhoršovala rovinnost dna a úhly. - Teplota v horkém vtokovém systému neměla téměř vliv.	

3.6. Vstřikování zkušební série výlisků

Bylo provedeno vstřikování zkušebních výlisků. To bylo realizováno s pomocí vstřikovací formy popsané v kapitole 3.3. Vstřikování bylo provedeno v laboratořích TUL.

Ke vstřikování byl použit hydraulický vstřikolis Arburg Allrounder 470 S (viz. obrázek č. 38). Parametry stroje byly uvedeny v přílohách č. 4a, č. 4b a č. 4c.



Obr. 38: Vstřikolis Arburg, výroba zkušebních výlisků

Vstřikováno bylo vždy 10 výlisků každé varianty, tzn. celkem bylo vyrobeno 40 zkušebních výlisků. Technologické podmínky výroby každé varianty byly uvedeny v tabulkách č. 6, č. 7, č. 8 a č. 9.



Obr. 39: Vylisované zkušební výlisky

Po vylisování byly zkušební výlisky položeny volně vedle sebe na stůl tak, aby se navzájem neovlivňovali. Výlisky do sebe nebyly nijak skládány, nebyly nijak deformovány. Bylo s nimi zacházeno tak, aby nedošlo ke zkreslení výsledků získaných z následné digitalizace.

Vyrobené výlisky byly označeny číslem varianty příslušných technologických podmínek, poslední vyrobený výlisek byl zvlášť označen pro použití k digitalizaci.

3.7. Digitalizace výlisků

Aby bylo možno vyhodnotit experiment, bylo nutné zjistit rozměry vyrobených zkušebních výlisků. Jelikož ke zkušebnímu výlisku neexistoval žádný kontrolní přípravek, na kterém by mohlo ke kontrole rozměrů dojít, jediným efektivním způsobem jak rozměry získat bylo výlisky digitalizovat a dále pracovat s jejich digitální podobou.

Bylo využito nabídek na digitalizaci ve dvou společnostech, a to ve společnosti MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o. Liberec a T-Mobile Czech Republic a.s. pobočka Mladá Boleslav.

Ve společnosti MODELÁRNA LIAZ spol. s r.o. byl k digitalizaci použit laserový 3D skener od výrobce Leica. Digitalizaci provedl pracovník společnosti. Nebylo nijak nutné upravovat povrch výlisků ani na ně nanášet referenční značky a podobně. Díky tomu byl čas nutný k digitalizaci cca 30 minut.



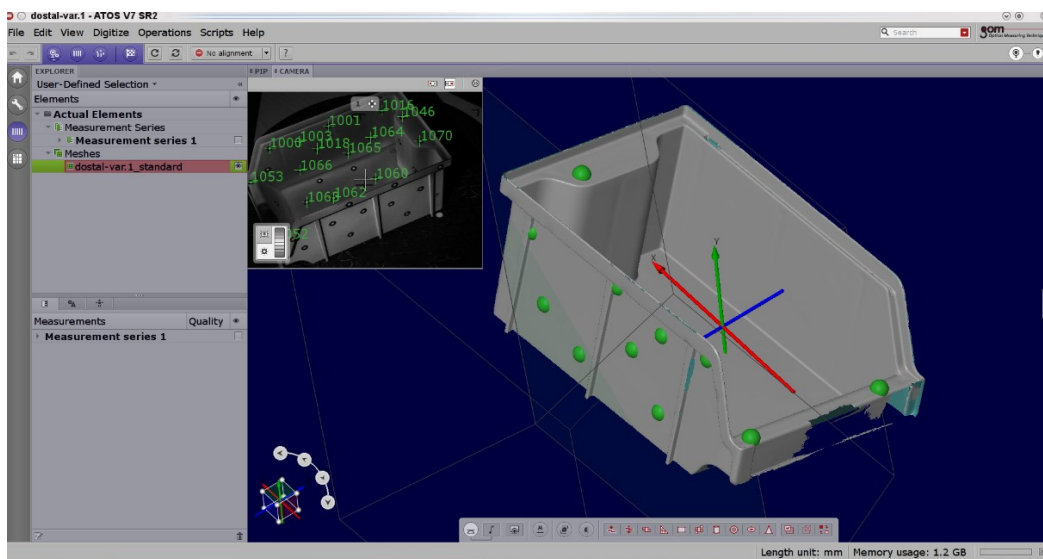
Obr. 40: Ošetřené výlisky připravené k digitalizaci skenerem ATOS. Povrch výlisků zmatněn křídovým prachem a opatřen referenčními značkami

Ve společnosti T-Mobile Czech Republic a.s. byl k digitalizaci použit optický 3D skener ATOS od výrobce GOM (viz. obrázek č. 41). Digitalizaci provedl za pomoci pracovníka společnosti autor diplomové práce. Digitalizace touto metodou zabrala cca 4 hodiny, jelikož nebylo touto metodou možné

skenovat výlisky bez úprav. Vzhledem k principu digitalizace zařízením ATOS bylo nutno zmatnit povrch výlisků (aplikovat nástřík křídového prachu) a opatřit povrch výlisků referenčními značkami nutnými pro „sesouhlasení“ jednotlivých pořizovaných snímků. Snímek z digitalizace skenerem ATOS byl na obrázku č. 41.

V obou případech byl výlisek přenesen do digitální podoby jako mračno bodů, po odstranění přebytkého nasnímaného okolí byl výsledek digitalizace uložen ve formátu STL.

Výstupem 3D skenovacích pracovišť obvykle bývá i vypracovaný protokol o měření (barevné mapy, tabulky odchylek a podobně). Vzhledem k množství a způsobu měřených rozměrů na zkušebních výliscích toto provedl samostatně autor této diplomové práce.



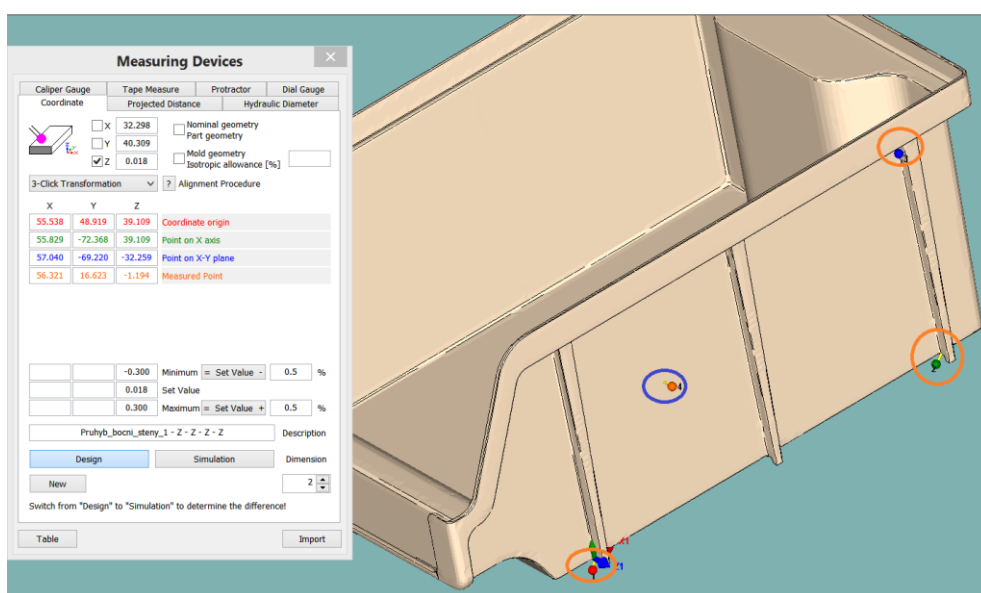
Obr. 41: Snímek z digitalizace výlisků skenerem ATOS. Nahoře skener provádějící snímání, dole snímek ze softwaru ATOS (zelené koule jsou rozpoznané referenční značky)

4. Vyhodnocení

Cílem této kapitoly bylo vyhodnotit, jak úspěšně dokázal modul Varimos vypočítat technologické podmínky, do jaké míry rozměry (tvarové podmínky) na reálném výlisku odpovídaly těm vypočteným modulem Varimos. Zároveň bylo provedeno i porovnání rozměrů reálného zkušebního výlisku s jeho originálními 3D CAD daty. Vyhodnocení bylo provedeno na doporučení společnosti T-Mobile Czech Republic a.s. ve volně dostupném softwaru určeném k porovnávání 3D CAD modelů GOM Inspect V8.

Při práci s digitalizovanými daty hrozí potenciální nebezpečí špatného „sesouhlasení“ 3D CAD dat a digitalizovaných dat, do měření se zanáší chyba digitalizace a podobně, proto byly vždy pro každou variantu rozměry získávány ze dvou zdrojů. Prvním zdrojem bylo porovnání 3D CAD dat s digitalizovanými daty ze skeneru LEICA, druhým zdrojem bylo porovnání 3D CAD dat s digitalizovanými daty ze skeneru ATOS. Zároveň v zájmu co nejnižšího zkreslení měření byly vždy rozměry „měřeny“ 8x a pracováno bylo s průměrnou hodnotou.

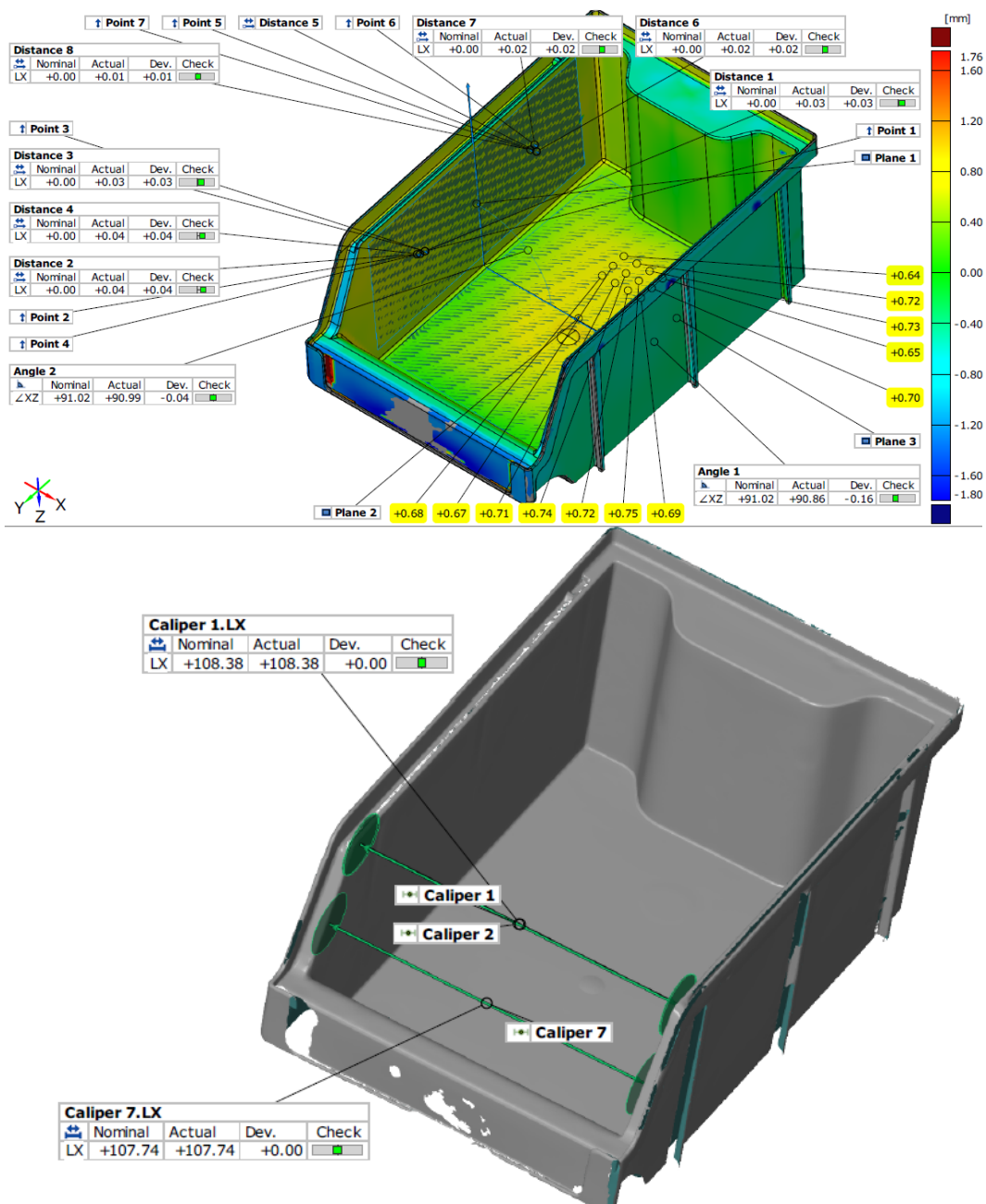
Každá varianta (č. I až č. IV) byla vyhodnocována samostatně vzájemným porovnáním 3D CAD modelu výlisku a digitalizovaných dat. Jako referenční byl vždy vzat 3D CAD model, tj. barevné mapy odchylek vyskytující se v této práci zobrazují vždy odchylky digitalizovaných dat od 3D CAD modelu. Hodnoty odečítané v softwaru GOM Inspect V8 byly vždy odečítány tak, aby byl zohledněn princip jejich zavedení v modulu Varimos. Například (na obrázku č. 42) tvarová podmínka na průhyb bočních stěn byla zadána do modulu Varimos následujícím způsobem: byla vytvořena rovina procházející boční stěnou výlisku a určen jeden bod na stěně výlisku. Průhyb byl tedy určen jako kolmá vzdálenost mezi rovinou a bodem. Tento bod se nacházel na stěně v určité pozici (viz. obrázek č. 42).



Obr. 42: Body v oranžových kruzích určují rovinu, bod v modrém kruhu bod v místě kontroly na průhyb boční stěny

V softwaru GOM Inspect V8 byla stěnou výlisku proložena rovina stejným způsobem jako v modulu Varimos (viz. obrázek č. 43 nahoře), určeny body na stěně a odečtena kolmá vzdálenost mezi body a stěnou.

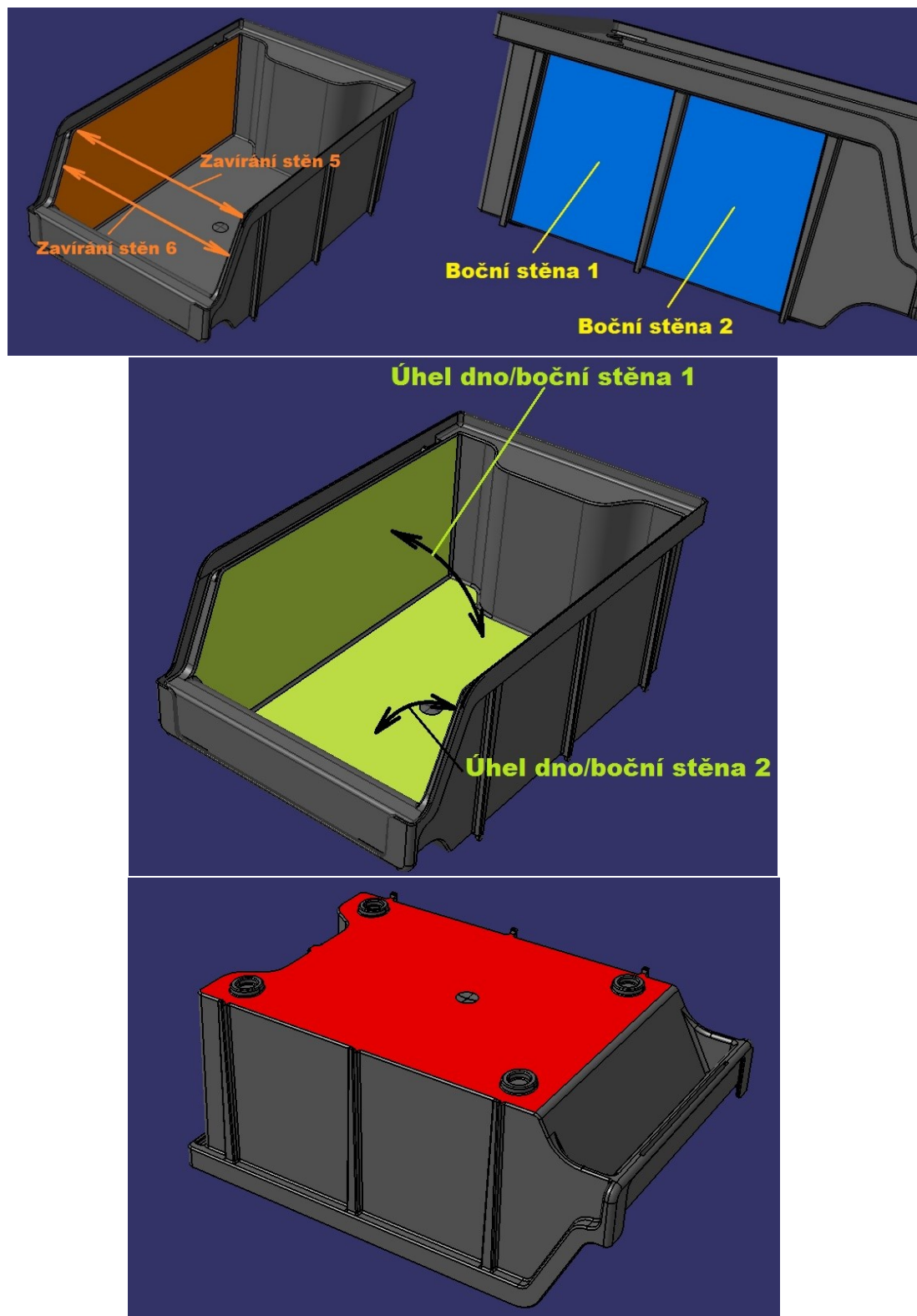
Úhly mezi dnem a bočními stěnami byly získány jako úhly mezi dvěma rovinami proloženými dnem a boční stěnou (viz. obrázek č. 43 nahoře). Zavírání bočních stěn bylo získáno jako nejkratší vzdálenost mezi dvěma oblastmi na bočních stěnách ve směru kolmém na boční stěny (viz. obrázek č. 43 dole). Princip vyhodnocení byl dále patrný z příloh č. 6a až č. 6d.



Obr. 43: Nahoře naznačen princip odměřování rovinnosti bočních stěn.

Měřena kolmá vzdálenost mezi rovinou a bodem. Ve žlutých oválech odměřen průhyb dna výlisku, mezi čerchovanými rovinami odměřen úhel dno/boční stěna. Dole naznačen způsob měření vzdálenosti mezi bočními stěnami na digitalizovaném výlisku

Pro lepší orientaci a přehlednost této kapitoly zde byly na obrázku č. 44 opět zobrazeny tvarové podmínky zadávané do modulu Varimos. Tyto podmínky pak byly při vyhodnocení sledovány v GOM Inspect V8 závislosti na vyhodnocované variantě.



Obr. 44: Barevně označeny jednotlivé sledované rozměry (tvarové podmínky)

4.1. Vyhodnocení varianty č. I

Při této variantě měly být nalezeny takové technologické podmínky, aby tvarová podmínka Průhyb dna 1 ležela ve svém tolerančním pásmu. V tolerančním pásmu by měla ležet i podmínka na Průhyb boční stěny 2.

Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet podmínka na Průhyb boční stěny 1 a podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2.

Vzájemné porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými modulem Varimos a s hodnotami 3D CAD modelu jsou přehledně uvedeny v tabulce č. 10 níže včetně tolerančních pásem jednotlivých tvarových podmínek.

Tab. 10: Kompletní vyhodnocení varianty č. I

Průhyb dna 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,70	0,66	0,70	0,66	0,67	0,65	0,69	0,71
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,63	0,61	0,63	0,55	0,63	0,62	0,61	0,58
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,64	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,04	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,24	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,40	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,24	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							
Průhyb boční stěny 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,09	0,07	0,09	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,10	0,11	0,12	0,09	0,10	0,10	0,09	0,14
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,09	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,02	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,49	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,40	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							

Tab. 10 (pokračování): Kompletní vyhodnocení varianty č. I

Průhyb boční stěny 2							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,06	0,08	0,06	0,05	0,07	0,07	0,07	0,06
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,09	0,09	0,09	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,07	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,01	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,40	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,33	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							
Úhel dno/boční stěna 1							
měření GOM				měření LEICA			
90,80				90,76			
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						90,78	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						89,70	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						1,08	[°]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							
Úhel dno/boční stěna 2							
měření GOM				měření LEICA			
90,60				90,68			
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						90,64	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						89,90	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,74	[°]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							

4.2. Vyhodnocení varianty č. II

Při této variantě měly být nalezeny takové technologické podmínky, aby tvarové podmínky Zavírání stěn 5 a Zavírání stěn 6 byly co nejbližší středu tolerančního pásma. Modulem Varimos nebyly nalezeny takové technologické podmínky, aby rozměry ležely v tolerančním pásmu.

Při této variantě měla ležet v tolerančním pásmu podmínka Průhyb boční stěny 1 i Průhyb boční stěny 2 a podmínka Průhyb dna 1. Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2. Vzájemné porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými modulem Varimos a s hodnotami 3D CAD modelu jsou přehledně uvedeny v tabulce č. 11 níže včetně tolerančních pásem jednotlivých tvarových podmínek.

Tab. 11: Kompletní vyhodnocení varianty č. II

Zavírání stěn 5							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
108,83	108,58	108,60	108,50	108,36	108,45	108,74	108,65
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
108,46	108,51	108,50	108,51	108,44	108,60	108,58	108,49
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						108,55	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,11	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						108,38	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,17	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						110,6±1,5	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,55	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							
Zavírání stěn 6							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
107,99	107,94	107,97	107,96	107,93	107,90	107,95	107,93
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
107,93	107,91	107,90	107,95	107,96	107,90	107,90	107,91
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						107,93	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,03	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						108,19	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,26	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						110±1,5	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,57	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							

Tab. 11 (pokračování): Kompletní vyhodnocení varianty č. II

Průhyb dna 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,52	0,56	0,50	0,55	0,50	0,51	0,50	0,52
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,49	0,45	0,42	0,51	0,48	0,45	0,49	0,55
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,50	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,04	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,38	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,12	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,10	[mm]
Naměřený neleží v tolerančním pásmu.							
Průhyb boční stěny 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,02	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,01	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,37	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,35	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							
Průhyb boční stěny 2							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,02	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,01	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,39	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,37	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							

Tab. 11 (pokračování): Kompletní vyhodnocení varianty č. II

Úhel dno/boční stěna 1		
měření GOM	měření LEICA	
90,90	90,92	
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)	90,91	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)	89,37	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	1,54	[°]
Neshoda s výsledky simulace.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.		
Úhel dno/boční stěna 2		
měření GOM	měření LEICA	
90,93	90,86	
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)	90,90	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)	90,02	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	0,88	[°]
Neshoda s výsledky simulace.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.		

4.3. Vyhodnocení varianty č. III

Při této variantě měly být nalezeny takové technologické podmínky, aby tvarové podmínky Průhyb boční stěny 1 i Průhyb boční stěny 2 ležely ve svých tolerančních pásmech.

Při této variantě by měla ležet v tolerančním pásmu i podmínka Průhyb dna výlisku 1.

Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2.

Vzájemné porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými modulem Varimos a s hodnotami 3D CAD modelu jsou přehledně uvedeny v tabulce č. 12 níže včetně tolerančních pásem jednotlivých tvarových podmínek.

Tab. 12: Kompletní vyhodnocení varianty č. III

Průhyb boční stěny 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,04	0,03
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,03	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,01	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,36	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,33	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							
Průhyb boční stěny 2							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,02	0,03	0,01	0,04	0,01	0,04	0,03
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,02	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,02	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,39	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,37	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							

Tab. 12 (pokračování): Kompletní vyhodnocení varianty č. III

Průhyb dna 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,68	0,71	0,72	0,69	0,67	0,75	0,64	0,73
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,47	0,48	0,49	0,47	0,48	0,50	0,52	0,54
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,60	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,11	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,39	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,21	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,20	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							
Úhel dno/boční stěna 1							
měření GOM				měření LEICA			
90,99				90,95			
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						90,97	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						89,41	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						1,56	[°]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							
Úhel dno/boční stěna 2							
měření GOM				měření LEICA			
90,86				90,91			
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						90,89	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						90,10	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,79	[°]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							

4.4. Vyhodnocení varianty č. IV

Varianta č. IV byla varianta navržená modulem Varimos „bez zásahu“ autora této práce, tj. varianta vzešlá zachováním standardní priority u všech tvarových i ostatních podmínek.

V tolerančních pásmech leží podmínka Průhyb dna 1 a podmínky Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2.

Podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2 leží blízko okraje svého tolerančního pásma.

Vzájemné porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými modulem Varimos a s hodnotami 3D CAD modelu jsou přehledně uvedeny v tabulce č. 13 níže včetně tolerančních pásem jednotlivých tvarových podmínek.

Tab. 13: Kompletní vyhodnocení varianty č. IV

Zavírání stěn 5							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
108,39	108,38	108,36	108,38	108,39	108,37	108,36	108,36
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
108,52	108,46	108,45	108,46	108,49	108,53	108,50	108,50
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						108,43	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,06	
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						108,26	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,17	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						110,6±1,5	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,67	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							
Zavírání stěn 6							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
108,39	108,38	108,36	108,38	107,93	107,90	107,95	107,93
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
107,74	107,75	107,76	107,74	107,75	107,76	107,79	107,79
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						107,96	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,25	
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						108,08	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,12	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						110±1,5	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,54	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							

Tab. 13 (pokračování): Kompletní vyhodnocení varianty č. IV

Průhyb dna 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,56	0,59	0,55	0,57	0,58	0,58	0,62	0,63
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,51	0,50	0,52	0,54	0,54	0,52	0,57	0,58
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,56	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,04	
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,37	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,19	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma						0,16	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.							
Průhyb boční stěny 1							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,02	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,01	
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,39	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,37	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							
Průhyb boční stěny 2							
číslo měření GOM							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,06	0,04	0,04	0,06	0,02	0,03	0,05
číslo měření LEICA							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,06	0,05	0,06	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)						0,04	[mm]
Směrodatná odchylka měření						0,01	
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)						0,40	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního						0,36	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.							
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku						0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.							

Tab. 13 (pokračování): Kompletní vyhodnocení varianty č. IV

Úhel dno/boční stěna 1			
měření GOM		měření LEICA	
90,90		90,82	
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)		90,86	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)		89,49	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního		1,37	[°]
Neshoda s výsledky simulace.			
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku		91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.			
Úhel dno/boční stěna 2			
měření GOM		měření LEICA	
90,90		90,99	
Naměřeno (průměrná hodnota, reálný výlisek)		90,95	[°]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)		89,90	[°]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního		1,05	[°]
Neshoda s výsledky simulace.			
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku		91,2±1	[°]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.			

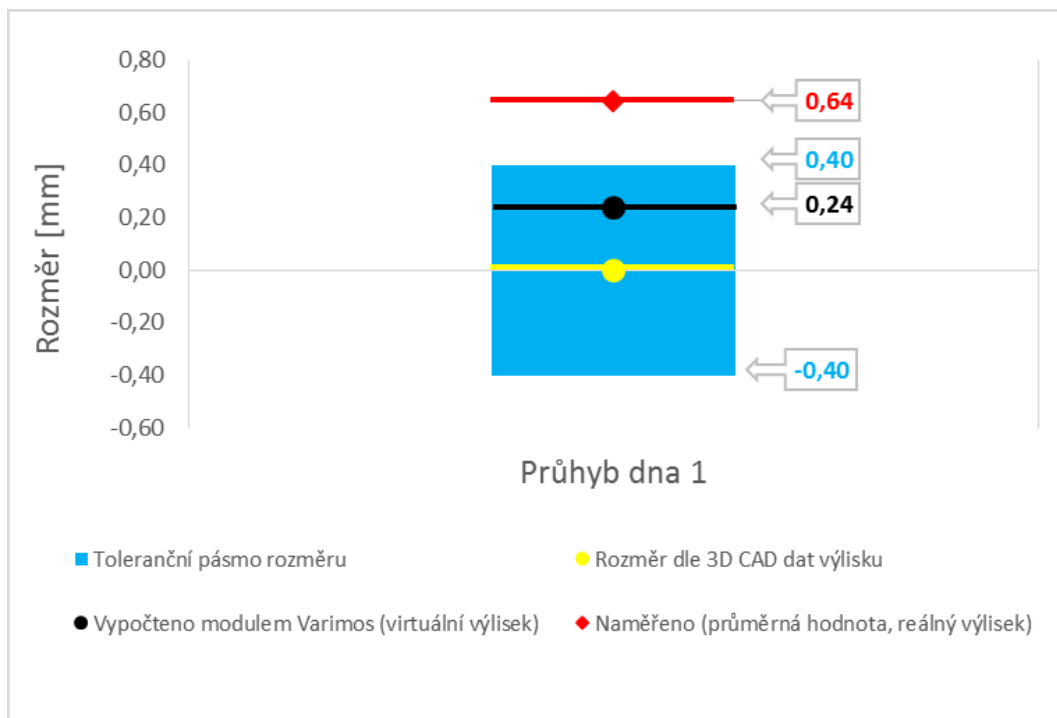
5. Diskuze výsledků

V této kapitole byly podrobněji diskutovány výsledky vzešlé z kapitol 4.1., 4.2., 4.3. a 4.4. Cílem kapitoly 5. bylo podrobně se zaměřit na jednotlivé výsledky a učinit z nich závěry zda došlo ke shodě mezi modulem Varimos a reálným zkušebním výliskem, případně konstatovat neshody mezi výsledky a zamyslet se nad jejich příčinami. Pro přehlednost byly diskutovány výsledky postupně pro každou variantu č. I až č. IV zvlášť.

Výsledky v následujících kapitolách byly demonstrovány pomocí grafů a tabulek. Tabulky a grafy v této kapitole vycházely z tabulek obsažených v kapitole 4. Tabulky byly sestaveny pro přehlednost výsledků a pouze pro prioritní tvarové podmínky. Všechny grafy použité v kapitole 5. mají stejné schéma. Na svislé ose byla zobrazena stupnice v intervalu sledovaného rozměru. Modré pole definuje toleranční pásmo, žlutá přímka rozměr dle 3D CAD dat výlisku, černá přímka rozměr vypočtený modulem Varimos, červená přímka průměrnou hodnotu rozměru získaného z digitalizovaných dat.

5.1. Diskuze výsledků varianty č. I

Varianta technologických podmínek č. I byla „vytvořena“ s prioritou na co nejmenší průhyb dna výlisku. Na ostatní tvarové podmínky nebyl kladen důraz. Při technologických podmínkách vypočtených modulem Varimos měl být Průhyb dna 1 v místě měření 0,24 [mm]. Na reálném zkušebním výlisku byl průhyb 0,64 [mm]. Z výsledků tabulky č. 10 shrnutých v tabulce č. 14 a grafu č. 1 vyplývalo, že modul Varimos chybně predikoval Průhyb dna 1 a že reálná hodnota průhybu byla cca 2,5x větší a že také neležela v tolerančním pásmu.

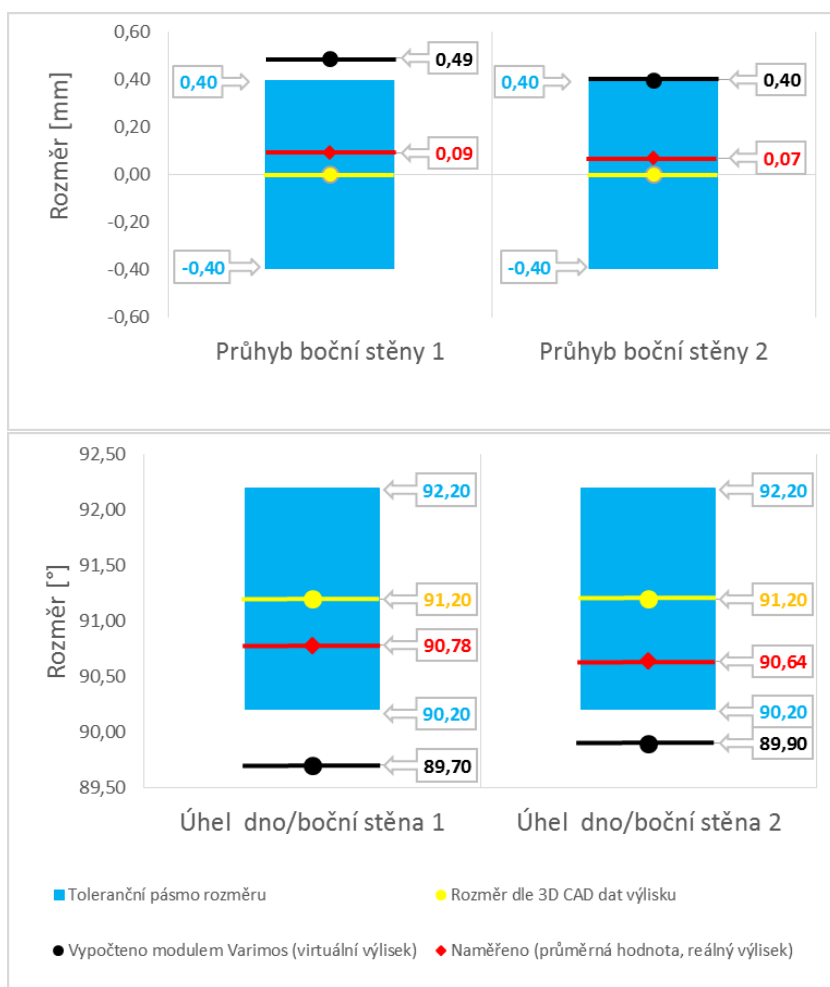


Graf 1: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. I pro prioritní tvarovou podmínku Průhyb dna 1

Tab. 14: Diskuze výsledků Varianty č. I (Průhyb dna 1)

Průhyb dna 1		
Naměřeno na (reálném) zkušební výlisku	0,64±0,04	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)	0,24	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	0,40	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	0±0,4	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma	0,24	[mm]
Naměřený rozměr neleží v tolerančním pásmu.		

Průhyb dna 1 byl měřen jako kolmá vzdálenost mezi rovinou proloženou dnem a bodem, kdy tento bod byl umístěn relativně blízko místa vtoku. Dno zkušební výlisku je vzhledem k ostatním částem výlisku rozměrná rovinná plocha, nevyztužená tvarově, žebry ani jinak. Jedná se o velkou rovinnou plochu, na kterou navazují všechny ostatní části výlisku. Tuhnutí výlisku probíhá směrem od konců bočních stěn až ke dnu výlisku, které tuhne jako poslední. V okamžiku zatuhnutí bočních stěn je dno ještě stále „živé“. Na dno výlisku při jeho tuhnutí tedy nepůsobí jen dotlak, ale také již zatuhlé boční stěny a to má pravděpodobně v kombinaci s místem vtoku blízko bodu měření a krátkého času plnění vliv na neshodu mezi modulem Varimos a realitou.



Graf 2: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. I pro ostatní neprioritní tvarové podmínky

Kromě tvarové podmínky Průhyb dna 1 měla v tolerančním pásmu ležet i podmínka na Průhyb boční stěny 2. Blízko svého tolerančního pásma měla ležet podmínka na Průhyb boční stěny 1 a podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2.

Z grafu č. 2 (vychází z tabulky č. 10) vyplývaly závěry uvedené v následujících odstavcích této kapitoly. Všechny ostatní tvarové podmínky (Průhyb boční stěny 1, Průhyb boční stěny 2, Úhel dno/boční stěna 1, Úhel dno/boční stěna 2) se neshodovaly s výsledky modulu Varimos, zároveň ale pro všechny platilo, že ležely ve svých tolerančních pásmech.

V případě tvarových podmínek Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2 byly průhyby obou bočních stěn naprosto zanedbatelné a stěny bylo možno považovat za rovinné. Vypočtený průhyb modulu Varimos a průhyb reálného výlisku byly značně odlišné. Na základě teorie měly být průhyby bočních stěn naprosto minimální, protože jejich velikost byla vzhledem k výlisku relativně malá, navíc byly tyto stěny přerušeny a vyztuženy žebry.

V případě tvarových podmínek Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2 byla sice odchylka úhlu $1,08 [^\circ]$ a $0,74 [^\circ]$, vzhledem k celkovým rozměrům výlisku a materiálu výlisku lze výsledek považovat za uspokojivý. Rovněž to, že oba úhly měly téměř stejnou velikost, svědčilo o tom, že výlisek je symetrický a temperace ve formě byla vyvážená.

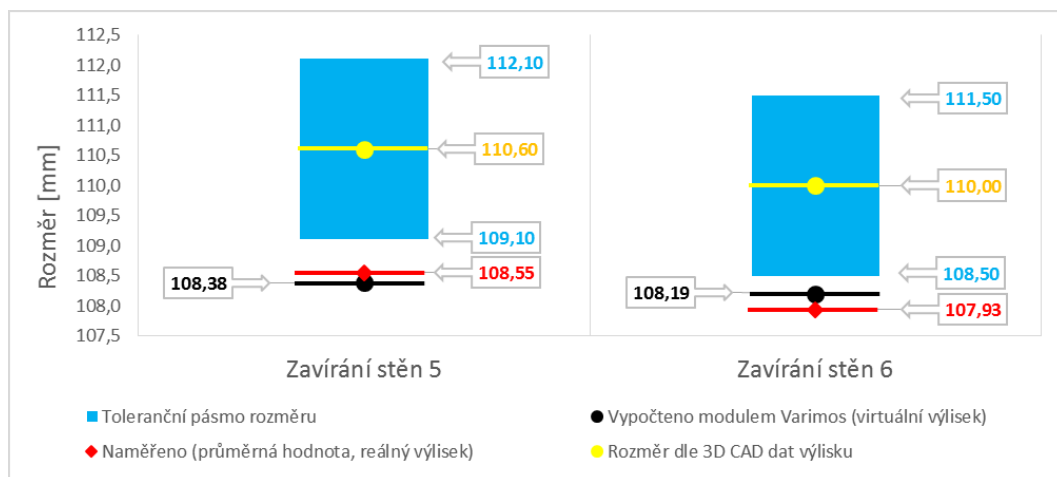
5.2. Diskuze výsledků varianty č. II

Varianta technologických podmínek č. II byla „vytvořena“ s prioritou na co nejmenší změnu vzdálenosti mezi bočními stěnami v místech, kde byly tyto tvarové podmínky definovány. Pracovně toto bylo označeno jako tvarové podmínky Zavírání stěn 5 a Zavírání stěn 6 (viz. obrázek č. 44). Na ostatní tvarové podmínky nebyl kladen důraz.

S pomocí modulu Varimos nebyla nalezena taková kombinace technologických podmínek, aby ležely obě tvarové podmínky ve svých tolerančních pásmech. Byla nalezena taková kombinace technologických podmínek, aby tvarové podmínky ležely co nejblíže okraji svého tolerančního pásma.

Při porovnání výpočtu modulu Varimos a měření digitalizovaných modelů (viz. tabulka č. 16 a graf č. 3 níže, vycházející z tabulky č. 11) bylo zřejmé, že odchylka mezi vypočteným a skutečným rozměrem $0,17 [mm]$ a $0,26 [mm]$ byla vzhledem ke způsobu měření (z digitalizovaných dat) a celkové vzdálenosti zanedbatelná a bylo možno konstatovat, že modul Varimos vypočetl rozměry dobře. To platilo pro obě prioritní tvarové podmínky.

Kromě tvarových podmínek Zavírání stěn 5 a Zavírání stěn 6 měla v tolerančním pásmu ležet i podmínka Průhyb boční stěny 1 i Průhyb boční stěny 2 a podmínka Průhyb dna 1. Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2. Z tabulky č. 17 (vychází z tabulky č. 11) vyplývají závěry uvedené v následujících odstavcích této kapitoly.



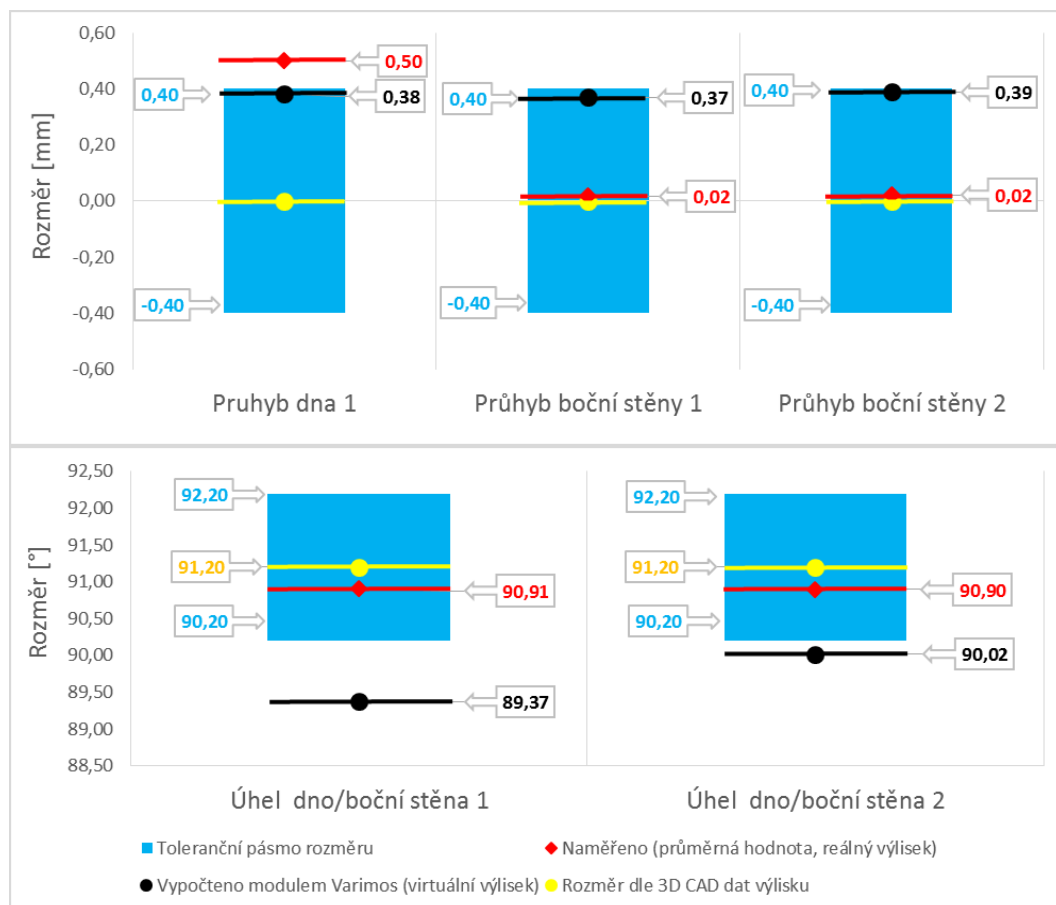
Graf 3: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. II pro prioritní tvarové podmínky Zavírání stěn 5 a Zavírání stěn 6

Tab. 15: Diskuze výsledků Varianty č. II (Zavírání bočních stěn 5 a 6)

Zavírání stěn 5		
Naměřeno na (reálném) zkušebním výlisku	108,55±0,11	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)	108,38	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	0,17	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	110,6±1,5	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma	0,55	[mm]
Naměřený rozměr DLE PŘEDPOKLADŮ neleží v tolerančním pásmu.		
Zavírání stěn 6		
Naměřeno na (reálném) zkušebním výlisku	107,93±0,03	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisek)	108,19	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	0,26	[mm]
Vzhledem k nízké absolutní odchylce můžeme považovat rozměry za shodné se simulací.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	110±1,5	[mm]
Odchylka reálného výlisku od okraje tolerančního pásma	0,57	[mm]
Naměřený rozměr DLE PŘEDPOKLADŮ neleží v tolerančním pásmu.		

Tvarovou podmínku Průhyb dna 1, vzhledem k malé odchylce mezi výpočtem Varimos a reálným výliskem 0,12 [mm] bylo možno považovat za dodrženu. Zároveň ale tato tvarová podmínka neležela ve svém tolerančním pásmu.

V případě tvarových podmínek Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2 se vypočtený rozměr modulu Varimos a rozměr reálného výlisku značně odlišovali (odchylka 0,35 [mm] a 0,37 [mm]), zároveň výsledek naměřeného průhybu udával, že obě boční stěny byly de-facto rovinné. Na základě teorie by měly být průhyby bočních stěn naprosto minimální vzhledem k tomu, že jejich velikost byla vzhledem k výlisku relativně malá, navíc jsou tyto stěny přerušeny a vyztuženy žebry. Zároveň tyto tvarové podmínky ležely ve svých tolerančních pásmech.

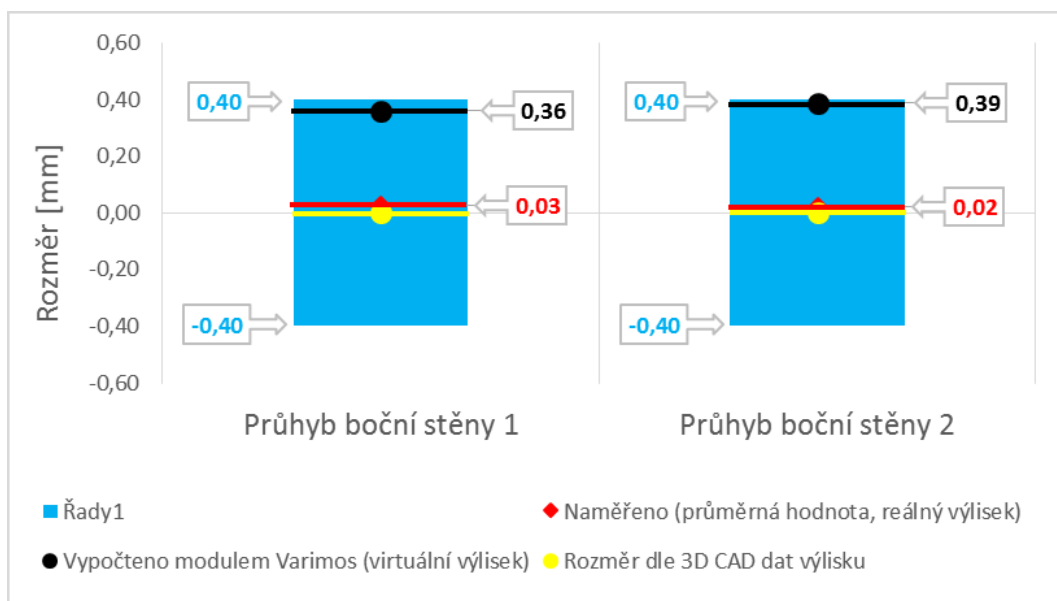


Graf 4: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. II pro ostatní neprioritní tvarové podmínky

To, že tvarové podmínky Zavírání stěn byly vyhovující a tvarové podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2 nebyly vyhovující se mohlo na první pohled jevit nelogicky. Důvod ale spočíval v tom, že tvarové podmínky Zavírání stěn byly měřeny jako kolmá vzdálenost mezi dvěma body, kdežto tvarové podmínky Úhel dno/boční stěna byly měřeny jako úhel svírající mezi dvěma plochami ideálně proloženými celými stěnami výlisku a ne pouze oblastí měření Zavírání bočních stěn. Příčina tedy spočívala v definici tvarových podmínek v modulu Varimos a z toho odvíjejícího způsobu jejich měření v softwaru GOM Inspect V8. Oba úhly mezi dnem a boční stěnou byly v podstatě totožné.

5.3. Diskuze výsledků varianty č. III

Varianta technologických podmínek č. III byla „vytvořena“ s prioritou na co nejmenší průhyb bočních stěn. Průhyb byl měřen jako kolmá vzdálenost mezi rovinou (proložena celou boční stěnou) a bodem ležícím ve středu plochy stěny (viz. obrázek č. 44). Pracovně toto bylo označeno jako tvarové podmínky Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2. Na ostatní tvarové podmínky nebyl kladen důraz.



Graf 5: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. III pro prioritní tvarové podmínky Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2

Tab. 16: Diskuze výsledků Varianty č. III (Průhyb boční stěny 1 a 2)

Průhyb boční stěny 1		
Naměřeno na (reálném) zkušebním výlisku	0,03±0,01	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisk)	0,36	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	0,33	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.		
Průhyb boční stěny 2		
Naměřeno na (reálném) zkušebním výlisku	0,02±0,02	[mm]
Vypočteno modulem Varimos (virtuální výlisk)	0,39	[mm]
Absolutní odchylka reálného výlisku od virtuálního	0,37	[mm]
Neshoda s výsledky simulace.		
Rozměr dle 3D CAD dat výlisku	0±0,4	[mm]
Naměřený rozměr i přes neshodu se simulací leží v tolerančním pásmu.		

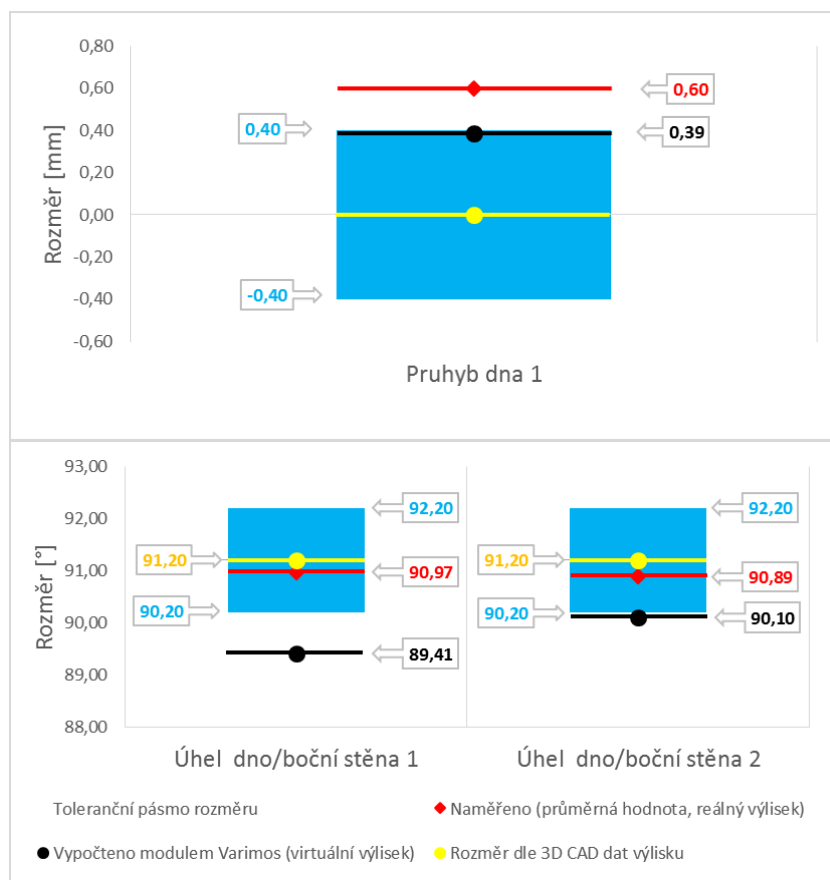
S pomocí modulu Varimos byla nalezena taková kombinace technologických podmínek, aby ležely obě podmínky ve svých tolerančních pásmech. Při porovnání výpočtu modulu Varimos a měření digitalizovaných modelů (viz. tabulka č. 18 a graf č. 5 výše, vycházející z tabulky č. 12) bylo

zřejmé, že odchylka mezi vypočteným a skutečným rozměrem byla, tak jako u předešlých variant, značná (0,33 [mm] a 0,37 [mm]). Zároveň dle měření byly stěny de-facto rovinné. To odpovídalo i teorii. Průhyby bočních stěn by měli být naprosto minimální vzhledem k tomu, že jejich velikost byla vzhledem k výlisku relativně malá, navíc byly tyto stěny přerušeny a vyztuženy žebry. Zde se výpočet Varimos značně odlišoval od skutečnosti. Zároveň ale tyto tvarové podmínky ležely ve svých tolerančních pásmech.

Kromě tvarových podmínek Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2 měla na okraji svého tolerančního pásma ležet i podmínka Průhyb dna 1. Blízko svého tolerančního pásma by měla ležet i podmínka Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2. Z grafu č. 6 (vychází z tabulky č. 12) vyplývaly závěry uvedené v následujících odstavcích této kapitoly.

Tvarová podmínka Průhyb dna 1 nebyla splněna stejně tak jako v případě varianty č. I (odchylka 0,21 [mm]). Důvodem byla pravděpodobně kombinace více proměnných, které měly na predikci chování dna vliv (rozměrná nevyztužená rovinná plocha, měření blízko místa vtoku). Zároveň tato tvarová podmínka neležela ve svém tolerančním pásmu.

V případě tvarových podmínek Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2 byly výsledky obdobně jako v případě variant č. I a č. II (odchylky 1,56 [°] a 0,79 [°]).

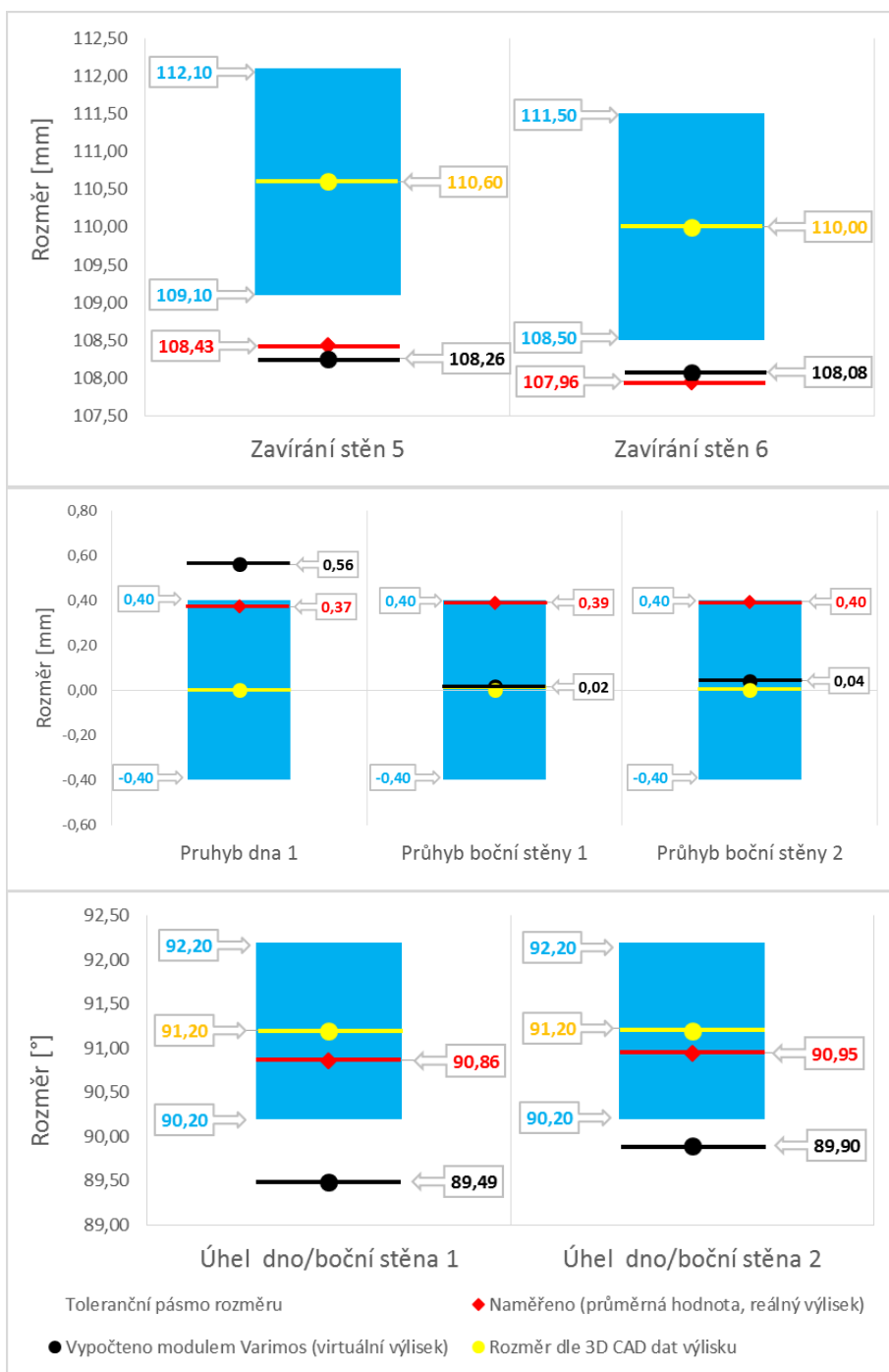


Graf 6: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. III pro ostatní neprioritní tvarové podmínky

5.4. Diskuze výsledků varianty č. IV

Varianta č. IV byla varianta navržená modulem Varimos „bez zásahu“ autora této práce. Byla to varianta vzešlá zachováním standardní priority u všech tvarových i ostatních podmínek.

V tolerančních pásmech měly ležet tvarové podmínky Průhyb dna 1, Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2. Podmínky Úhel dno/boční stěna 1 a Úhel dno/boční stěna 2 měly ležet blízko okraje svého tolerančního pásma.



Graf 7: Grafické znázornění diskuze výsledků varianty č. IV pro všechny tvarové podmínky

V této kapitole byla diskuze provedena pouze s pomocí grafu č.7, a to vzhledem k tomu, že varianta č. IV byla navržena se „standardní prioritou“ (viz. kapitola č. 3.5.5.) všem tvarovým podmínkám.

Z grafu č. 7 (vychází z tabulky č. 13) byly patrné následující závěry. Tvarové podmínky Zavírání bočních stěn 5 i Zavírání bočních stěn 6 neměli ležet a ani neležely ve svých tolerančních pásmech, zároveň ale platilo, že modul Varimos určil jejich rozměry vcelku přesně s velice malými odchylkami 0,17 [mm] a 0,12 [mm]. Výsledek bylo možno považovat za dobrý (stejně jako v případě varianty č. II).

Tvarová podmínka Průhyb dna 1 neodpovídala výpočtu modulu Varimos ani neležela ve svém tolerančním pásmu, odchylka 0,19 [mm].

Tvarové podmínky Průhyb boční stěny 1 i Průhyb boční stěny 2 neodpovídali výpočtu a byly opět de-facto rovinné stejně jako u všech předchozích variant, odchylky 0,37 [mm] a 0,36 [mm].

Tvarové podmínky Úhel dno/boční stěna 1 i Úhel dno/boční stěna 2 neodpovídaly výpočtu, ale ležely ve svých tolerančních pásmech, odchylky 1,37 [°] a 1,05 [°].

5.5. Shrnutí diskuze

Z výsledkových tabulek v kapitolách 5.1.až 5.4. vyplývalo, že modul Varimos dokázal vypočítat rozměry naměřené na zkušebních výliscích pouze u některých variant (varianta č. II a částečně varianta č. IV). Příčin neshody výsledků bylo pravděpodobně více.

Hlavní příčinou byl fakt, že modul Varimos byl v době tvorby této diplomové práce na trhu velice nový software, prakticky ve své první verzi. Nebyl to časem a praxí prověřený a vyladěný nástroj. Obor vstřikování plastů je velice rozmanitý, vstřikují se výlisky nejrůznějších tvarů, existuje velice široká nabídka materiálů ke vstřikování, rozmanitá konstrukce nástrojů a podobně. Celý takto rozmanitý obor musí nutně modul Varimos pojmout. K tomu bude zapotřebí dalšího vývoje a ladění softwaru. V určitém smyslu bylo logické, že modul Varimos (takto „nový software“) nedokázal výpočtem přesně predikovat chování reálného zkušebního výlisku.

U každé simulace bude docházet k lehkému „zkreslení“ výsledků. Celý simulační model nadefinovaný v softwaru Cadmould® 3D-F byl vytvořen tak, aby co možná nejlépe odpovídal reálným podmínkám. Nicméně vytvořit takový virtuální model, který by naprosto přesně odpovídal v každém detailu reálnému stavu dnes není prakticky možné.

Vliv materiálu, jeho vlastností, ale i konkrétní šarže materiálu má na výlisky vliv. Materiálová databanka Cadmould® 3D-F pracovala s „pevnými materiálovými daty“, nebrala nijak v potaz možné rozdíly (odchyly) mezi jednotlivými šaržemi materiálu. Právě rozdíly v šaržích mohou mít na neshodu výsledků vliv. Výrobce se na toto při vývoji nové verze Varimos zaměřil.

Při porovnání výsledků (kapitoly 5.1.až 5.4.) napříč jednotlivými variantami bylo patrné, že velikost (rozměry) stejných tvarových podmínek se od sebe výrazně nelišily. To bylo pravděpodobně způsobeno dvěma hlavními faktory.

Prvním faktorem bylo pravděpodobně to, že nehledě na prioritu jednotlivých tvarových podmínek napříč variantami, byly technologické podmínky vypočítané modulem Varimos značně podobné, a to hlavně v případě variant č. II, č. III a č. IV.

Druhým faktorem, který mohl zapříčinit velkou podobnost výsledků, byl pravděpodobně použitý materiál zkušebního výlisku. Jednalo se sice o polypropylen, u kterého by se i menší změny technologických podmínek měli na rozměrech výlisku projevit. Protože ale materiál použitý ke vstřikování nebyl „čistý“, ale byl použit polypropylen plněný minerálním plnivem (viz. kapitola 2.1.4. Druhy přísad a jejich vliv na smrštění materiálu), došlo pravděpodobně vlivem plniva k částečnému „smazání“ rozdílů v rozměrech výlisků mezi jednotlivými variantami.

Z celé diskuze nad výsledky plyne několik závěrů:

- 1) Přes neshodu většiny rozměrů vypočtených modulem Varimos a zjištěných na reálném výlisku ležela většina rozměrů ve svých tolerančních pásmech.
- 2) Při porovnání jednotlivých variant a zaměření se pouze na tvarovou podmínku Průhyb dna 1 byla pro tuto tvarovou podmínku nejhorší varianta technologických podmínek č. I s odchylkou 0,4 [mm], naopak nejlepší varianta č. II s odchylkou 0,12 [mm].
- 3) Největší neshody mezi virtuálním a reálným výliskem byly v případě tvarových podmínek Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2 (důvody diskutovány v kapitolách 5.1 až 5.4.). Zároveň platilo, že nehmě na změnu (variantu) technologických podmínek zůstávaly průhyby obou bočních stěn prakticky nezměněny. Ve všech případech platilo, že obě boční stěny na reálném zkušebním výlisku byly de-facto rovinné (důvody diskutovány v kapitolách 5.1 až 5.4.). Výše uvedené jasně svědčilo o tom, že změny technologických podmínek na tyto tvarové podmínky neměly praktický vliv.
- 4) V případě tvarových podmínek na Úhel dno/boční stěna vyšli vždy oba úhly de-facto stejně velké, což svědčilo o dobrém vyvážení temperační soustavy a o tom, že vyráběné výlisky byly symetrické.
- 5) V případě tvarových podmínek Zavírání boční stěny 5 i Zavírání boční stěny 6 byly očekávány velké odchylky mezi výpočty modulu Varimos a reálnými rozměry. Přes všechny předpoklady dokázal modul Varimos tyto rozměry určit relativně přesně (viz. graf č. 3 a graf č. 7). Nejlepších výsledků bylo dosaženo variantou č. IV s odchylkami 0,12 [mm] a 0,17 [mm].
- 6) Z výsledků bylo patrné, že optimalizaci zkušebního výlisku není možné dosáhnout pouze změnou technologických podmínek vstřikování, ale že by bylo zapotřebí i zásahů do designu výlisku a tím pádem i do konstrukce nástroje (vyztužit dno například žebry, upravit tvar bočních stěn a podobně).
- 7) U všech měřených rozměrů vycházely malé směrodatné odchylky, což svědčilo o přesném měření a kvalitních digitalizovaných datech. Snaha o získání co možná nejlepších digitalizovaných dat a práce s digitalizovanými daty ze dvou zdrojů měla tedy smysl a pozitivně odrazila se v přesnosti a kvalitě výsledků.

6. Závěr

Clem diplomové práce bylo optimalizovat technologické podmínky vstřikování, a to pomocí modulu Varimos jako nadstavby softwaru Cadmould® 3D-F. Modul Varimos byl na trhu relativně novým produktem. Jedním z cílů práce bylo ověřit, jak platným nástrojem vlastně modul Varimos mohl být. K ověření modulu Varimos bylo rozhodnuto o provedení optimalizace technologických podmínek s pomocí modulu Varimos, a to na zkušebním výlisku. Pro tento výlisek byla dostupná vstřikovací forma přímo na TUL. Byl nalezen i materiál, vhodný pro výrobu výlisku. Výběr materiálu byl omezen, bylo nutno najít takový materiál, který byl zaveden v materiálové databance Cadmould® 3D-F a zároveň byl dostupný na TUL.

Prvním krokem bylo provedení úvodních simulací v Cadmould® 3D-F. Provedeny byly z důvodu hrubého odhadu technologických podmínek, za kterých by bylo vhodné výlisek vstřikovat. Celkově tak byl získán hrubý přehled o výlisku a technologických podmínkách výroby a byla ověřena celková funkčnost nadefinovaného modelu. Byly tedy provedeny standardní simulace vstřikování plastů běžně používané v průmyslové praxi.

Z poznatků z úvodních simulací byl vytvořen optimalizační model pro modul Varimos. Na základě úvodních simulací byly vybrány technologické podmínky, které bylo vhodné variovat, dále byly definovány omezující tvarové podmínky a jejich toleranční pole (podmínky rovinnosti dna a stěn, zavírání stěn a podobně). Pro takto nadefinovaný optimalizační model pak modul Varimos provedl optimalizační výpočet. Celkem byly provedeny tři optimalizační výpočty, jelikož se ukázalo nevhodné nastavení intervalů některých technologických podmínek, zároveň bylo zjištěno, že například podmínky temperačního systému není nutné variovat, protože na tvarové podmínky výlisku nemají příliš vliv a podobně. Tímto postupem byl získán optimalizační výpočtový model pracovně označen jako výpočet C.

Na základě výsledků výpočtu C byly stanoveny čtyři varianty technologických podmínek. Při každé variantě technologických podmínek měla určitá tvarová podmínka (rozměr) prioritu.

Bylo provedeno vstřikování zkušebních výlisků za výše uvedených technologických podmínek. Tyto zkušební výlisky byly následně digitalizovány do 3D podoby a porovnány s 3D CAD modelem výlisku. Aby byly získány co nej kvalitnější digitalizovaná data a byla jistota jejich co největší přesnosti, byla provedena digitalizace dvěma odlišnými metodami. Z obou digitalizovaných modelů pak byl určitý rozměr vždy odečten několikrát a bylo pracováno s jeho průměrnou hodnotou.

Získané závěry je možno rozdělit na tři části, a sice zhodnocení užitnosti a výhod použití modulu Varimos v průmyslové praxi, zhodnocení možnosti a úspěšnosti optimalizace konkrétního zkušebního výlisku modulem Varimos a závěry vyplývající z porovnání 3D modelů.

Hodnocení užitenosti a výhod použití Varimos v praxi:

Z průběhu práce a výsledků provedeného experimentu jasně vyplývalo, že modul Varimos byl velice vhodný nástroj pro získání informací o chování výlisku ještě v předvýrobní fázi. Standardní simulační softwary toto neumožňovaly.

Díky modulu Varimos získá uživatel nejen informaci o tom, jaké technologické podmínky lze ke vstřikování použít, aby byl výlisek dle standardů uživatele optimální, ale díky práci s technologickým oknem získá hlavně přehled o tom, jaké technologické podmínky mají na výlisek největší vliv, jaké technologické podmínky vliv nemají a podobně.

Uživatel získá cenné informace o tom, jak se bude chovat výlisek, když se určitá technologická podmínka změní a podobně.

Dále získá informaci o tom, zda je možné vůbec výlisek vyrobit dle rozměrů a tolerancí výkresu. Uživatel tak například zjistí, že výlisek není možné vyrobit a bude nutné přistoupit i ke změně tvaru výlisku, přidání žeber, přemístění vtoku, změně tloušťky výlisku a podobně. Toto vše má šanci uživatel zjistit ještě v předvýrobní fázi a uspořit tak značné náklady na úpravu nástrojů a podobně.

Zároveň má uživatel v rukou konkrétní výsledky, se kterými může argumentovat a lépe tak obhájit své závěry a prosazované změny.

Jinou možností jak takové výsledky získat bylo měnit technologické podmínky na vstřikolisu a kontrolovat každý vyrobený výlisek. Pak například ze změn rozměrů nebo hmotnosti výlisku lze vyvozovat závěry a konstatovat vlivy měnících se technologických podmínek. Tento postup byl ale oproti použití modulu Varimos značně zdlouhavý a neefektivní.

Díky použití DOE a relativní rychlosti výpočtů v modulu Varimos v tomto směru hodnotím modul Varimos jako výrazný přínos pro praxi a posun v oblasti optimalizace a simulace vstřikování plastů.

Hodnocení optimalizace zkušebního výlisku modulem Varimos:

Modul Varimos nenalezl takovou kombinaci technologických podmínek, aby ležely všechny definované rozměry (tvarové podmínky) ve svých tolerančních polích. Z toho vyplývá, že zkušební výlisek jako celek z daného materiálu nebyl pro dané tvarové podmínky a jejich toleranční pole optimalizovatelný.

Aby bylo možno zkušební výlisek vyrábět v „optimálním tvaru“, bylo by nutné přistoupit ke změně tvaru výlisku, přemístění a úpravě tvaru žeber, změně tloušťky stěn v určitých partiích, úpravě temperačního systému a podobně. Toto ale překračovalo rozsah práce a nebylo cílem práce.

Závěry vyplývající z porovnání 3D modelů:

Přes neshodu většiny rozměrů vypočtených modulem Varimos a zjištěných na reálném výlisku ležela většina rozměrů ve svých tolerančních polích.

Při porovnání jednotlivých variant a zaměření se pouze na tvarovou podmínku Průhyb dna 1 byla pro tuto tvarovou podmínku nejhorší varianta technologických podmínek č. I s odchylkou 0,4 [mm], naopak nejlepší varianta č. II s odchylkou 0,12 [mm].

Největší neshody mezi virtuálním a reálným výliskem byly v případě tvarových podmínek Průhyb boční stěny 1 a Průhyb boční stěny 2 (důvody diskutovány v kapitolách 5.1 až 5.4.). Zároveň platilo, že nehledě na změnu (variantu) technologických podmínek zůstávaly průhyby obou bočních stěn prakticky nezměněny. Ve všech případech platilo, že obě boční stěny na reálném zkušební výlisku byly de-facto rovinné (důvody diskutovány v kapitolách 5.1 až 5.4.). Výše uvedené jasně svědčilo o tom, že změny technologických podmínek na tyto tvarové podmínky neměli praktický vliv.

V případě tvarových podmínek na Úhel dno/boční stěna vyšli vždy oba úhly de-facto stejně velké, což svědčilo o dobrém vyvážení temperační soustavy a o tom, že vyráběné výlisky byly symetrické.

V případě tvarových podmínek Zavírání boční stěny 5 i Zavírání boční stěny 6 byly očekávány velké odchylky mezi výpočty modulu Varimos a reálnými rozměry. Přes všechny předpoklady dokázal modul Varimos tyto rozměry určit relativně přesně (viz. graf č. 3 a graf č. 7). Nejlepších výsledků bylo dosaženo variantou č. IV s odchylkami 0,12 [mm] a 0,17 [mm].

Z výsledků bylo patrné, že optimalizaci zkušebního výlisku není možné dosáhnout pouze změnou technologických podmínek vstřikování, ale že by bylo zapotřebí i zásahů do designu výlisku a tím pádem i do konstrukce nástroje (vyztužit dno například žebry, upravit tvar bočních stěn a podobně).

U všech měřených rozměrů vycházely malé směrodatné odchylky, což svědčilo o přesném měření a kvalitních digitalizovaných datech. Snaha o získání co možná nejlepších digitalizovaných dat a práce s digitalizovanými daty ze dvou zdrojů měla tedy smysl a pozitivně odrazila se v přesnosti a kvalitě výsledků.

Seznam zdrojů

- [1] - SKÁLA, Tomáš. *Porovnání CAE aplikací pro analýzu vstřikovacího procesu*. Zlín, 2010. Diplomová práce (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická.
- [2] - Běhálek, Luboš. *Morfologie polymerů (teor. poznatky, vliv na kvalitu dílů a metody hodnocení)* [online]. [cit. 2014-07-11]. Liberec: TU v Liberci. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_VIP_PR_04_CZE_Behalek_Morfologie_polymeru.pdf
- [3] - Zeman, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN-technická literatura, 2009. ISBN 978-807300-250-3.
- [4] - Homola, Jan. *Simulace vstřikování plastů jsou „in“ — Dassault koupil firmu, která pro něj vyvíjí SolidWorks Plastics* [online]. [cit. 2014-07-09]. © 2010-2014, Vydavatelství Nová média, s. r. o. — CAXMIX.cz. Dostupné z: <http://www.caxmix.cz/2013/05/13/simulace-pro-vstrikovani-plastu-jsou-in-dassault-koupil-firmu-ktera-pro-nej-dosud-vyvijela-solidworks-plastics/>
- [5] - Plasty Gabriel. *Cadmould 3D-F*. Cadmould.cz [online]. © 2013 [cit. 2014-07-09]. Dostupné z: <http://cadmould.cz/software/cadmould-3d-f/>
- [6] - Autodesk® Simulation Moldflow® brožura (Česky) [online]. [cit. 2014-07-09]. Dostupné z: http://www.smartplast.cz/data/official/simulation_moldflow_brozura_cz.pdf
- [7] - Simulplast. *Moldex3D*. Simulplast.cz/moldex3d.php [online]. ©2009 [cit. 2014-07-10]. Dostupné z: <http://www.simulplast.cz/moldex3d.php>
- [8] - Plasty Gabriel. *Varimos*. Cadmould.cz [online]. © 2013 [cit. 2014-07-08]. Dostupné z: <http://cadmould.cz/2014/04/varimos/>
- [9] - SMARTPLAST. *Software*. Smartplast.cz [online]. © 2014 [cit. 2014-07-09]. Dostupné z: <http://www.smartplast.cz/software.php>
- [10] - Simcon. *Varimos*. Simcon-worldwide.com [online]. [cit. 2014-07-08]. Dostupné z: <http://www.simcon-worldwide.com/pages/en/products/varimos.php?lang=EN>
- [11] - Gabriel, Jiří. *Virtuální a reálný systém pro optimalizaci vstřikování* [online]. [cit. 2014-07-08]. © 2014 www.mmspektrum.com. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/virtualni-a-realny-system-pro-optimalizaci-vstrikovani.html>
- [12] - Gabriel, Jiří. *VARIMOS® Systém pro virtuální a reálnou optimalizaci vstřikovacího procesu* [online]. Plasty Gabriel s.r.o. [cit. 2014-07-08]. Dostupné z: <http://cadmould.cz/wp-content/uploads/2013/12/VARIMOS.pdf>
- [13] - Kulkarni, Suhas. *Robust Process Development and Scientific Molding*. Munich: Hanser Publications, 2010. ISBN 978-3-446-42275-9
- [14] - Simcon kunststofftechnische Software GmbH. *The quantum leap of injection moulding*. [cit. 2014-11-02]. © 2014. Prezence: Reseller meeting 2014.
- [15] - Lenfeld, Petr a Aleš Ausperger. *Vady plastových dílů (využití simulace k predikci vad)* [online]. [cit. 2014-07-10] Liberec: TU v Liberci. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_NVP_PR_14_CZE_Lenfeld_Vady_plastovych_dilu.pdf

- [16] - Ausperger, Aleš. *Simulace procesu tečení a deformací plastových dílů v programu Cadmould 3D* [online]. [cit. 2014-07-11]. Liberec: TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_MTK_CV_06_CZE_Ausperger_SW_Cadmould_Simulace_procesu_teceni_a_deformaci_plastovych_dilu_\(ICT\).pdf](http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_MTK_CV_06_CZE_Ausperger_SW_Cadmould_Simulace_procesu_teceni_a_deformaci_plastovych_dilu_(ICT).pdf)

- [17] - Ausperger, Aleš. *SW Cadmould* [online]. [cit. 2014-07-11]. Liberec: TU v Liberci. Dostupné z: [http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_NVP_CV_09_CZE_Ausperger_SW_Cadmould_Optimalizace_konstrukce_vstrikovaneho_dilu_\(ICT\).pdf](http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_NVP_CV_09_CZE_Ausperger_SW_Cadmould_Optimalizace_konstrukce_vstrikovaneho_dilu_(ICT).pdf)

- [18] - Lyondellbasell. Hostacom M4 U02. Polymers.lyondellbasell.com [online]. ©2008 [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: https://polymers.lyondellbasell.com/portal/site/basell/template.PAGE/menuitem.f1ff80c98625adef62e408fde5548a0c/?VCMChannelID=2daf473032095110VgnVCM100000646f3c14____&javax.portlet.tpst=7bc706488cd9f36418c3691026f6c341&javax.portlet.pst=7bc706488cd9f36418c3691026f6c341_ws_MX&javax.portlet.prp_7bc706488cd9f36418c3691026f6c341_viewID=single_product_grade&VCMContentID=a4a31400b0237010VgnVCM100000646f3c14RCRD

- [19] - ARBURG GmbH + Co KG. Allrounder 470S [online]. ©2014 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470S_TD_528481_en_GB.pdf

Seznam obrázků

- OBR. 1: ROZDĚLENÍ POLYMERŮ PODLE NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY [1]
- OBR. 2 : ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ AMORFNÍCH POLYMERŮ S MĚNÍCÍ SE TEPLOTOU
- OBR. 3: ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SEMIKRYSTALICKÝCH POLYMERŮ S MĚNÍCÍ SE TEPLOTOU
- OBR. 4: ZOBECNĚNÉ POROVNÁNÍ VLIVU JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ PLNIV NA SMRŠTĚNÍ A ANIZOTROPII SMRŠTĚNÍ. MODŘE ZVÝRAZNĚN OČEKÁVANÝ SMĚR VĚTŠÍHO SMRŠTĚNÍ
- OBR. 5: PŘÍKLAD RYCHLÉHO URČENÍ VELIKOSTI ODEZVY (ROZMĚR VÝLSKU) S VYUŽITÍM LINEARITY V INTERVALU MEZI DVĚMA TESTOVANÝMI ÚROVNĚMI FAKTORU (VELIKOST DOTLAKU), NEJEDNODUŠŠÍ PŘÍKLAD DOE PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ [13]
- OBR. 6: DIALOGOVÉ OKNO SLOUŽÍCÍ K ZADÁNÍ A ZÁROVEŇ I VARIOVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ. V LEVÉM SLOUPCI DIALOGOVÉHO OKNA ZADÁVÁNA „ZÁKLADNÍ“ ÚROVEŇ FAKTORŮ, KTEROU UŽIVATEL PREFEROVAL (ZJIŠTĚNÁ NAPŘÍKLAD NA ZÁKLADĚ ÚVODNÍ SIMULACE ČI ZE ZKUŠENOSTÍ S PODOBNÝMI VÝLSKY). V PRÁVÉM SLOUPCI DIALOGOVÉHO OKNA ZADÁNÍ TOLERANČNÍHO PÁSMU (OKRAJOVÉ ÚROVNĚ, NA JAKÉ AŽ ÚROVEŇ FAKTORU BYL OCHOTEN UŽIVATEL ZAJÍT)
- OBR. 7: NALEZENÍ OPTIMÁLNÍCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PRINCIPEM „KROK PO KROKU“. ČERVENÉ BODY OZNAČUJÍ KOMBINACI ÚROVNÍ FAKTORŮ (VELIKOST DOTLAKU A TEPLOTA FORMY) NACHÁZEJÍCÍCH SE MIMO TOLERANČNÍ PÁSMO ODEZVY (DĚLKA, PRŮMĚR, ... DEFORMACE). ZELENÝ BOD OZNAČUJE NALEZENOU KOMBINACI ÚROVNÍ FAKTORŮ, PRO KTERÉ JSOU VŠECHNY ODEZVY V TOLERANČNÍM PÁSMU. TENTO ZPŮSOB ALE TĚMĚŘ NEUMOŽŇUJE NALÉZT TAKOVOU KOMBINACI ÚROVNÍ FAKTORŮ, ABY BYL ZELENÝ BOD VŽDY PŘÍBLIŽNĚ VE STŘEDU TOLERANČNÍHO PÁSMU KAŽDÉ JEDNOTLIVÉ SLEDOVANÉ ODEZVY [14]
- OBR. 8: VÝSLEDKY OPTIMALIZACÍ ZÍSKANÉ MODUEM VARIMOS. ZELENÉ ŠRAFOVANÉ PLOCHY PŘEDSTAVUJÍ MOŽNÉ KOMBINACE ÚROVNÍ FAKTORŮ, PŘI KTERÝCH BUDOU ODEZVY LEŽET VE SVÝCH TOLERANČNÍCH PÁSMECH. „SLOŽENÍM“ TĚCHTO PLOCH VZNIKNE VÝSLEDKOVÁ PLOCHA. BODY NA PLOŠE JSOU KOMBINACÍ ÚROVNÍ FAKTORŮ, PŘI KTERÝCH BUDOU VŽDY VŠECHNY ODEZVY VE SVÝCH TOLERANČNÍCH PÁSMECH[14]
- OBR. 9: PŘÍSTROJ VARIMOS [11]
- OBR. 10: GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ ZÁVISLOSTI TLAKU V DUTINĚ FORMY NA ČASE (FÁZE VSTŘIKOVACÍHO CYKLU) [3]
- OBR. 11: ANALÝZA PLNĚNÍ DUTINY FORMY. ČERVENÁ BARVA ZOBRAZUJE ČELA TAVENINY VE STEJNÉM ČASE A OBJASŇUJE ZPŮSOB PLNĚNÍ DUTINY FORMY. Z TOHOTO SNÍMKU LZE USUZOVAT NA NEBEZPEČÍ VZNIKU STUDENÉHO SPOJE Z DŮVODU SETKÁNÍ OBOU ČEL TAVENINY. DVĚ ČELA TAVENINY VZNIKLA V DŮSLEDKU TVAROVÉHO ŘEŠENÍ VÝLSKU A POLOHY VTOKOVÉHO ÚSTNÍ
- OBR. 12: UKAZATEL HROMADĚNÍ VZDUCHU. MÍSTA SE SKLONEM K „HROMADĚNÍ“ VZDUCHU OZNAČENA BÍLÝMI JEHLANY [15]
- OBR. 13: NEDOSTŘÍKNUTÍ V MÍSTĚ OKRAJE VÝLSKU
- OBR. 14: PLOŠNÉ ZOBRAZENÍ PROPADLIN. PROPADLINY JSOU LOGICKY HLAVNĚ V MÍSTECH HROMADĚNÍ MATERIÁLU (NAPOJENÍ STĚN A ŽEBER) A V MÍSTECH DALEKO OD VTOKU S HORŠÍM PŮSOBENÍM DOTLAKU
- OBR. 15: POROVNÁNÍ 3D CAD DAT VÝLSKU S VÝLSKEM A APLIKOVANÝMI DEFORMACEMI PŘI DESETINÁSOBNÉM ZVĚTŠENÍ DEFORMACÍ
- OBR. 16: DEFORMACE V JEDNOM SMĚRU
- OBR. 17: ANALÝZA ZMĚN KŘIVOSTI

- OBR. 18: URČENÍ VELIKOSTI SMRŠTĚNÍ DŮLEŽITÉ PRO KONSTRUKCI NÁSTROJE. SOFTWARE ROVNĚŽ DOKÁŽE URČIT PRŮMĚRNÉ SMRŠTĚNÍ. UŽIVATEL TAK DOSTANE PŘEHLED O CHOVÁNÍ VÝLISKU A MŮŽE LÉPE NAVRHNOUT ROZMĚRY TVAROVÉ DUTINY FORMY
- OBR. 19: BAREVNÉ OZNAČENÍ PLOCH, KTERÉ BYLY VZHLEDEM K TVARU A ÚČELU VÝLISKU ZVOLENY JAKO DŮLEŽITÉ. TYTO PLOCHY A ZÁVISLOSTI MEZI NIMI BYLY ZADÁNY DO VARIMOS JAKO TVAROVÉ PODMÍNKY. POMOCÍ MODULU VARIMOS PAK BYLY HLEDÁNY TAKOVÉ KOMBINACE TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK, ABY BYLO DODRŽENO CO NEJVÍCE ZVOLENÝCH TVAROVÝCH PODMÍNEK
- OBR. 20: USPOŘÁDÁNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY. ŽLUTĚ OZNAČENA VLOŽKA TVÁRNÍKU A TVÁRNICE. ORANŽOVOU BARVOU NAZNAČENA DĚLÍCÍ ROVINA FORMY
- OBR. 21: USPOŘÁDÁNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY. SVĚTLE ZELENÁ OZNAČENA TEMPERACE TVÁRNICE, TMAVĚ ZELENÁ TEMPERACE TVÁRNÍKU. NA OBRÁZKU JE PATRNÉ I ZAFORMOVÁNÍ VÝLISKU A DŮVOD POUŽITÍ PŘEPÁŽEK K CHLAZENÍ. ČERVENĚ JSOU OZNAČENY MECHANICKÉ VYHAZOVAČE, SYTĚ ŽLUTĚ ZAVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM
- OBR. 22: MODEL VÝLISKU. NA POVRCHU VIDITELNÁ VÝPOČTOVÁ SÍŤ
- OBR. 23: NAZNAČEN PRINCIP TVORBY VÝPOČTOVÉ SÍTĚ (POHLED DO „IDEÁLNÍ“ STĚNY VÝLISKU V ŘEZU)
- OBR. 24: ÚPRAVA GEOMETRIE IMPORTOVANÉHO TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU. TEMPERAČNÍ SYSTÉM V UPRAVENÉM STAVU. POMOCÍ OKNA NA OBRÁZKU PROVEDENA ÚPRAVA TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU, UPRAVEN PRŮMĚR A TYP KANÁLŮ, PROVEDENA ZMĚNA ORIENTACE NĚKTERÝCH KANÁLŮ S PŘEPÁŽKOU TAK, ABY ČERVENÝ KONEC (ZAČÁTEK KANÁLU) VŽDY NAVAZOVAL NA ZBYTEK OKRUHU. V OPAČNÉM PŘÍPADĚ BY CADMOULD® 3D-F V DANÉM OKRUHU HLÁSIL CHYBU A NEBYLO BY MOŽNO DEFINOVAT SMĚR PRŮTOKU CHLADÍČÍHO MÉDIA OKRUHEM
- OBR. 25: DIALOGOVÉ OKNO PRO DEFINOVÁNÍ CHLADÍČÍHO MÉDIA, SMĚRU PRŮTOKU MÉDIA A JEHO PARAMETRŮ PŘI PRŮTOKU KANÁLY. NA OBRÁZKU BYLO TÉŽ PATRNÉ, ŽE PO ÚPRAVĚ ORIENTACE CADMOULD® 3D-F BEZ PROBLÉMU ROZPOZNAL JEDNOTLIVÉ OKRUHY A UMOŽNIL ZVOLIT SMĚR PRŮTOKU CHLADÍČÍHO MÉDIA (OZNAČENO MALOU MODROU A ČERVENOU ŠIPKOU). JAKO CHLADÍČÍ MÉDIUM ZVOLENA VODA
- OBR. 26: NASIMULOVÁNÍ DUTINY VSTŘIKOVACÍ FORMY
- OBR. 27: ZADÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK, VOLBA MATERIÁLU
- OBR. 28: ZADÁNÍ TVAROVÉ PODMÍNKY ZAVÍRÁNÍ BOČNÍCH STĚN SE ZADÁNÍM TOLERANCE TVAROVÉ PODMÍNKY. BODY 1, 2 A 3 URČUJÍ ROVINU. BODY 4 A 5 URČUJÍ VZDÁLENOST. ZATRŽENÝ SMĚR Y V DIALOGOVÉM OKNĚ URČUJE SMĚR MĚŘENÍ (KOLMÁ VZDÁLENOST MEZI STĚNAMI). DOLE DIALOGOVÉ OKNO S PŘEHLEDOVOU TABULKOU ZADANÝCH VARIACÍ
- OBR. 29: VARIOVANÉ TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY
- OBR. 30: VARIOVANÉ PARAMETRY ČTVRTÉHO OKRUHU TEMPERAČNÍHO SYSTÉMU
- OBR. 31: ZJIŠTĚNÍ HODNOTY PRŮMĚRNÉHO SMRŠTĚNÍ VÝLISKU ZE SIMULACE V CADMOULD® 3D-F
- OBR. 32: DIALOGOVÉ OKNO VÝPOČTOVÉHO PLÁNU V MODULU VARIMOS
- OBR. 33: DIALOGOVÉ OKNO SHRNUTÍ A NASTAVENÍ SPOUŠTĚNÍ VÝPOČTŮ JEDNOTLIVÝCH VARIANT (BATCH MODUL)
- OBR. 34: VÝŘEZ LEVÉ ČÁSTI TECHNOLOGICKÉHO OKNA. V LEVÉ ČÁSTI POD SEBOU JEDNOTLIVÉ VARIOVANÉ TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY SE STUPNICÍ VE VARIOVANÉM INTERVALU. NA STUPNICI POHYBLIVÝ JEZDEC UMOŽŇUJÍCÍ PRÁCI S TECHNOLOGICKÝM OKNEM
- OBR. 35: VÝŘEZ PRAVÉ ČÁSTI TECHNOLOGICKÉHO OKNA S POPISEM VÝZNAMU JEDNOTLIVÝCH SYMBOLŮ A BAREV
- OBR. 36: TECHNOLOGICKÉ OKNO VARIMOS
- OBR. 37: PRINCIP ZADÁNÍ NOVÝCH TVAROVÝCH PODMÍNEK ZAVÍRÁNÍ BOČNÍCH STĚN 5 A ZAVÍRÁNÍ BOČNÍCH STĚN 6

OBR. 38: VSTŘIKOLIS ARBURG, VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VÝLISKŮ

OBR. 39: VYLISOVANÉ ZKUŠEBNÍ VÝLISKY

OBR. 40: OŠETŘENÉ VÝLISKY PŘIPRAVENÉ K DIGITALIZACI SKENEREM ATOS. POVRCH VÝLISKŮ ZMATNĚN KŘÍDOVÝM PRACHEM A OPRATŘEN REFERENČNÍMI ZNAČKAMI

OBR. 41: SNÍMEK Z DIGITALIZACE VÝLISKŮ SKENEREM ATOS. NAHOŘE SKENER PROVÁDĚJÍCÍ SNÍMÁNÍ, DOLE SNÍMEK ZE SOFTWARE ATOS (ZELENÉ KOULE JSOU ROZPOZNANÉ REFERENČNÍ ZNAČKY)

OBR. 42: BODY V ORANŽOVÝCH KRUŽÍCH URČUJÍ ROVINU, BOD V MODRÉM KRUHU BOD V MÍSTĚ KONTROLY NA PRŮHYB BOČNÍ STĚNY

OBR. 43: NAHOŘE NAZNAČEN PRINCIP ODMĚŘOVÁNÍ ROVINNOSTI BOČNÍCH STĚN. MĚŘENA KOLMÁ VZDÁLENOST MEZI ROVINOU A BODEM. VE ŽLUTÝCH OVÁLECH ODMĚŘEN PRŮHYB DNA VÝLISKU, MEZI ČERCHOVANÝMI ROVINAMI ODMĚŘEN ÚHEL DNO/BOČNÍ STĚNA. DOLE NAZNAČEN ZPŮSOB MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI MEZI BOČNÍMI STĚNAMI NA DIGITALIZOVANÉM VÝLISKU

OBR. 44: BAREVNĚ OZNAČENY JEDNOTLIVÉ SLEDOVANÉ ROZMĚRY (TVAROVÉ PODMÍNKY)

Seznam tabulek

TAB. 1: TABULKA ZÁKLADNÍCH TERMOPLASTŮ

TAB. 2: ROZDÍLNÝ STAV MAKROMOLEKUL ZA MĚNÍCÍCH SE TEPLOTNÍCH PODMÍNEK U AMORFNÍCH A SEMIKRYSTALICKÝCH POLYMERŮ [2]

TAB. 3: VZTAH SLOUŽÍCÍ PRO URČENÍ TEORETICKY NUTNÉHO POČTU EXPERIMENTŮ „ÚPLNÉHO DOE“ [13]

TAB. 4: PŘÍKLAD ÚPLNÉHO VÝPOČTOVÉHO SCÉNÁŘE VARIMOS [13]

TAB. 5: POROVNÁNÍ VARIACÍ MEZI PRVNÍM A DRUHÝM OPTIMALIZAČNÍM VÝPOČTEM VE VARIMOS

TAB. 6: VARIANTA I TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

TAB. 7: VARIANTA II TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

TAB. 8: VARIANTA III TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

TAB. 9: VARIANTA IV TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

TAB. 10: KOMPLETNÍ VYHODNOCENÍ VARIANTY Č. I

TAB. 11: KOMPLETNÍ VYHODNOCENÍ VARIANTY Č. II

TAB. 12: KOMPLETNÍ VYHODNOCENÍ VARIANTY Č. III

TAB. 13: KOMPLETNÍ VYHODNOCENÍ VARIANTY Č. IV

TAB. 14: DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. I (PRŮHYB DNA 1)

TAB. 16: DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. II (ZAVÍRÁNÍ BOČNÍCH STĚN 5 A 6)

TAB. 18: DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. III (PRŮHYB BOČNÍ STĚNY 1 A 2)

Seznam grafů

- GRAF 1: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. I PRO PRIORITY TVAROVOU
PODMÍNKU PRŮHYB DNA 1
- GRAF 2: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. I PRO OSTATNÍ NEPRIORITY
TVAROVÉ PODMÍNKY
- GRAF 3: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. II PRO PRIORITY TVAROVÉ
PODMÍNKY ZAVÍRÁNÍ STĚN 5 A ZAVÍRÁNÍ STĚN 6
- GRAF 4: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. II PRO OSTATNÍ NEPRIORITY
TVAROVÉ PODMÍNKY
- GRAF 5: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. III PRO PRIORITY TVAROVÉ
PODMÍNKY PRŮHYB BOČNÍ STĚNY 1 A PRŮHYB BOČNÍ STĚNY 2
- GRAF 6: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. III PRO OSTATNÍ NEPRIORITY
TVAROVÉ PODMÍNKY
- GRAF 7: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DISKUZE VÝSLEDKŮ VARIANTY Č. IV PRO VŠECHNY TVAROVÉ
PODMÍNKY

Seznam příloh

Příloha č. 1: Materiálový list Hostacom M4 U02 [18]

Příloha č. 2: Původní výpočtový plán Varimos – Výpočet A

Příloha č. 3: Nový výpočtový plán Varimos – Výpočet B, Výpočet C

Příloha č. 4a: Výňatek z katalogového listu vstřikolisu Arburg [19]

Příloha č. 4b: Výňatek z katalogového listu vstřikolisu Arburg [19]

Příloha č. 4c: Výňatek z katalogového listu vstřikolisu Arburg [19]

Příloha č. 5a: Výstupní protokol Varimos varianta I

Příloha č. 5b: Výstupní protokol Varimos varianta II

Příloha č. 5c: Výstupní protokol Varimos varianta III

Příloha č. 5d: Výstupní protokol Varimos varianta IV

Příloha č. 6a: Příklad vyhodnocení – průhyb dna

Příloha č. 6b: Příklad vyhodnocení – změna vzdálenosti mezi bočními stěnami

Příloha č. 6c: Příklad vyhodnocení – průhyb bočních stěn

Příloha č. 6d: Příklad vyhodnocení – úhel mezi dnem a boční stěnou

Příloha č. 1: Materiálový list Hostacom M4 U02 [18]



Product Data and Technical Information

Name	Hostacom
Grade	M4 U02
Resin type	Compounded Polyolefin
Description	"Hostacom" M4 U02 is a 40% mineral filled PP homopolymer with high flow, high stiffness and low warpage. It is not intended for medical, pharmaceutical or drinking water applications.
Availability	Europe, North America, South & Central America
Technical data	
Density	1.21 g/cm ³
Melt flow rate (MFR)	16 g/10 min (230°C/2.16Kg)
Melt volume flow rate	15 cm ³ /10min (230°C/2.16Kg)
Tensile Modulus	4000 MPa (Secant)
Tensile Stress at Yield	31 MPa (50 mm/min)
Tensile Strain at Yield	3.5 % (50 mm/min)
Flexural modulus	4300 MPa (Secant)
Flexural Stress	52 MPa (3.5 %)
Charpy unnotched impact strength	12 kJ/m ² (-20 °C)
Charpy unnotched impact strength	14 kJ/m ² (0 °C)
Charpy unnotched impact strength	25 kJ/m ² (23 °C)
Charpy notched impact strength	1.5 kJ/m ² (-20 °C)
Charpy notched impact strength	2.5 kJ/m ² (23 °C)
Heat deflection temperature B (0.45 MPa) Unannealed	125 °C
Heat deflection temperature A (1.80 MPa) Unannealed	75 °C
Ball indentation hardness	92 MPa (H 358/30)
Product Data Sheets	ISO Data Sheet
MSDS (Material Safety Data Sheet)	European Hostacom M4 U02 102943 Hostacom M4 U02 North American Hostacom M4 U02 102943 Hostacom M4 U02 NA BLACK

Příloha č. 2: Výpočtový plán Varimos – Výpočet A

Číslo výpočtového scénáře	Nastavení výpočtového scénáře
1	000000000000000000000000000000
2	-----+++++++-----++++
3	+-----+++++++-----
4	-+-----++-----+++++-----+
5	++-----++-----+++++-----+
6	--+-+--+--+--+--+--+--+--+--+
7	+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
8	-+-+--+--+--+--+--+--+--+
9	+++--+--+--+--+--+--+--+--+
10	---+-+--+--+--+--+--+--+--+
11	+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
12	-+-+--+--+--+--+--+--+--+
13	++--+--+--+--+--+--+--+--+
14	--+-+--+--+--+--+--+--+--+
15	+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
16	-+++-----+++--+--+--+--+
17	+++++--+--+--+--+--+--+--+
18	----+++++--+--+--+--+--+
19	+--+--+--+--+--+--+--+--+
20	-+-+--+--+--+--+--+--+--+
21	++--+--+--+--+--+--+--+--+
22	--+-+--+--+--+--+--+--+--+
23	+--+--+--+--+--+--+--+--+
24	-+-+--+--+--+--+--+--+--+
25	+++--+--+--+--+--+--+--+
26	---+++++--+--+--+--+--+
27	+--+--+--+--+--+--+--+--+
28	-+-+--+--+--+--+--+--+--+
29	++--+--+--+--+--+--+--+
30	--+++++-----+++++-----
31	+--+--+--+--+--+--+--+--+
32	-+++++-----+++++-----
33	+++++-----+++++-----

Příloha č. 3: Výpočtový plán Varimos – Výpočet B, Výpočet C

Číslo výpočtového scénáře	Nastavení výpočtového scénáře
1	0 0 0 0 0
2	- - - - -
3	- - - + +
4	- + + - -
5	- + + + +
6	+ + - + -
7	+ + - - +
8	+ - + + -
9	+ - + - +
10	+ + + + +

Příloha č. 4a: Výňatek z katalogového listu vstřikolisu Arburg [19]

Technical data

470 S

Clamping unit		470 S		
with clamping force	max. kN	800	1000	1100
Opening force stroke	max. kN mm	255 500		
Mould height, fixed variable	min. mm	250 —		
Platen daylight fixed variable	max. mm	750 —		
Distance between tie bars (w x h)	mm	470 x 470		
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	637 x 637		
Weight of movable mould half	max. kg	760		
Ejector force stroke	max. kN mm	40 175		
Dry cycle time EUROMAP 2	1 pump min. s - mm	2,3 2,1 - 329		
	2 pumps min. s - mm	1,8 - 329		
	Accum. min. s - mm	1,5 - 329		

Injection unit		170			290			400		
with screw diameter	mm	25	30	35	30	35	40	35	40	45
Effective screw length	L/D	24	20	17	23,3	20	17,5	23	20	18
Screw stroke	max. mm	120			150			160		
Calculated stroke volume	max. cm³	59	85	115	106	144	188	154	201	254
Shot weight	max. g PS	54	77	105	97	132	172	141	184	232
Material throughput	max. kg/h PS	10	13,5	16	17	20,5	24,5	25	29	35
	max. kg/h PA6.6	5	7	8	8,5	10,5	12,5	12,5	15	17,5
Injection pressure	max. bar	2500	2000	1470	2500	2000	1530	2500	2000	1580
Holding pressure	max. bar	2500	2000	1470	2500	2000	1530	2500	2000	1580
Injection flow 2	1 pump max. cm³/s	94 120	136 172	186 236	102 130	140 178	182 232	128	168	212
	2 pumps max. cm³/s	94 120	136 172	186 236	102 130	140 178	182 232	128	168	212
	Accum. max. cm³/s	216	312	424	316	430	562	482	642	814
Screw circumferential speed 2	1 pump max. m/min	49 50	59 60	69 70	46 51	54 60	62 69	47	53	60
	2 pumps max. m/min	49 50	59 60	69 70	46 51	54 60	62 69	47	53	60
	Accum. max. m/min	14	17	19	20	24	27	16	19	21
Screw torque	max. Nm	210	250	290	320	380	430	480	550	610
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm	50 210			60 240			60 300		
Heating capacity zones	kW	9,4 5			6,4 5			9,4 5		
Feed hopper	l	50			50			50		

Drive and connection		1 pump			2 pumps			Accum.		
with injection unit		170	290	400	170	290	400	170	290	400
Net weight of machine	kg	4500	4550	4750	4500	4550	4750	—		
Emiss. sound press. level DIN EN 201:1997	dB(A)	66 ±3			66 ±3			66 ±3		
Oil filling	l	175			175			175		
Drive power 2	max. kW	18,5			18,5	18,5	22	15		
Electrical connection 3	kW	30	27	30	30	27	34	26	24	26
	Total A	80			80	80	100	80	63	80
	Machine A	—			—			—		
	Heating A	—			—			—		
Cooling water connection	max. °C	25			25			30		
	min. Δp bar	1,5 DN 25			1,5 DN 25			1,5 DN 25		

Machine type	
with EUROMAP size designation 1	Drive
470 S 800-170 290	1 2 Accum.
470 S 1000-170 290 400	1 2 Accum.
470 S 1100-170 290 400	- 2 Accum.

Upon request: other machine types and mould installation heights, screws, drive powers etc.
All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

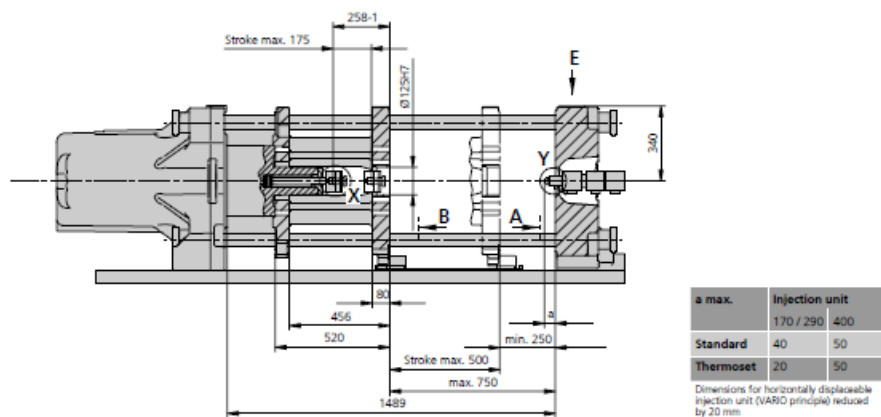
1) Clamping force (tN) - large injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (dbar).

2) Specifications depend on drive configuration – the first value applies to lower clamping forces.

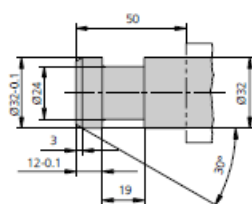
3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.

[1] Specifications apply to alternative equipment.

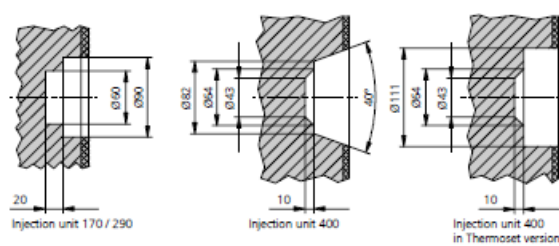
Příloha č. 4b: Výňatek z katalogového listu vstřikolisu Arburg [19]



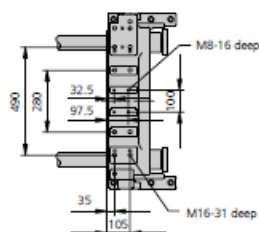
Ejector bolt | X



Bore in mould (if required) | Y

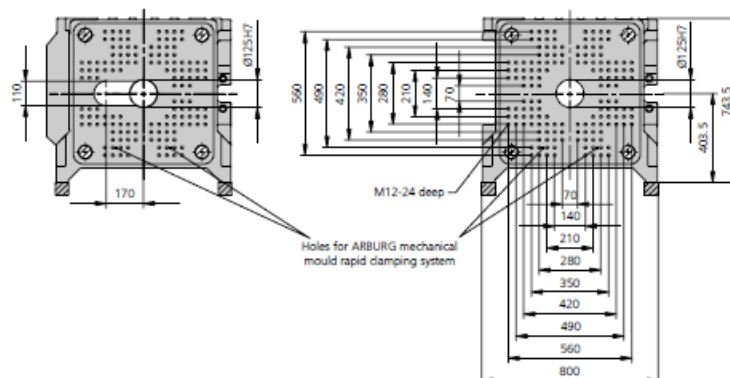


Robotic system mounting | E

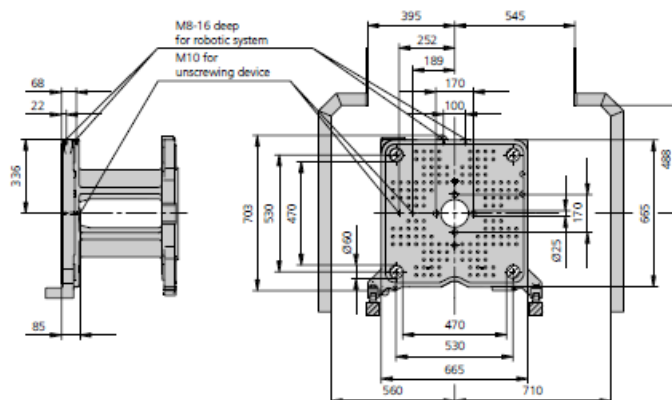


Příloha č. 4c: Výňatek z katalogového listu vstřikolisu Arburg [19]

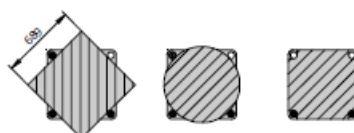
Fixed mould mounting platen | A



Moving mould mounting platen | B



Useful clamping surface when pulling the tie rods



Příloha č. 5a: Výstupní protokol Varimos varianta I

Optimum machine setting

1791_0 (1791_0)

☐ 1791: 1,50 s

3947_0 (3947_0)

☐ 3947: 260,00 °C

3943_0 (3943_0)

☐ 3943: 260,00 °C

1030_0 (1030_0)

☐ 1030: 8,20 s

3620_0 (3620_0)

☐ 3620: 20,00 s

Expected feature values for optimum machine setting

Filling Problems [%]	0,007 +/- 0,1571
Min. FF Temp. [°C]	243,136 +/- 1,5441
Max. FF Temp. [°C]	260,978 +/- 0,0638
Max. Pressure [bar]	369,522 +/- 5,9697
Sink Marks [%]	3,886 +/- 0,2822
Clamping Force X [kN]	481,200 +/- 10,6593
Clamping Force Y [kN]	341,715 +/- 2,5894
Clamping Force Z [kN]	810,550 +/- 3,7960
Min. Volume Shrinkage [%]	3,690 +/- 0,1337
Max. Volume Shrinkage [%]	14,483 +/- 0,5087
Avg. Volume Shrinkage [%]	5,521 +/- 0,0888
Residual pressure at demolding [bar]	0 +/- 0
Req. Cooling Time [s]	12,540 +/- 1,6816
Pruhyb_dna_1 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,237 +/- 0,0106
Pruhyb_bocni_steny_1 - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,49 +/- 0,012
Pruhyb_bocni_steny_2 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,399 +/- 0,0648
Uhel_dno/bocni_stena_1 [°]	-89,670 +/- 0,4562
Uhel_dno/bocni_stena_2 [°]	-89,908 +/- 0,1904
Zavirani_sten_1 [mm]	116,225 +/- 0,0975
Zavirani_sten_2 [mm]	116,009 +/- 0,2082
Zavirani_sten_3 [mm]	116,693 +/- 0,1068
Zavirani_sten_4 [mm]	116,496 +/- 0,0844
Zmena_delky [mm]	185,025 +/- 0,0305
Zavitani_stin_5 [mm]	107,512 +/- 0,0817
Zavirani_sten_6 [mm]	107,439 +/- 0,0667

Příloha č. 5b: Výstupní protokol Varimos varianta II

Optimum machine setting

1791_0 (1791_0)

☐ 1791: 3,50 s

3947_0 (3947_0)

☐ 3947: 240,00 °C

3943_0 (3943_0)

☐ 3943: 258,00 °C

1030_0 (1030_0)

☐ 1030: 8,00 s

3620_0 (3620_0)

☐ 3620: 30,00 s

Expected feature values for optimum machine setting

Filling Problems [%]	2,104 +/- 0,1611
Min. FF Temp. [°C]	194,841 +/- 1,5441
Max. FF Temp. [°C]	260,166 +/- 0,0642
Max. Pressure [bar]	391,715 +/- 5,8862
Sink Marks [%]	1,375 +/- 0,2805
Clamping Force X [kN]	416,947 +/- 8,9621
Clamping Force Y [kN]	300,577 +/- 2,5701
Clamping Force Z [kN]	739,114 +/- 3,7434
Min. Volume Shrinkage [%]	3,485 +/- 0,0406
Max. Volume Shrinkage [%]	12,301 +/- 0,5161
Avg. Volume Shrinkage [%]	5,049 +/- 0,0658
Residual pressure at demolding [bar]	0 +/- 0
Req. Cooling Time [s]	11,280 +/- 0,4733
Pruhyb_dna_1 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,382 +/- 0,0098
Pruhyb_bocni_steny_1 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,37 +/- 0,011
Pruhyb_bocni_steny_2 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,389 +/- 0,0142
Uhel_dno/bocni_stena_1 [°]	-89,371 +/- 0,4223
Uhel_dno/bocni_stena_2 [°]	-90,024 +/- 0,1571
Zavirani_sten_1 [mm]	117,077 +/- 0,1016
Zavirani_sten_2 [mm]	116,651 +/- 0,1975
Zavirani_sten_3 [mm]	117,038 +/- 0,0935
Zavirani_sten_4 [mm]	117,356 +/- 0,0819
Zmena_delky [mm]	185,314 +/- 0,0301
Zavitani_stin_5 [mm]	108,384 +/- 0,0794
Zavirani_sten_6 [mm]	108,194 +/- 0,0648

Příloha č. 5c: Výstupní protokol Varimos varianta III

Optimum machine setting

1791_0 (1791_0)

☐ 1791: 3,50 s

3947_0 (3947_0)

☐ 3947: 248,00 °C

3943_0 (3943_0)

☐ 3943: 260,00 °C

1030_0 (1030_0)

☐ 1030: 9,00 s

3620_0 (3620_0)

☐ 3620: 30,00 s

Expected feature values for optimum machine setting

Filling Problems [%]	1,618 +/- 0,1486
Min. FF Temp. [°C]	200,271 +/- 1,3991
Max. FF Temp. [°C]	279,332 +/- 0,1585
Max. Pressure [bar]	362,351 +/- 7,1880
Sink Marks [%]	1,511 +/- 0,2727
Clamping Force X [kN]	433,350 +/- 8,5302
Clamping Force Y [kN]	311,491 +/- 2,5056
Clamping Force Z [kN]	759,315 +/- 3,6999
Min. Volume Shrinkage [%]	3,434 +/- 0,0410
Max. Volume Shrinkage [%]	12,029 +/- 0,4380
Avg. Volume Shrinkage [%]	4,998 +/- 0,0722
Residual pressure at demolding [bar]	0 +/- 0
Req. Cooling Time [s]	12,657 +/- 0,4742
Pruhyb_dna_1 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,385 +/- 0,0088
Pruhyb_bocni_steny_1 - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,36 +/- 0,013
Pruhyb_bocni_steny_2 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,388 +/- 0,0157
Uhel_dno/bocni_stena_1 [°]	-89,411 +/- 0,4230
Uhel_dno/bocni_stena_2 [°]	-90,106 +/- 0,1968
Zavirani_sten_1 [mm]	117,052 +/- 0,0927
Zavirani_sten_2 [mm]	116,674 +/- 0,2004
Zavirani_sten_3 [mm]	117,063 +/- 0,0945
Zavirani_sten_4 [mm]	117,331 +/- 0,0769
Zmena_delky [mm]	185,304 +/- 0,0270
Zavitani_stin_5 [mm]	108,356 +/- 0,0745
Zavirani_sten_6 [mm]	108,166 +/- 0,0609

Příloha č. 5d: Výstupní protokol Varimos varianta IV

Optimum machine setting

1791_0 (1791_0)

☐ 1791: 3,20 s

3947_0 (3947_0)

☐ 3947: 260,00 °C

3943_0 (3943_0)

☐ 3943: 240,00 °C

1030_0 (1030_0)

☐ 1030: 9,00 s

3620_0 (3620_0)

☐ 3620: 30,00 s

Expected feature values for optimum machine setting

Filling Problems [%]	0,342 +/- 0,1509
Min. FF Temp. [°C]	213,128 +/- 1,4150
Max. FF Temp. [°C]	246,971 +/- 0,0862
Max. Pressure [bar]	343,844 +/- 5,5470
Sink Marks [%]	2,099 +/- 0,2748
Clamping Force X [kN]	470,155 +/- 9,5698
Clamping Force Y [kN]	333,196 +/- 2,5400
Clamping Force Z [kN]	796,750 +/- 3,7104
Min. Volume Shrinkage [%]	3,292 +/- 0,0399
Max. Volume Shrinkage [%]	13,406 +/- 0,4585
Avg. Volume Shrinkage [%]	5,211 +/- 0,0881
Residual pressure at demolding [bar]	0 +/- 0
Req. Cooling Time [s]	12,914 +/- 0,4787
Pruhyb_dna_1 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,373 +/- 0,0091
Pruhyb_bocni_steny_1 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,39 +/- 0,009
Pruhyb_bocni_steny_2 - Z - Z - Z - Z - Z [mm]	-0,395 +/- 0,0177
Uhel_dno/bocni_stena_1 [°]	-89,493 +/- 0,4757
Uhel_dno/bocni_stena_2 [°]	-89,900 +/- 0,1664
Zavirani_sten_1 [mm]	116,962 +/- 0,0909
Zavirani_sten_2 [mm]	116,624 +/- 0,1987
Zavirani_sten_3 [mm]	117,091 +/- 0,1042
Zavirani_sten_4 [mm]	117,244 +/- 0,0753
Zmena_delky [mm]	185,279 +/- 0,0264
Zavitani_stin_5 [mm]	108,261 +/- 0,0730
Zavirani_sten_6 [mm]	108,081 +/- 0,0596

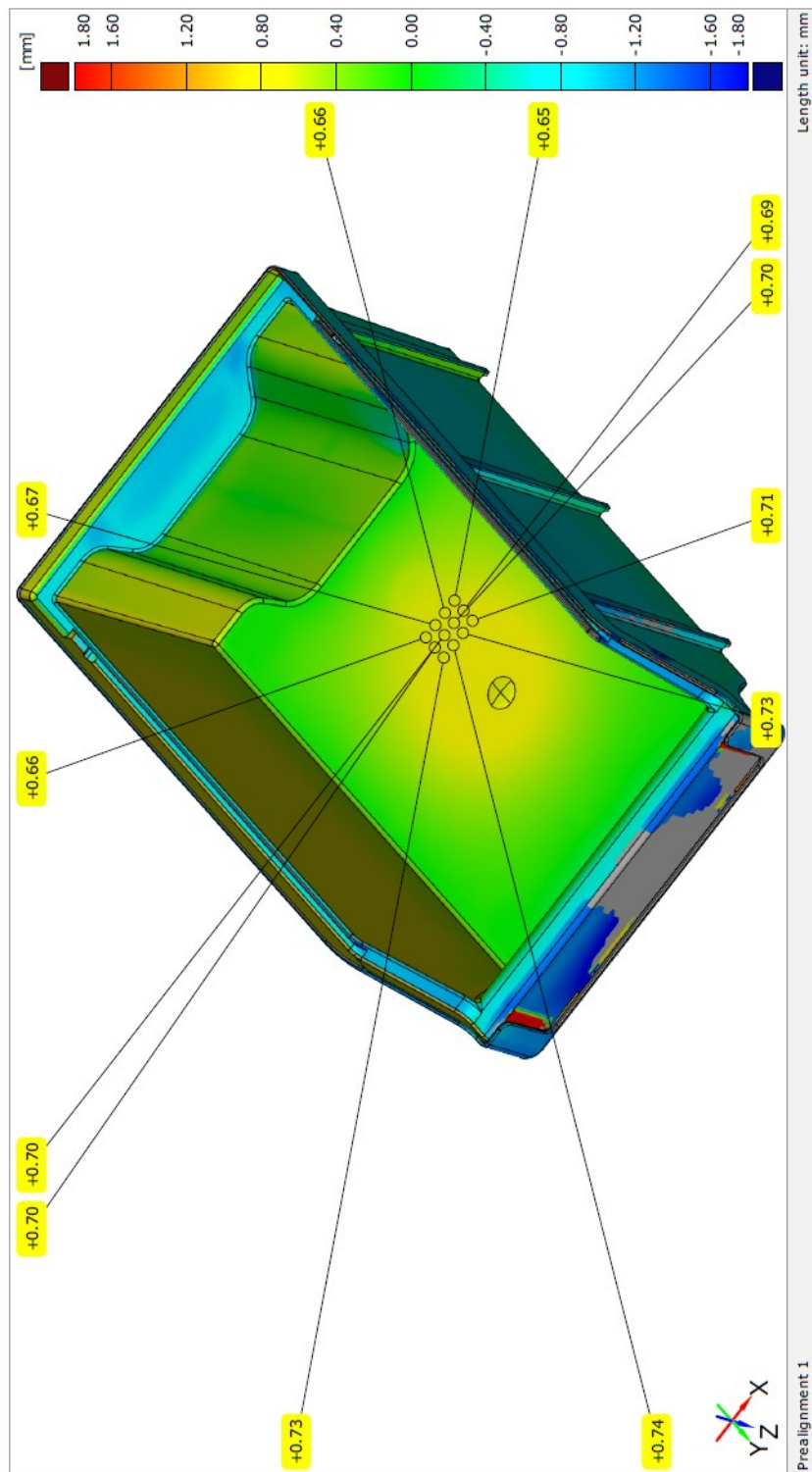
Příloha č. 6a: Příklad vyhodnocení – průhyb dna

Měření průhybu dna výlisku. Měřeno v oblasti definice podmínky jako odchylky mezi 3D CAD daty a digitalizovanými daty. Dál pracováno s průměrnou hodnotou.

gom

Generated with GOM Inspect V8

Zjištění průhybu dna výlisku - měřeno jako odchylky mezi originálními CAD daty a digitalizovanými daty v dané oblasti.



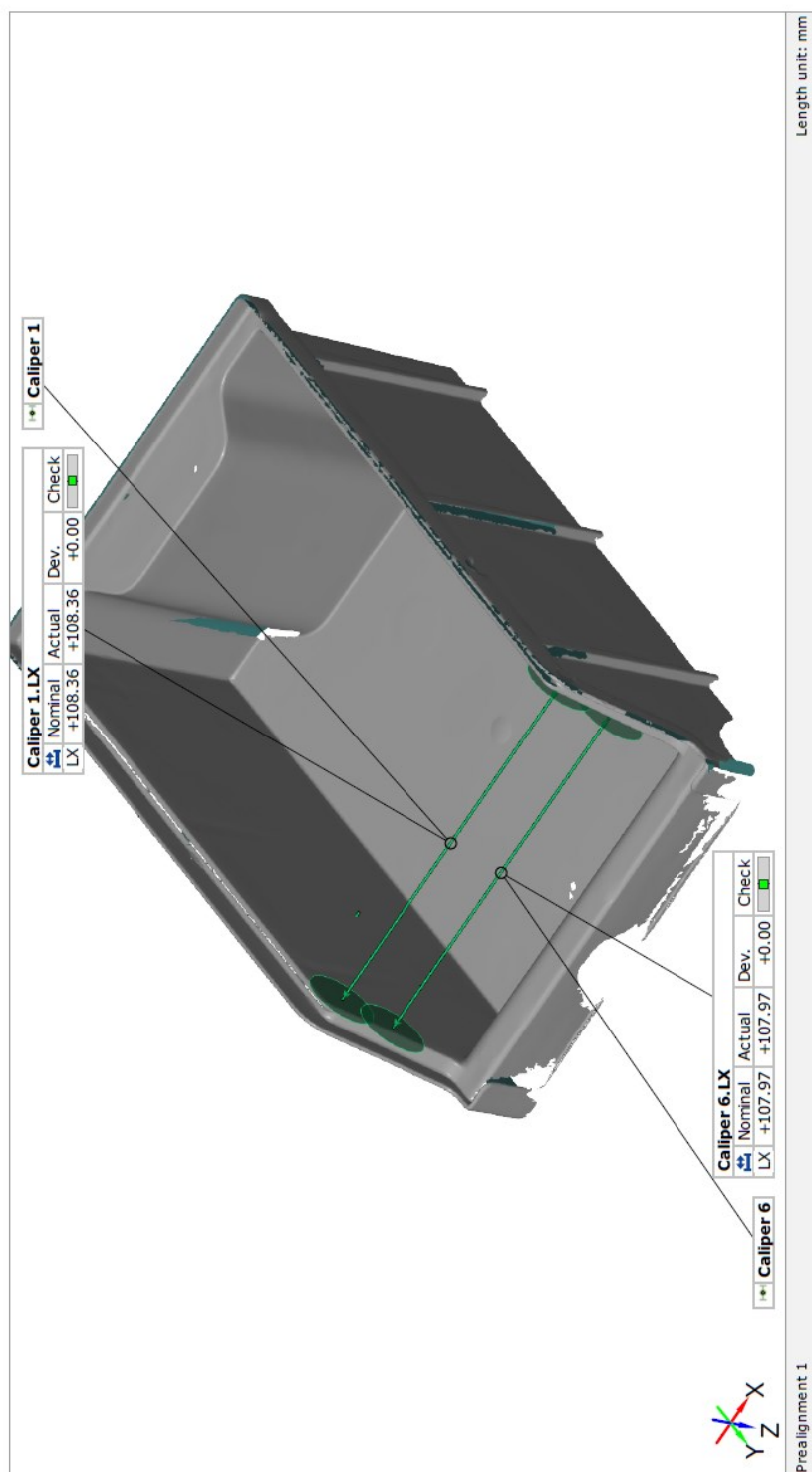
Příloha č. 6b: Příklad vyhodnocení – změna vzdálenosti mezi bočními stěnami

Měření změny vzdálenosti mezi bočními stěnami. Měřena kolmá vzdálenost mezi stěnami digitalizovaného výlisku ve dvou oblastech. Měřeno několikrát. Průměrná naměřená hodnota porovnána se vzdáleností odečtenou z originálních CAD dat.

gom

Generated with GOMInspect V8

Untitled



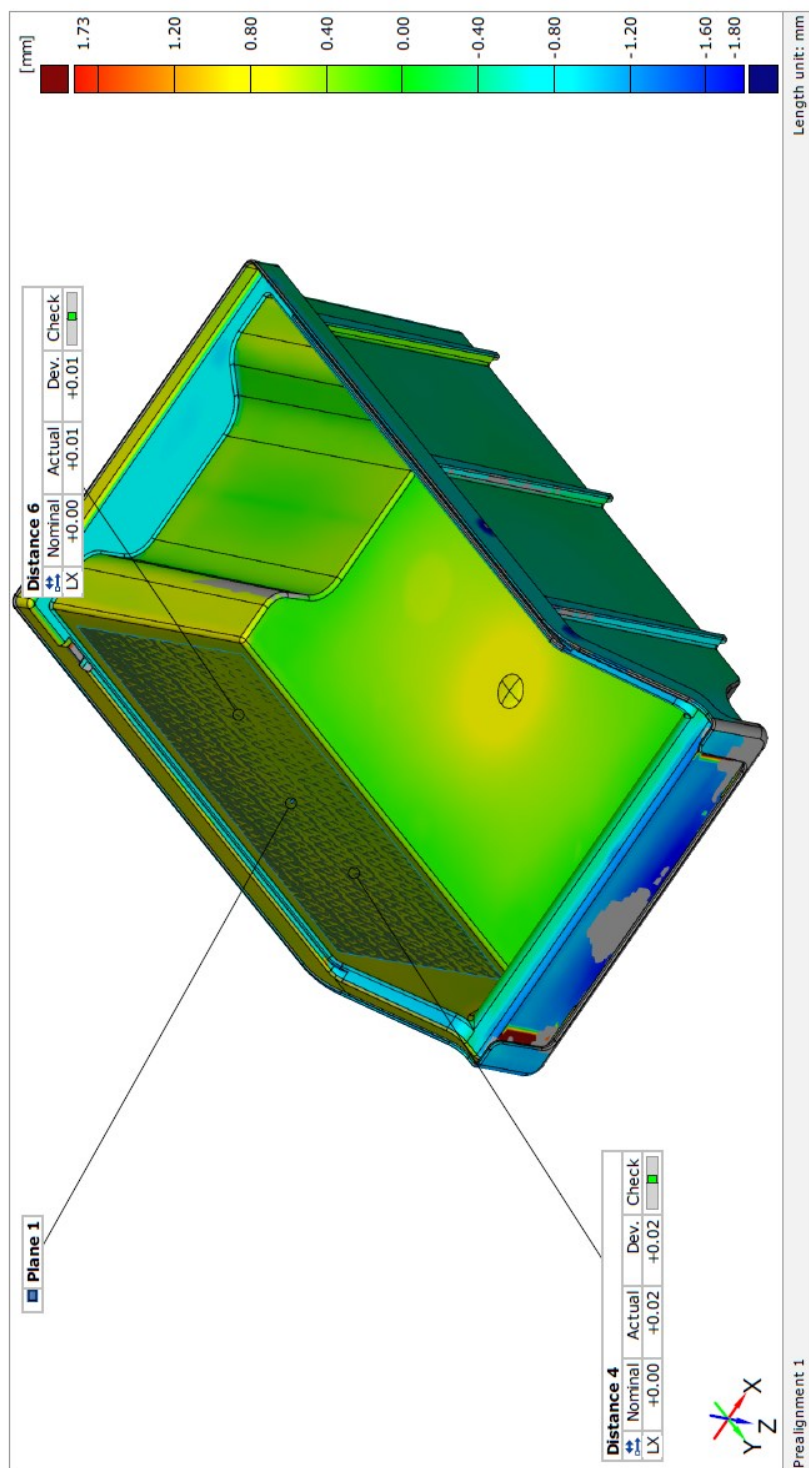
Příloha č. 6c: Příklad vyhodnocení – průhyb bočních stěn

Měření průhybů na boční stěně. Proložena rovina boční stěnou výlisku. Definován bod v místě měření jako bod protínající stěnu výlisku. Měřena kolmá vzdálenost mezi bodem a rovinou. Rozměr měřen několikrát, dál pracováno s průměrnou hodnotou.

gom

Generated with GOM Inspect V8

Měření průhybu boční stěny - proložena rovina, měřena kolmá vzdálenost bodu ležícího na stěně výlisku a roviny



Příloha č. 6d: Příklad vyhodnocení – úhel mezi dnem a boční stěnou

Měření změny úhlu mezi dnem a boční stěnou. Oběma stěnami proloženy roviny. Měřen úhel mezi oběma rovinami.



Měření úhlu mezi dnem a boční stěnou - dnem a boční stěnou proložena rovina, měření úhlu mezi rovinami

