

Optimalizace deformace plastového pouzdra světloometu po vstřikování

Miroslav Michálek

Bakalářská práce
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Miroslav Michálek
Osobní číslo:	T16031
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Optimalizace deformace plastového pouzdra světlometu po vstřikování

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma
2. Provést simulaci procesu vstřikování v programu Moldflow
3. Validace deformací ze simulace, použitelnost pro optimalizaci
4. Volba vtoku s ohledem na deformaci (volba nejlepší pozice)
5. Návrh kompenzace smrštění ve formě (doporučené z materiálového listu vs. optimální pro výsledné deformace)

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů: I.díl Vstřikování termoplastů*. 2. vydání Brno: Uniplast, 1999. 134s.

BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů: II.díl Vstřikování termoplastů*. 1. vydání Brno: Uniplast, 1999. 214s.

ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vydání Praha: BEN technická literatura, 2009, 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta: Miroslav Michálek

.....
Podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je optimalizace deformace plastového pouzdra světlometu pro osobní automobil s využitím simulace vstřikování v softwaru Autodesk Moldflow. Teoretická část práce se věnuje polymerním materiálům, technologii vstřikování a vlastnostem smrštění. Důraz je kladen na vliv fází vstřikovacího cyklu na kvalitu výrobku a vztahu smrštění k výsledné deformaci. V praktické části je provedena validace výpočetní metody, která je dále použita pro optimalizaci deformace pouzdra. Optimalizace se zabývá volbou optimálního umístění vtoků a hodnotou kompenzace smrštění s cílem minimalizovat deformaci výrobku.

Klíčová slova: technologie vstřikování, simulace vstřikování, Moldflow

ABSTRACT

The aim of the bachelor's thesis is to optimize the deformation of a plastic housing for a headlamp of passenger car using injection molding simulation in Autodesk Moldflow software. The theoretical part of the work deals with polymeric materials, injection technology and shrinkage properties. The focus is on influence of injection cycle phases on the product quality and relation of shrinkage on resulting deformation. In the practical part is performed validation of simulation method, which is further used for optimization of housing deformation. Optimization deals with the choice of the optimal injection locations and value of shrinkage compensation in order to minimize the deformation of the product.

Keywords: injection technology, injection molding simulation, Moldflow

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat své manželce za podporu a trpělivost.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	11
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ	11
1.1.1 Termoplasty.....	12
1.1.2 Reaktoplasty.....	13
1.1.3 Vulkanizované elastomery	13
1.1.4 Termoplastické elastomery	14
1.2 ADITIVA	14
1.2.1 Částicová plniva	15
1.2.2 Vyztužující plniva	15
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	16
2.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	17
2.1.1 Vstřikovací jednotka	17
2.1.2 Uzavírací jednotka	18
2.1.3 Řídící jednotka	19
2.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	19
2.2.1 Plastikační fáze.....	20
2.2.2 Vstřikovací fáze	21
2.2.3 Dotlaková fáze	22
2.2.4 Fáze chlazení.....	22
2.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	23
2.3.1 Studený vtokový systém	24
2.3.2 Vyhřívaný vtokový systém	28
2.3.3 Temperační systém.....	29
2.3.4 Odvzdušnění.....	30
3 SMRŠTĚNÍ	31
3.1 ROZKLAD PODLE ROVNOMĚRNOSTI	31
3.1.1 Rovnoměrné smrštění.....	32
3.1.2 Nerovnoměrné smrštění	32
3.2 VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ	32
3.2.1 Vstřikovací tlak a rychlost	33
3.2.2 Tlak a čas dotlaku.....	33
3.2.3 Teplota taveniny a formy	34
3.3 VLIV POLOHY VTOKU	34
3.3.1 Vtok na boku desky.....	35
3.3.2 Vtok ve středu desky	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	37
5 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK	38
5.1 MATERIÁL VÝROBKU	39
6 SIMULACE	40

6.1	POUŽITÝ SOFTWARE	40
6.2	DISKRETIZACE.....	40
6.3	SIMULACE PRO VALIDACI	41
6.4	SIMULACE PRO OPTIMALIZACI	42
7	VALIDACE.....	43
7.1	VYHODNOCENÍ SKENU.....	43
7.2	VYHODNOCENÍ SIMULACE	44
7.3	VYHODNOCENÍ VALIDACE	45
8	VOLBA POZICE VTOKU	46
8.1	VARIANTA 1	47
8.2	VARIANTA 2	47
8.3	VARIANTA 3	48
8.4	VARIANTA 4	48
8.5	ZHODNOCENÍ.....	49
9	OPTIMALIZACE KOMPENZACE SMRŠTĚNÍ.....	50
9.1	STŘEDNÍ HODNOTA SMRŠTĚNÍ	50
9.2	AUTOMATICKÁ KOMPENZACE SMRŠTĚNÍ.....	51
9.3	OPTIMÁLNÍ KOMPENZACE SMRŠTĚNÍ	52
	DISKUZE VÝSLEDKŮ	54
	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK.....	65
	SEZNAM PŘÍLOH.....	66

ÚVOD

Plastové materiály jsou součástí každodenního života celé lidské populace. Po II. světové válce prošly masivním rozmachem a dnes se staly nejpoužívanějšími materiály. V současnosti se plasty využívají ve všech průmyslových oblastech, kde díky svým vlastnostem v mnoha případech úspěšně nahradily tradiční materiály.

Nejrozšířenější technologií zpracování plastů je vstřikování, kterým lze v krátkých cyklech produkovat tvarově složité a rozměrově přesné výrobky bez nutnosti dodatečných úprav. Takto je dosažena potřebná ekonomická převaha, díky které se aplikace technologie vstřikování neustále rozšiřují.

S rozšiřováním technologie vstřikování také rostou požadavky na kvalitu výrobků. Vedle estetického rázu jde o rozměrovou stabilitu a přesnost a řadu dalších podmínek. V některých případech jsou požadavky na rozměrovou přesnost tak vysoké, že jejich dosažení technologií vstřikování není samozřejmé.

Rozměrová přesnost vystřikovaného výrobku je z podstatné části výsledkem smrštění plastu v průběhu procesu výroby. Pro splnění rozměrových požadavků je ideální rovnoměrné smrštění po celém výrobku. Na rozložení smrštění má ale vliv mnoho konstrukčních i technologických faktorů, které vždy povedou k určité nerovnoměrnosti. V případě přísnějších rozměrových požadavků je nutné tyto faktory vyhodnotit a optimalizovat již v průběhu vývoje výrobku.

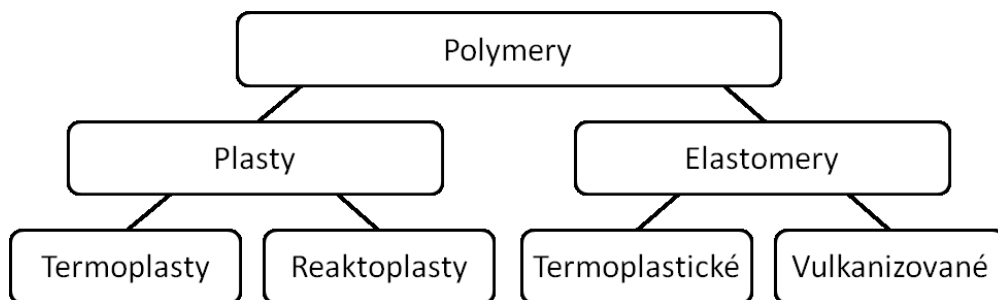
Jednoduchým a účinným krokem takové optimalizace ve fázi vývoje výrobku je nalezení nejvhodnější polohy vtoku s ohledem na výslednou deformaci. Odhady těchto deformací se u tvarově složitých výrobků provádí výhradně numerickými simulacemi. Takové simulace mohou obsahovat velké množství zjednodušení a nepřesností. Přesto, pokud jsou založeny na důvěryhodných vstupních datech, mohou významně pomoci s posouzením více různých poloh vtoků a v rámci konstrukčních omezení určit nejvhodnější variantu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymerní materiály, resp. polymery, jsou chemické látky s velmi širokým spektrem vlastností a aplikací. Jejich podstatou jsou velké makromolekuly, které se skládají z řetězců opakujících se základních článků merů. Tyto mery obsahují nejčastěji atomy C, H, O a také často N, Cl a další. Polymery jsou především organické látky, které se od tradičních organických látek, jako je dřevo nebo ropa, odlišují vyšší molární hmotností s hodnotou nejméně 10^4 g/mol. Tvar polymerních výrobků v tuhé fázi je nejčastěji získán pomocí převedení polymeru do plastického nebo tekutého stavu za působení vyšších teplot a tlaků. [1], [2]

Množství vyráběných druhů polymerů je na trhu v řádu tisíců a dostupné spektrum materiálových vlastností stále roste. Avšak při volbě vhodného polymeru nehrají významnou roli jen materiálové vlastnosti, ale také cena a zpracovatelnost. Proto 70% světové výroby je založeno pouze na polyolefinech, styrenových hmotách a polyvinylchloridech. [3]



Obr. 1. Základní rozdělení polymerů

1.1 Základní rozdělení

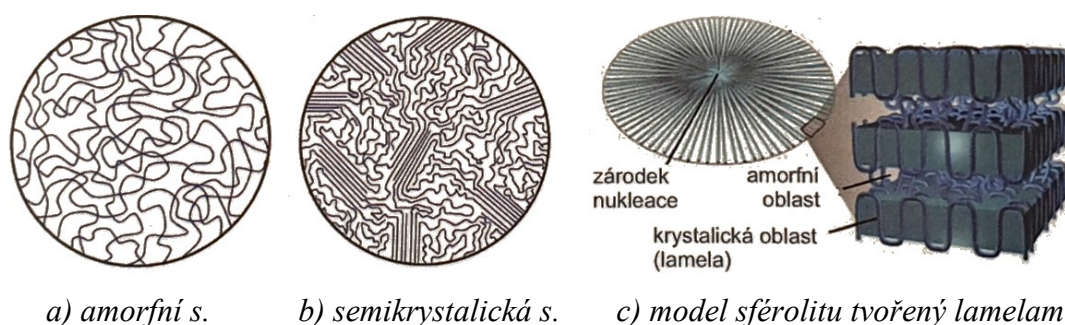
Polymerní materiály jsou primárně děleny do dvou proudů na plasty a elastomery, dále pak nejčastěji podle chování za zvýšených teplot na termoplasty, reaktoplasty a elastomery termoplastické a vulkanizované. [1]

Plasty i elastomery lze za určitých podmínek tvarovat, ale po tvarovém zafixování se chovají odlišně. Plasty se za běžných podmínek chovají jako tuhá tělesa, často i křehká, zatímco elastomery se chovají jako pružná tělesa, schopné výrazné, převážně vratné, deformace i při nízkém zatížení. [2], [4]

1.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou za běžné teploty okolí tuhé materiály, které za působení tepla přecházejí do plastického stavu, kde je lze tvářet. Za tvářecích teplot se v termoplastech odehrávají pouze fyzikální děje, při kterých je zachována jejich chemická struktura. Převádění do plastického stavu s opakovaným tvářením je tedy možné, ale roste riziko degradace makromolekul. Degradace především snižuje molární hmotnost a s ní svázané mechanické vlastnosti výrobku. [1]

Vnější materiálové vlastnosti termoplastů jsou významně ovlivněny jejich nadmolekulární strukturou. Podle stupně uspořádání makromolekul je nutné tyto plasty rozlišovat na amorfni a semikrystalické. [1]



a) amorfni s. b) semikrystalická s. c) model sférolitu tvořený lamelami

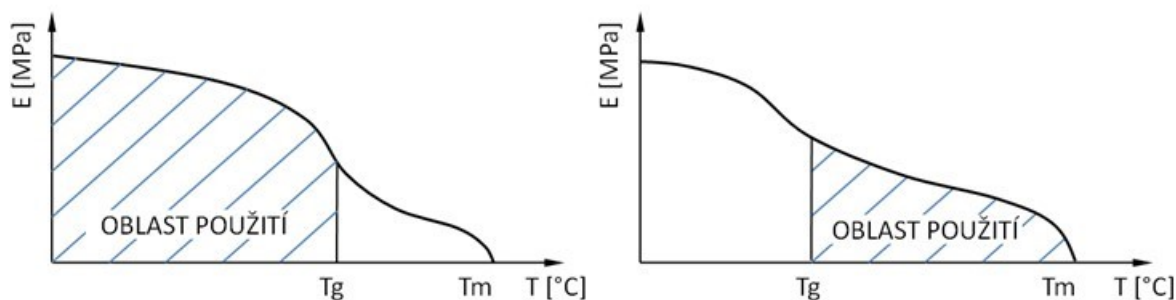
Obr. 2. Nadmolekulární struktura termoplastů [1]

Amorfni plasty – jsou složeny z neuspořádaných makromolekul ve formě chaotických a obvykle vzájemně propletených klubek. Vykazují vysokou tvrdost, pevnost, křehkost a nízký index lomu, díky kterému mohou být průhledné, případně až čiré. Své vlastnosti a využití ztrácejí již v teplotní oblasti skelného přechodu T_g , která se u uvedených materiálů pohybuje v rozmezí 85 – 150°C. Např. PS, ABS, SAN, PMMA, PC. [3], [6]

Semikrystalické plasty – vyznačují se určitým stupněm krystalinity, tj. podílem zkrystalizovaných oblastí v materiálu, obvykle v rozmezí 40 – 90%, ale nikdy nedosahují 100%. Základními útvary semikrystalické struktury jsou krystalické lamely, z kterých mohou makromolekuly vystupovat, procházet amorfni fází a vstupovat do dalších lamel, což významně ovlivňuje soudržnost materiálu. Při pomalejším tuhnutí se lamely seskupují do tvarově složitějších sférolitů, rostoucích z centrálních zárodků všemi směry. Za vhodných podmínek může vzniknout i sférolitická struktura, kde dalším růstem sférolitů dochází k jejich průniku. [1]

Se stupněm krystalinity semikrystalických termoplastů roste jejich tuhost a pevnost. Krystalická struktura také zvyšuje index lomu, díky kterému je povrch obvykle mléčně zakalený.

Materiály jsou pod přechodovou oblastí T_g příliš křehké, proto jejich využití je obvykle nad touto oblastí, kde získávají potřebnou houževnatost. Využití výrazněji ztrácí až v teplotách přechodové oblasti tání T_m , která se u uvedených materiálů pohybuje v rozmezí 110 – 230°C. Např. PE, PP, POM, PA, PBT. [3], [6]



Obr. 3. Oblasti využití amorfních (vlevo) a semikrystalických (vpravo) plastů [6]

1.1.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty, resp. termosety, jsou polymery, které také s rostoucí teplotou měknou, ale lze je tvářet jen po omezenou dobu. Zahříváním se v nich urychluje chemická reakce vytvrzování, při které dochází k prostorovému zesíťování makromolekul až do fáze, kdy lze celý výrobek považovat za jednu velkou makromolekulu. Vytvrzování může nastartovat vedle účinku teploty také účinek síťovacích činidel, případně oba tyto účinky. [1]

Síťování makromolekul je nevratný chemický proces vedoucí k větší pevnosti a křehkosti výrobku. Výrobek po vytvrzení již není možné opět převést do plastického stavu, je tedy netavitelný, nesvařitelný a nerozpustný. Reaktoplasty v nevytvrzeném stavu jsou často označovány za pryskyřice, mezi které patří např. EP (epoxidová p.), UP (polyesterová p.), PF (fenol-formaldehydová p.) a další. [1], [5]

1.1.3 Vulkanizované elastomery

Vulkanizované elastomery neboli pryže vznikají vulkanizací gumárenské směsi obsahující především kaučuk a řadu pomocných látek. Vulkanizace mění strukturu kaučuku řídkým zesíťováním makromolekul do podoby pryže, nejčastěji pomocí síry. Pryž tak získává příčné chemické vazby mezi makromolekulami, které tvoří uzly prostorové sítě. Díky chemickým vazbám již není možné pryže opět převést do kapalného stavu, ale díky uzlové struktuře je schopna velkých, převážně vratných, deformací bez porušení. Používané kaučuky pro výrobu pryže jsou např. NR (přírodní k.), IR (izoprenový k.), SBR (butadien-styrenový k.) a další. [5]

1.1.4 Termoplastické elastomery

Termoplastické elastomery (TPE) jsou termoplastické systémy, které mají podobně jako pryže uzlovou strukturu. Uzly jsou ale jen fyzikální povahy a vznikají díky dvoufázové nemísitelné struktuře tvrdých polymerních uzlů rozptýlených v měkké elastomerní fázi. Měkká a spojitá elastomerní fáze dodává materiálu vysokou elasticitu. Tvrdé polymerní segmenty v podobě uzlů zase systém obohacují vyšší teplotou tání či skelného přechodu a umožňují materiálu jeho opakované použití a zpracování na běžných strojích určených pro termoplasty. [1], [5]

Vzhledem k absenci pevných chemických vazeb v uzlech a jejich nahrazení slabšími fyzikálními vazbami, TPE nedosahují mechanických vlastností pryží a skutečné vlastnosti se vždy pohybují někde mezi pryžemi a termoplasty. [5]

1.2 Aditiva

Aditiva se do polymerů přidávají téměř vždy za účelem odstranění řady nedostatků samotného polymeru, kterými jsou obvykle hořlavost, nízká odolnost vysokým teplotám, nízká chemická odolnost, horší optické vlastnosti a v neposlední řadě slabší mechanické vlastnosti. [5]

Mezi aditiva patří:

- Tepelné stabilizátory – zvyšují tepelnou odolnost a zpomalují degradační procesy
- Retardéry – zpomalují proces hoření
- UV stabilizátory – zvyšují odolnost vůči slunečnímu záření
- Barviva – zajišťují požadovaný odstín a kryvost
- Optická zjasňovadla – zjasňují produkt fluorescencí
- Maziva – zlepšují především zpracovatelnost, mají pozitivní vlivy na výrobek
- Změkčovadla – zvyšují ohebnost, rázovou houževnatost a tekutost taveniny
- Nadouvadla – umožňují výrobu lehčených hmot
- Tvrdivla a iniciátory – zajišťují a urychlují vytvrzování pryskyřic
- Plniva – mají širší využití, ovlivňují fyzikální i mechanické vlastnosti materiálu [5]

Plniva mají mezi aditivy významné postavení, spolu s polymerem mohou tvořit kompozity se synergickými účinky. Vzhledem k jejich schopnostem významně ovlivňovat mechanické vlastnosti jsou obvykle děleny na částicová a vyztužující. [4]

1.2.1 Částicová plniva

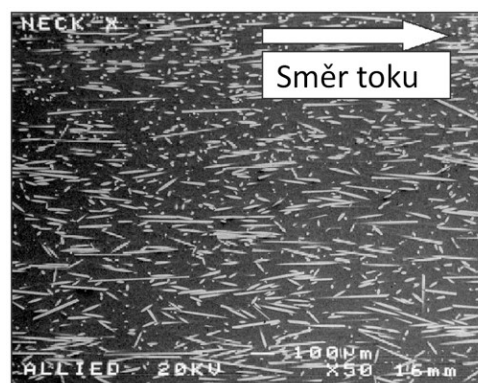
Částicová plniva mají nižší vyztužující účinek. Patří sem řada minerálních plniv o různé velikosti a tvaru částic, které sice obvykle zvyšují viskozitu taveniny, ale také zvyšují tvrdost, tuhost a tepelnou odolnost výrobku, nebo snižují jeho smrštění. [4]

Částicová plniva mohou být i nevyztužující, pouze s cílem zlevnit materiál (např. břidlice), nebo s jiným specifickým účelem jako zvyšování elektrické vodivosti (např. hliníkový prach), kluzné vlastnosti (např. grafit) a další. [3]

1.2.2 Vyztužující plniva

Vyztužující plniva mají výrazně vyšší vyztužující účinek než plniva částicová. Tvoří je skleněná, uhlíková, aramidová, kovová, přírodní a další vlákna. Vyztužující efekt vláken závisí vedle jejich složení, také na poměru jejich délky k průměru. Většina vláken má průměr 14 μ m, protože menší vlákna pronikají do plic a jsou karcinogenní. Při zpracování vstřikováním jsou již obsažena v polymerních granulích, kde se používají obvykle dva druhy délek, tzv. krátká vlákna s délkou 0,2 až 0,4mm a dlouhá vlákna o délce 10 až 15mm. [5], [7]

Výsledný kompozit tvořený polymerní matricí s vlákny obvykle dosahuje vyšší pevnosti, tuhosti, tvarové stálosti a nižšího smrštění. Na druhé straně, smrštění je díky orientaci vláken podstatně více anizotropní a výrobek méně houževnatý. Např. Ultramid 8233G (obchodní název materiálů PA6-GF33 s krátkými vlákny, kde GF33 značí 33% obsahu skelných vláken). [4], [8]



Obr. 4. Krátká skelná vlákna PA6-GF33 a jejich orientace ve směru toku [10]

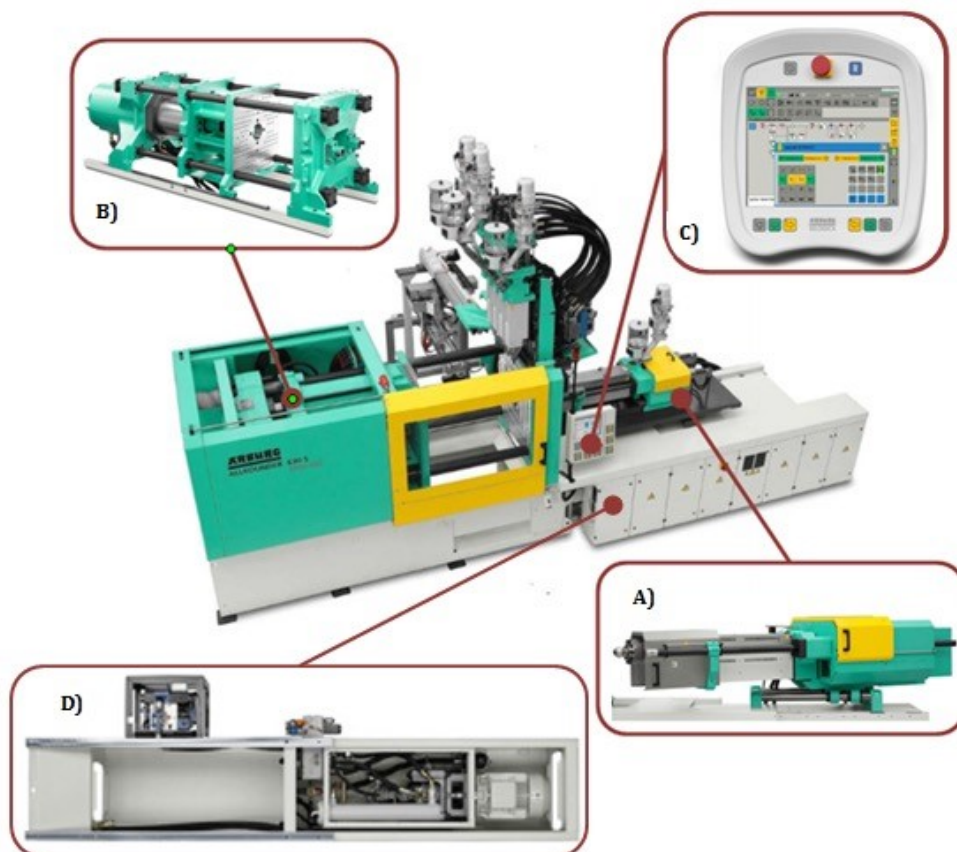
Zvláštním druhem vyztužujícího plniva jsou dlouhovláknité výztuže ve formě rovingů, rohoží, tkanin atd. Jsou určeny pro aplikace s mimořádnými nároky na mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost, především v leteckém, automobilovém a sportovním průmyslu. Nejčastěji se využívá skleněných a uhlíkových vláken, např. kompozit uhlíkových vláken v matrici epoxidové pryskyřice. Využití těchto kompozitů roste, především díky stále klesajícím výrobním nákladům. [5]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování je nejrozšířenější technologií zpracování termoplastů, reaktoplastů, polymerních směsí, kompozitů i termoplastických a vulkanizovaných elastomerů. Technologie vstřikování je cyklické tváření se složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí zpracovávaný materiál, vstřikovací stroj a forma. [9]

Principem je vstříknutí dávky taveniny zpracovávaného materiálu pomocí šneku nebo pístu z plastikační komory vstřikovacího stroje do uzavřené dutiny formy. Tavenina ve formě vlivem chlazení ztuhne v požadovaném tvaru výstřiku, kterým může být buď polotovar pro další zpracování, součást k následné montáži, nebo konečný výrobek. [9]

Výhody vstřikování polymerů jsou především rychlé vstřikovací cykly a možnost vyrábět tvarově složité součásti s dobrými rozměrovými tolerancemi a kvalitou povrchu. Významné nevýhody jsou vysoké investiční náklady a časová náročnost výroby forem, proto je technologie vstřikování vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu. [1]



A) vstřikovací jednotka, B) uzavírací jednotka, C) ovládání řídicí jednotky, D) rám stroje

Obr. 5. Vstřikovací stroj [12]

2.1 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroje se liší svým provedením s různým stupněm řízení, náročností obsluhy, rychlostí výroby, stálostí a reprodukovatelností technologických parametrů a především investičními náklady. Konkrétní možnosti a funkce vstřikovacího stroje jsou dány použitou vstřikovací, uzavírací a řídicí jednotkou. Pohon stroje je nejčastěji hydraulický, používají se ale i elektrické, hybridní a další. [4], [6]

Vstřikovací stroj pro svou funkci vyžaduje ještě další vybavení, mezi které patří jeřáb pro manipulaci s formou, temperační zařízení, ejektor pro dopravu materiálu, vyhřívaná násypka, hydraulické vyhazování, řízení pro ovládání tahačů jader a další. [6]

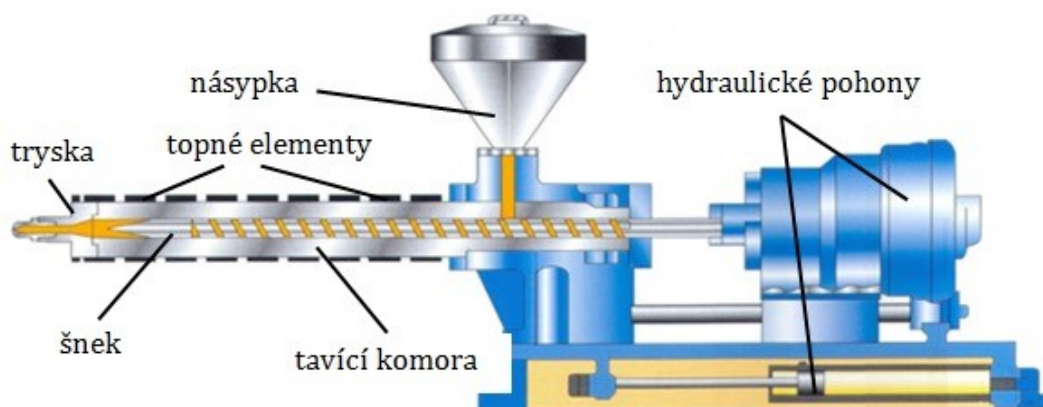
Vzhledem k vysokým investičním nákladům jsou stroje včetně vstřikovacích, uzavíracích i řídicích jednotek často modulární konstrukce, tak aby jejich kombinací bylo možné splnit požadované funkce i ekonomiku výroby. [6]

Mezi základní požadavky na vstřikovací stroj pro dosažení přesných výstřiků patří:

- Tuhost a pevnost při vstřiku
- Přesné řízení tlaku, rychlosti, teploty a dalších parametrů
- Reprodukovatelnost technologických parametrů [6]

2.1.1 Vstřikovací jednotka

Úkolem vstřikovací jednotky je převedení tuhého polymeru do viskózní taveniny a její přesun do dutiny formy s požadavkem na maximální tvarovou a rozměrovou přesnost výstřiku. K přesunu taveniny se nejčastěji používá konstrukce se šnekem v tavící komoře, který využívá axiálního i rotačního pohybu kolem své osy. Konstrukce vstřikovací jednotky včetně tavící komory je závislá na volbě zpracovávaného polymeru. [12]



Obr. 6. Schéma vstřikovací jednotky [12]

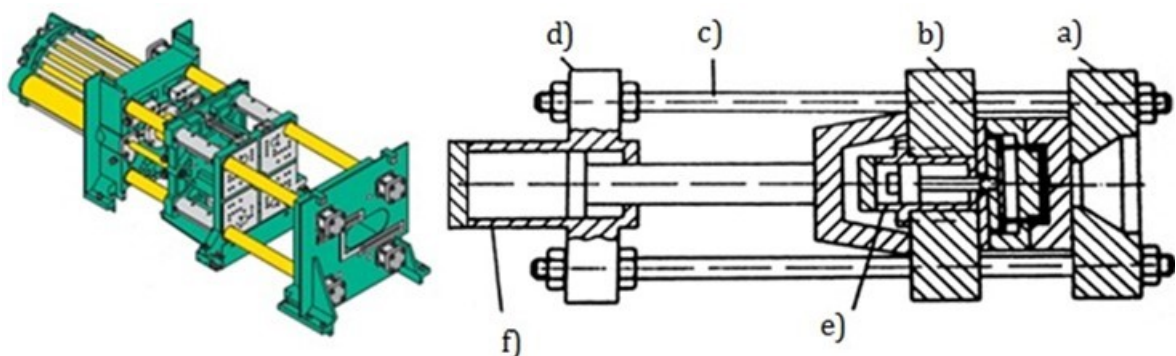
Výkon vstřikovací jednotky určuje její vstřikovací a plastikační kapacita. Vstřikovací kapacita je základní charakteristikou, která udává maximální objem taveniny v cm^3 , který je vstřikovací jednotka schopna vstříknout z tavicí komory do volného prostoru na jeden zdvih šneku. Druhou, spíše orientační charakteristikou, je plastikační kapacita, která udává maximální množství materiálu v kg/hod , kterého je jednotka schopna převést do plastického stavu před čelo šneku k následnému vstřikování. Plastikační kapacita se uvádí v katalogu pro polystyren, při použití jiného materiálu se hodnota může více lišit. [12]

2.1.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka zajišťuje otevírání a zavírání vstřikovací formy. Zavření formy musí být zajištěno dostatečně vysokou uzamykací silou, tak aby nedošlo k otevření při působení vysokého tlaku vstřikovaného polymeru. [3]

Součástí uzavírací jednotky je k rámu pevně uložená opěrná deska, vedení pohyblivé desky spolu s pohyblivou deskou pro upevnění pohyblivé části formy a upínací deska s otvorem pro trysku stroje, na které je upnuta pevná část formy. Významnou součástí jsou také uzavírací mechanismy, které mohou být různé konstrukce, např. hydraulické, mechanické, elektrické nebo jejich kombinace. [3]

Vedle hlavního pohybu pohyblivé desky musí uzavírací jednotka zajistit také vyhození výstřiku z formy prostřednictvím vyhazovacího systému. Z řady používaných konstrukčních řešení je v současnosti nejrozšířenější vyhazování pomocí hydraulického systému, který je pevně uložen na pohyblivé upínací desce. Jeho hlavní výhodou je možnost nezávislého řízení bez ohledu na ostatních pohybech uzavírací jednotky. [12]



Obr. 7. Schéma hydraulické uzavírací jednotky, (a) upínací deska, (b) pohyblivá deska, (c) vodící tyče, (d) opěrná deska, (e) hydraulický vyhazovač, (f) hydraulický válec pro ovládní pohyblivé desky [12]

2.1.3 Řídicí jednotka

Základem řídicí jednotky jsou regulátory standardně řízené mikroprocesory. Hlavním úkolem je porovnávání požadovaných technologických parametrů se sledovanými parametry na stroji a jejich případné odchylky pak regulovat. Díky řízení mikroprocesory je možné tyto regulace provádět automaticky v průběhu vstřikování. [12]

Požadované technologické parametry jsou do jednotky zadávány manuálně přes obslužné rozhraní nebo elektronicky z externích datových zdrojů. Obslužné rozhraní obvykle využívá dotykového displeje, na kterém lze programovat jednotlivé operace vstřikování do výsledného blokového schématu. [12]

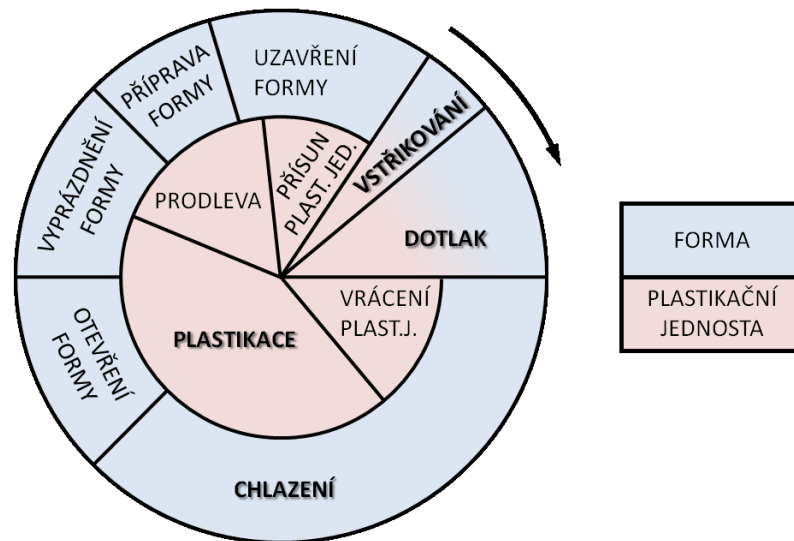


Obr. 8. Obslužné rozhraní Gestic vstřikovacího stroje fy. Arburg [13]

Úkolem obslužného rozhraní je ulehčení práce a času obsluhy při seřizování a optimalizaci vstřikování. Současným trendem v optimalizaci vstřikování jsou asistenční služby řídicích jednotek pro integraci simulace plnění do řídicího systému vstřikovacího stroje. Užitečné pak jsou 3D zobrazení simulace plnění v reálném čase podle aktuální polohy šneka, nebo jen zobrazení porovnání výsledků simulace s posledním cyklem stroje na obslužném rozhraní stroje. [13], [14]

2.2 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je posloupnost činností vedoucích k výrobě výstřiků. Na začátku cyklu, kdy je forma prázdná, dojde k jejímu uzavření a pokud se plastikační jednotka přisouvá k formě, tak i k jejímu přísunu. Následuje vlastní vstřikování a fáze dotlaku, po kterém dojde k odpojení plastikací jednotky od formy, příp. jen k uzavření trysky a zahájí se fáze plastikace. Ve formě po ukončení dotlaku pokračuje chlazení výstřiku a závěrečný proces otevření, vyprázdnění a přípravy formy. [1]



Obr. 9. Schéma vstřikovacího cyklu [6]

Z pohledu kvality výstřiku jsou významné fáze plastikace, vstřikování, dotlak a chlazení. Jejich hlavním kvalitativním cílem je zajištění maximální homogenity materiálových vlastností v celém objemu výstřiku. [4]

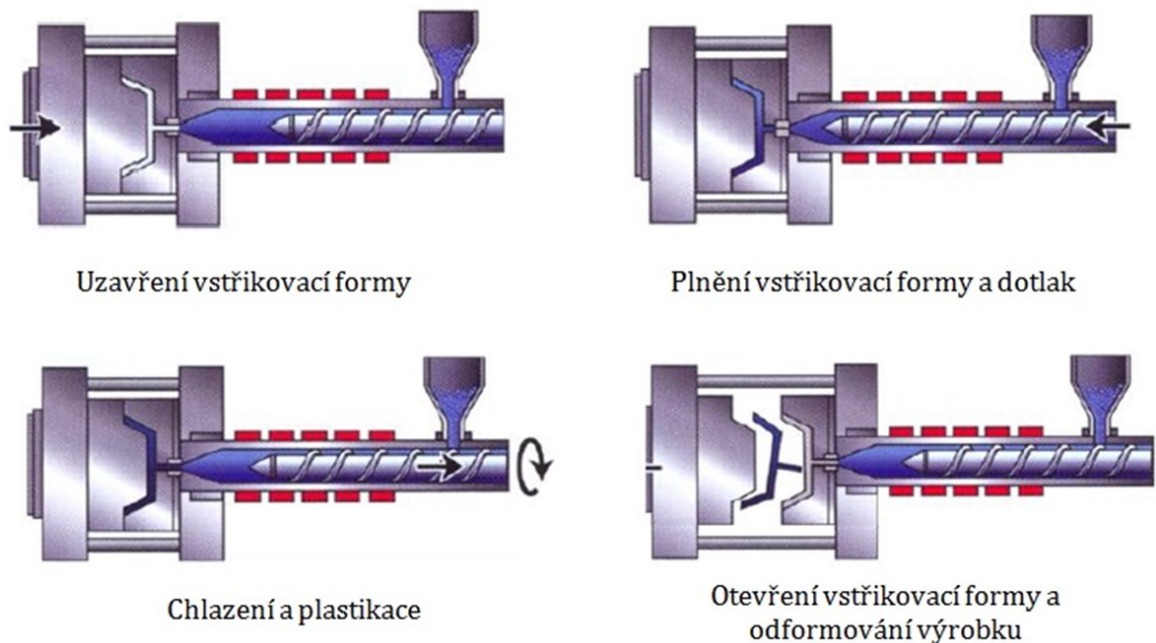
2.2.1 Plastikační fáze

Plastikační fáze začíná nabíráním nejčastěji granulovaného materiálu z násypky pomocí rotačního pohybu šneku pod násypkou. Rotací šneku dále dochází k plastikaci, prohnětení a vtlačování materiálu do prostoru před čelem šneku. Při plastikaci je materiál ohříván teplem z tření o povrch šneku a stěnu plastikačního válce, přeměnou hnětací práce šneku, ale také převodem tepla z vyhřívaného válce s několika topnými pásmy. Šnek se při plastikaci současně osově posouvá dozadu a vytváří tak zpětný tlak, který ovlivňuje dobu plastikace a tedy i míru teplotní a viskózní homogenity taveniny. [3]

Míra této homogenity tvoří základní předpoklad pro optimální naplnění dutiny formy. Lze jí docílit vyváženým nastavením teplot v jednotlivých topných pásmech plastikačního válce, otáčkami šneku a jeho zpětného tlaku. Nedodržení teplotní a viskózní homogenity ve vstřikované dávce obvykle vede k horší kvalitě povrchu výstřiku v podobě viditelných tokových čar, studených spojů, nerovnoměrného rozložení plniva a další. [4]

Na izotropii výstřiku má vedle homogenity taveniny významný vliv i její samotná teplota, která má rozhodující vliv na finální orientaci makromolekul. Vyšší teplota taveniny snižuje stupeň jejich orientace, navíc se snižuje vnitřní pnutí a zvyšuje pevnost studených spojů. Na

druhé straně s vyšší teplotou taveniny mohou klesat některé mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tahu a houževnatost. [4]



Obr. 10. Fáze vstřikovacího cyklu [12]

2.2.2 Vstřikovací fáze

Vstřikování taveniny polymeru do vstřikovací formy je vyvoláno axiálním pohybem šneku v tavicí komoře. V této fázi se šnek neotáčí, zastává pouze funkci pístu. Po vyplnění celé dutiny formy je tavenina dále stlačována, dokud tlak nedosáhne maximální hodnoty, poté nastává fáze dotlaku. [3]

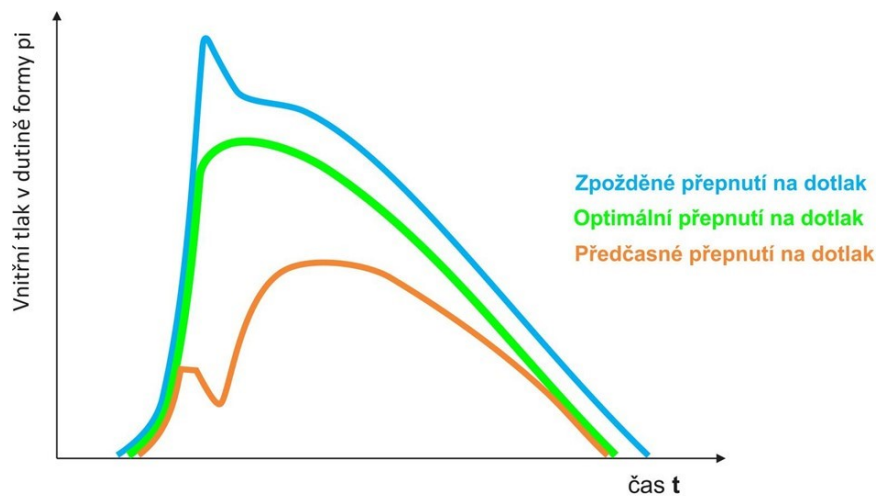
Rychlostí vstřikování se reguluje doba plnění, která se pohybuje od zlomku sekundy do několika jednotek sekund u výstřiků s velkou hmotností. Delší doba plnění může vést k nedostříknutému zmetku vlivem předčasného zchlazení taveniny. Tavenina je chlazená ihned při kontaktu s formou a začíná ztrácet tekutost, proto je doporučeno používat dobu plnění co nejkratší. V případě plněných polymerů platí toto doporučení jen pro vláknité plniva, v případě částicových plniv je obvykle výhodnější vstřikování s delší dobou plnění a vyšší teplotou taveniny. [3], [4]

Pro zajištění homogenních vlastností výstřiku je nutné nastavit celý vstřikovací profil tak, aby tavenina navíc protékala celým objemem tvarové dutiny konstantní rychlostí. Tento požadavek je pro tvarově složitější výstřiky obtížně splnitelný, a to i při podpoře numerické simulace této fáze vstřikování. [4]

2.2.3 Dotlaková fáze

Dotlaková fáze nastává při přepnutí vstřikování řízeného rychlostí posuvu šneku na vstřikování řízené tlakem, kterým šnek v roli pístu působí na taveninu. Účelem tohoto tlaku, resp. dotlaku, je doplňovat smršťující se objem taveniny vlivem chladnutí a udržovat požadovaný tlak nezamrzlých vnitřních vrstev taveniny až do celkového zamrznutí, nebo do zamrznutí vtoku, po kterém již další působení tlaku nemůže ovlivňovat kvalitu výstřiku. Předčasného přepnutí na dotlak se také využívá pro částečné dostříknutí tvarové dutiny taveninou, kde dotlakové plnění funguje jako pojistka proti možnému prudkému nárůstu tlaku na konci plnění doprovázeného pružným prohnutím formy, tzv. dýchnutí. [3], [4]

Dotlak je definován tlakovým profilem v čase, který převádí řídicí jednotka na hydraulický pohon šneku. Nařízený tlakový profil by neměl ovlivnit plynulost tlakové odezvy v průběhu plnění tvarové dutiny formy. Z pohledu izotropie vlastností a minimálního vnitřního pnutí, by měla tlaková odezva z maximálního tlaku na konci vstřikování plynule přejít na dotlakový profil bez tlakových špiček. [4]



Obr. 11. Vliv doby přepnutí na průběh tlaku v dutině formy [11]

Optimálním nastavením dotlakového profilu lze vedle minimalizace vnitřního pnutí a negativního dopadu smrštění na rozměry výstřiku také odstranit propadliny, lunkry, bubliny a trhliny, nebo dosáhnout požadovaného otisku dezénu formy na výstřiku. [4]

2.2.4 Fáze chlazení

Chlazení je nejdelší částí vstřikovacího cyklu. Začíná působit již ve fázi vstřikování a dotlaku a pokračuje až do vyjmutí výstřiku z formy. Doba chlazení je závislá především na

tloušťce stěny výstřiku, dále na použitém polymeru, na teplotách taveniny a formy a na požadované teplotě výstřiku při vyjímání z formy. Doba chlazení se může pohybovat od několika sekund u tenkostěnných výstřiků až po jednotky minut v případě tlustostěnných výstřiků. [3]

Pomalé chlazení způsobené vyšší teplotou formy a delší dobou chlazení dosahuje vyšší krystalinity semikrystalických materiálů s lepšími mechanickými vlastnostmi, ale také s větším smršněním. Vyšší teplota formy má dále pozitivní vliv na povrchovou kvalitu výstřiku, včetně povrchového lesku. Přesto je obvykle významnějším ekonomickým cílem dobu chlazení minimalizovat. Toho lze docílit především návrhem účinného chladicího systému, zejména v oblastech formy, kde materiál chladne nejpomaleji. Doba chlazení nesmí klesnout tak, aby vlivem nedostatečného ztuhnutí docházelo k deformacím nebo jiným vadám způsobených vyhazovacím systémem. [4]

2.3 Vstřikovací forma

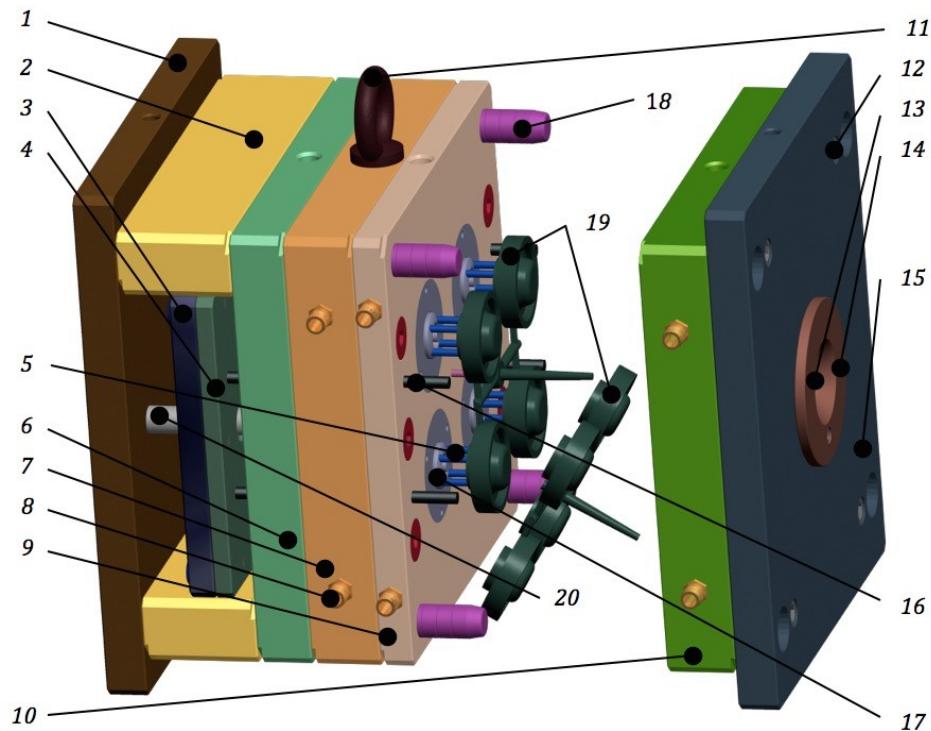
Vstřikovací formy jsou komplikovaná zařízení, které po ochlazení taveniny dávají výstřiku výsledný tvar spolu s požadovanými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Forma je dimenzována na vysoké provozní teploty a tlaky, tak aby byla dodržena její životnost a zároveň rozměrová přesnost výstřiků. Forma dále musí umožnit snadné vyjmutí výstřiků a automatizaci pracovních cyklů. [1]

Jednotlivé části formy lze rozdělit podle jejich funkce:

- Tvarová dutina formy
- Vtokový systém
- Temperanční systém
- Vyhazovací systém
- Odvzdušnění
- Upínací a vodící elementy [1]

Z pohledu konstrukce jsou vstřikovací formy velmi rozmanité. Velké množství typů forem lze dělit podle několika základních konstrukčních hledisek:

- Podle počtu dutin na jednonásobné a vícenásobné formy
- Podle konstrukčního řešení zaformování výstřiku na formy dvoudeskové, třídeskové, etážové, čelist'ové, vytáčeční atd.
- Podle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se vstřikem v ose formy a se vstřikem do dělicí roviny. [1]



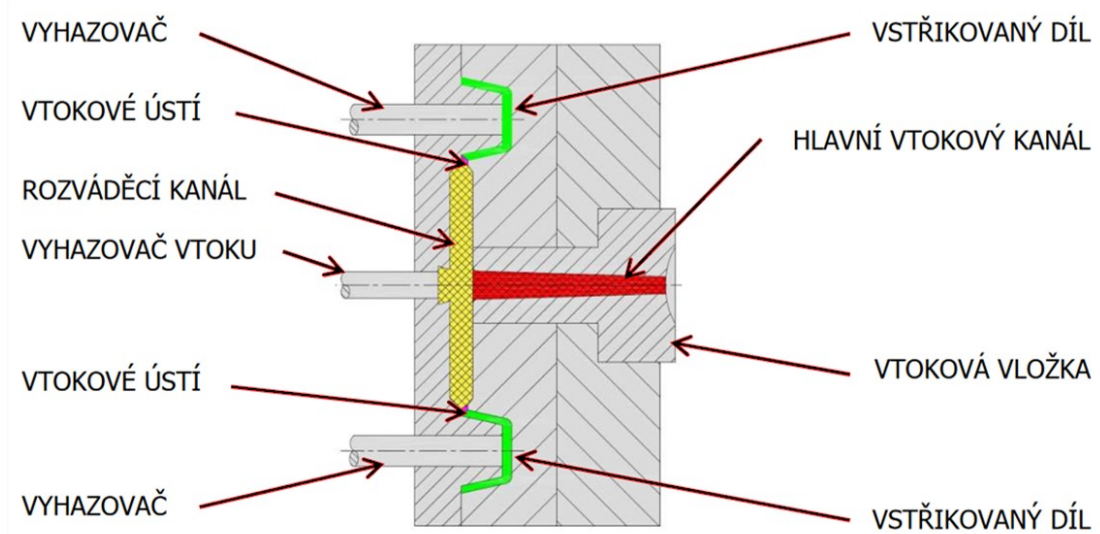
- | | | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| (1) pohyblivá upínací deska | (2) rozpěra | (3) vyhazovací deska opěrná |
| (4) vyhazovací deska kotevní | (5) vyhazovač | (6) podpěrná deska |
| (7) deska pro rozvod chlazení | (8) přípojka chlazení | (9) tvárník |
| (10) tvárnice | (11) manipulační oko | (12) hlavní montážní šrouby |
| (13) vtoková vložka | (14) středící kroužek | (15) pevná upínací deska |

Obr. 12. Dvoudesková vstříkovací forma [1]

2.3.1 Studený vtokový systém

Vtokový systém je systém vtokového kanálu, rozváděcích kanálů a vtokových ústí, který významně ovlivňuje kvalitu výstříku. Hlavním úkolem systému je vedení proudu taveniny polymeru od vstříkovacího stroje do tvarové dutiny formy v co nejkratším čase a s minimálním odporem. Mezi další úkoly patří snadné odtržení nebo oddělení vtokového zbytku od výstříku a jeho vyhození. Podle způsobu izolace a vyhřívání taveniny v kanálech se vtokové systémy dělí na studené (SVS) a vyhřívané (VVS). [6]

Ve studeném vtokovém systému dochází ihned po vstříknutí taveniny k jejímu ztuhnutí na povrchu kanálu. Tato ztuhlá vrstva vytváří tepelnou izolaci proti dalšímu chladnutí vnitřního proudu taveniny tak, aby bylo možné vyplnit celou dutinu formy bez výrazného nárůstu viskozity proudu a příslušných vstříkovacích tlaků. Výhodou tohoto systému je levnější a jednodušší provedení formy s využitím standardizovaných dílů – normálií. [6] [15]

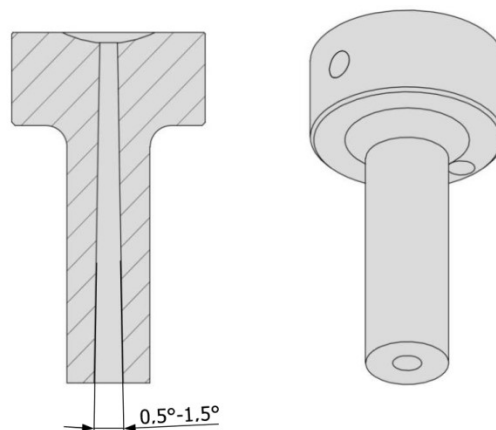


Obr. 13. Schéma studené vtokové soustavy [15]

Vtokový kanál

Tavenina je z trysky vstřikovacího stroje vstřikována přímo do vtokového kanálu, který dále ústí do rozváděcích kanálů, popř. u jednonásobných forem může ústít přímo do tvarové dutiny. Vtokový kanál je konstrukčně řešen pomocí vtokové vložky, která je dodávána jako normálie. Vstřikovací tryska, která přímo dosedá na vtokovou vložku, pak musí být vystředěna pomocí středícího kroužku na formě. [6]

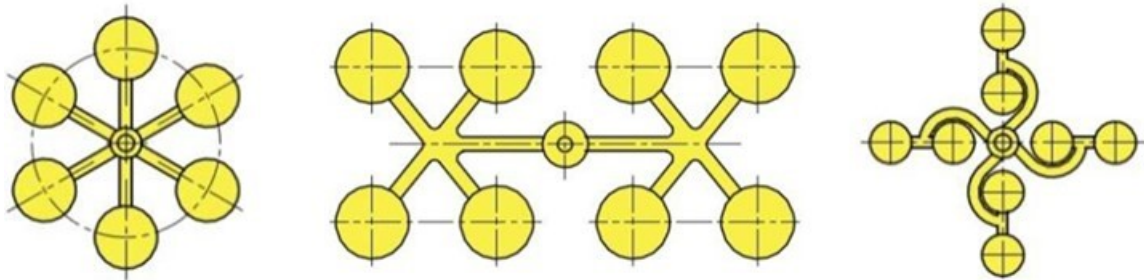
Průměr vtokového kanálu je u trysky stroje o 0,5 až 1mm větší než průměr trysky a směrem k dělicí rovině se průměr dále rozšiřuje pod úhlem 0,5 až 1,5° tak, aby bylo zajištěné snadné vyhození vtokového zbytku. Stěna kanálu se obvykle leští na drsnost 0,1 Ra. Vedle vtokového kanálu obsahuje vložka další otvory pro kolíky k zajištění správné polohy ve formě. Vtokové vložky jsou vzhledem k značnému mechanickému a tepelnému namáhání obvykle dodávány z houževnatých nástrojových ocelí s tepelným zpracováním. [6], [15]



Obr. 14. Vtoková vložka [15]

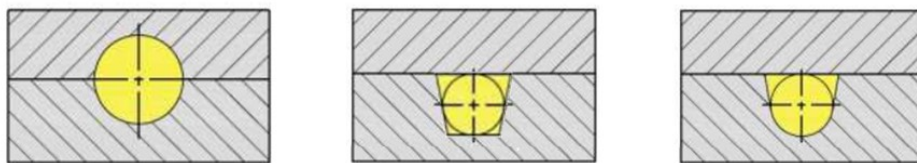
Rozváděcí kanály

Konstruuji se s co nejkratší dráhou toku od vtokového kanálu do tvarové dutiny formy tak, aby nedocházelo ke zbytečným časovým a tlakovým ztrátám. Dráha toku by také měla být ke všem dutinám formy stejně dlouhá, aby bylo zajištěno rovnovážného plnění. [6]



Obr. 15. Příklady rozváděcích kanálů šesti a osmi násobných forem [15]

Rozváděcí kanály mají mít minimální chlazený povrch s co největším průřezem. Důvodem je požadavek na minimální spotřebu materiálu, ale zároveň udržení jádra taveniny v plastickém stavu i po vyplnění dutiny formy a tedy umožnění působení dotlaku. Ideální kruhový průřez je výrobně náročný, proto se v praxi častěji volí technologicky jednodušší lichoběžníkové a kruhu blízké tvary. [6]



Obr. 16. Vyhovující průřezy rozváděcích kanálů [15]

Vtoková ústí

Vtokové ústí je zúžený přechod mezi rozváděcím kanálem a tvarovou dutinou. Jeho účelem je především zvýšení klesající teploty taveniny před vstupem do tvarové dutiny a umožnění snadného oddělení vtokového zbytku od výstřiku. Zvýšením teploty se předchází řadě povrchových defektů, především díky odstranění strhávání ztuhlých vrstev polymeru ze stěn formy. [6]

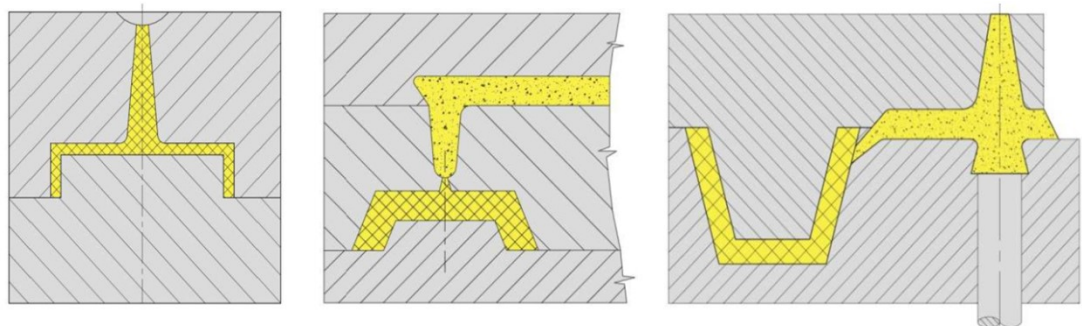
Průřezy i délky vtokových ústí jsou voleny co nejmenší, které ještě umožní spolehlivé plnění tvarové dutiny včetně působení dotlaku. Rozměry jsou tedy závislé na konkrétním polymeru, tvaru výstřiku i technologii vstřikování. Minimální délka vtokového ústí je navíc omezena pevností materiálu formy. [6]

Umístění vtokového ústí má významný vliv na dekorativní, rozměrovou i mechanickou kvalitu výstříku. Mezi základní doporučení polohy vtoku patří [6]:

- geometrický střed výstříku – požadavek na rovnoměrné zatečení taveniny do celé tvarové dutiny;
- nejsilnější stěna výstříku – požadavek na dřívější ztuhnutí vzdálenějších oblastí od vtoku a tedy účinného působení doplňování s dotlakem;
- mimo pohledové plochy výstříku – požadavek na dekorativní kvalitu u viditelných stop po odstranění vtoku;
- u žebrovaných výstříků zajistit tok taveniny ve směru orientace žeber – požadavek na spolehlivé zatečení.

Konkrétní tvar a rozměry vtokového ústí se odvíjí od zvoleného typu. Mezi základní typy vtokových ústí patří [6], [15]:

- Plný kuželový vtok – přímý vtok z vtokového kanálu, vhodný pro jednoduché výstříky s tlustší stěnou, nebo pro polymerní taveniny s vyšší viskozitou, nevýhodou je pracné oddělení vtokového zbytku;
- Bodový vtok – odtrhnutí vtokového ústí od výstříku pomocí systému třídeskového odformování, po odtržení následuje otevření formy v dělicí rovině s tvarovou dutinou, nevhodné pro taveniny s vyšší viskozitou a plněné plasty pro větší výstříky;
- Tunelový vtok – zvláštní případ bodového vtoku s jednou dělicí rovinou, kde vtokový zbytek leží ve stejné rovině jako výstřík a k oddělení vtokového zbytku dojde buď při otevření formy, nebo při vyhazování výstříku, nevýhodou je náročná výroba vtoku a použití jen pro polymery s dostatečnou elasticitou;



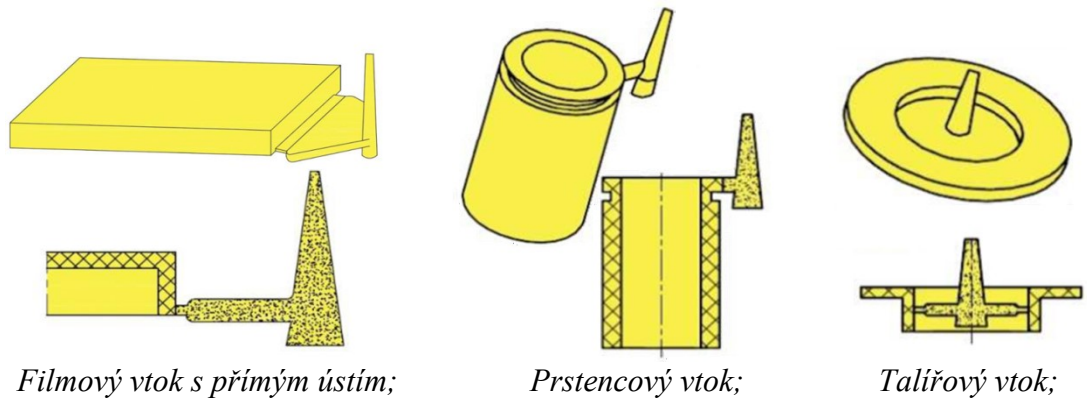
Plný kuželový vtok;

Bodový vtok;

Tunelový vtok;

Obr. 17. Základní typy vtokových ústí [15]

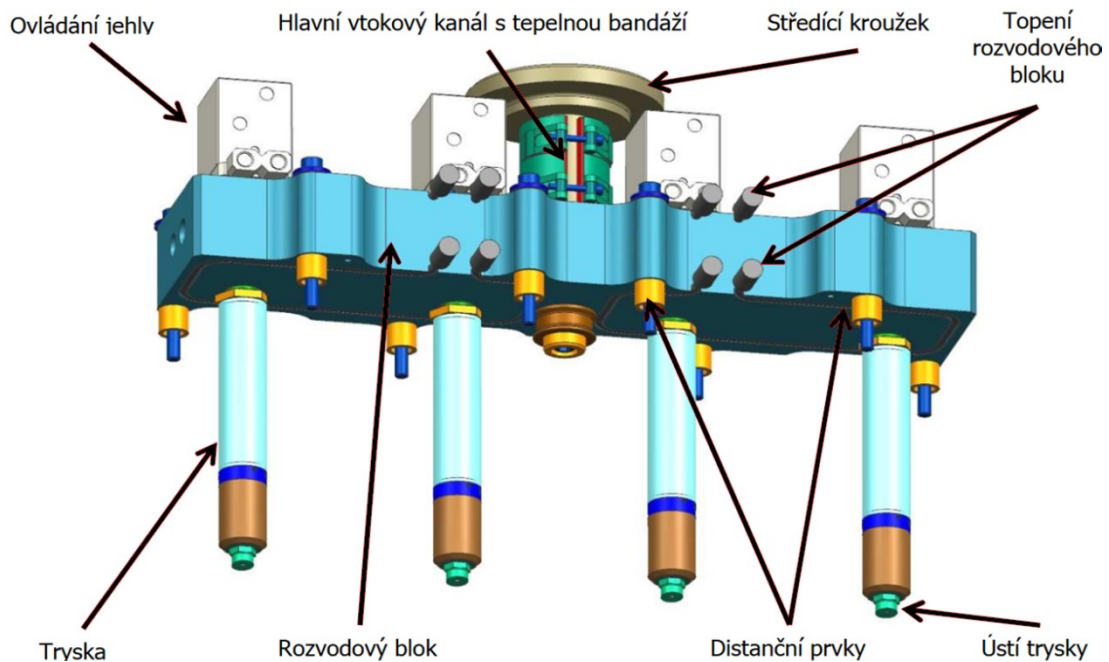
- Boční vtok – konstrukčně nejjednodušší vtok bez oddělení vtokového zbytku, obvykle obdélníkové ústí ležící v dělicí rovině výstřiku, nevýhodou je potřeba dodatečného odřezání vtokového zbytku, které je často součástí formy;
- Filmový vtok – zvláštní případ bočního vtoku s dodatečným složitějším odřezáním vtoku, vhodné pro plnění plochých, kruhových a trubicových dutin s vyššími požadavky na kvalitu.



Obr. 18. Varianty filmových vtoků [15]

2.3.2 Vyhřívaný vtokový systém

Vyhřívaný vtokový systém (VVS) je systém vyhřívaných komponent, jako je hlavní vtokový kanál, rozvodná deska, trysky a ovládání jehel. Jejich úkolem je udržení taveniny v plastickém stavu se zaručenou viskozitou po celou dobu vstřikovacího cyklu. [16]



Obr. 19. Vyhřívaná vtoková soustava [16]

Použití VVS zvyšuje energetickou náročnost výroby a také vyžaduje výrazně složitější konstrukci vstřikovací formy spolu s nezbytnými snímači a regulátory. Na druhou stranu má VVS řadu výhod, díky kterým jeho využití stále roste [6], [16]:

- Možnost bezodpadového vstřikování – úspora materiálu
- Snížení nákladů spojených s odstraňováním a recyklací vtokových zbytků
- Modularita jednotlivých komponent
- Snadná montáž / demontáž a čištění
- Kratší výrobní cyklus s nižšími tlakovými ztráty
- Ovládání jehel umožňuje postupné otevírání trysek a řízení poloh studených spojů.

2.3.3 Temperační systém

Hlavním úkolem temperačního systému je zajištění konstantního teplotního režimu vstřikovací formy spolu se snížením doby pracovního cyklu a tedy výrobních nákladů. Tento systém tvoří vedle širokého příslušenství, především systém několika nezávislých okruhů kanálů a dutin umožňujících přestup tepla z formy do temperačního média. [17]

Před nasazením formy do provozu temperační systém formu vyhřívá na požadovanou teplotu. Naopak při vstřikování udržuje teplotu formy chlazením. Chlazením je odváděno teplo z taveniny, dokud teplota vstřikovaného polymeru neklesne na požadovanou hodnotu pro odformování. [17]

Tab. 1. Doporučené teploty vybraných termoplastů pro vstřikovací proces [11]

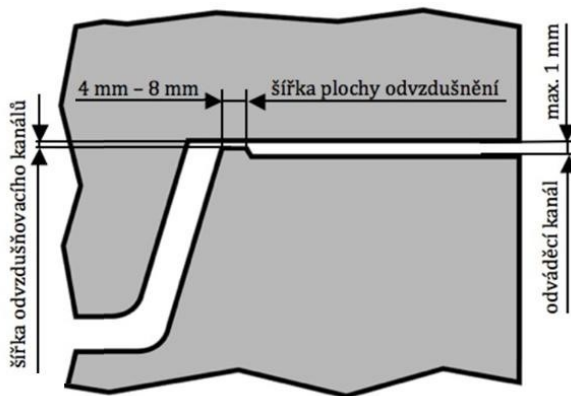
Termoplast	Teplota formy [°C]	Teplota taveniny [°C]	Teplota dílu při odformování [°C]
PA	80 - 120	260 - 300	110 - 130
PC	80 - 100	280 - 320	140
PC + GF	80 - 130	310 - 330	150
ABS	60 - 80	220 - 260	80 - 100
PBT	80 - 100	250 - 270	140
PBT + GF	80 - 100	250 - 270	150
PP	30 - 60	200 - 250	70 - 90
PE	30 - 60	180 - 230	60 - 90

Správným návrhem temperačního systému s vhodným dimenzováním a optimálním nastavením rychlostí průtoků a teplot temperačního média v jednotlivých okruzích lze dosáhnout rozměrově přesných výstřiků s minimální deformací, kvalitnějším povrchem a požadovanými mechanickými vlastnostmi. [11]

2.3.4 Odvzdušnění

Při vstřikování taveniny do dutiny formy je potřeba zajistit únik vzduchu a případných zplodin přes odvzdušnění formy. S rostoucí rychlostí vstřikování roste potřeba účinnějšího odvzdušnění. V opačném případě se zvyšuje riziko různých vad na výstřiku. Nejčastěji dochází k Dieselovému efektu, tj. ke vzniku spálenin způsobených intenzivním zahříváním vzduchu při jeho rychlém a silném stlačení taveninou. [17]

Rozmístění odvzdušnění je doporučeno podél rozváděcích kanálů a tvarové dutiny, kde nejvýznamnější polohou je oblast, kterou tavenina vyplní jako poslední. Obvykle nejjednodušším řešením odvzdušnění je vytvoření odvzdušňovacích ploch v dělicí rovině, kde plasty s nižší viskozitou vyžadují nižší šířku odvzdušňovacího kanálu. [11]



Obr. 20. Odvzdušnění v dělicí rovině [11]

Tab. 2. Doporučená šířka odvzdušňovacího kanálu [11]

Termoplast	Šířka odvzdušňovacího kanálu [mm]
PC, POM	max. 0,05
PC, ABS	max. 0,05
PA	0,02 - 0,03
PBT	max. 0,03
PA + GF	0,05

Pokud konstrukce výstřiku neumožní nasměrovat proud taveniny k vytlačení všeho vzduchu do dělicí roviny, pak lze využít např. odvzdušnění přes vyhazovače pomocí jejich zploštění na protilehlých stranách, nebo vytvoření vložky v problematické oblasti formy. Mezi vložkou a zbytkem těla formy tak vznikne další dělicí rovina s možným odvzdušněním. Použití vložek je doporučeno např. u otvorů se slepými dny. [11]

3 SMRŠTĚNÍ

Smrštění polymerů je hlavní příčinou tvarové nepřesnosti výstřiků. Smrštění S je objemová změna polymeru vznikající především v průběhu chlazení, vyjádřená v rovnici (1) pomocí délkových rozměrů dutiny formy V_f a výstřiku V_v . [4]

$$S = \frac{V_f - V_v}{V_f} 100 [\%] \quad (1)$$

Hodnota smrštění je výrazně ovlivněna nadmolekulární strukturou polymeru. Semikrystalické termoplasty oproti amorfním dosahují vyšších hodnot, kde smrštění roste s podílem krystalické fáze. Hodnota smrštění je ovlivněna kromě vlastností polymeru, také tvarem výstřiku, konstrukcí vstřikovací formy, i zvolenými technologickými parametry. Smrštění je navíc anizotropní s odlišnou hodnotou ve směru a kolmo na směr toku taveniny. Neplněné polymery obvykle dosahují vyššího smrštění ve směru toku. Přítomnost plniva pak smrštění spíše snižuje a u vláknitého plniva ve směru toku smrštění klesá pod hodnoty v příčném směru. [6], [9]

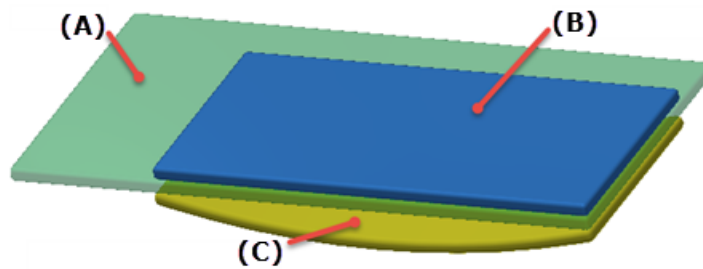
Tab. 3. Smrštění vybraných termoplastů [9]

Termoplast	Smrštění [%]	Termoplast	Smrštění [%]
PS	0,2 - 0,5	PC	1,7 - 2,3
PVC	0,2 - 0,6	PBT	1,7 - 2,3
ABS	0,4 - 0,7	PA6	1,0 - 2,5
PMMA	0,3 - 0,8	LDPE	1,5 - 3,0
PP	1,5 - 2,0	HDPE	2,0 - 4,0

Smrštění výstřiku se mění i s časem po vystříknutí, proto se rozlišuje smrštění výrobní a dodatečné. Výrobní smrštění se měří 24 hod. po vyrobení při normovaných podmínkách, tj. 23 °C a 50 % relativní vlhkost vzduchu. Výrobní smrštění obvykle představuje ca. 90 % z celkové hodnoty, zbytek je dodatečné smrštění. Dodatečné smrštění probíhá poměrně dlouho v důsledku pomalé relaxace napětí, sekundární krystalizace u semikrystalických polymerů a dalších jevů. [9]

3.1 Rozklad podle rovnoměrnosti

Rozměrové odchylky výstřiku od tvarové dutiny (deflection) lze z praktických důvodů rozložit na odchylky od čistě rovnoměrného smrštění (uniform shrinkage) a odchylky od zbylého nerovnoměrného smrštění v podobě zkroucení resp. deformací (warpage). [19]



Obr. 21. Deformace desky, (A) tvar dutiny formy, (B) výstřik s rovnoměrným smrštěním, (C) výstřik s rovnoměrným smrštěním i deformací [19]

3.1.1 Rovnoměrné smrštění

Rovnoměrné smrštění je definováno jako pouhá změna velikosti výstřiku. Její hodnotu lze hrubě odhadnout pomocí střední hodnoty výrobního smrštění, tj. průměrné hodnoty smrštění ve směru toku a napříč toku taveniny, která je uvedena v příslušném materiálovém listě polymeru. Tento odhad je vhodné následně zpřesnit zohledněním konkrétních podmínek zpracování, zkušenostmi, nebo simulací vstřikování. Tohoto odhadu se dále využívá při konstrukci forem, kde tvarová dutina je navržena větší o tzv. kompenzaci smrštění, tedy s opačnou hodnotou smrštění. [4]

3.1.2 Nerovnoměrné smrštění

Zbylé nerovnoměrné smrštění je zdrojem vnitřní napjatosti, která v závislosti na tuhosti výstřiku velmi často vede k jeho deformacím. V dlouhodobém měřítku se na výrobku mohou objevit i trhliny. Nerovnoměrné smrštění je způsobeno nehomogenním stavem polymeru. Mezi hlavní zdroje nehomogenity patří [4], [18]:

- anizotropní orientace makromolekul vlivem jejich rozbalení ve směru toku
- nerovnoměrný tlak v průběhu vstřikování a dotlak vlivem elasticity taveniny
- nehomogenní teplotní pole díky nerovnoměrnému odvodu tepla chlazením
- v případě semikrystalických polymerů nerovnoměrná krystalizace
- v případě vlákniny plněného polymeru orientace vláken

3.2 Vliv procesních parametrů

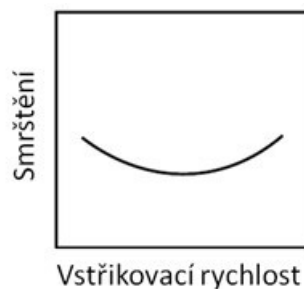
Hodnota smrštění je spolu s příslušnou napjatostí a deformací závislá na konkrétních podmínkách zpracování. Volba procesních parametrů má vliv jak na rovnoměrné smrštění, tak

na výše zmíněné zdroje nehomogenit. Jednotlivé technologické parametry se mohou vzájemně ovlivňovat a jejich účinky sčítat nebo se rušit. [18]

3.2.1 Vstříkovací tlak a rychlost

Vyšší vstříkovací tlak a jeho doba působení snižuje smršťení. Hodnota vstříkovacího tlaku vlivem elasticity taveniny v dutině formy klesá se vzdáleností od vtokového ústí. Největší smršťení tedy nastává nejdále od vtoku. Vstříkovací tlak obvykle není na vstříkovacím stroji samostatně nastavován, ale je reakcí na zadaný profil vstříkovací rychlosti. [9]

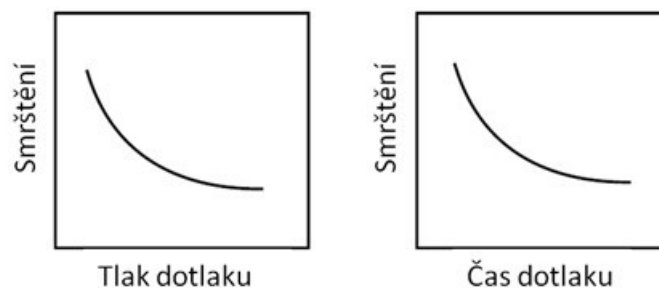
Nižší vstříkovací rychlost vede k vyššímu smršťení především díky nižšímu tlaku taveniny dále od vtoku. Na druhé straně, při rychlejším vstříkování dochází k výraznějšímu rozbalování makromolekul ve směru toku, které opět vede k vyššímu smršťení. Optimální vstříkovací rychlost lze obvykle nalézt jako kompromis mezi těmito dvěma vlivy. [9], [18]



Obr. 22. Vliv vstříkovací rychlosti na smršťení [18]

3.2.2 Tlak a čas dotlaku

Vyšší hodnota dotlaku i jeho delší působení snižuje smršťení. Vyšší dotlak může účinněji kompenzovat smršťení chladnoucí taveniny až do okamžiku zamrznutí vtokového ústí. Poté další působení dotlaku již nemá účinek. [18]

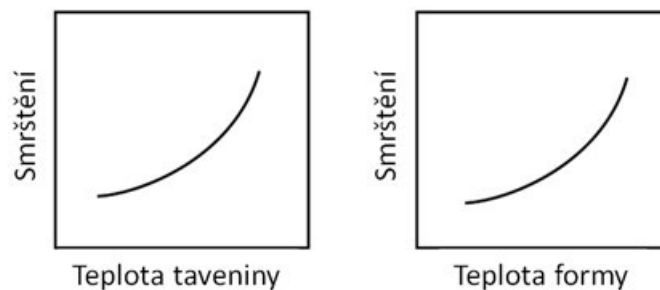


Obr. 23. Vliv vstříkovací rychlosti a dotlaku na smršťení [18]

3.2.3 Teplota taveniny a formy

Teplota taveniny sama o sobě zvyšuje smrštění, protože tavenina chladne do tuhého stavu z vyšší teploty. Teplota taveniny je ale obvykle ve vazbě se vstřikovacím tlakem, který je teplotou snižován. Výsledný efekt na smrštění tak může být slabší nebo opačný. [9]

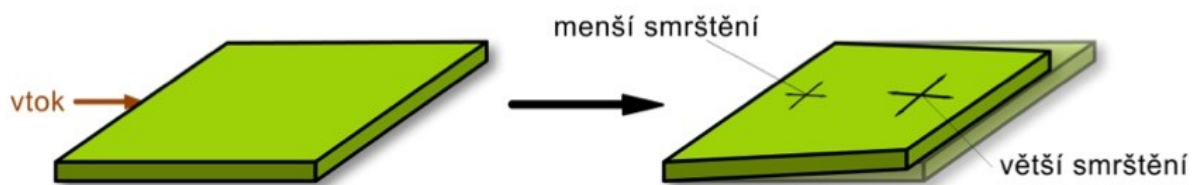
Nižší teplota formy, a tedy rychlejší chlazení, snižuje výrobním smrštění, po kterém ale nastává vyšší dodatečné smrštění. Na druhou stranu, s vyšší teplotou formy lze za cenu vyššího výrobním smrštěním cíleně dodatečné smrštění minimalizovat. Vliv teploty formy na smrštění roste s krystalinitou semikrystalických materiálů, u amorfních materiálů je relativně nízký. [9]



Obr. 24. Izolovaný vliv teploty taveniny a formy na výrobní smrštění [18]

3.3 Vliv polohy vtoku

Umístění vtoku má na smrštění podstatný vliv. Polohou vtoku jsou předurčeny vzdálenější oblasti s delší dráhou toku, kde klesají některé hodnoty výše zmíněných procesních parametrů. Jedná se obvykle o pokles vstřikovacího tlaku, teploty taveniny, a tím účinku dotlaku. Výsledkem je rostoucí smrštění dále od vtoku. [9], [18]



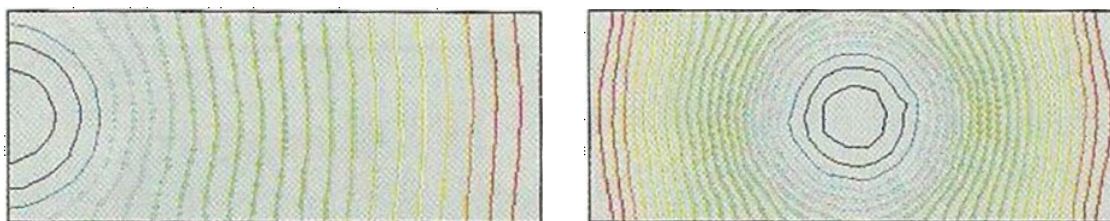
Obr. 25. Vliv polohy vtoku na smrštění [9]

Poloha vtoku navíc ovlivňuje proudění taveniny v dutině, a tím orientaci makromolekul a plniva. Tento vliv je popsán na následujících příkladech plnění obdélníkové desky s vtokem na boku a uprostřed stěny. [18]

3.3.1 Vtok na boku desky

Z pohledu deformace, tedy nerovnoměrného smrštění, je nejvhodnější jednosměrné plnění. V případě použité podlouhlé desky s vtokem na kratší hraně (viz obr. 26 vlevo) dojde k jednosměrnému plnění už v blízkosti vtoku. Výjimku tvoří jen lokální oblasti v levých rozích. Celkové smrštění jednosměrně plněných dílů může vzniknout s výraznou anizotropií. Přesto je tak obecně dosaženo nižší deformace dílu, především u amorfních a vlákny plněných polymerů. [18]

Nevýhodou vtoku na boku je delší dráha toku. Ta může vést k potřebě vysokého vstřikovacího tlaku, který ale se vzdáleností od vtoku výrazněji klesá. Stejně tak klesá i účinek dotlaku a dochází k nárůstu smrštění. Negativní vliv klesajícího účinku dotlaku na smrštění lze částečně kompenzovat jeho klesajícím profilem v čase. [18]



Obr. 26. Průběh plnění dutiny s vtokem na boku desky (vlevo)
a ve středu desky (vpravo) [18]

3.3.2 Vtok ve středu desky

V tomto případě proudí tavenina nejprve v radiálním směru, dokud nenarazí na překážku. U podélných dílů, jako je uvedena obdélníková deska (viz obr. 26 vpravo), dojde po kontaktu s delšími obvodovými hranami ke změně orientace toku na lineární. Výsledkem je nerovnoměrná orientace makromolekul, popř. plniva, a tím i vyšší deformace než u vtoku z boku desky. [18]

Z pohledu deformace je vtok ve středu dílu vhodnější pro díly kruhového, popř. čtvercového tvaru, kde oblasti se změněnou orientací jsou výrazně menší. U tvarově složitých dílů, především s více vtoky, je vliv polohy vtoku na smrštění závislý na mnoha faktorech a odhad se provádí numerickou simulací. Simulace mohou pomoci vyhodnotit více různých poloh a v rámci konstrukčních omezení určit nejvhodnější umístění. [18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro bakalářskou práci jsou stanoveny tyto cíle:

- Vypracovat literární studii na dané téma
- Provést simulaci vstřikování v programu Moldflow
- Validace deformací ze simulace, použitelnost pro optimalizaci
- Volba vtoku s ohledem na deformaci – volba nejlepší pozice
- Návrh kompenzace smrštění ve formě – doporučené z materiálového listu vs. optimální pro výsledné deformace

První bod je obsahem teoretické části této práce, která je rozdělena do tří kapitol. První kapitola je věnována rozdělení polymerních materiálů a jejich plniv. Druhá kapitola uvádí technologii vstřikování s popisem vstřikovacího stroje, formy a vlivu fází vstřikovacího cyklu na kvalitu výrobku. Třetí kapitola se věnuje smrštění a jeho vztahům k deformaci výrobku, kompenzaci smrštění formy, závislosti na vybrané technologické parametry a vlivu umístění vtokového ústí.

Ostatní body jsou součástí praktické části práce. Jejím obsahem je popis vstřikovaného výrobku, spolu s jeho základním požadavkem na rozměrovou kvalitu. Za účelem splnění tohoto požadavku, resp. minimalizace deformace, bude použita jednoduchá metoda simulace vstřikování. Tato metoda bude nejprve validována na sériově vyráběném výrobku s dostupným měřením. Cílem validace je vyhodnocení chyby simulace a její použitelnost pro optimalizaci deformace.

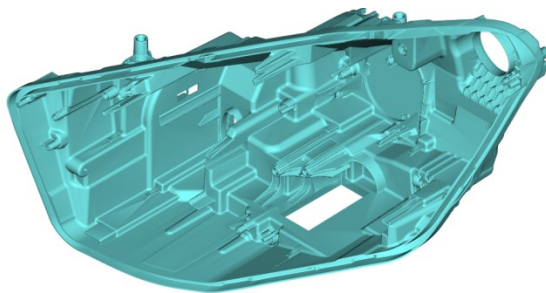
Optimalizace deformace bude provedena pro odlišný výrobek se srovnatelnou konstrukcí i technologií výroby. Optimalizace bude probíhat ve dvou krocích. V prvním kroku budou navrženy čtyři kombinace umístění vtoků s vyhodnocením jejich vlivu na deformaci výrobku. Nejvýhodnější varianta bude dále použita v druhém kroku pro návrh optimální hodnoty kompenzace smrštění. Doporučená hodnota kompenzace z materiálového listu bude porovnána s kompenzací smrštění, při které bude dosaženo minimální deformace.

5 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK

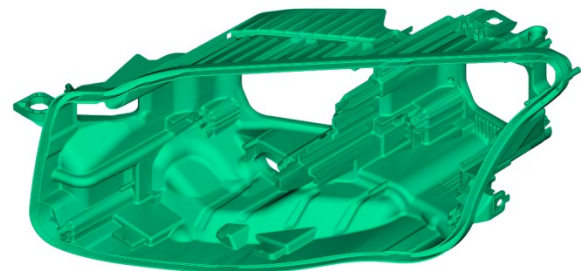
Vstřikovaným výrobkem je pouzdro světlometu, do kterého se uchycují vnitřní funkční a dekorativní komponenty. Délka pouzdra je cca 0,6m. Po obvodu pouzdra je lepicí drážka tvaru U, do které se nanáší lepicí hmota a zakládá krycí sklo světlometu. Z vnější strany jsou umístěny upevňovací body k montáži do automobilu.

Na samotné pouzdro jsou kladeny vysoké požadavky na tuhost, rozměrovou přesnost a stálost. Mezi nejvýznamnější rozměrové požadavky celého světlometu patří maximální odchylky bodů na krycím skle vůči uchycovacím bodům pouzdra v hodnotách pod 1mm. Splnit tyto požadavky je náročný úkol. Samotné pouzdro, které v tolerančním řetězci hraje významnou roli, se běžně deformuje výrazně více než povolená tolerance celého řetězce. Větší deformace pouzdra jsou následně snižovány montáží vnitřních komponent a samotným procesem lepení krycího skla. Přesto minimalizace deformace pouzdra je základem pro snadnou montáž všech komponent a jejich správnou funkci.

Pro účel validace je zvoleno pouzdro A, které je již v sériové výrobě, a je tedy možné získat všechna nezbytná měření. Pro následnou optimalizaci je zvoleno pouzdro B. Obě pouzdra jsou podobných rozměrů s identickou tloušťkou stěny 1,8mm. Obě pouzdra jsou vyráběna srovnatelnou technologií vstřikování ze stejného materiálu.



pouzdro A (pro validaci)



pouzdro B (pro optimalizaci)

Obr. 27. Geometrie pouzder

Formy těchto pouzder jsou řešeny jako dvojnásobné s hlavní dělicí rovinou podél vnějšího obvodu lepicí drážky. Při jednom pracovním cyklu je vystříknuta jedna sada pouzder pro pravý a levý světlomet. Konstrukční elementy, jejichž rozměrová přesnost hraje významnou roli (upevňovací body, RPS systém, dosedací plochy, atd.), jsou většinou řešeny jako vyměnitelné vložky, nebo plochy s jednoduchou geometrií. Jejich případná modifikace (výměna vložky, navaření/odfrézování materiálu) je relativně jednoduchá.

Opakem je tomu u lepící drážky, jejíž rozměrová přesnost hraje také významnou roli, ale její případná modifikace je velmi náročná. Z tohoto důvodu je výhodné optimalizovat deformaci pouzdra přednostně s cílem minimalizace deformace samotné drážky a ostatní konstrukční elementy této deformaci následně přizpůsobit.

5.1 Materiál výrobku

Pro vstřikování obou pouzder je použit shodný materiál s obchodním názvem Hostacom G3N01 od společnosti Covestro (původně Basell). Jde o PP s obsahem 30% skelněných vláken. Materiál je hůře tekoucí, ale dosahuje velmi vysoké tuhosti, nízké tepelné roztažnosti a nízkého creepu při zatížení za zvýšených teplot. [20]

Tab. 4. Hostacom G3N01 - vybrané vlastnosti

Hustota	1.14 g/cm ³
Index toku taveniny (230°C/5.0kg)	5.00 cm ³ /10min
Modul pružnosti v tahu	6500 MPa
Pevnost v tahu	85 MPa
Teplota měknutí (podle Vicata 50°C/h 50N)	130 °C
Smrštění ve směru toku taveniny	0,3 %
Smrštění kolmo k toku taveniny	1,0 %

6 SIMULACE

Optimalizace pouzdra B je provedena ve fázi konstrukce výrobku. V této vývojové fázi ještě není známá konstrukce formy s návrhem chladících kanálů, plnicího systému, včetně typů vtoků a dalších informací, které ovlivňují přesnost simulace. Také nejsou přesně určeny technologické parametry vstřikování. Simulace pro účel optimalizace bude tedy velmi zjednodušená. Vstupy simulace budou tvořeny pouze 3D geometrií pouzdra, polohou vtoků, materiálovými daty a doporučenými základními technologickými parametry.

Simulaci pro validaci pouzdra A, které je již v sériové výrobě, lze vytvořit jako velmi detailní replikace reality s mnoha vstupy. Taková simulace by měla výrazně lépe popisovat skutečný stav. Avšak pro vyhodnocení přesnosti simulací optimalizace by byl její přínos zavádějící. Proto simulace pro validaci bude také obsahovat stejně zjednodušené vstupy. Cílem této simulace je odhadnout nepřesnost právě takto zjednodušených simulací.

6.1 Použitý software

Všechny simulace v této práci jsou provedeny v softwaru Autodesk Moldflow Insight 2019. Jde o software pro simulaci celého vstřikovacího procesu, který umožňuje detailně řešit, vyhodnocovat a optimalizovat jak plastový díl, tak vstřikovací formu. Tohoto softwaru využívají přední světový výrobci v automobilovém průmyslu a dalších odvětví za účelem efektivní inovace, úspory nákladů a vysoké kvality produktů. [21]

6.2 Diskretizace



Obr. 28. Ukázka diskretizace (pouzdro A) s detailem vnitřní sítě ve stěně lepící drážky

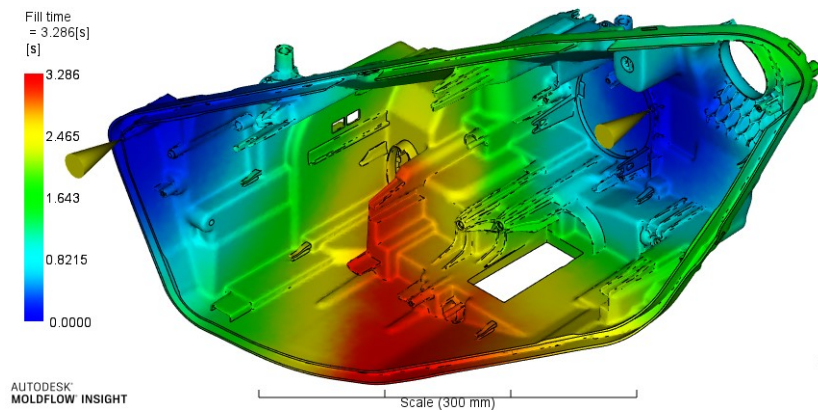
Oba modely pro validaci i optimalizaci jsou síťovány 3D tetra elementy s průměrnou povrchovou délkou hrany 4mm. Počet vrstev elementů přes tloušťku je 10. Celkový počet elementů se u obou modelů pohybuje kolem 5mil. (pouzdro A: 5,2mil.; pouzdro B: 5,6mil.).

6.3 Simulace pro validaci

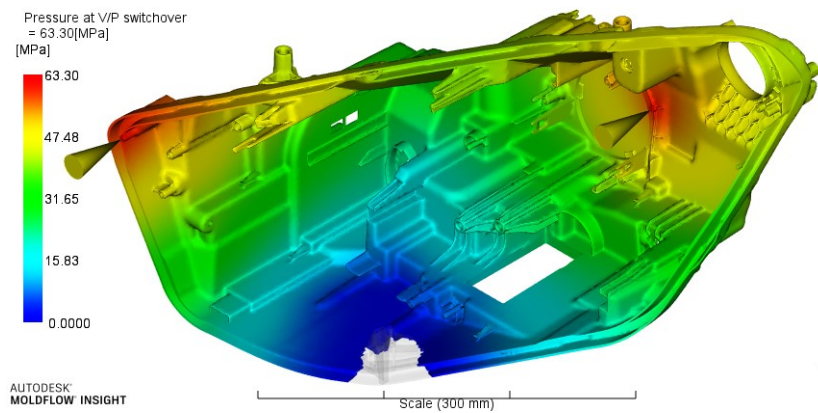
Vstupní technologické parametry:

- Teplota taveniny: 250°C
- Teplota formy: 40°C
- Čas plnění: 3s
- Doba chlazení: 20s
- Dotlak: 54MPa po dobu 9.5s (konstantní profil)

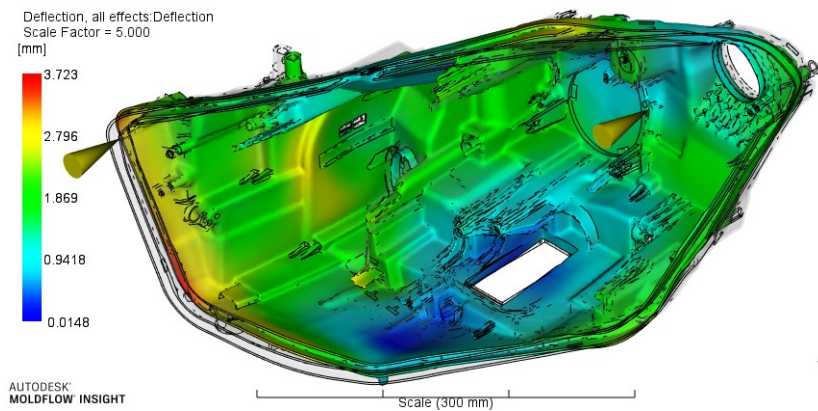
Základní výsledky se dvěma vtoky na boku a ve stěně pouzdra:



Obr. 29. Pouzdro A, čas plnění tvarové dutiny – 3.3s



Obr. 30. Pouzdro A, tlak při přepnutí na dotlak – 63MPa



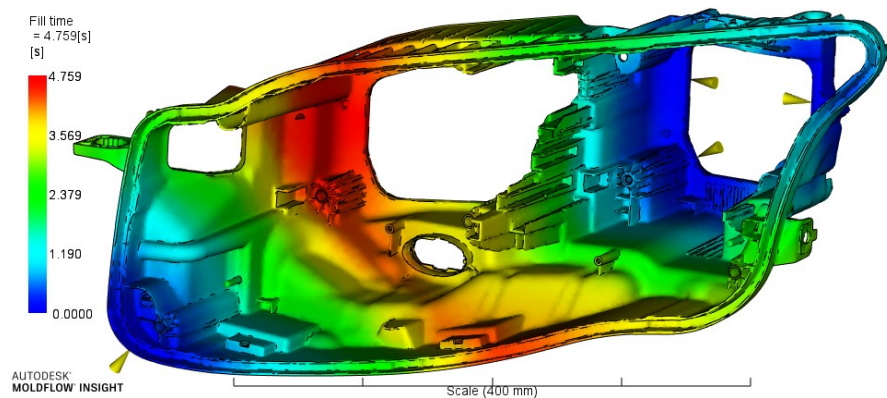
Obr. 31. Pouzdro A, deformace – max. 3,7mm

6.4 Simulace pro optimalizaci

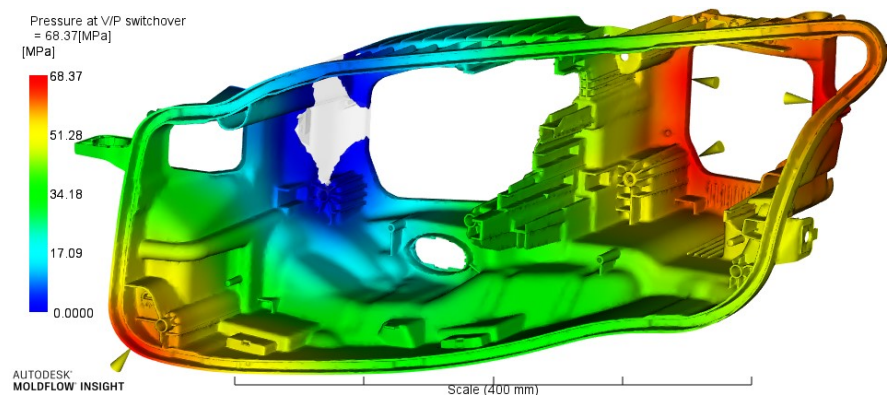
Vstupní technologické parametry:

- Teplota taveniny: 250°C
- Teplota formy: 40°C
- Čas plnění: 4,2s
- Doba chlazení: 20s
- Dotlak: 54MPa po dobu 9.5s (konstantní profil)

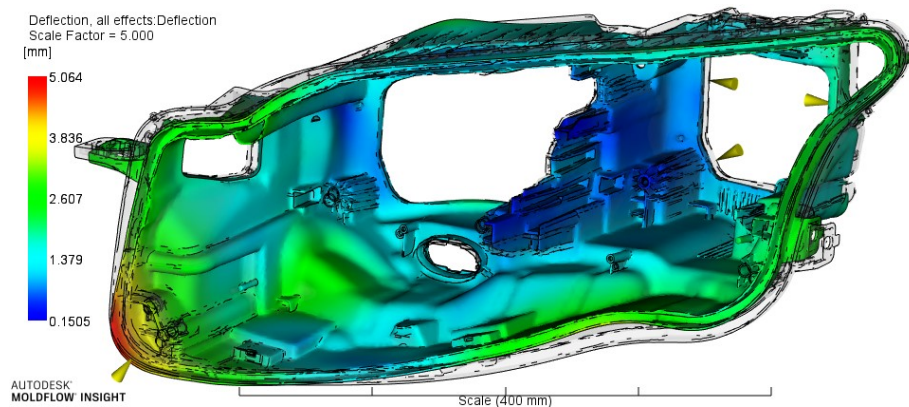
Základní výsledky se zobrazeny čtyřmi vtoky ve dvou krajních oblastech pouzdra:



Obr. 32. Pouzdro B, čas plnění tvarové dutiny – 4.8s



Obr. 33. Pouzdro B, tlak při přepnutí na dotlak – 68MPa



Obr. 34. Pouzdro B, deformace – max. 5,1mm

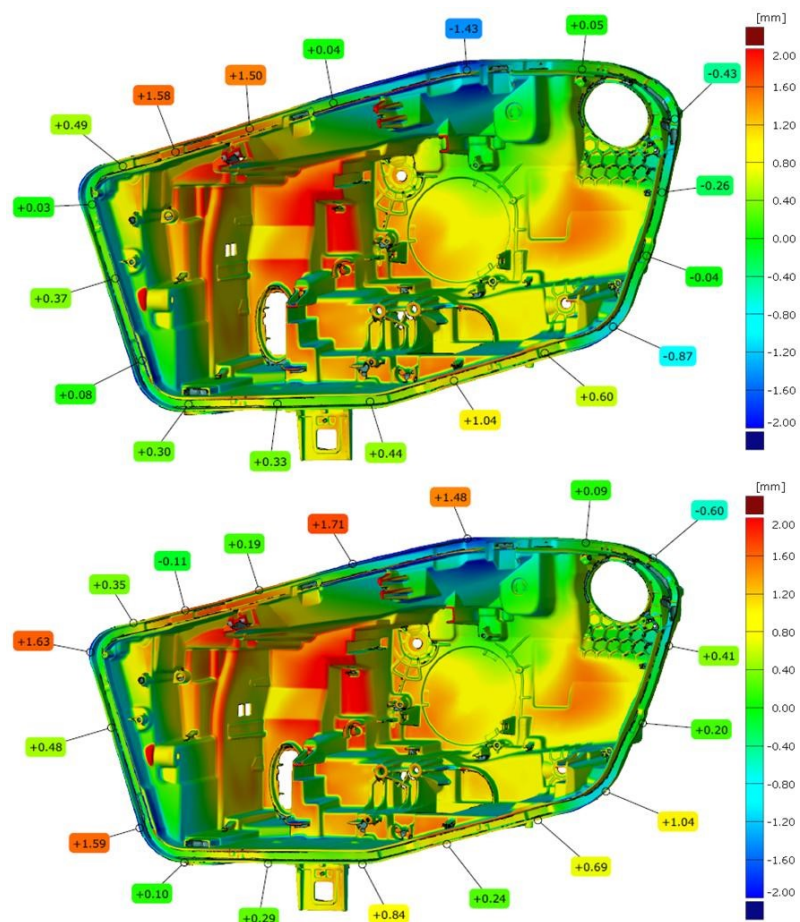
7 VALIDACE

Validace deformace je provedena pro pouzdro A pomocí porovnání výsledků simulace s měřením. Zkoumané pouzdro bylo odebráno ze stabilizované sériové výroby a podrobena bezkontaktnímu 3D optickému skenování, jehož výstupem je prostorový STL model.

7.1 Vyhodnocení skenu

Vyhodnocení skenu spočívá ve stanovení odchylek mezi plochami skenovaného STL a nominálního CAD modelu. Výsledkem procesu skenování je ale model s velmi odlišnou polohou i natočením v prostoru. Před vyhodnocením je tedy provedeno určité překrytí, resp. vyrovnaní, obou modelů.

Pro vyhodnocení deformace samotné lepicí drážky je použito vyrovnaní metodou Local Best Fit. Tato metoda hledá nejlepší vzájemnou polohu obou modelů tak, aby rozměrové odchylky všech bodů vybrané oblasti byly minimální. Oblast pro toto vyrovnaní je vnitřní plocha lepicí drážky po celém obvodu pouzdra.

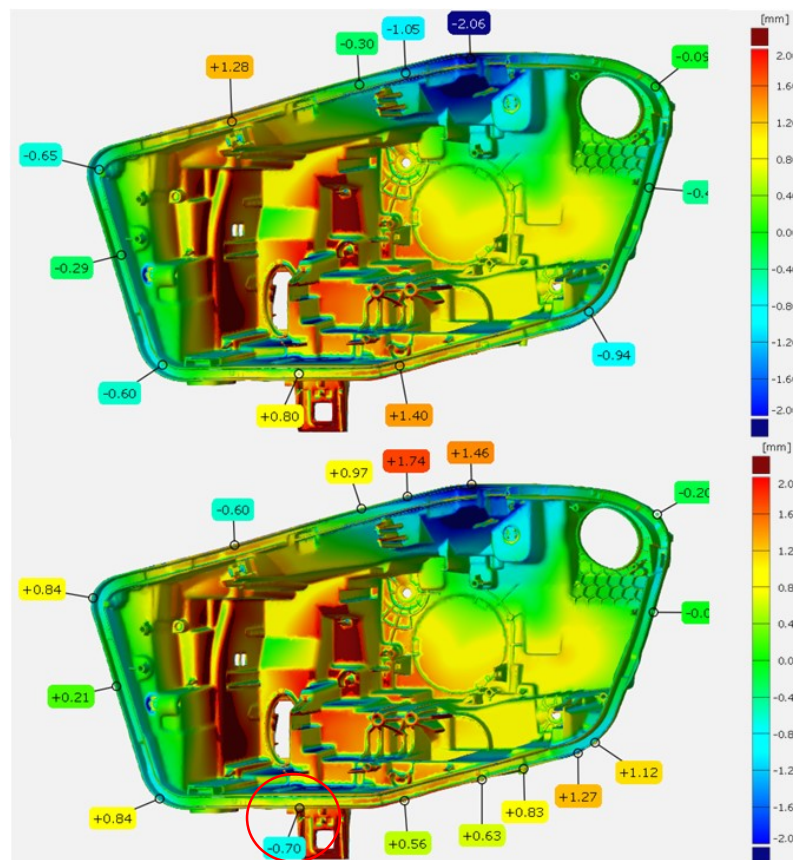


Obr. 35. Sken pouzdra A s vyhodnocením deformace lepicí drážky na dně drážky (nahore) a boku drážky (dole) v softwaru GOM Inspect

Vyrovnaní a vyhodnocení odchylek je provedeno v softwaru GOM Inspect. Jedná se o komerční inspekční systém pro analýzu 3D dat získaných ze skenerů a dalších zdrojů. Odchylka je zde vyhodnocena jako normálová vzdálenost bodů STL modelu k nejbližší ploše CAD modelu. Pole odchylek je tedy jen pole skalárních hodnot. Pro popis deformace lepící drážky je využito kolmosti dna a boku lepící drážky, díky čemuž lze každou oblast popsat ve dvou kolmých souřadnicích.

7.2 Vyhodnocení simulace

Takto získané odchylky nelze přímo porovnat s výsledky simulace deformace v softwaru Moldflow Insight. Moldflow využívá znalosti souřadnic všech uzlů před a po deformaci a jeho výstupem je vektorové pole posuvů o třech souřadnicích. Takto vyjádřená deformace není porovnatelná s použitou metodou měření. Liší se orientace jednotlivých souřadnic i hodnota vektoru.



Obr. 36. Výsledky simulace deformace pouzdra A s vyhodnocením deformace lepící drážky na dně drážky (nahore) a boku drážky (dole) v softwaru GOM Inspect

Pro přímé porovnání simulace s měřením je simulovaná deformace exportována z Moldflow ve formě STL modelu a dále zpracována v softwaru GOM Inspect, stejně jako STL model ze skenování. Před exportováním je v simulaci zohledněna hodnota kompenzace smrštění 0,7%, která byla použita pro výrobu tvarové dutiny formy.

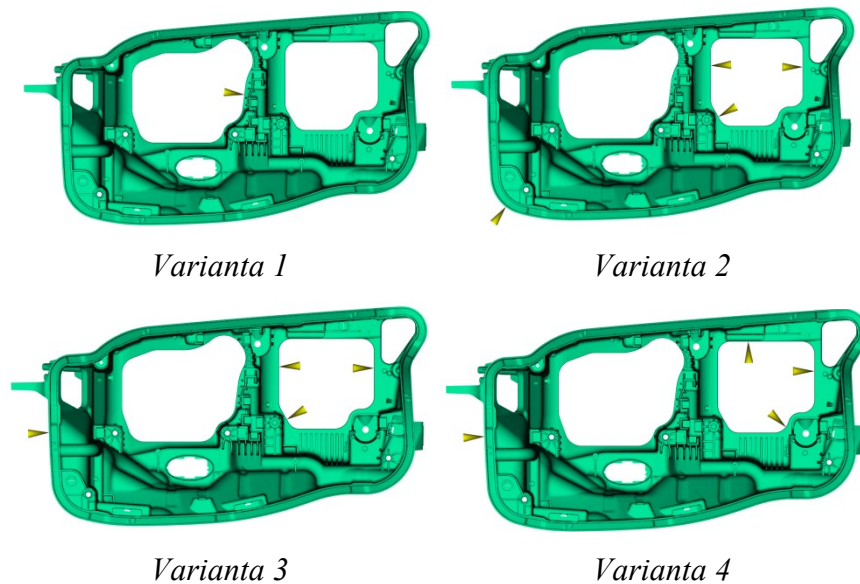
7.3 Vyhodnocení validace

Maximální absolutní odchylka simulace od měření je cca 1mm. Jde o červeně označenou oblast na boku lepící drážky (obr. 36. dole), kde simulace ukazuje -0,7mm a sken +0,29mm. Tato odchylka dosahuje 58% hodnoty nejvyšší měřené deformace, která činí 1,71mm (obr. 35. dole).

Na druhou stranu, validace potvrzuje totožnou tendenci všech oblastí lepící drážky s měřenou deformací nad 1mm. Toto je zásadní pro použitelnost zjednodušené simulace ve vývojové fázi konstrukce výrobku.

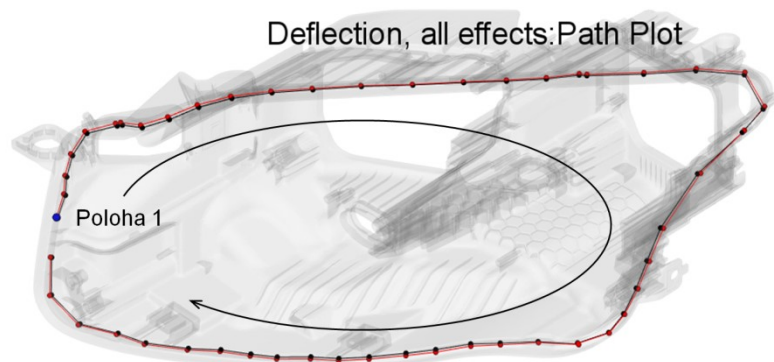
8 VOLBA POZICE VTOKU

Za účelem optimalizace deformace pouzdra B jsou zvoleny čtyři varianty umístění vtoků. Jejich simulace jsou založeny na identických vstřikovacích parametrech podle kap. 6. Vyhodnocení deformace lepící drážky je provedeno zjednodušeně pomocí absolutní hodnoty vektoru posuvu přímo v softwaru Moldflow Insight. Vyrovnání je opět použito typu Local Best Fit na lepící drážku.



Obr. 37. Varianty pozic vtoků

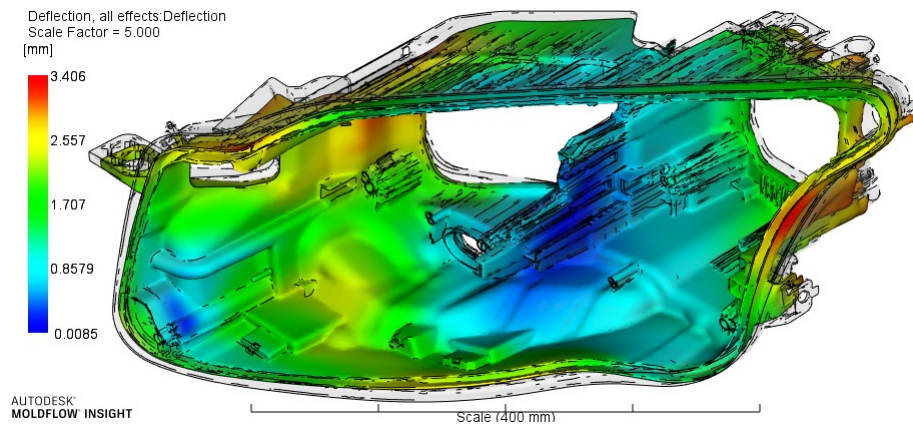
Jako pomocné vyhodnocení této deformace je zobrazen graf deformace podél drážky. Prvním bodem grafu je deformace v poloze 1 podle obr. 38. Následující body odpovídají polohám po obvodu celé drážky ve směru hodinových ručiček.



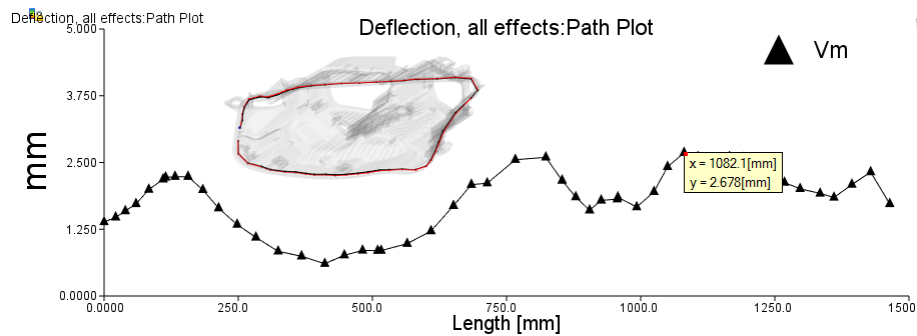
Obr. 38. Body pro vyhodnocení deformace podél drážky

8.1 Varianta 1

Simulace pouzdra B s jediným vtokem v přibližném geometrickém středu. Dosaženo plněního času 5,2s a tlaku při přepnutí na dotlak 99MPa.



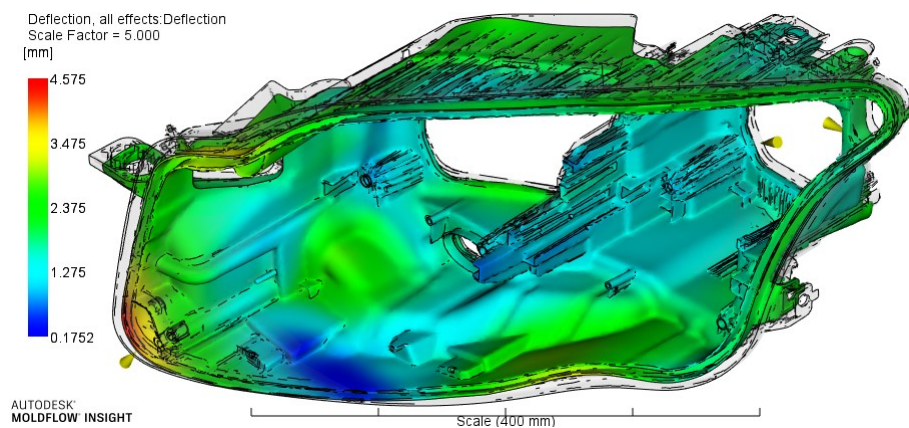
Obr. 39. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 1



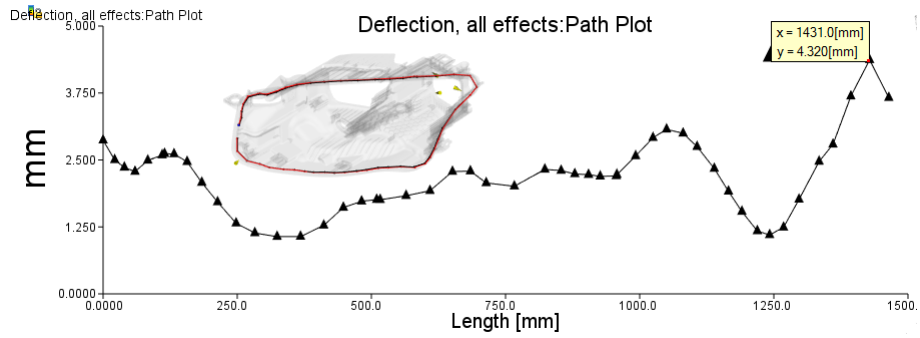
Obr. 40. Graf deformace drážky – varianta 1 (max. deformace 2,68mm)

8.2 Varianta 2

Simulace se čtyřmi vtoky ve dvou krajních oblastech. Dosaženo plněního času 4,8s a tlaku při přepnutí na dotlak 68MPa.



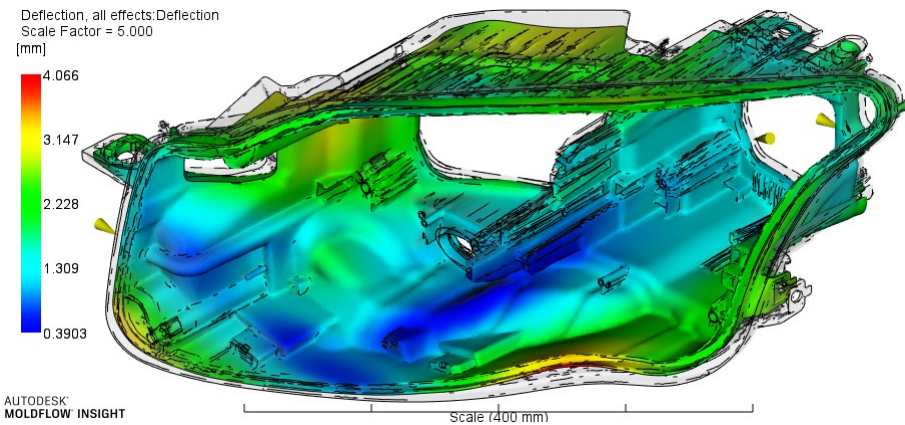
Obr. 41. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 2



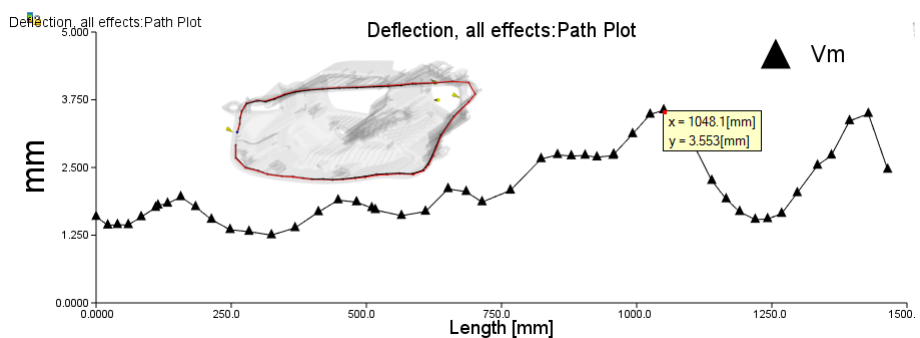
Obr. 42. Graf deformace drážky – varianta 2 (max. deformace 4,32mm)

8.3 Varianta 3

Vychází z varianty 2, levý vtok je posunut do středu svislé stěny. Dosaženo plnicího času 4,7s a tlaku při přepnutí na dotlak 64MPa.



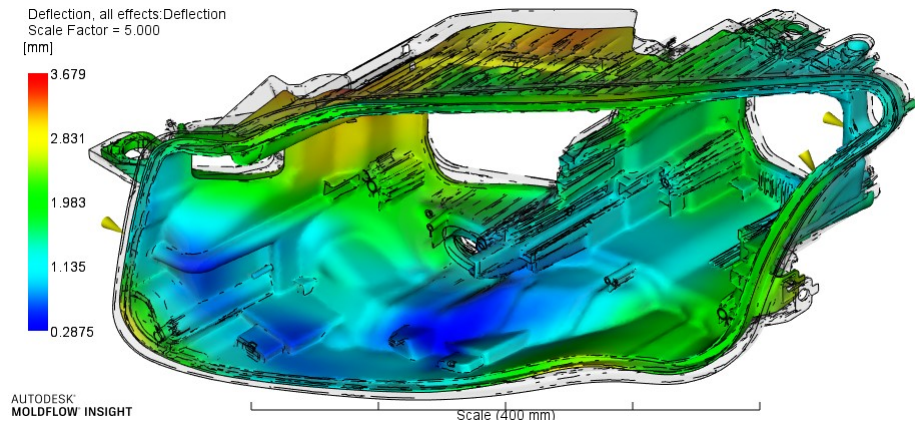
Obr. 43. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 3



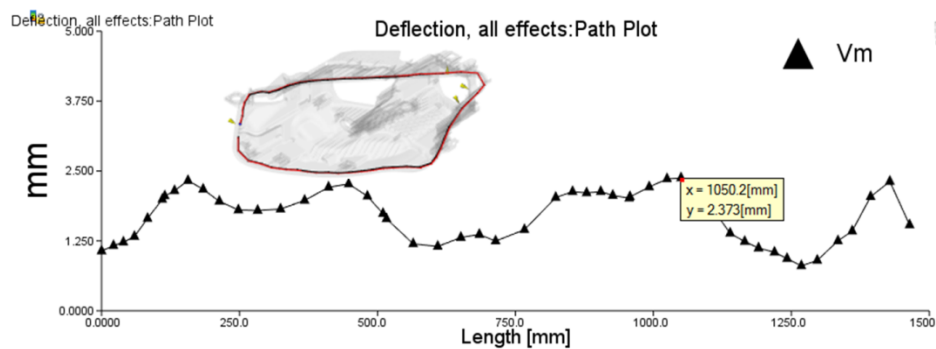
Obr. 44. Graf deformace drážky – varianta 3 (max. deformace 3,55mm)

8.4 Varianta 4

Vychází z varianty 3, pravé vtoky jsou více orientovány do pravého rohu pouzdra. Dosaženo plnicího času 4,7s a tlaku při přepnutí na dotlak 69MPa.



Obr. 45. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 4



Obr. 46. Graf deformace drážky – varianta 4 (max. deformace 2,37mm)

8.5 Zhodnocení

Konstrukčně nejjednodušší varianta 1 s jediným vtokem ve středu výrobku dosahuje příliš vysokého vstřikovacího tlaku 99MPa. Ostatní varianty 2 až 4 obsahují dvě vtokové oblasti, vždy se čtyřmi vtokovými ústí. Tyto varianty dosahují minimálně o 20MPa nižšího vstřikovacího tlaku.

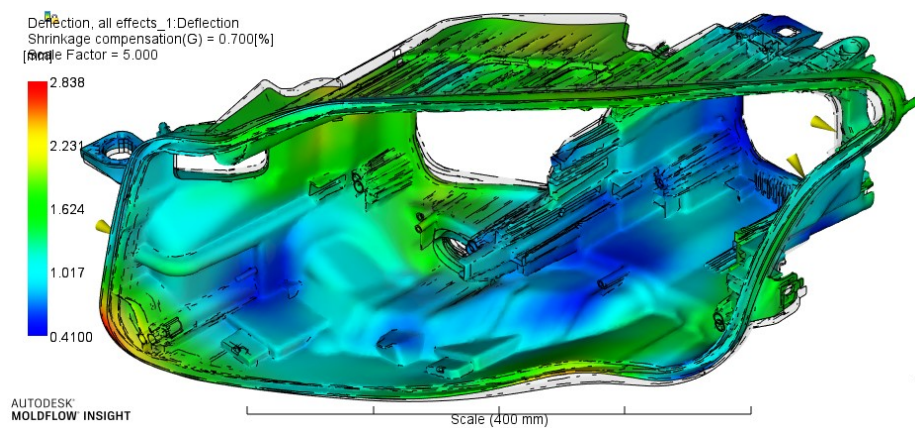
Z porovnání výsledků deformace jednotlivých variant vyplývá významný vliv konkrétního umístění vtoků. Např. varianta 4 dosahuje o 45% menší max. deformace než varianta 2. Z pohledu deformace lepící drážky je varianta 4 zároveň nejméně výhodnější simulovanou variantou umístění vtoků s dosaženou maximální deformací 2,37mm.

9 OPTIMALIZACE KOMPENZACE SMRŠTĚNÍ

Pro nalezení optimální hodnoty kompenzace smrštění s ohledem na deformaci lepicí drážky optimalizovaného pouzdra B je vybrána varianta vtoků s nejnižšími deformacemi – Varianta 4. Všechny následující výsledky deformací jsou založeny na této variantě a vždy vyrovnány na drážku. Pouze hodnota kompenzace smrštění bude měněna.

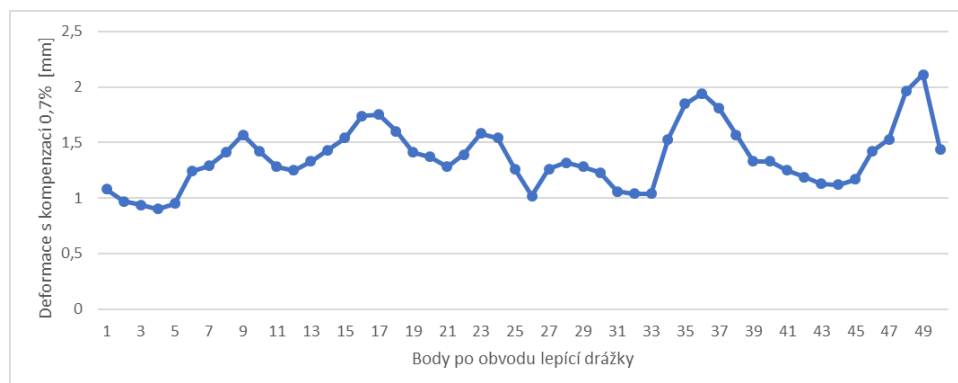
9.1 Střední hodnota smrštění

Střední hodnota smrštění použitého mat. Hostacom G3N01 je 0,7%. Tato hodnota byla použita pro výrobu validovaného pouzdra A a je také výchozí hodnotou pro optimalizaci.



Obr. 47. Deformace s kompenzací smrštění 0,7%

Graf deformace lepicí drážky zahrnující kompenzaci smrštění software Moldflow Insight 2019 neumožňuje, ale uzlové hodnoty lze exportovat do CSV souboru. Pro uvedenou simulaci jsou data exportována a dále zpracována v softwaru Microsoft Excel.

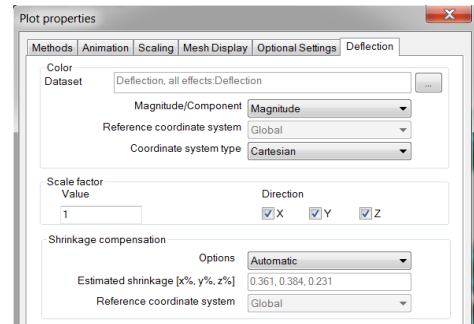


Obr. 48. Graf deformace drážky s kompenzací smrštění 0,7% (max.def. 2,11mm)

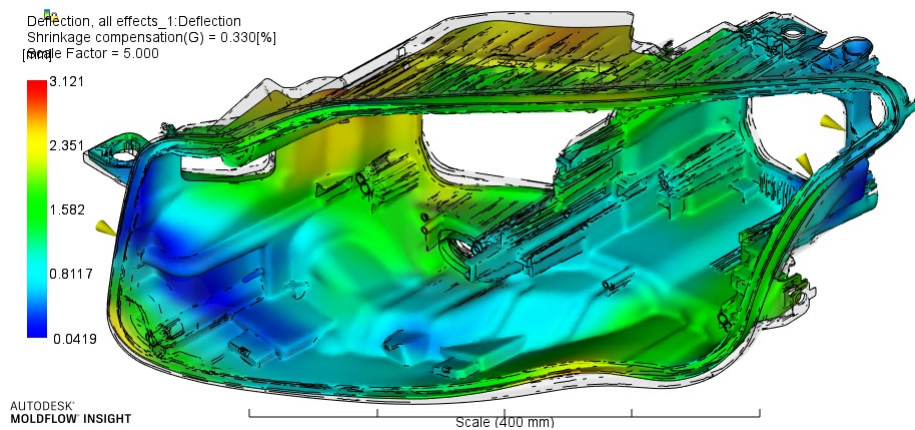
Použitím kompenzace se střední hodnotou materiálového smrštění došlo ke snížení maximální deformace lepicí drážky z 2,37mm (bez kompenzace, viz orb. 46) na 2,11mm.

9.2 Automatická kompenzace smrštění

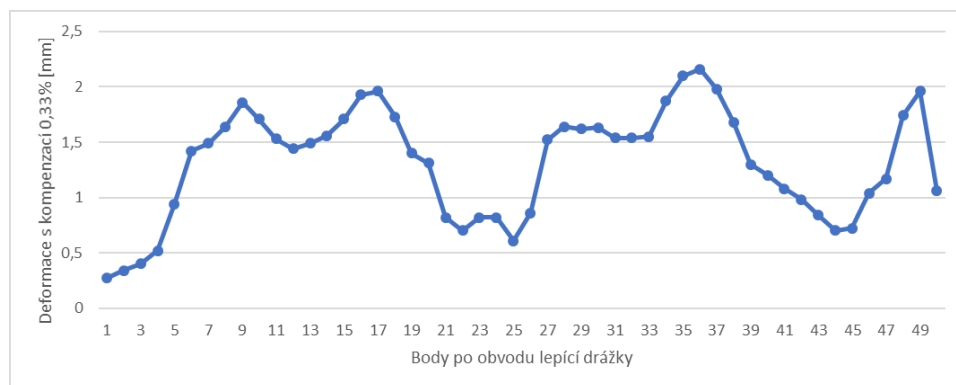
Software Moldflow Insight 2019 umožňuje automatický výpočet kompenzace smrštění. Tato kompenzace je anizotropní, vypsána ve třech směrech podle globálního souřadnicového systému. Střední hodnota automatické kompenzace smrštění pro zkoumané pouzdro je 0,33%.



Obr. 49. Automatická kompenzace smrštění v Moldflow Insight 2019



Obr. 50. Deformace s kompenzací smrštění 0,33%

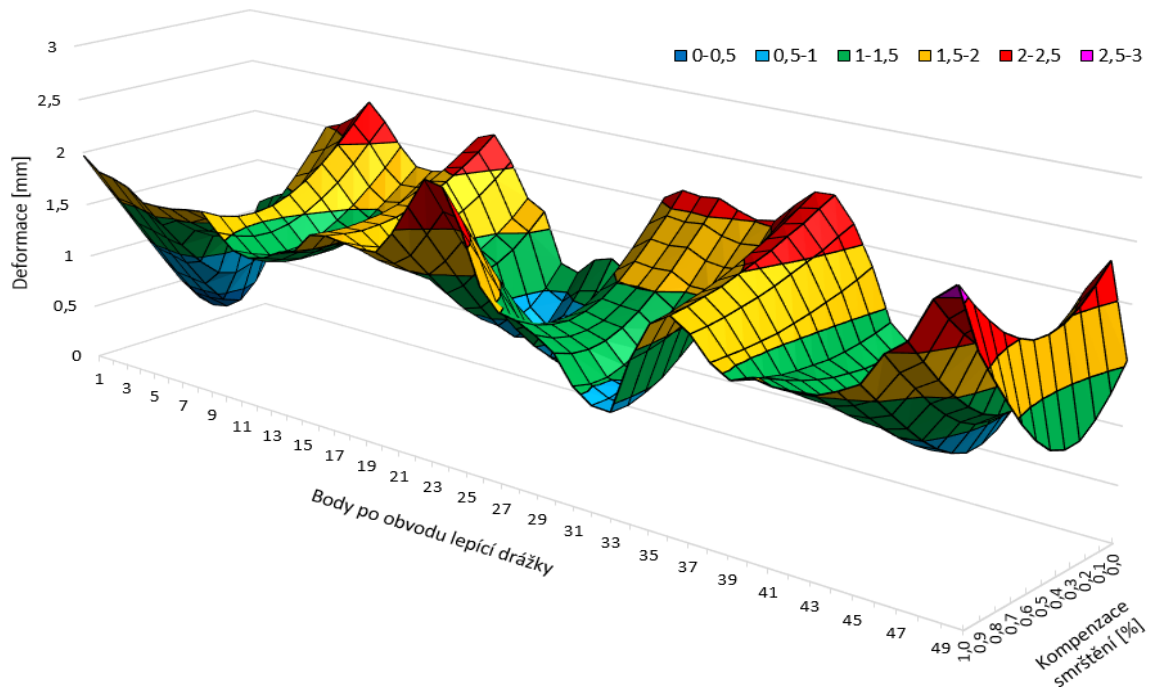


Obr. 51. Graf deformace drážky s kompenzací smrštění 0,33% (max.def. 2,16mm)

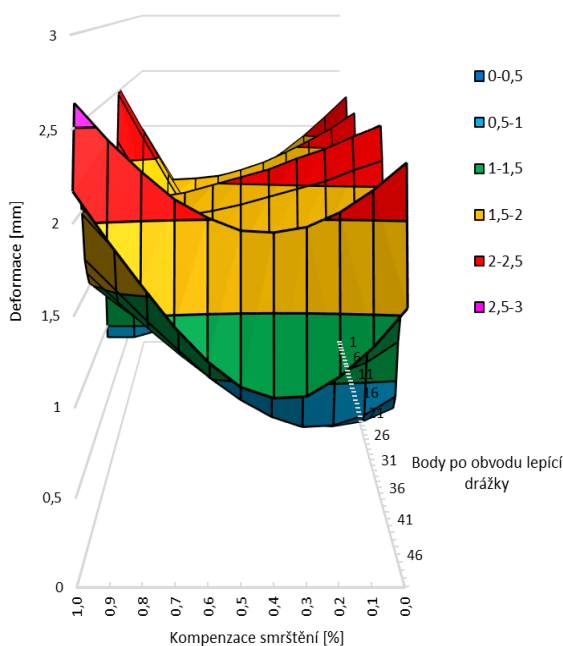
Simulace s automatickou kompenzací smrštění dosahuje oproti materiálové střední hodnotě o trochu vyšší deformace sledované oblasti. Důvodem je odlišný cíl automatické kompenzace, kterým je minimalizace průměrné deformace celého výrobku. Zatímco cílem optimalizace pouzdra je minimalizace nejvyšší dosažené deformace v lokální oblasti.

9.3 Optimální kompenzace smrštění

Za účelem nalezení optimální hodnoty kompenzace smrštění s ohledem na deformaci lepicí drážky je ze simulace v Moldflow Insight 2019 expotrováno 11 CSV souborů s různou hodnotou kompenzace smrštění od 0,0% do 1,0% s krokem 0,1%. Sloučením a zpracováním CSV dat v softwaru Microsoft Excel vznikl následující graf vlivu kompenzace smrštění na deformaci lepicí drážky.



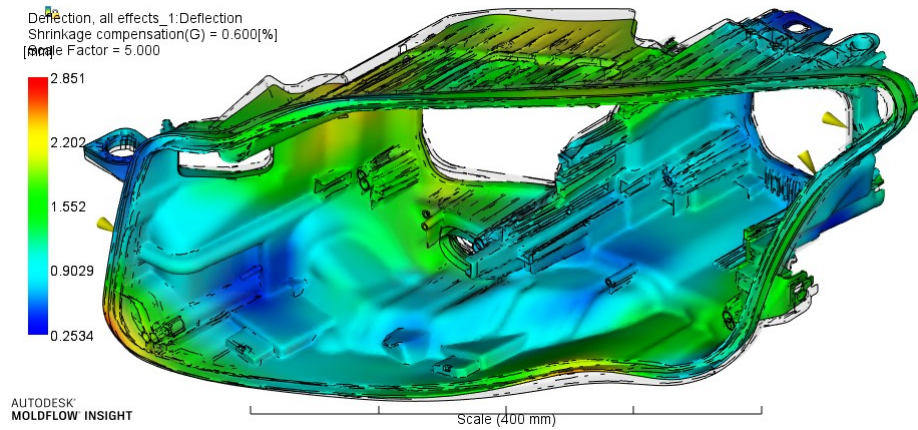
Obr. 52. Vliv kompenzace smrštění na deformaci drážky



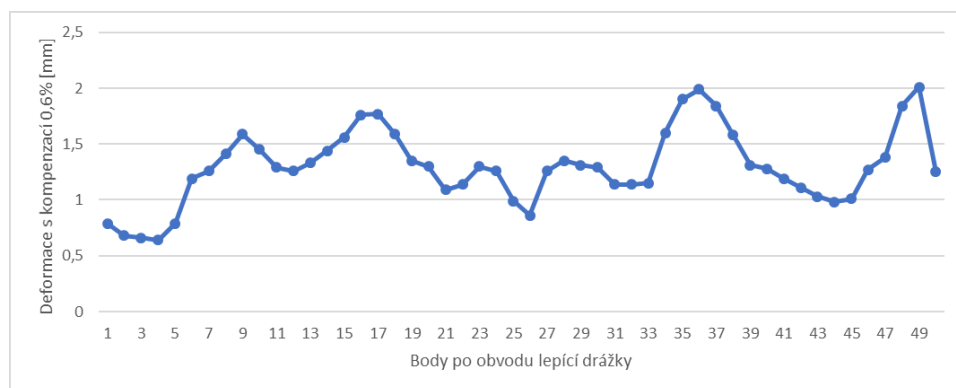
Obr. 53. Vliv kompenzace -pohled z boku

Optimální hodnota kompenzace smrštění je patrna z bočního pohledu na graf. Nejnižší maximální deformace zde nastává při kompenzaci 0,6%.

Při této kompenzaci nepřesahuje maximální deformace 2,0mm (červenou oblast grafu).



Obr. 54. Deformace s kompenzací smrštění 0,6%



Obr. 55. Graf deformace drážky s kompenzací smrštění 0,6% (max.def. 2,0mm)

Snížení maximální deformace při použití optimální kompenzace 0,6% oproti výchozí kompenzaci o střední hodnotu 0,7% tvoří jen 0,11mm. To je snížení deformace pouze o 5%. Výchozí hodnota kompenzace smrštění je tedy také dostatečná. Pro tento případ má optimalizace kompenzace smrštění velmi nízký vliv na deformaci drážky a vedle optimalizace umístění vtoků ji lze zanedbat.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Validace – jejím závěrem je potvrzení použitelnosti zjednodušené výpočetní metody pro následnou optimalizaci deformace, a to především díky shodě orientací deformace v oblastech s výraznějšími hodnotami (nad 1mm). Právě takové oblasti jsou předmětem následné optimalizace. Pokud by v těchto oblastech nesouhlasila orientace deformace, tak by případná optimalizace vedla spíše ke zhoršení skutečné kvality výrobku.

Tab. 5. Validace – extrémny deformací

Oblasti lepicí drážky s extrémními hodnotami deformací:	Deformace v měření [mm]	Deformace v simulaci [mm]	Absolutní chyba [mm]
max. změřená deformace	1,71	1,74	0,03
min. změřená deformace	-1,43	-2,06	0,63
max. absolutní chyba	0,29	-0,70	0,99

Největší chyba, resp. rozdíl deformace mezi simulací a měřením, je cca 1mm, a to v oblasti, kde se samotná hodnota deformace pohybuje v akceptovatelné úrovni pod 1mm. Vzhledem k použité metodě simulace, s mnoha chybějícími vstupy, jde o předpokládanou chybu. Naopak, spíše překvapivá, je výborná shoda simulace v oblasti s maximální měřenou deformací +1,71mm.

Překvapující je také vyšší deformace v simulaci oproti měření. Toto je v rozporu s osobními zkušenostmi se simulacemi podobných výrobků, kde simulované deformace zpravidla vychází mírně podhodnocené.

Samotný závěr této validace nelze nijak zobecňovat, protože obsahuje řadu nejistot. Nejde jen o zjednodušené či chybějící vstupy simulace, ale také o výběr vzorku výrobku pro měření. Skutečná deformace je ovlivněna vlastnostmi aktuální šarže vstříkovaného materiálu, schopnostmi vstříkovacího stroje udržet konstantní vstříkovací parametry, dobou mezi vystříknutím a měřením a mnoha dalšími vlivy.

Při opakování měření s použitím nového vzorku bude zcela jistě získáno odlišných výsledků. Z osobní zkušenosti se mohou dvě měření takto rozměrného výrobku vystříknutých s totožnými vstupními technologickými parametry, ale s odstupem několika výrobních směn a odlišnou šarží materiálu, lišit až o hodnotu srovnatelnou s uvedenou max. absolutní chybou (cca 1mm).

Optimalizace - je zaměřena na minimalizaci deformace obvodové lepicí drážky pouzdra pouze pomocí vhodného návrhu polohy vtoků a kompenzací smrštění ve vývojové fázi konstrukce výrobku. V této fázi lze deformace také minimalizovat optimalizací designu, změnou tloušťky stěn, jejich profilováním, rozložením konstrukčních žeber atd. Design ale musí splňovat řadu dalších požadavků na tuhost, omezený zástavbový prostor, funkci výrobku a cenu formy. Tyto požadavky mohou být v rozporu s požadavky na rozměrovou kvalitu a hledání jejich kompromisu je náročným úkolem.

Tab. 6. Optimalizace – souhrn variant simulací

Umístění vtoků	Počet vtokových oblastí	Max. vstřikovací tlak [MPa]	Kompenzace smrštění [%]	Max. deformace [mm]
Varianta 1	1	99	-	2,68
Varianta 2	2	68	-	4,32
Varianta 3	2	64	-	3,55
Varianta 4	2	69	-	2,37
			0,33	2,16
			0,60	2,01
			0,70	2,11

V prvním kroku hledání polohy vtoků byla vyloučena varianta s jedním vtokem z důvodu vysokého vstřikovacího tlaku. Vybalancováním toku taveniny by mohl být vstřikovací tlak dále snížen, ale na druhou stranu by tím bylo odstraněno široké zpracovatelské okno, které je nutné zachovat pro případnou optimalizaci procesních parametrů reálné výroby.

Ze zbývajících variant byla za nejvýhodnější označena varianta 4 s deformací bez kompenzace smrštění 2,37mm. Pro identifikaci vhodné polohy vtoků bylo ve výsledku použito jen tří variant s dvěma oblastmi vtoků. To lze považovat spíše za orientační analýzu citlivosti polohy vtoků na zkoumanou deformaci. Při vyšším počtu variant by velice pravděpodobně byly nalezeny výhodnější polohy.

Kritériem volby nejvhodnější varianty vtoků byla pouze max. deformace lepicí drážky, bez ohledu na polohu studených spojů, uzavírání vzduchu, teploty čela taveniny atd. Těmto kritériím se nebylo věnováno, i když by mohla vést k zamítnutí některých variant a přehodnocení nejvhodnější polohy vtoků. Detailnější analýza přesné polohy vtoků by měla být provedena ve fázi konstrukce vstřikovací formy.

Pro nejvýhodnější variantu vtoků č. 4 byla v posledním kroku identifikována nejvhodnější hodnota kompenzace smrštění. I zde byla kritériem pouze max. deformace lepící drážky, bez ohledu na deformaci zbytku pouzdra. Rizikem tohoto kritéria je možná optimalizace deformace lepící drážky na úkor růstu deformace zbytku pouzdra. Toto riziko by bylo vhodné také vyhodnotit a poté případně akceptovat.

Tab. 2 zobrazuje max. dosaženou deformaci drážky varianty 4 pro výsledky bez kompenzace, s automatickou kompenzací 0,33% (optimum dle sw Moldflow), s optimální kompenzací 0,6% (s min. deformací drážky) a doporučenou kompenzací 0,7% (dle materiálového listu). Deformace s optimální kompenzací klesly vůči výsledkům bez kompenzace o 0,36mm. To je překvapivě málo vzhledem k délce pouzdra 660mm. Navíc rozdíl mezi optimálním a doporučeným smrštěním je prakticky zanedbatelný a optimalizace zde nemá přidanou hodnotu.

Důvodem nízkého vlivu kompenzace smrštění na analyzovaná data může být fakt, že deformace byla vyhodnocena jako hodnota vektoru. Pokud by vlivem aplikace kompenzace smrštění docházelo ke snižování deformace v jednom směru a zároveň k růstu deformace ve směru kolmém (pouze změna orientace), změna hodnoty vektory by nebyla zaznamenána.

Přínos optimalizace – není vhodné vyhodnotit na základě optimalizace samotné, protože její úspěšnost by stála na zvoleném dostatečně neúspěšném výchozím stavu.

Přínos lze vyjádřit z porovnání nejúspěšnější varianty optimalizace proti simulaci použité pro validaci. Obě simulace jsou založeny na identicky zjednodušených vstupech a lze u nich předpokládat srovnatelnou chybu vůči realitě:

- Max. deformace validované simulace nastala v nejvyšší poloze lepící drážky (obr. 36). Deformace zde byla vyhodnocena ve dvou kolmých směrech s hodnotami -2,06mm na dně a +1,46mm na boku drážky. Celková deformace zde činí 2,52mm.
- Nejúspěšnější varianta optimalizace dosáhla max. celkové deformace 2,01mm.

Optimalizované pouzdro oproti validovanému dosáhlo o cca 20% nižší deformace.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byla optimalizace deformace plastového pouzdra světlometu pro osobní automobil využitím simulačního nástroje Autodesk Moldflow ve vývojové fázi konstrukce výrobku.

První, teoretická část práce je věnována polymerním materiálům, technologii vstřikování a vlastnostem smrštění. Důraz je kladen na vliv fází vstřikovacího cyklu na kvalitu výrobku a vztahu smrštění k výsledné deformaci.

Obsahem praktické části je představení základního rozměrového požadavku pouzdra a popis výpočtové metody k jeho simulaci. Použitá metoda je následně validována a použita k optimalizaci deformace.

Pro validaci je použito jiné pouzdro se srovnatelnou konstrukcí i technologií výroby, pro které je dostupné měření vzorku ze stabilizované sériové výroby. Validace odhaluje značnou chybu simulace při vyhodnocení absolutních rozdílů simulované a měřené deformace. Na druhou stranu potvrzuje totožnou tendenci oblastí s výraznější deformací. Tato tendence deformace splňuje nezbytnou podmínku pro aplikaci použité výpočetní metody k optimalizaci pouzdra.

Optimalizace deformace pouzdra je provedena identifikací nejvhodnější polohy vtoků a kompenzace smrštění s cílem minimalizace sledované deformace. Za účelem identifikace polohy vtoků byly sestaveny čtyři varianty simulací. Simulace s nejvýhodnějším umístěním vtoků byla dále podrobena optimalizaci kompenzace smrštění. Z výsledků optimalizace vyplývá vysoká citlivost deformace na poloze vtoků a naopak velmi nízká citlivost na kompenzaci smrštění.

Přínos optimalizace je rozebrán v diskuzi výsledků. V porovnání s validovanou simulací bylo dosaženo o cca 20% nižší maximální hodnoty sledované deformace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BĚHÁLEK, L. a kol. *Úvod do technologií zpracování plastů*. 1. vyd. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2019. 173 s. ISBN 978-80-7494-460-4
- [2] DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 1. vyd. (dotisk) VŠCHT Praha, Praha 2005. 354 s. ISBN 80-7080-241-3
- [3] LENFELD, P. *Technologie II. – 2. část (Zpracování plastů)*. 3. vyd. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2016. 140 s. ISBN 978-80-7494-305-8
- [4] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů, teorie a praxe*. 1. vyd. Grada Publishing a.s., Praha 2018. 464 s. ISBN 978-80-271-0614-1
- [5] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. [online] Code Creator s.r.o., 2016 [cit. 20.12.2019]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [6] BOBČÍK, L. *Formy pro zpracování plastů I. DÍL – Vstřikování termoplastů*. 2. upr. vyd. UNIPLAST BRNO, Brno 1999. 134 s.
- [7] EHERSTEIN, W. Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Scientia s.r.o., Praha 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [8] *PROSPECTOR: Datasheet Ultramid 8233G* [online]. [cit. 20.1.2020]. Dostupné z: <https://plastics.ulprospector.com/datasheet/e468/ultramid-8233g-hs>
- [9] LENFELD, P. *Technologie vstřikování*. [online] Code Creator s.r.o., 2016 [cit. 4.1.2020]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [10] KAGAN, A. Val a kol. *Optimizing Mechanical Performance of Injection Molded Multiple Gated Rotating Thermoplastic Components: Part 2 – Knit Line/Weld Inter-Phase Integrity*. [online]. [cit. 2.2.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/300701070_Optimizing_Mechanical_Performance_of_Injection_Molded_Multiple_Gated_Rotating_Thermoplastic_Components_Part_2_-_Knit_LineWeld_Inter-Phase_Integrity
- [11] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. [online] Code Creator s.r.o., 2016 [cit. 8.1.2020]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>

- [12] SEIDL, M. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. [online] Code Creator s.r.o., 2016 [cit. 12.1.2020]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Impresum.html>
- [13] ARGURG: *Selogica a Gestica - Průkopnické intuitivní ovládací technické vybavení*. [online]. [cit. 10.2.2020]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_selogica_523003_cz.pdf
- [14] ARBURG: *Simulace plnění - vstřikovací stroje Allrounder jsou ještě chytřejší*. [online]. [cit. 11.2.2020]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/simulace-plneni-vstrikovaci-stroje-allrounder-jsou-jeste-chytrejsi/c/5842/>
- [15] HYNEK, M. a kol. *Plastové díly – Studené a živé vtokové systémy* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: http://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf
- [16] HYNEK, M. a kol. *Plastové díly – Horké vtoky* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Horke_vtoky.pdf
- [17] BOBČÍK, L. *Formy pro zpracování plastů II. DÍL – Vstřikování termoplastů*. 1. upr. vyd. UNIPLAST BRNO, Brno 1999. 214 s.
- [18] SHOEMAKER, Jay. *Moldflow design guide*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006. 346 s. ISBN 978-3-446-40640-7
- [19] AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK: *Shrinkage vs Warpage*. [online]. [cit. 26.2.2020]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/MoldflowInsight-Results/files/GUID-113115C2-B633-40C0-835D-EA3781CEABD3-htm.html>
- [20] BASELL: *Datasheet Hostacom G3N01 102297*. Basell Service Company, 2007
- [21] SMARTPLAST: *Autodesk Moldflow Insight* [online]. [cit. 20.4.2020] Dostupné z: <http://www.smartplast.cz/sluzby/autodesk-moldflow-prodej-podpora-sw/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procento
°	Stupeň
°C	Stupeň Celsia
µm	Mikrometr
3D	Prostorový
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
atd.	A tak dále
CAD	Computer-aided design
cca	Cirka
cm	Centimetr
CSV	Comma-separated values
E	Modul pružnosti
EP	Epoxidová pryskyřice
fy.	Firma
g	Gram
GF	Glass fiber
HDPE	High-density polyethylene
hod	Hodina
IR	Izoprenový kaučuk
kap.	Kapitola
kg	Kilogram
LDPE	Low-density polyethylene
m	Metr
max.	Maximálně
mil.	Milión

min.	Minimálně
mm	Milimetr
mol	Látkového množství
MPa	Megapascal
např.	Například
NK	Přírodní kaučuk
obr.	Obrázek
PA	Polyamid
PBT	Polybutylen-tereftalát
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PF	Fenol-formaldehydová pryskyřice
Pi	Tlak v dutině formy
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylén
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
Ra	Drsnost
resp.	Respektive
S	Smrštění
s	Sekunda
SAN	Styrene-acrylonitrile
SBR	Butadien-styrenový kaučuk
STL	Stereolitografie
SVS	Studený vtokový systém

sw	Software
T	Teplota
t	Čas
tab.	Tabulka
Tg	Teplota skelného přechodu
tj.	To jest
Tm	Teplota tání
TPE	Termoplastické elastomery
tzv.	Tak zvaný
UP	Polyesterová pryskyřice
Vf	Délkový rozměr dutiny formy
vs.	Versus
Vv	Délkový rozměr výstřiku
VVS	Vyhřívaný vtokový systém

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Základní rozdělení polymerů</i>	11
<i>Obr. 2. Nadmolekulární struktura termoplastů [1]</i>	12
<i>Obr. 3. Oblasti využití amorfních a semikrystalických plastů [6]</i>	13
<i>Obr. 4. Krátká skelná vlákna PA6-GF33 a jejich orientace ve směru toku [10]</i>	15
<i>Obr. 5. Vstřikovací stroj [12]</i>	16
<i>Obr. 6. Schéma vstřikovací jednotky [12]</i>	17
<i>Obr. 7. Schéma hydraulické uzavírací jednotky [12]</i>	18
<i>Obr. 8. Obslužné rozhraní Gestica vstřikovacího stroje fy. Arburg [13]</i>	19
<i>Obr. 9. Schéma vstřikovacího cyklu [6]</i>	20
<i>Obr. 10. Fáze vstřikovacího cyklu [12]</i>	21
<i>Obr. 11. Vliv doby přepnutí na průběh tlaku v dutině formy [11]</i>	22
<i>Obr. 12. Dvoudesková vstřikovací forma [1]</i>	24
<i>Obr. 13. Schéma studené vtokové soustavy [15]</i>	25
<i>Obr. 14. Vtoková vložka [15]</i>	25
<i>Obr. 15. Příklady rozváděcích kanálů šesti a osmi násobných forem [15]</i>	26
<i>Obr. 16. Vyhovující průřezy rozváděcích kanálů [15]</i>	26
<i>Obr. 17. Základní typy vtokových ústí [15]</i>	27
<i>Obr. 18. Varianty filmových vtoků [15]</i>	28
<i>Obr. 19. Vyhříváná vtoková soustava [16]</i>	28
<i>Obr. 20. Odvzdušnění v dělicí rovině [11]</i>	30
<i>Obr. 21. Deformace desky [19]</i>	32
<i>Obr. 22. Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění [18]</i>	33
<i>Obr. 23. Vliv vstřikovací rychlosti a dotlaku na smrštění [18]</i>	33
<i>Obr. 24. Izolovaný vliv teploty taveniny a formy na výrobní smrštění [18]</i>	34
<i>Obr. 25. Vliv polohy vtoku na smrštění [9]</i>	34
<i>Obr. 26. Průběh plnění dutiny s vtokem na boku desky a ve středu desky [18]</i>	35
<i>Obr. 27. Geometrie pouzder</i>	38
<i>Obr. 28. Ukázka diskretizace s detailem vnitřní sítě ve stěně lepící drážky</i>	40
<i>Obr. 29. Pouzdro A, čas plnění tvarové dutiny – 3.3s</i>	41
<i>Obr. 30. Pouzdro A, tlak při přepnutí na dotlak – 63MPa</i>	41
<i>Obr. 31. Pouzdro A, deformace – max. 3,7mm</i>	41
<i>Obr. 32. Pouzdro B, čas plnění tvarové dutiny – 4.8s</i>	42

<i>Obr. 33. Pouzdro B, tlak při přepnutí na dotlak – 68MPa</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 34. Pouzdro B, deformace – max. 5,1mm</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 35. Sken pouzdra A s vyhodnocením deformace lepicí drážky v softwaru GOM Inspect</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 36. Výsledky simulace deformace pouzdra A s vyhodnocením deformace lepicí drážky v softwaru GOM Inspect</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 37. Varianty pozic vtoků</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 38. Body pro vyhodnocení deformace podél drážky</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 39. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 1</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 40. Graf deformace drážky – varianta 1 (max. deformace 2,68mm)</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 41. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 2</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 42. Graf deformace drážky – varianta 2 (max. deformace 4,32mm)</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 43. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 3</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 44. Graf deformace drážky – varianta 3 (max. deformace 3,55mm)</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 45. Deformace pouzdra s vyrovnáním na drážku – varianta 4</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 46. Graf deformace drážky – varianta 4 (max. deformace 2,37mm)</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 47. Deformace s kompenzací smrštění 0,7%</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 48. Graf deformace drážky s kompenzací smrštění 0,7% (max.def. 2,11mm)</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 49. Automatická kompenzace smrštění v Moldflow Insight 2019</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 50. Deformace s kompenzací smrštění 0,33%</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 51. Graf deformace drážky s kompenzací smrštění 0,33% (max.def. 2,16mm)</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 52. Vliv kompenzace smrštění na deformaci drážky</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 53. Vliv kompenzace -pohled z boku</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 54. Deformace s kompenzací smrštění 0,6%</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 55. Graf deformace drážky s kompenzací smrštění 0,6% (max.def. 2,0mm)</i>	<i>53</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Doporučené teploty vybraných termoplastů pro vstřikovací proces [11]</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 2. Doporučená šířka odvětrávacího kanálu [11]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3. Smrštění vybraných termoplastů [9]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4. Hostacom G3N01 - vybrané vlastnosti</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5. Validace – extrémní deformací</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6. Optimalizace – souhrn variant simulací</i>	<i>55</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I. CD disk obsahující bakalářskou práci v elektronické podobě