



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Vstřikování tlustostěnných dílů

Injection Molding of Thick-walled Parts

Autor: **Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.**

Studijní program: Procesní inženýrství (P0711D13000)

Studijní obor: Nástroje a procesy (P0788D270012)

Školitel: prof. Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
prof. Ing. Ivan Hudec, PhD.
prof. Ing. Pavel Mokrejš, Ph.D.

Zlín, únor 2024

ISBN 978-80-7678-243-3

© Jiří Vaněk

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2024.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací forma, procesní parametry, tlustostěnný výrobek, světlovod, optická čočka

Key words: injection molding, injection mold, process parameters, thick-walled part, light guide, optical lens

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ABSTRAKT

Technologie vstřikování patří v současné době k nejvyužívanějším procesům pro zpracování plastů. Vzhledem k řadě výhod vyplývajících ze samotného principu této metody, nachází své uplatnění zejména u hromadné a sériové výroby ve většině průmyslových odvětví. Nicméně, kvůli neustálému vývoji a rozšiřování produkce může být aplikovatelnost vstřikování stále částečně omezena právě požadovanými vlastnostmi vyráběných produktů. Zejména transparentní tlustostěnné díly nacházející své uplatnění v optickém průmyslu jsou obtížně vyrobitelné kvůli svému geometrickému charakteru. Jejich samotný konstrukční návrh totiž oponuje obecným koncepcím plastových dílů, které se standardně navrhují jako tenkostěnné, skořepinové. Z průmyslové praxe tak vyvstává celá řada otázek týkajících se jak konstrukce, tak samotné výroby kvalitních tlustostěnných komponentů. Účelem této práce je tedy studovat vliv vstupních aspektů, jako jsou zvolené procesní podmínky a parametry vstřikovací formy na výslednou kvalitu dílu. Získané poznatky pak mohou přispět k efektivnímu návrhu individuálních řešení tlustostěnných dílů a nástrojů pro jejich hospodárnou výrobu při minimalizaci vzniku vad.

Práce přináší významný přínos z hlediska použití simulačních softwarů za účelem predikce chování taveniny během vstřikování tlustostěnných dílů, což umožňuje detailní analýzu a identifikaci stěžejních faktorů ovlivňujících kvalitu vstřikovaných výrobků. Experimentální výzkum následně ověřuje simulační výsledky, přičemž kombinace těchto přístupů poskytuje komplexní pohled na celý výrobní proces vstřikování s ohledem na dosažitelné kvalitativní aspekty. Identifikace klíčových procesních parametrů vstřikovacího procesu, včetně vlivu geometrie vtokových ústí, efektivity dotlakové fáze a vhodné teploty taveniny, je dalším významným přínosem této práce. Výsledky simulací ukazují, že volba těchto parametrů má výrazný vliv na vlastnosti vstřikovaných dílů, což je zásadní pro průmyslová odvětví zaměřená na návrh a výrobu tlustostěnných optických komponentů. Na základě získaných poznatků lze konstatovat, že disertační práce poskytuje hlubší pochopení procesu vstřikování tlustostěnných optických dílů a přináší konkrétní výstupy, které jsou přenosné pro praxi i další výzkum. Výstupy práce mohou být využity při samotném konstrukčním návrhu, optimalizaci vstřikovacích forem a nastavování procesních parametrů s cílem dosáhnout efektivní produkce a kvalitních výrobků. V kontextu rostoucí poptávky po plastových komponentách s vyšší tloušťkou stěny je tato disertační práce významným příspěvkem k zdokonalení výrobního procesu a inovacím v oblasti vstřikování tlustostěnných optických komponentů.

ABSTRACT

Injection molding technology is currently one of the most used processes for plastics parts production. Due to a number of advantages resulting from the very principle of this method, it finds its application especially in mass and serial production in most industries. However, due to the continuous development and expansion of production, the applicability of injection molding may still be partially limited by the required properties of the products produced. In particular, transparent thick-walled parts used in the optical industry are difficult to produce due to their geometric character. In fact, their very design opposes the general concepts of plastic parts, which are normally designed as thin-walled, shell-like parts. This raises a number of questions in industrial practice concerning both the design and the actual manufacture of quality thick-walled components. The purpose of this thesis is therefore to study the effect of input aspects such as the chosen process parameters and injection mold design on the resulting part quality. The knowledge gained can then contribute to the effective design of individual solutions for thick-walled components and tooling for their cost-effective production while minimizing defects.

The dissertation makes a significant contribution in terms of the use of simulation software in order to predict the melt behavior during injection molding of thick-walled parts, allowing a detailed analysis and identification of the key factors affecting the quality of the injection molded products. Experimental research then verifies the simulation results, with the combination of these approaches providing a comprehensive view of the entire injection molding process with respect to the achievable quality aspects. The identification of key process parameters of the injection molding process, including the influence of the geometry of the gates, the efficiency of the packing pressure phase and the appropriate melt temperature, is another important contribution of this work. Simulation results show that the choice of these parameters has a significant impact on the properties of the injection molded parts, which is essential for industries focused on the design and manufacture of thick-walled optical components. Based on the findings, it can be concluded that the dissertation provides a deeper understanding of the injection molding process of thick-walled optical components and provides concrete outputs that are transferable to practice and further research. Its results can be used in the actual design, optimization of injection molds and adjustment of process parameters in order to achieve efficient production and quality parts. In the context of increasing demand for plastic products with higher wall thickness, this dissertation is an important contribution to the improvement of the production process and innovation in the field of injection molding of thick-walled optical components.

OBSAH

ÚVOD	6
SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	7
CÍLE PRÁCE	9
1. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	11
1.1 Příprava experimentů	11
1.2 Zkušební vzorky	12
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	13
2.1 Simulace vstřikování světlovodu.....	13
2.1.1 Deformace a propadliny	13
2.1.2 Shrnutí výsledků simulací světlovodu	14
2.1.3 Evaluace deformací	15
2.1.4 Shrnutí studie	16
2.2 Problematika vstřikování optických čoček	16
2.2.1 Propadliny	17
2.2.2 Shrnutí výsledků simulací	18
2.3 Reálné vstřikování optických čoček.....	19
2.4 Postup vyhodnocení hloubky propadliny	20
2.5 Návrh experimentů s využitím metodiky DOE.....	22
2.5.1 Shrnutí DOE.....	23
2.1 Statistické vyhodnocení experimentů.....	24
2.1.1 Vyhodnocení pro čočku o tloušťce 12,5 mm	25
2.1.2 Vyhodnocení pro čočku o tloušťce 16,5 mm	26
2.1.3 Vyhodnocení pro čočku o tloušťce 20,5 mm	28
2.1.4 Srovnání simulovaných a reálných hodnot z hlediska DOE.....	29
2.1.5 Shrnutí statistického vyhodnocení	31
3. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	34
4. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	37
5. ZÁVĚR	39
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	45
SEZNAM TABULEK.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	49
OBORNÝ ŽIVOTOPIS	50

ÚVOD

V současném průmyslovém prostředí, kde vstříkované díly představují klíčovou součást automobilového průmyslu a jiných odvětví, nabývá otázka tloušťky jejich stěn zásadního významu. Základní princip konstrukce tenkostěnných skořepin, preferující co nejrovnoměrnější tloušťku stěny, vychází z potřeby žádoucího a rovnoměrného toku taveniny při procesu vstříkovaní. Snaha o dosažení vhodného průběhu plnění dutiny formy a efektivní odvod tepla má za cíl minimalizovat rizika vzniku vad spojených s nestejným smrštěním materiálu.

V rámci širšího kontextu, kde se plastové komponenty stávají stěžejním prvkem v dopravních prostředcích, zejména v automobilovém průmyslu, se nyní kladou nové požadavky na konstrukci vstříkovaných dílů. Zvláště v oblasti optických dílů, například čoček a světlovodů, vzniká potřeba výroby s větší tloušťkou stěny, přičemž tato tloušťka přímo ovlivňuje požadované funkční vlastnosti výrobků. Vzhledem k rostoucí poptávce a náročnějším specifikacím, které se kladou na plastové komponenty, se otevírá prostor pro studii a inovaci procesu vstříkovaní tlustostěnných optických dílů. Tyto díly nyní zaujímají stěžejní pozici například v moderních sestavách světlometů, díky svým příznivým mechanickým vlastnostem, nízké hmotnosti, odolnosti vůči okolním vlivům a schopnosti realizace složitých designových návrhů.

S postupujícím vývojem produktů i výrobních technologií vyvstávají i náročnější požadavky v oblasti dosahování cílených funkčních i pohledových vlastností tlustostěnných výrobků. Nejenže geometrické nepřesnosti, zvlnění nebo drsnost povrchu mohou ohrozit optické vlastnosti, ale také vnitřní pnutí ve výrobku může ovlivnit prostup a rozptyl světla. Z tohoto důvodu se klade důraz na vysoký stupeň přesnosti v konstrukci formy, reprodukovatelnosti a čistotě výrobního prostředí. Volba procesních parametrů, stanovení tolerančních rozmezí a implementace pečlivého postupu kontroly kvality se stává klíčovým prvkem úspěšného výrobního procesu.

V kontextu této disertační práce byla pozornost věnována především studii procesu vstříkovaní tlustostěnných optických dílů z polykarbonátu. Jedná se o díly, jejichž geometrie nesouzní s obecnými zásadami návrhu vstříkovaných výrobků. Kvalitativní hodnoty výsledného produktu a efektivita výrobního procesu jsou těsně spjaty s konstrukčními atributy nástroje a procesními podmínkami vstříkovacího cyklu. Klíčovými parametry jsou teplotní charakteristiky taveniny, povrchu dutiny formy a průběh vstříkovacího tlaku a dotlaku. V tomto smyslu si disertační práce klade za cíl prostřednictvím simulací a reálného vstříkovaní detailně popsat a zhodnotit vliv jednotlivých aspektů výrobního procesu na kvalitativní atributy výsledného výrobku. Snahou je identifikovat optimální hodnoty procesních parametrů a jejich variací, které minimalizují rozměrové a estetické nedostatky při výrobě tlustostěnných optických dílů.

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Zásadní metodou pro zpracování plastů, která se neustále vyvíjí, je technologie vstřikování. Většina plastových výrobků se v současnosti vyrábí s použitím tohoto výrobního postupu, a to pro rozličná průmyslová odvětví. Přestože většina dílů vyrobených vstřikováním představuje tenkostěnné skořepiny, existují některé aplikace, kde je kvůli rostoucí poptávce nutné vyrábět díly s vyšší tloušťkou stěny. Existují speciální postupy vstřikování, jako jsou GIT, WIT nebo vstřikování s napěňováním. Tyto procesy však neumožňují zhotovovat optické díly s potřebnou průhledností a dalšími požadovanými vlastnostmi. Jelikož problematika výroby tlustostěnných dílů právě pomocí konvenční metody vstřikování byla doposud velmi málo studována, vyvstává mnoho nezodpovězených otázek směřujících k jejich účelné konstrukci a výrobě.

Někteří výzkumníci se již do jisté míry zabývali možnostmi výroby plastových součástí o silné tloušťce stěny. V publikacích [1-5] byly diskutovány postupy výroby tlustostěnných čoček a dalších optických komponentů s využitím metody vícevrstvého vstřikování. Jelikož tyto studie byly zaměřeny na speciální metodu vstřikování, získané výstupy nemusí být relevantní pro komplexnější či jinak geometricky odlišné výrobky, a tudíž by neměly být zobecňovány. Nicméně, u konkrétních výrobků bylo s využitím této metody dosaženo vysoké tvarové i rozměrové přesnosti, požadovaných optických vlastností i relativně krátkých výrobních časů. Je však třeba brát v potaz, že takto modifikovaný proces vyžaduje speciální vstřikovací stroj, specificky navrženou formu a složitě optimalizovatelné procesní parametry.

Studie [6] se zaměřuje na numerickou a experimentální analýzu konvenčního vstřikování tlustostěnného dílu. Obdobný proces byl popsán v publikaci [7], jejíž cílem bylo omezit vznik dutin vytvářejících se uvnitř zkušební vzorku s velkou tloušťkou stěny. V obou případech byla při výrobě zkušebních vzorků zvolena metoda vstřikování s dolisováním. Jedná se o postup vyžadující specificky navrženou vstřikovací formu a taktéž klade vysoké nároky na vstřikovací stroj. Obdržené znalosti tedy nejsou přímo aplikovatelné pro konvenční způsob vstřikování. Tato technologie a vliv procesních podmínek na výslednou kvalitu plastových čoček byla taktéž studována v článcích [8-14]. Proces vstřikování byl v uvedených publikacích také diskutován, ovšem pouze okrajově a s primárním zaměřením na zkoumání optických vlastností dílů než na samotný výrobní proces.

Kombinace výše zmíněných metod byla zkoumána v publikaci [15]. Zde byly testovány možnosti výroby trojúhelníkového optického elementu s využitím vícevrstvého vstřikování s následným dolisováním. Nejpriznivějších výsledků bylo dosaženo s dvěma vrstvami polymeru, kdy na každou vrstvu připadá jeden stlačující píst. Tento poměrně komplikovaný postup vedl k minimalizaci smrštění a dosažení požadovaných optických parametrů.

Další výzkum [16] je věnován studii možností výroby tlustostěnného netransparentního dílu pomocí konvenčního vstřikování. Cílem tohoto výzkumu

bylo prověřit vliv vybraných procesních podmínek na výslednou kvalitu výrobku. Mezi indikátory kvality byly stanoveny aspekty jako deformace, objemové smrštění či hloubka propadlin. Simulace vstřikování technických dílů o velké tloušťce stěny s ohledem na procesní parametry byly provedeny, vyhodnoceny a diskutovány v článcích [17-21]. Výstupy zmíněných studií by mohly vést ke zlepšení některých kvalitativních parametrů u obdobně koncipovaných výrobků, či zkrácení doby cyklu jejich výroby.

V rámci publikací [22, 23] byly realizovány výzkumy zahrnující problematiku návrhu konformního temperačního systému vstřikovací formy pro optický díl o významné tloušťce stěny. Byly navrženy a simulovány konformní chladičí kanály pro homogenizaci rozložení teplotního pole formy během procesu vstřikování. Vhodnou regulací teploty tvarových vložek formy bylo zamýšleno snížit deformace a vnitřní pnutí ve výrobku. Získané výsledky by mohly být přínosné při návrhu drah trajektorií temperačních kanálků u forem pro tlustostěnné výrobky s ohledem na vyšší kvalitu dílu.

Vliv vybraných procesních parametrů a tloušťky stěny vstřikované součásti na smrštění byl analyzován pomocí metody RSM (Response Surface Methodology) v publikacích [24, 25]. Získané výsledky ukázaly, že zvýšení teploty polymerní taveniny vedlo k intenzivnějšímu účinku smrštění. Dále bylo zjištěno, že změna parametrů jako je teplota formy, vstřikovací tlak, doba dotlaku a doba chlazení, ovlivnila míru smrštění pouze v omezené míře. Získané poznatky tedy mohou přispět k efektivnějšímu nastavení procesních podmínek při vstřikování součástí s větší tloušťkou stěny. Dále pak, výsledky publikované ve studiích [26-30], které rovněž souvisejí s procedurou RSM, naznačují, že by daná metodologie mohla být přínosná pro rozsáhlejší optimalizaci procesních parametrů vedoucí k redukci vad a zefektivnění výrobního procesu.

Optimalizace procesních podmínek vstřikování optických čoček s využitím výpočtového postupu GRA (Grey Relational Analysis) byla realizována a vyhodnocena v publikacích [31-34]. Tyto se zabývaly identifikací optimálních parametrů výrobního procesu s cílem minimalizovat deformace a residuální napětí ve výrobku. Zkoumány byly taktéž optické vlastnosti čoček, jako jsou rozdíly v indexech světelného lomu, interferenční obrazce či světelná propustnost. Obdobnou problematikou využívající různé numerické metody k dosažení požadovaných optických charakteristik čoček se zabíraly i studie [35, 36]. Získané hodnoty jednotlivých procesních parametrů byly ve výše zmíněných studiích verifikovány pomocí simulací, kdy jejich výsledky potvrzují, že dané způsoby optimalizace přinášejí zlepšení kvality vstřikovaných čoček a přispívají k jejich efektivní produkci.

Vliv konstrukčních aspektů vtokového systému formy, konkrétně vtokového ústí, a jeho geometrie na průběh plnění tvarové dutiny byl diskutován v publikaci [37]. Cílem bylo optimalizovat design vtokového ústí tak, aby došlo k redukci průměrné zbytkové napjatosti, která negativně ovlivňuje optické parametry vyráběného dílu, zejména z hlediska refrakčního indexu a interferenčního vzoru.

Návrh geometrie vtoku byl podpořen a ověřen simulacemi v softwaru Moldex 3D. Presentované poznatky mohou vést k efektivní konstrukci vtokových ústí tak, aby vlivem plnění dutiny formy a dotlakové fáze nebyly do výrobku zanášeny nadměrné hodnoty zbytkového napětí.

S cílem dosáhnout vyšší kvality vstřikovaných čoček byla v studii [38] navržena technika, jejímž účelem je hledat optimální podmínky pro zachování požadovaného povrchového profilu optických čoček. Po provedení CAE simulací byly predikovány optimální parametry vstřikování pomocí programu využívajícího neuronové sítě, který je založen na vstupních datech získaných ze simulace. K prokázání účinnosti této metody byla provedena série experimentů při vybraných podmínkách a obdržené hodnoty byly porovnány s výstupy předpovězenými neuronovou sítí. Výsledky predikce změny tloušťky a míry zkreslení profilu čočky solidně korespondovaly s experimentálními daty a bylo tak prokázáno, že navržená technika může nalézt uplatnění při výrobě přesných optických čoček.

Inovativní metoda vstřikování konkávní plastové čočky do dutiny formy tvořené tvarovými vložkami z oxidu křemičitého povlakovaného grafenem byla demonstrována v článku [39]. Zejména díky příznivým povrchovým vlastnostem použitých nekonvenčních materiálů bylo dosaženo nižších hodnot zbytkového napětí a rovnoměrnějšího rozložení indexu lomu světla, než u dutin zhotovených z běžně používaných ocelí či hliníkových slitin. Obdržené poznatky byly podpořeny a validovány CAE simulací realizovanou v softwaru Moldex 3D. Zkoumaná modifikace vstřikovací formy by tedy mohla přispět k dosažení precizních optických vlastností plastových čoček i jiných optických komponentů.

Pro zkrácení doby vývoje a výroby rozměrných asférických plastových čoček i jinak geometricky tvarovaných výrobků byly provedeny experimenty a publikovány články [40-42]. Podstata prezentovaných studií spočívá v použití skutečné velikosti smrštění a deformace, která byla zjištěna po počátečním vstřikování a následně aplikována jako referenční hodnota pro upravení geometrie tvarových vložek. Takový přístup nastiňuje možné konstrukční řešení spočívající v úpravě tvárníku a tvárnice s cílem minimalizovat deformace dílu a zajistit tak efektivní a přesnou výrobu plastových čoček o požadovaných vlastnostech. V rámci studií byla zmíněna také možnost kondicionování vstřikovaných optických výrobků s cílem dosáhnout vyššího stupně optické homogenity tím, že se sníží úroveň residuální napjatosti.

CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce byla studie procesu konvenčního vstřikování tlustostěnných optických dílů z polykarbonátu, jejichž geometrie oponuje obecným zásadám návrhu vstřikovaných výrobků. Kvalitativní kritéria výsledného produktu i efektivita jeho výroby se do značné míry odvíjí od konstrukčních atributů nástroje a procesních podmínek jednotlivých fází vstřikovacího cyklu. Zejména teplotní charakteristiky taveniny a povrchu dutiny formy spolu s průběhem vstřikovacího tlaku a dotlaku představují klíčové parametry procesu. Chování polymerní taveniny uvnitř formy je z hlediska její konstrukce převážně udáváno i definicí vtokového systému, zejména pak geometrií ústí vtoku. Zmíněné aspekty tedy mohou přímo ovlivňovat rozměrovou a tvarovou stabilitu tlustostěnných výrobků včetně jejich optických vlastností. Smyslem práce tedy bylo popsat vyvstávající děje, jež vznikají jak v rámci simulačního prostředí, tak při skutečném vstřikování a vyhodnotit jejich dopad na kvalitativní parametry výsledného výrobku. Dále bylo snahou nalézt takové hodnoty procesních parametrů a jejich variace, aby při výrobě nedocházelo k významným rozměrovým i pohledovým nedostatkům.

Cíle práce spolu s úkony vedoucími k jejich dosažení lze shrnout následovně:

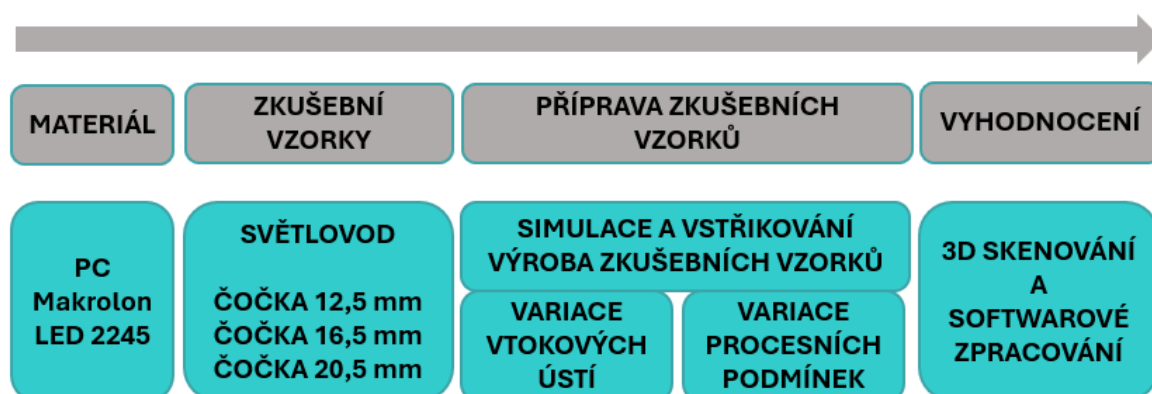
1. Příprava a provedení simulací výrobního procesu tlustostěnného světlovodu, jehož konstrukce vyplývá z automobilového průmyslu s následnou verifikací obdržených výsledků pomocí reálného vstřikování.
2. Navržení testovacích tlustostěnných vzorků (čoček) optického charakteru a zhotovení experimentální vstřikovací formy pro jejich výrobu s ohledem na posouzení vlivu vybraných geometrií vtokových ústí na průběh plnění dutiny formy taveninou a vyhodnocení jevů s tím souvisejících.
3. Provedení a vyhodnocení softwarových simulací vstřikování s cílem identifikovat vznikající vady a tyto porovnat se skutečnými defekty, které vznikají při reálném vstřikování zkušebních vzorků.
4. Studie a popsání vlivu procesních podmínek na kvalitu tlustostěnných optických dílů z hlediska tvarů a rozměrů s ohledem na četnost a intenzitu vznikajících vad.
5. Aplikace reverzního inženýrství pro porovnání tvaru povrchu vyrobených vzorků s referenčními CAD modely a následné softwarové zpracování zjištěných odchylek.
6. Vyhodnocení získaných poznatků a naměřených výsledků s využitím vhodných statistických postupů včetně jejich interpretace.

1. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Návrh experimentu spolu s jeho realizací byl koncipován tak, aby odpovídal požadavkům pro výrobu tlustostěnných optických dílů vystávajících z průmyslové praxe. Konstrukční návrhy testovacích vzorků i vstřikovacích forem byly podpořeny softwarovými simulacemi, jejichž studie a interpretace byla nezbytná, vzhledem ke geometrii zkušebních vzorků, která oponuje obecným zásadám jejich konstrukce. Na základě obdržných výsledků pak bylo možné získat konkrétnější představu o dějích probíhajících v procesu výrobního cyklu ve formě a stanovit okrajové podmínky pro následnou definici technologických parametrů vstřikování zkušebních vzorků. Geometrické charakteristiky těchto vzorků byly poté srovnávány s požadovanými geometriemi CAD modelů, což bylo realizováno s využitím principů reverzního inženýrství a následného statistického zpracování obdržných dat.

1.1 Příprava experimentů

Postup přípravy a provádění experimentů se odvíjel od charakteru zkušebních vzorků, které lze rozdělit do dvou skupin, a to na experimentální a praktické. Experimentální vzorky byly navrženy čistě pro účely výzkumu, kdežto vzorky praktické (funkční) vyplývaly přímo z konkrétního požadavku automobilového průmyslu. Schématický plán experimentu je uveden na obrázku 2.1.



Obr. 1.1: Postup realizace experimentů

Vliv geometrie vtokového ústí a procesních parametrů na kvalitu vzorku byl zkoumán s cílem minimalizovat výskyt vad a snížit rozměrové i tvarové nestability. Aby byl konkrétní vliv jednotlivých procesních podmínek a jejich kombinací na kvalitu vzorku vyhodnocen, byla použita statistická metoda Design of Experiment (DOE). Před aplikací DOE proběhlo úvodní vstřikování vzorků k určení rozsahů nastavovaných procesních parametrů bez vzniku zjevných vad nesouvisejících s geometrickou stálostí.

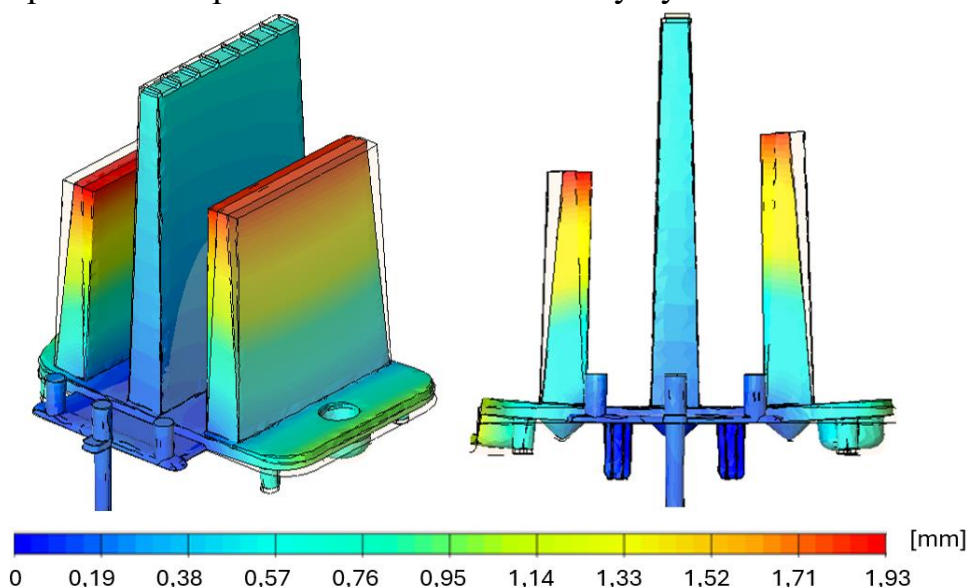
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Simulace vstřikování světlovodu

Stěžejní fází experimentu představovalo vyhodnocení samotného procesu vstřikování prostřednictvím simulací provedených v softwaru Autodesk Moldflow a Simcon Cadmould. Konkrétně byly provedeny analýzy toku polymerní taveniny, působení dotlakové fáze, průběhu chlazení a míry vznikajících deformací. Tato sekvence umožnila sledovat a evaluovat jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu a charakterizovat tak celou řadu vad a nežádoucích jevů včetně jejich možných příčin. Dále bylo možné zjistit, jakým způsobem geometrie vtokového systému, zejména vtokového ústí, ovlivňuje průběh plnění tvarové dutiny formy a následný vznik deformací a vad. Na základě průběžných výsledků tedy byly identifikovány ty aspekty výrobního procesu, jejichž hodnoty do značné míry určovaly kvalitu vstřikovaných vzorků.

2.1.1 Deformace a propadliny

V rámci této analýzy byla vyhodnocena velikost celkových deformací ve všech směrech způsobených rozdílnou velikostí smrštění a odlišnou intenzitou chlazení. Výsledky jsou zobrazeny pomocí barevné škály, kde jsou červeně označeny nejvíce zdeformované oblasti na výrobku, modře místa zdeformovaná nejméně. Velikost deformace lze také porovnat s obrysem nezdeformovaného referenčního CAD modelu výrobku. Největší podíl deformace způsobuje nerovnoměrně rozložené teplotní pole tvarové dutiny formy a rozdílné velikosti smrštění polymeru způsobené nepravidelnou tloušťkou stěny výrobku.



Obr. 2.1: Deformace vznikající při vstřikování filmovým vtokem (Cadmould)

Z vizualizace na obrázku 3.1 je patrné, že se deformace projevují především vychýlením postranních žebër směrem k žebër středovému. V oblasti optického desénu na povrchu volných konců těchto žebër dosahuje globální deformace

maximální hodnoty 1,8 mm. Tato deformace by mohla negativně ovlivnit požadované optické vlastnosti výrobku z hlediska rovnoměrnosti světelné distribuce a zkreslení či lomu prostupujícího světla. Také by došlo k ovlivnění požadovaného designu výrobku, který by se očividně odlišoval a neplnil by tak danou estetickou funkci. Montážní základna dílu se vůči referenčnímu modelu prohýbá ve směru deformace postranních žeber o hodnotu 0,9 mm. To by mohlo zapříčinit komplikace při montáži nebo i znemožnit usazení tohoto komponentu k dalším prvkům sestavy světlometu.

Dále byla provedena simulace rozložení a hloubky propadlin, tedy lokálního smrštění tloušťky, ke kterému dochází v oblastech velké kumulace materiálu, což způsobuje rozdílné objemové smrštění. K tomu přispívá také nerovnoměrné ochlazování taveniny. Tyto nehomogenity se poté projeví jako tvarové a rozměrové odchylky, které v nejtlustších částech optických žeber nabývají maximálních hodnot 0,44 mm při uvažování filmového vtokového ústí.

2.1.2 Shrnutí výsledků simulací světlovodu

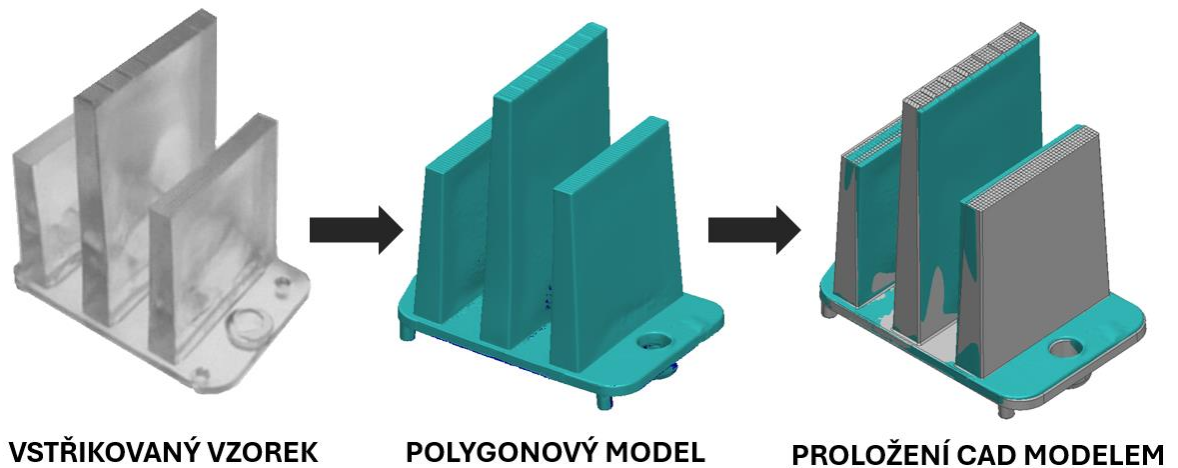
Simulace vstřikování tlustostěnného optického světlovodu byly provedeny pro dvě varianty vtokového ústí při konstantních procesních podmínkách, jejichž hodnoty vycházely z doporučených údajů ať už z materiálových dat nebo z parametrů navržených simulačním softwarem. Účelem bylo vizualizovat a identifikovat kritické aspekty vyvstávající při plnění a chlazení dílu s následným posouzením kvality výrobku z hlediska jeho tvarové a rozměrové stability (tabulka 2.1). Deformace byly navíc vyhodnoceny s využitím dvou simulačních softwarů, aby bylo možné porovnat, který výpočet se více blíží rozměrům reálně vstřikovaných výrobků. Celkově lze shrnout, že výsledky u simulací s využitím filmového vtoku se jeví z hlediska zkoumaných aspektů jako příznivější. Průběh plnění je rovnoměrnější, výskyt studených spojů ztelně menší, dotlak působí účinněji delší dobu i smykové napětí a smyková rychlost nabývá menších hodnot. Výsledky u filmového vtoku by mohly být ještě příznivější, pokud by byl jeho průtočný průřez zvětšen například navýšením tloušťky na 1,5 nebo 2 mm.

Tabulka 2.1: Shrnutí výsledků ze simulací (světlovod)

ZKOUMANÝ PARAMETR	FILMOVÝ VTOK	TŘÍBODOVÝ VTOK	JEDNOTKA
Čas zaplnění	5,2	6,8	s
Výskyt studených spojů	nepatrný	značný	-
Doba efekt. působení dotlaku	3,5	2,7	s
Smyková rychlost	12 533	14 091	s ⁻¹
Smykové napětí	0,71	1,10	MPa
Max. deformace (Moldflow)	1,80	2,12	mm
Max. deformace (Cadmould)	1,93	2,36	mm
Max. hl. propadlin (Cadmould)	0,44	0,52	mm

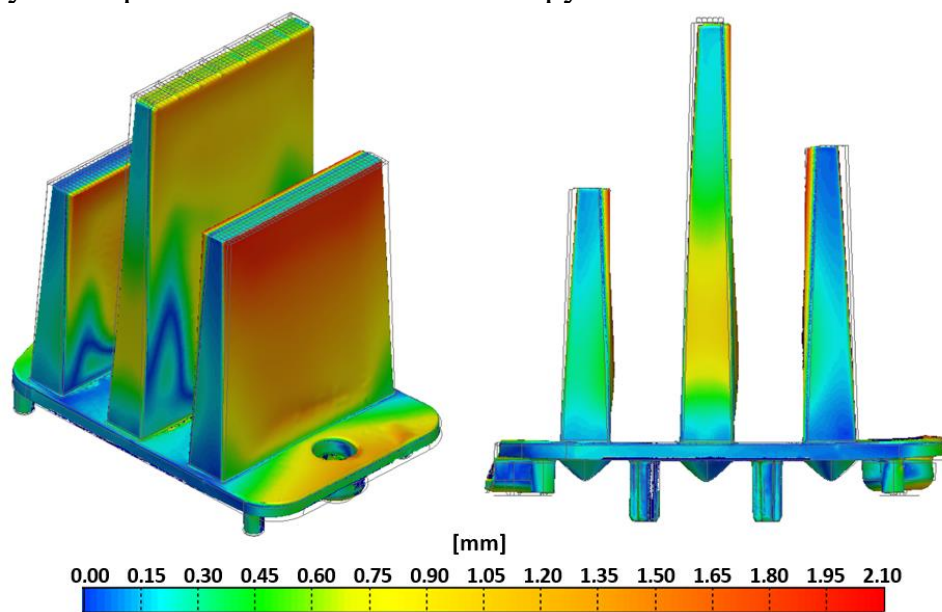
2.1.3 Evaluace deformací

Jak již bylo zmíněno, jeden z možných postupů pro orientační srovnání výsledků velikosti a charakteru deformací obdržných ze simulací s parametry reálně vystřikovaného dílu představuje postup využívající principy trojrozměrného skenování. Snímání povrchu vyrobeného vzorku laserovým 3D skenerem, následné zpracování získaných dat a jejich srovnání s geometrií referenčního CAD modelu se jeví jako aplikovatelný postup.



Obr. 2.2: Postup srovnání ideální a skutečné geometrie

S využitím laserového 3D skeneru Nikon MCAx30 PLUS byl snímán povrch výrobku, což umožnilo přenést danou geometrii do prostředí softwaru Polyworks, který byl použit pro zpracování těchto dat do podoby vysítovaného polygonového modelu. Ten je pak možné s využitím prokládacích funkcí srovnat s požadovanou geometrií CAD modelu. Na obrázku 3.4 je znázorněn postup, který byl aplikován s cílem vyhodnotit míru odchylek a provést celkové posouzení rozměrové stability výrobku pomocí názorné barevné mapy.



Obr. 2.3: Barevná mapa vyjadřující odchylky výrobku od CAD modelu

Modře zbarvené oblasti na vizualizaci (obrázek 3.5) představují nejmenší odchylky vstřikovaného dílu od ideálního modelu, červeně jsou pak zvýrazněny odklony největší, přičemž maximum dosahuje hodnoty 2,10 mm a vyskytuje se na volných koncích optických žeber. Ta se deformují podobným způsobem, jako predikovaly výsledky provedených simulací. Maximální deformace vypočtené pomocí Moldflow vykazovaly 1,80 mm a pomocí Cadmould 1,93 mm, což se více blíží reálným rozměrům. Skutečnost, že vypočtené deformace jsou nižší než reálné lze vysvětlit tím, že simulace uvažují ideální a konstantní podmínky, které jsou jinak nedosažitelné. I přesto lze konstatovat, že výsledky simulací do značné míry odpovídají velikosti i směru deformace vstřikovaného dílu.

2.1.4 Shrnutí studie

Provedená studie poskytla cenné informace z hlediska procesu vstřikování tlustostěnného optického dílu, jehož geometrie vyvstává z průmyslové praxe. S využitím simulačních softwarů bylo možné analyzovat děje, které probíhají uvnitř vstřikovací formy během výrobního cyklu a identifikovat tak kritické aspekty procesu, které by mohly nepříznivě ovlivňovat kvalitu výrobku. Provedly se tedy analýzy procesu toku polymerní taveniny, zahrnující dotlakovou fázi, chlazení a vznikající deformace i propadliny. Jelikož simulace byly realizovány pro dva typy vtokového ústí, konkrétně filmové a třibodové, bylo tak možné posoudit, která geometrie vtoku je vhodnější pro vstřikování optického dílu tlustostěnného charakteru z pohledu stability procesu, rozměrů výrobku i vzniku pohledových vad. Bylo zjištěno, že filmové vtokové ústí se pro tento díl ve většině sledovaných faktorech jeví jako vhodnější varianta. Dále byl ověřen způsob vyhodnocování rozměrových a tvarových odchylek pomocí principů reverzního inženýrství. Laserové trojrozměrné skenování výrobku s následným softwarovým zpracováním a vyhodnocením odchylek od referenčního modelu poskytlo žádoucí výsledky, které do značné míry korespondovaly s výsledky simulací. Obtížně měřitelné rozměry lze tedy tímto postupem zjišťovat a provádět jejich inspekci. Obdobný postup tak lze implementovat i v následující studii věnované vlivu jednotlivých procesních parametrů, jejich velikosti a vzájemných kombinací na rozměrovou stabilitu optických čoček z hlediska vznikajících propadlin.

2.2 Problematika vstřikování optických čoček

Následující sekce práce se zabývá zkoumáním procesu výroby vstřikovaných optických čoček tlustostěnného charakteru. Studován byl především vliv nastavených hodnot jednotlivých procesních parametrů a jejich vzájemných kombinací na zásadní kvalitativní nedostatek, kterým byla značná propadlina vznikající na rubové straně čočky. Tomu předcházela softwarová analýza vstřikování umožňující popis jevů, ke kterým dochází v dutině formy jak z hlediska plnění, dotlaku a chlazení, tak i vyvstávajících rozměrových nestabilit a pohledových vad. Aby bylo možné samotné vstřikování čoček realizovat, bylo nejprve třeba navrhnout vstřikovací formu včetně výrobní dokumentace, provést

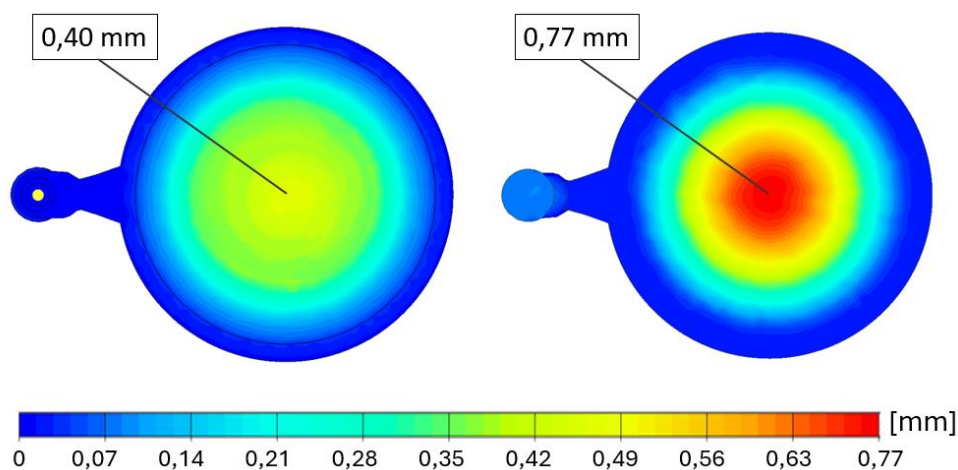
její výrobu a montáž, vsadit ji do univerzálního rámu a upnout na vstřikovací stroj. Prvotním a stěžejním krokem při konstrukci formy bylo zvolit vhodnou geometrii vtokového ústí jak z hlediska průběhu vstřikování, tak z výrobně technologického hlediska.

Za účelem získání podrobného vhledu do jednotlivých fází vstřikování tlustostěnných optických čoček a souvisejících průvodních jevů v dutině formy byl proveden soubor simulací pomocí softwarů Moldflow a Cadmould. Tyto simulace poskytly užitečné informace o vývoji rozměrových a tvarových odchylek v průběhu výrobního cyklu. Při analýze byly studovány klíčové aspekty z fáze plnění dutiny formy, působení dotlaku a procesu ochlazování. V následujících podkapitolách jsou prezentovány výsledky pro čočku o střední tloušťce 16,5 mm.

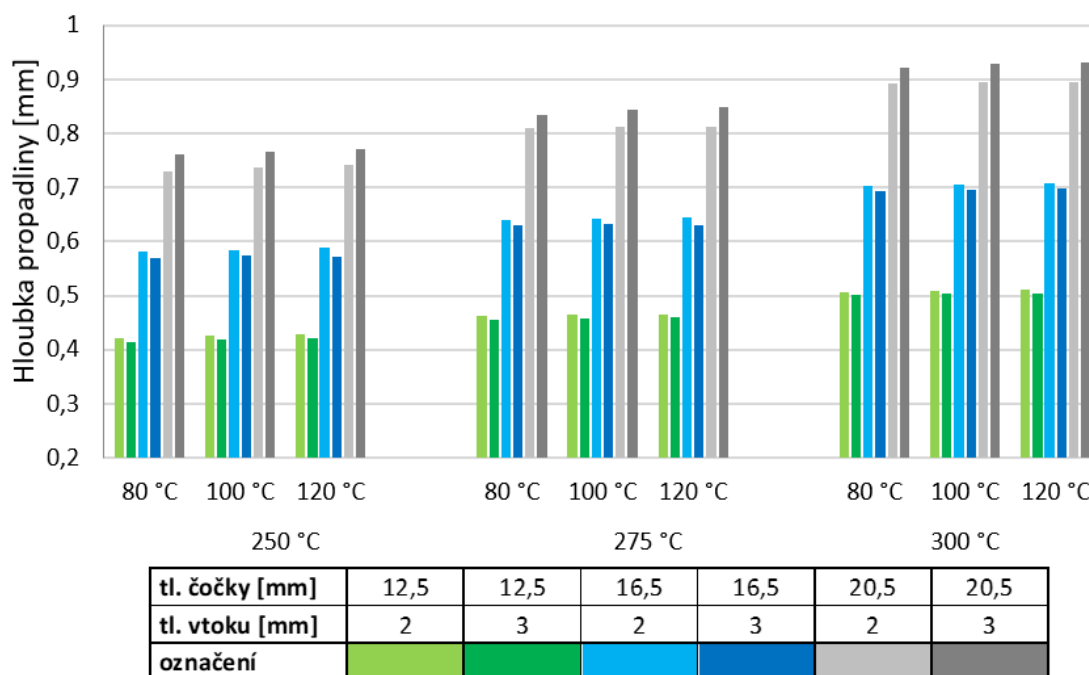
2.2.1 Propadliny

Výsledky prezentující výskyt a velikost propadlin (obrázek 3.6) byly vyhodnoceny s využitím softwaru Cadmould, neboť tento program disponuje výpočtovým režimem určeným přímo pro výpočet kvalitativních parametrů tlustostěnných dílů. Obdržené výsledky do značné míry korespondují s výsledky uvedenými v předchozí studii objemového smrštění. V oblasti s největší kumulací materiálu, kde je patrné značné objemové smrštění vzniká výrazná propadlina o maximální hloubce 0,77 mm. Jedná se o rubovou stranu čočky. Smrštění v tloušťce na straně lícové již nabývá hodnot výrazně nižších (0,40 mm), neboť zde z geometrického hlediska není nahromaděno takové množství materiálu a zakřivení povrchu čočky omezuje tvorbu propadu.

Tento defekt je tedy dominantní na planární, rubové straně čočky v jejím středu. U reálného vstřikování bude zmiňovaná vada zřejmě ještě výraznější, neboť predikovaný výsledek se vztahuje ke stavu, kdy je výrobek ochlazen na vyhazovací teplotu 130 °C, další změny (dodatečné smrštění) budou probíhat při následujícím ochlazování na teplotu okolí 25 °C. Vzhledem k požadované funkci čočky je zjištěná propadlina nepřijatelná, a proto je třeba její hloubku minimalizovat.



Obr. 2.4: Výsledek hloubky propadliny



Obr. 2.5: Srovnání hl. propadlin pro všechny vzorky a různé teploty formy i taveniny

Obrázek 3.8 znázorňuje predikovanou hloubku propadliny vypočtenou programem Cadmould 16 pro tři tloušťky čočky, dvě tloušťky vtoku a proměnné teploty taveniny a formy. Je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou čočky vzrůstá i vyhodnocovaná hloubka propadliny, což z grafu jednoznačně vyplývá. Při srovnávání vlivu teploty taveniny na hloubku propadliny vyplývá, že při vyšších teplotách se vytváří hlubší propadlina. To lze přičítat větší míře objemového smrštění a dalším jevům, které vyvstávají při ochlazování z teploty vstřikované taveniny na teplotu vyhazovací. Z hlediska teploty formy není při pohledu na vyhodnocená data patrný žádný vliv tohoto faktoru na hloubku propadliny. Při srovnání výsledků pro různé tloušťky vtoku lze ve všech případech pozorovat menší hloubku při uvažování většího průřezu vtoku. To lze přisuzovat efektivnějšímu působení dotlakové fáze, než k jakému dochází u průřezu menšího.

2.2.2 Shrnutí výsledků simulací

Pro získání představ o jednotlivých fázích vstřikování tlustostěnných optických čoček a vyvstávajících průvodních jevech v dutině formy byla provedena série simulací v softwarech Moldflow a Cadmould, které navíc poskytovaly cenné informace o vznikajících rozměrových a tvarových odchylkách. Analyzovány byly stěžejní aspekty plnění, jako je rovnoměrnost zatékání taveniny do dutiny formy a vývoj smykové rychlosti a napětí. To umožňovalo ověřit, zda nebude docházet k vadám, jako je žloutnutí materiálu vlivem tepelné degradace, uzavírání vzduchových kapes a tvorby bublin nebo formaci studených spojů vlivem nerovnoměrného plnění dutiny. Po zaplnění byl sledován efektivní čas působení dotlakové fáze definovaný okamžikem, dokud

nezatuhlo vtokové ústí. Následovala studie teplotního pole formy a času potřebného pro dosažení vyhazovací teploty. Dále bylo vyhodnocováno objemové smrštění, které vznikalo v průběhu ochlazování výrobku, přičemž obdržené výsledky korespondovaly s následným zjišťováním hloubky propadliny, která přímo souvisí s objemovými změnami. Pro úplnost proběhlo i vyhodnocení deformací vznikajících při konstantním objemu ve všech směrech.

Tabulka 2.2: Vybrané výsledky provedených simulací (čočka)

PARAMETR	ČOČKA 16,5 mm	JEDNOTKA
Čas zaplnění	2,1	s
Výskyt studených spojů	žádný	-
Výskyt uzavřeného vzduchu	žádný	-
Doba efektivního působení dotlaku	8	s
Smykový rychlost	1 736	s ⁻¹
Smykové napětí	0,41	MPa
Čas pro dosažení vyhaz. teploty	218	s
Max. deformace v X; Y; Z (Moldflow)	0,22; 0,28; 0,09	mm
Max. hl. propadliny na rubu; líci (Cadmould)	0,77; 0,40	mm

Celkově lze shrnout, že na základě predikcí ze simulací by při vstřikování nemělo docházet k nehomogenitám zapříčiňujícím výrazné pohledové vady. Velikost deformací při konstantním objemu není zanedbatelná, ale ve srovnání s objemovými změnami zapříčiňujícím vznik propadliny na rubové straně čočky přispívá jednoznačně menší mírou k celkové rozměrové nestabilitě výrobku. Cílem je tedy hloubku této propadliny redukovat na nejnižší možné minimum, přičemž lze předpokládat, že tímto dojde i k minimalizaci deformací, neboť oba jevy spolu úzce souvisí. Jelikož je z výsledků simulací patrné, že vtokové ústí o tloušťce 2 mm způsobuje větší míru nežádoucích jevů, bude další výzkum primárně věnován vstřikování s využitím vtoku s tloušťkou 3 mm.

2.3 Reálné vstřikování optických čoček

V průběhu prvotního vstřikování, jehož cílem bylo verifikovat funkčnost formy, docházelo kromě vzniku propadlin a deformací i k jistým dalším typům vad, přičemž mezi nejčtenější lze zařadit žloutnutí, stopy po toku taveniny a uzavírání vzduchu s následnou tvorbou bublin. Úvodní vstřikování probíhalo při teplotě taveniny 275 °C a teplotě formy 100 °C. Variovány byly hodnoty vstřikovacího tlaku, úrovně dotlaku a vstřikovací rychlosti s cílem nalézt rozsah hodnot mezi přípustnými minimy a maximy, aby bylo možné tyto dále aplikovat jako okrajové podmínky při návrhu experimentu.

Při vstřikovacích tlacích vyšších než 100 MPa a při dotlaku dosahujícím více než 80 MPa docházelo k intenzivnímu smykovému namáhání taveniny při průchodu vtokovým ústím, což mělo za následek tepelnou degradaci materiálu, která se projevila jeho žloutnutím. Oproti tomu hodnoty vstřikovacího tlaku nižší

než 60 MPa zapříčiňovaly viditelné stopy (čáry) ve směru toku taveniny, které se vyskytovaly jak na rubové, tak na lícové straně čočky. Zbývající nedostatek představovaly vzduchové bubliny vyskytující se v objemu čočky. K jejich formování docházelo, pokud byla vstřikovací rychlost nastavena na hodnotu vyšší než 20 mm/s. Uvedené limitní hodnoty byly ověřovány pro všechny tři tloušťkové varianty čočky i pro rozsahy teplot formy a taveniny definované výrobcem materiálu.

Při dodržení rozsahů hodnot procesních parametrů uvedených níže bylo možné vyrobit všechny tři čočky tak, aby nevykazovaly známky výše popsaných defektů (obrázek 3.11). Tato minima a maxima tedy lze uvažovat pro návrh experimentu a provádět jejich variace s cílem minimalizovat velikost vznikající propadliny, jejíž hloubka bude měřena s využitím principů reverzního inženýrství.

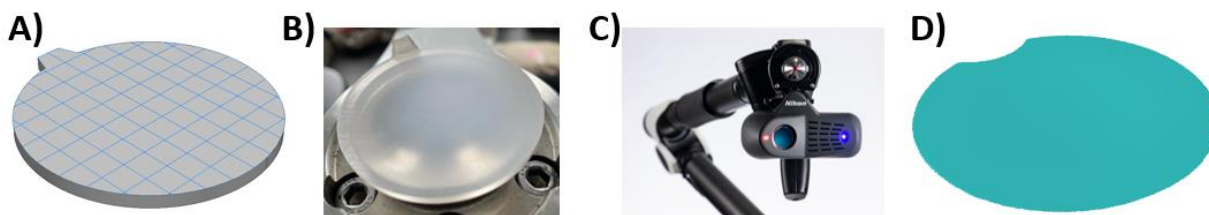


Obr. 2.6: Vyrobené čočky o tloušťce 12,5 mm, 16,5 mm a 20,5 mm bez zjevných vad

Ověřené rozsahy hodnot procesních parametrů byly následující: vstřikovací tlak 60–100 MPa, úroveň dotlaku 80 % max. vstřikovacího tlaku, vstřikovací rychlost 20 mm/s, teplota taveniny 250–300 °C a teplota formy 80–120 °C.

2.4 Postup vyhodnocení hloubky propadliny

Kvůli obtížnému měření hloubky propadliny konvenčními způsoby bylo třeba pro porovnání simulovaných deformací s reálnými parametry vstřikovaného dílu využít principy trojrozměrného skenování (viz podkapitola 2.1.3). Tento postup zahrnuje skenování povrchu vzorku laserovým 3D skenerem, následné zpracování dat a jejich porovnání s geometrií referenčního CAD modelu. Pokud je tento měřicí a vyhodnocovací postup vhodným způsobem navržen, umožňuje efektivní a spolehlivou evaluaci sledovaného parametru.

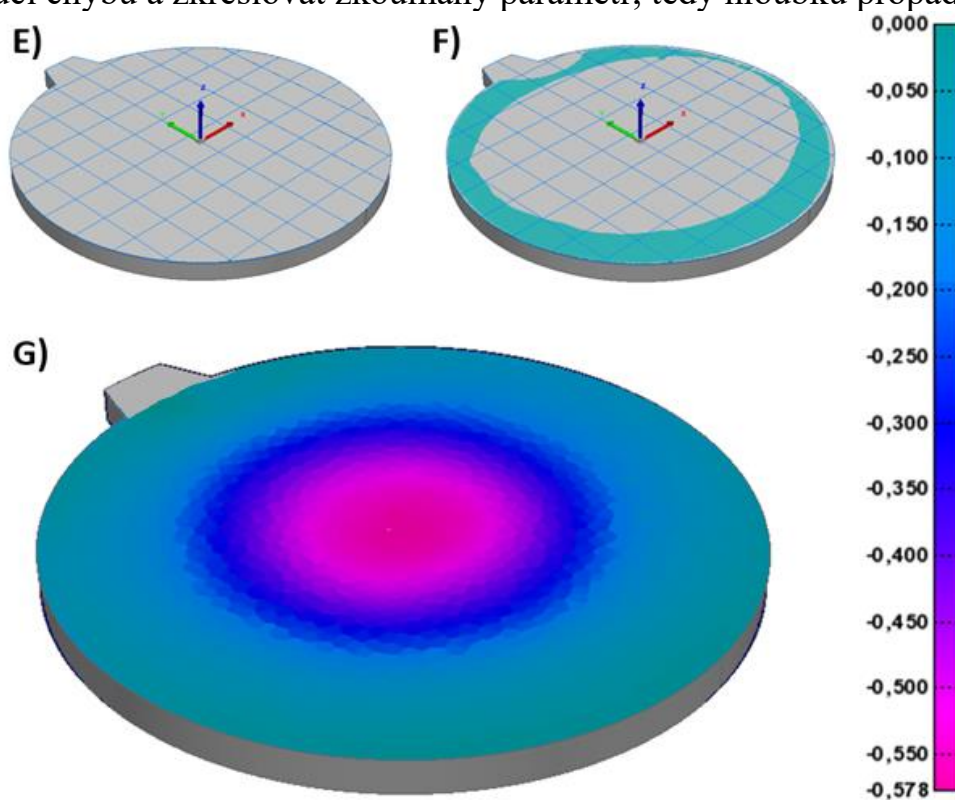


Obr. 2.7: Postup snímání povrchu vyrobeného vzorku

A) referenční plocha, B) skenovaná plocha, C) snímací hlavice, D) naskenovaná plocha čočky

Na obrázku 3.12 je uveden postup, který byl aplikován. Prvotním krok, který bylo třeba provést, spočíval v importování referenčního CAD modelu do prostředí softwaru Polyworks. Vzhledem k tomu, že předmětem zkoumání byla hloubka propadliny na rubové straně čočky, bylo nutné tuto planární plochu z 3D modelu extrahovat (krok A). Jelikož je vyhodnocovací software v reálném čase propojen se skenerem, bylo možné tuto referenční plochu využít jako limitující faktor pro oblast, která bude skenerem snímána. To znamená, že oblast ležící mimo tuto plochu byla při snímání ignorována. Tím došlo ke značné úspoře času i činností souvisejících s úpravou nasnímaných dat do požadované podoby.

Před samotným snímáním bylo třeba plochu čočky opatřit velmi tenkou vrstvou antireflexního nástřiku (na bázi titanové běloby), aby nedocházelo k odleskům, které by znemožňovaly obdržení kompletních dat o snímáné ploše (krok B). Tato data by v opačném případě bylo třeba získat několikanásobným skenováním nebo opravou nasnímané plochy, čímž by se celý proces komplikoval a byl by méně spolehlivý. Následně již probíhalo samotné skenování, kdy snímací hlavice umístěná na konci ramene byla ručně ovládána s pomocí naváděcích laserových paprsků tak, aby došlo k nasnímání celé plochy z požadované vzdálenosti (krok C). Po provedení tohoto kroku se již v prostředí softwaru zobrazila naskenovaná plocha čočky a je možné s ní dále pracovat (krok D). Záměrně byla odstraněna část nasnímané plochy v bezprostřední vzdálenosti od vtoku, jelikož deformace způsobené oddělováním vtokového zbytku by mohly do měření zanášet nežádoucí chybu a zkreslovat zkoumaný parametr, tedy hloubku propadliny.



*Obr. 2.8: Postup vyhodnocení hloubky propadliny
E) referenční plocha včetně souřadného systému, F) proložení referenční a naskenované plochy, G) vyhodnocení odchylek pomocí barevné mapy*

Proces vyhodnocení hloubky propadliny od referenční plochy extrahované z CAD modelu je zobrazen na obrázku 3.13. Po definici souřadného systému (krok E), který je nastaven tak, že hloubka propadliny je odečítána v záporném směru osy Z bylo provedeno vzájemné proložení naskenované a referenční plochy (krok F). Zarovnání bylo realizováno tak, že nezdeformovaný obvod nasnímané plochy čočky byl proložen s referenční plochou tak, aby vznikla nulová hladina představující počátek měření. Veškerá naskenovaná geometrie ležící pod touto hladinou se bude přičítat k hloubce propadliny, přičemž software pomocí barevné mapy vykreslí velikost odchylek, jejichž velikost lze odečíst z legendy (krok G). V tomto případě lze konstatovat, že maximální hloubka propadliny vztažena k referenční (neutrální) ploše nabývá maximální hodnoty -0,578 mm. S využitím totožného postupu byly měřeny veškeré hloubky propadlin u všech tlouštěk vstříkovaných čoček.

2.5 Návrh experimentů s využitím metodiky DOE

S využitím programu Minitab bylo provedeno navržení podmínek experimentu a následné vyhodnocení dat zahrnující jak výsledky ze simulací, tak hodnoty zjištěné laserovým skenováním vstříkovaných čoček. Cílem experimentů bylo variovat procesní podmínky vstříkování tak, aby bylo dosaženo co možná nejmenší hloubky sledovaného kvalitativního parametru, kterým byla hloubka propadliny vznikající na rubové straně čočky. Výsledky ze simulací byly s výhodou aplikovány pro specifikování statisticky významných procesních parametrů a jejich kombinací, kdy nastavení právě těchto povede k minimalizaci hloubky propadliny. Nalezené optimum poté bylo verifikováno reálnou výrobou zkušebních vzorků a měřením skutečné hloubky vznikající propadliny. Uvedený postup tedy umožnil nalézt podmínky procesu, při kterých bude význam propadliny minimalizován a následně i stanovit míru odklonu predikce softwarových simulací od reálně vstříkovaného vzorku.

Tabulka 2.3: Uvažované vstupní faktory a jejich úrovně

Vstupní faktor	Procesní parametr	Testovaná úroveň č. 1 (min. hodnota)	Testovaná úroveň č. 2 (max. hodnota)	Jednotka
A	Vstříkovací tlak	60	100	MPa
B	Teplota formy (t_formy)	80	120	°C
C	Teplota taveniny (t_taveniny)	250	300	°C

Pro zjištění vhodných podmínek experimentu byl tedy zvolen koncept aplikované statistiky DOE – Design of Experiment k dosažení optimálního průběhu hodnot vstupních parametrů. V rámci návrhu byl zvolen DOE o třech

faktorech s osmi průběhy. Počet opakování experimentu byl stanoven na hodnotu jedna, jelikož se jedná o experiment v rámci simulace a počet bloků byl také vymezen jedinou hodnotou z důvodu zachování konzistentních experimentálních podmínek. Zkoumané vstupní faktory zahrnovaly tlak, teplotu taveniny a teplotu formy, sledovanou výstupní hodnotou byla hloubka propadliny (p_{odezva}) zjištěná ze simulace. Všechny vstupní faktory vykazovaly dvě testované úrovně (minimální a maximální hodnoty). Tento koncept byl proveden pro uvažované tři tloušťky čočky separátně (tabulka 2.3)

2.5.1 Shrnutí DOE

V souladu s metodikou Design of Experiments (DOE) byly pro všechny tloušťky vzorků koncipovány a realizovány experimenty na úrovni simulací. Získané výsledky následně posloužily k optimalizaci procesních parametrů s primárním záměrem minimalizovat hloubku propadliny. Ve všech případech lze konstatovat, že zvyšování vstřikovacího tlaku a teploty formy vede k redukci hloubky propadliny. Z hlediska teploty taveniny je význam opačný, tedy její snižování omezuje i míru vznikající propadliny.

Z hlediska sledovaných faktorů je z tabulky 2.4 patrné, že u čočky s tloušťkou 12,5 mm dominuje vliv vstřikovacího tlaku a pro další tloušťky vzorku nejvýznamější vliv představuje teplota taveniny. Významnost ostatních faktorů je pro všechny vzorky obdobná. Obecně platí, že zvyšování teploty taveniny zvyšuje termální roztažnost materiálu. Když se polymerní tavenina vstříkne do formy a poté prudce ochladí, dochází k jejímu smrštění. Větší termální roztažnost při vyšší teplotě znamená větší objemové smrštění. Značný účinek teploty taveniny na hloubku propadliny u větších tlouštěk lze přisuzovat delšímu ochlazení polymerní taveniny na vyhazovací teplotu což vede k razantnějším objemovým změnám, které budou nepatrně významnější než působení vstřikovacího tlaku a následné dotlakové fáze. Tyto aspekty však představují nejvýznamnější účinek u čočky o tloušťce 12,5 mm, kde lze kompenzaci objemových změn, ke které dochází v průběhu dotlaku, přisuzovat nejvyšší statistickou významnost. Hodnota teploty formy ve všech případech vykazuje nižší míru účinku na vznik propadliny, ovšem stále leží nad hladinou statistické významnosti. Vyšší teploty formy mohou vést k menší termální kontrakci materiálu při chlazení, což může snížit objemové smrštění. Oproti tomu nižší teploty formy mohou způsobit větší objemové smrštění a potenciálně větší vznik propadlin.

Minimální dosažitelné hloubky propadlin při nastavení optimálních procesních parametrů vyplývají ze simulací vstřikovacího procesu (tabulka 2.5). Lze konstatovat, že nižších hodnot při uvažování daných rozsahů vybraných procesních parametrů nelze dosáhnout. Další sekce výzkumu tedy byla věnována ověření těchto predikcí pomocí reálného vstřikování vzorků při optimálních procesních parametrech a následného měření skutečné vznikající hloubky propadliny. To umožní stanovit minima hloubky propadlin, kterých je možné při uvažovaných vstupních parametrech dosáhnout.

Tabulka 2.4: Srovnání statistické významnosti jednotlivých faktorů

Míra stat. významnosti	čočka 12,5 mm	čočka 16,5 mm	čočka 20,5 mm
1.	A	C	C
2.	C	A	A
3.	B	B	B
4.	AB	AB	AB

Tabulka 2.5: Shrnutí výsledků z optimalizátoru

Vyhodnocované parametry	čočka 12,5 mm	čočka 16,5 mm	čočka 20,5 mm
Min. hloubka propadliny [mm]	0,347	0,481	0,598
Vstřikovací tlak [MPa]	100	100	100
Teplota formy [°C]	120	120	120
Teplota taveniny [°C]	250	250	250

2.1 Statistické vyhodnocení experimentů

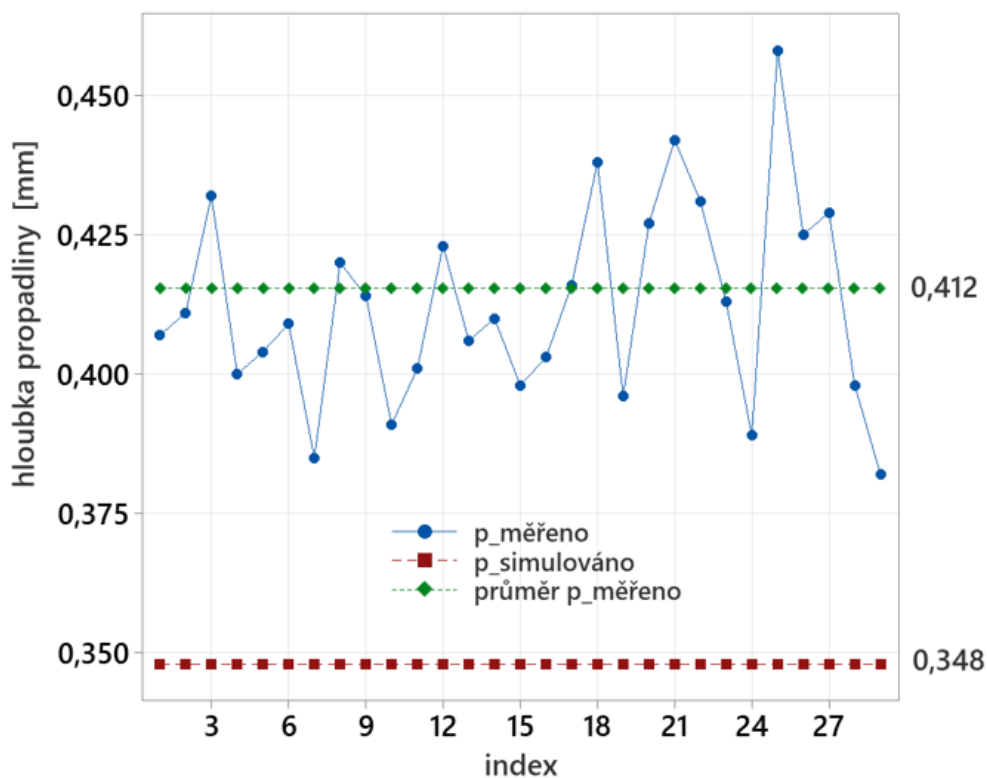
Na základě metodiky DOE byly pro všechny tloušťky vzorků navrženy a provedeny experimenty na úrovni simulací, jejichž výsledky umožnily provést optimalizaci procesních parametrů s cílem minimalizovat hloubku propadliny. Pro každou tloušťku čočky bylo na základě simulací stanoveno nejnížší dosažitelné minimum a jednotlivé úrovně procesních podmínek, při kterých bylo dosaženo. Tyto hodnoty dále představovaly podmínky pro výrobu zkušebních vzorků, na jejichž povrchu pak byla zjišťována skutečná hloubka vznikající propadliny. Získaná data byla dále evaluována a srovnávána s hodnotami obdrženy ze simulace, což umožnilo mimo jiné i stanovení nepřesnosti simulace oproti realitě.

Následující evaluace byla jak z hlediska aplikovaných statistických metod, tak z pohledu výroby vzorků a zjišťování hloubky propadliny pro všechny tři tloušťky optické čočky koncipována totožným způsobem. Tím byla zajištěna konzistence vyhodnocovaného vlivu procesních parametrů na vznikající hloubku propadliny i když vyhodnocení bylo provedeno pro každou tloušťku separátně.

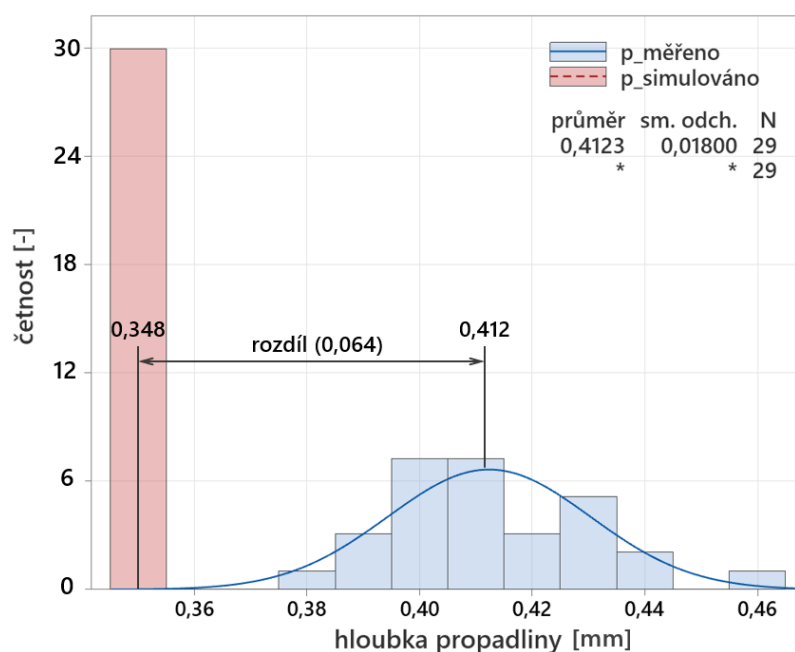
Vstřikování vzorků tedy probíhalo při nastavení procesních parametrů na hodnoty, při kterých bylo s pomocí optimalizátoru dosaženo nejnížších možných hloubek propadliny. U všech tlouštěk vzorků se jednalo o vstřikovací tlak 100 MPa, teplotu formy 120 °C a teplotu taveniny 250 °C. Při takových podmínkách bylo vyrobeno od každé tloušťky celkem 30 vzorků, což by mělo poskytovat dostatečný vzorek skutečných hodnot hloubek propadlin pro adekvátní statistické zpracování.

2.1.1 Vyhodnocení pro čočku o tloušťce 12,5 mm

Za účelem celkového vyhodnocení experimentu bylo třeba nalézt provozní optimum a následně porovnat reálná měřená data (skutečnou hloubku propadliny) s hodnotami, které byly získány na základě vyhodnocení simulací vsřikování. Na obrázku 3.14 jsou vizualizovány měřené hodnoty (modré kruhy), vypočtený průměr těchto hodnot (zelené čtverce) a hodnoty predikované simulací (červené čtverce).



Obr. 2.9: Srovnání měřených a simulovaných hodnot (čočka 12,5 mm)



Obr. 2.10: Srovnání prům. měřené hodnoty s výsledkem simulace (čočka 12,5 mm)

Na obou uvedených obrázcích 3.14 a 3.15 lze pozorovat odlišnost od výsledků středních hodnot reálných měřených výsledků hloubky propadliny vůči simulované predikci. Pro potvrzení statisticky významné odlišnosti byl proveden párový T – test, na jehož základě je možné potvrdit nebo vyvrátit vzájemnou variabilitu mezi výsledky simulace a experimentálně zjištěnými daty. Je tedy třeba stanovit hypotézu na jejímž základě budou výsledky klasifikovány.

$$H_0 = \mu_{sim.} = \mu_{real.}$$

$$H_a = \text{NON } (1-\alpha)$$

P = 0,000 < (α 0,05) => H_0 je zamítnuta

Hypotéza nulová říká, že odhad aritmetického průměru reálných naměřených hodnot a hodnot obdržených ze simulace se liší statisticky nevýznamně. Hypotéza alternativní pak toto tvrzení zamítá na hladině významnosti $1 - \alpha$. Na základě výsledné P hodnoty byla zamítnuta H_0 ve prospěch H_a na hladině významnosti $1 - \alpha$. Lze tedy konstatovat, že reálná naměřená data a data získaná pomocí simulace se liší statisticky významně, tedy liší se jinak než náhodně.

Tato diference může být způsobena několika příčinami. Jednou z nich může být skutečnost, že v prostředí simulace vykazují veškeré podmínky výpočtu ideální průběh, jsou neměnné a nedochází k jejich kolísání. Dále může být tento nesoulad ovlivněn okamžikem, ve kterém je simulovaná hloubka propadliny vyhodnocována, což je konec fáze ochlazování, kdy vzorek dosáhne vyhazovací teploty 130 °C. Je tedy zanedbáno dodatečné smrštění, které probíhá po vyjmutí výrobku z formy při dochlazování na teplotu okolí. Lze tedy předpokládat, že vyvstávající diference bude u větších tloušťek významnější.

2.1.2 Vyhodnocení pro čochku o tloušťce 16,5 mm

Za účelem komplexního zhodnocení experimentu bylo obdobně k předchozímu případu nezbytné identifikovat provozní optimum a následně provést srovnání skutečných měřených dat, tedy hloubky propadliny s hodnotami odvozenými z analýzy simulací vstřikování. Na obrázku 3.16 jsou barevně a symbolicky vizualizovány naměřené hodnoty, vypočítaný průměr těchto hodnot a hodnoty, které simulace predikovala.

Na obrázcích 3.16 a 3.17 lze identifikovat odlišnost mezi středními hodnotami skutečných měřených výsledků hloubky propadliny a simulovanou predikcí. Pro ověření statisticky významné rozdílnosti byl proveden párový T-test, jehož výsledky umožňují potvrdit nebo vyvrátit vzájemnou variabilitu mezi výsledky simulace a experimentálně získanými daty. Je tedy opět třeba formulovat hypotézu, na jejímž základě lze klasifikovat výsledky a stanovit míru signifikance této odlišnosti.

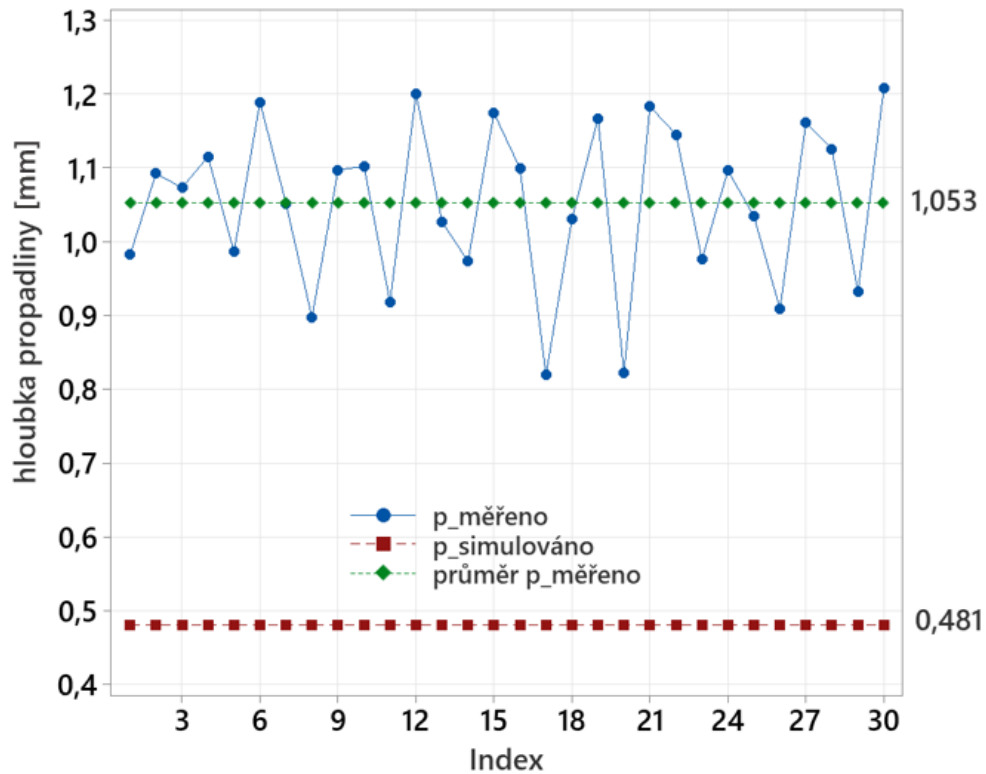
$$H_0 = \mu_{sim.} = \mu_{real.}$$

$$H_a = \text{NON } (1-\alpha)$$

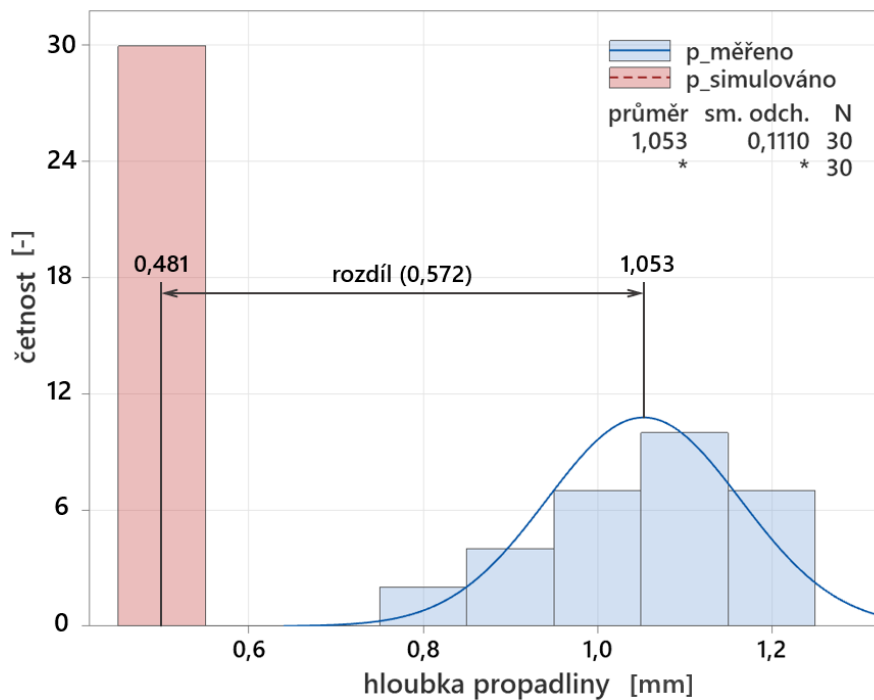
P = 0,000 < (α 0,05) => H_0 je zamítnuta

Nulová hypotéza tvrdí, že odhad aritmetického průměru skutečných měřených hodnot a simulovaných hodnot je statisticky nevýznamně odlišný. Alternativní hypotéza tuto tvrzení zamítá na hladině významnosti $1-\alpha$.

Na základě získané p-hodnoty byla zamítnuta nulová hypotéza ve prospěch alternativní hypotézy na hladině významnosti $1-\alpha$. Lze tedy konstatovat, že existuje statisticky významný rozdíl mezi skutečnými měřeními daty a simulovanými daty, což naznačuje, že odchylky nejsou náhodné.

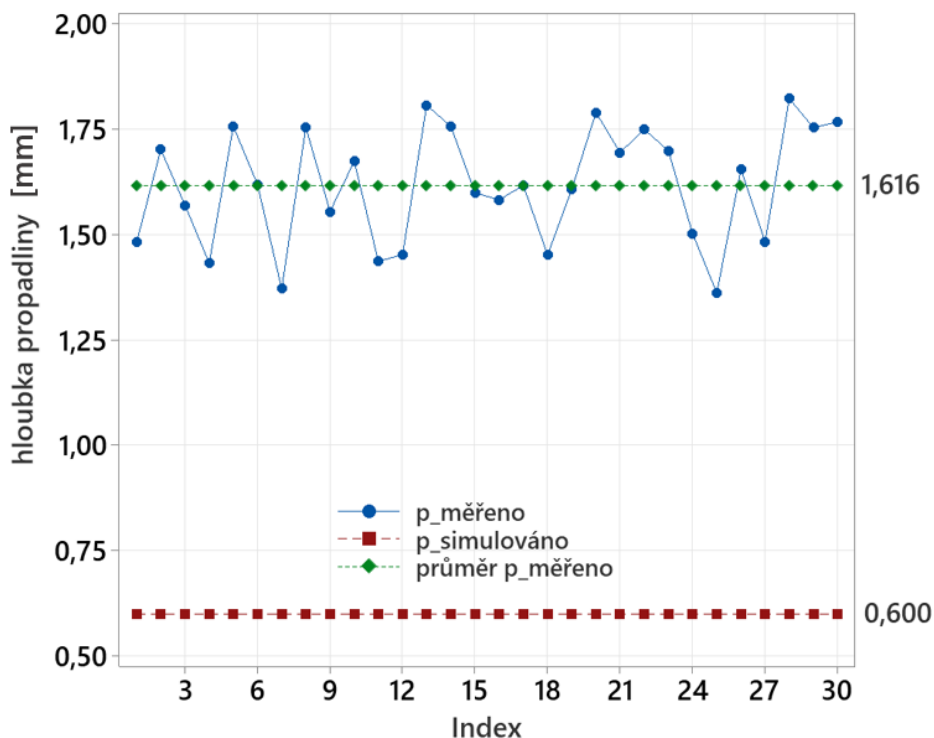


Obr. 2.11: Srovnání měřených a simulovaných hodnot (čočka 16,5 mm)

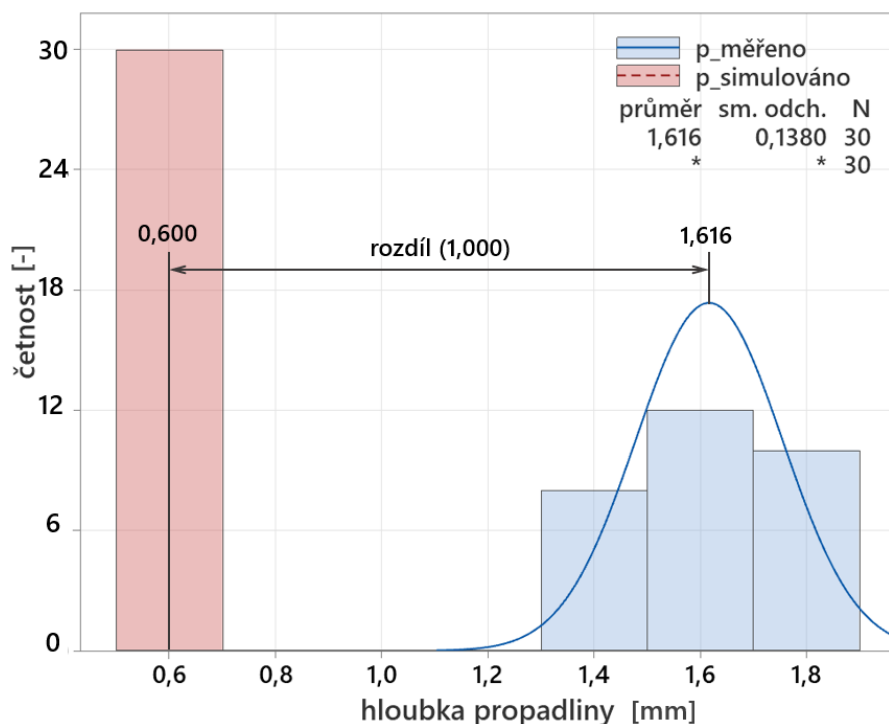


Obr. 2.12: Srovnání prům. měřené hodnoty s výsledkem simulace (čočka 16,5 mm)

2.1.3 Vyhodnocení pro čočku o tloušťce 20,5 mm



Obr. 2.13: Srovnání měřených a simulovaných hodnot (čočka 20,5 mm)



Obr. 2.14: Srovnání prům. měřené hodnoty s výsledkem simulace (čočka 12,5 mm)

Pro komplexní zhodnocení experimentu bylo nutné identifikovat provozní optimum a porovnat skutečné měřené hodnoty hloubky propadliny s hodnotami odvozenými z analýzy simulací vstřikování, podobně jako v předchozích

případech. Obrázky 3.18 a 3.19 vizualizují naměřené hodnoty, průměr těchto hodnot a hodnoty predikované simulací.

Na základě těchto grafů byla identifikována odlišnost mezi středními hodnotami skutečných měřených výsledků hloubky propadliny a simulovanou predikcí. Párový T-test byl proveden k ověření statisticky významné rozdílnosti, což umožnilo potvrdit, či vyvrátit vzájemnou variabilitu mezi výsledky simulace a experimentálními daty. Zamítnutím nulové hypotézy ve prospěch alternativní hypotézy na hladině významnosti $1-\alpha$ bylo konstatováno, že existuje statisticky významný rozdíl mezi skutečnými měřenými daty a simulovanými daty, což naznačuje, že odchylky nejsou náhodné.

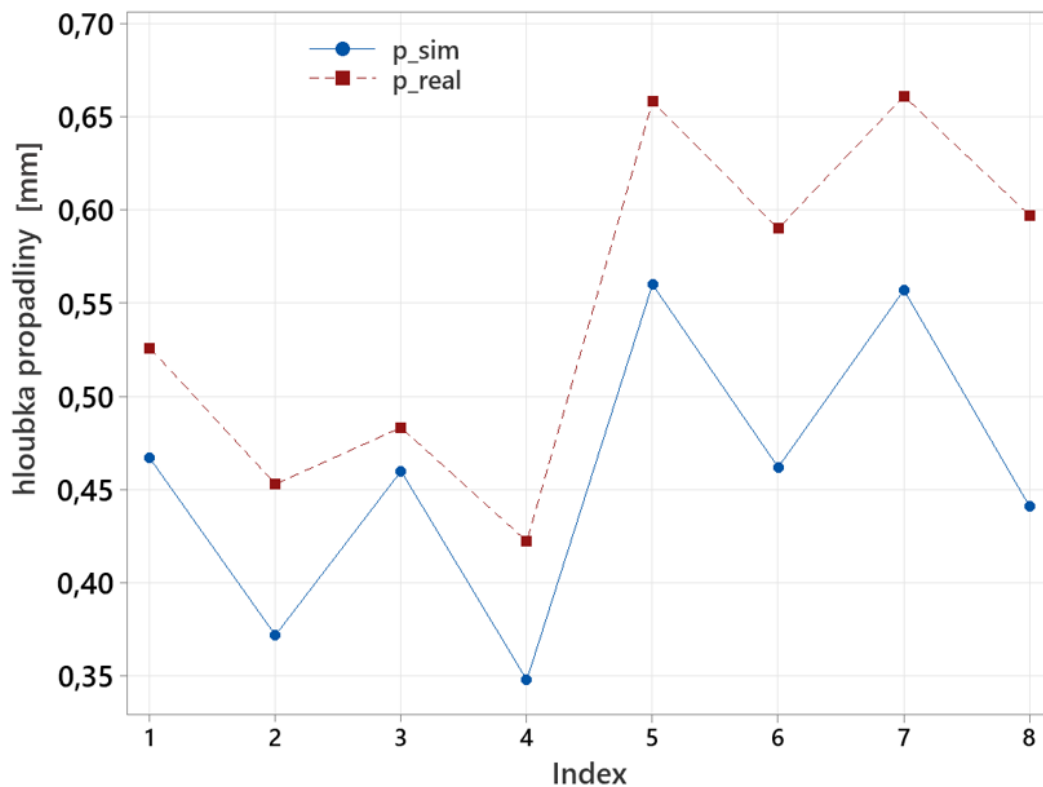
2.1.4 Srovnání simulovaných a reálných hodnot z hlediska DOE

Pro závěrečné vyhodnocení celkové studie bylo třeba porovnat průběh měření při změně jednotlivých parametrů jak při měření simulace, tak při hodnocení samotného experimentu. Za tímto účelem bylo tedy získáno celkem 16 hodnot, 8 hodnot při změně parametrů v simulaci a 8 hodnot při změně parametru při měření experimentu (tabulka 2.6). Na obrázku 3.20 je pak zobrazen průběhový diagram obou měření při změně jednotlivých parametrů.

Tabulka 2.6: DOE pro srovnání simulované a reálné hloubky propadliny

DOE simulace / realita (čočka 12,5 m)					
průběh č.	vstřík. tlak [MPa]	t_formy [°C]	t_taveniny [°C]	p_odezva [mm]	vstřík. tlak [MPa]
1	60	80	250	0,466	0,526
2	100	80	250	0,369	0,453
3	60	120	250	0,458	0,483
4	100	120	250	0,348	0,422
5	60	80	300	0,560	0,658
6	100	80	300	0,461	0,590
7	60	120	300	0,555	0,661
8	100	120	300	0,440	0,597

Z obrázku 3.20 je již na první pohled je patrné, že dochází k variaci mezi soubory dat obdrženy ze simulace a těmi reálně měřenými. Na základě dalšího zkoumání bylo třeba definovat samotný vztah mezi uvedenými měřeními soubory. Za tímto účelem byl použit test rovnosti rozptylů a test rovnosti průměrů, na jejichž základě bude spolehlivost provedených experimentů vyhodnocena.



Obr. 2.15: Variace simulovaných a reálných hodnot

Samotný F – Test (vyhodnocující rovnost rozptylů) pracuje na základě rovnosti variací, tedy rozptýleních hodnot. Při jeho vyhodnocení je předpokládáno, že soubor nemá jiné než normální rozdělení. Pro potvrzení statisticky významné odlišnosti byl proveden párový T – test, na jehož základu je možné potvrdit nebo vyvrátit vzájemnou variabilitu mezi výsledky simulace a experimentálních výsledků. Je třeba stanovit hypotézu na jejímž základu budou výsledky klasifikovány. Při hodnocení F – testu tedy byla stanovena hypotéza, kdy:

$$H_0 = \sigma_{sim.} = \sigma_{real.}$$

$$H_a = NON (1-\alpha)$$

$$P=0,633 > (\alpha 0,05) \Rightarrow H_0 \text{ není zamítnuta}$$

Na základě výsledné P hodnoty, která je vyšší než testovací kritérium α lze konstatovat, že rozptyly jak výsledků ze simulace, tak hodnot měřených na reálně vstříkovaných vzorcích se liší statisticky nevýznamně. Tedy mezi simulací a realitou byla potvrzena rovnost rozptylů.

Dále byla vyhodnocována odlišnost aritmetických průměrů. Hypotéza nulová říká, že odhad aritmetického průměru reálných naměřených hodnot a hodnot ze simulace se liší statisticky nevýznamně. A hypotéza alternativní toto tvrzení zamítá na hladině významnosti $1 - \alpha$.

$$H_0 = \mu_{sim.} = \mu_{real.}$$

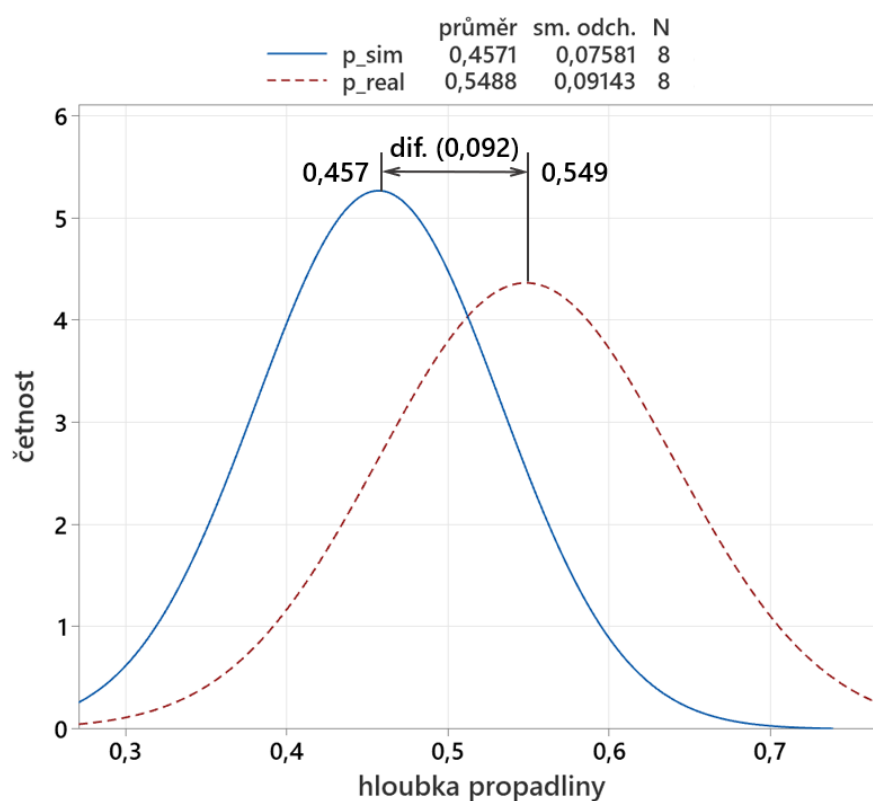
$$H_a = NON (1-\alpha)$$

$$P=0,000 < (\alpha 0,05) \Rightarrow H_0 \text{ je zamítnuta}$$

Na základě výsledné P hodnoty byla nulová hypotéza zamítnuta ve prospěch hypotézy alternativní, a to na hladině významnosti $1-\alpha$. Lze tedy konstatovat, že reálná naměřená data a data získaná pomocí simulace se liší statisticky významně, tedy liší se jinak než náhodou.

S ohledem na tyto výsledky lze uvažovat o variabilitě mezi simulací a realitou. Jak lze pozorovat z dat vizualizovaných na obrázku 3.21, dochází ke stejné variabilitě rozptylů mezi soubory dat z reality a ze simulace, což bylo také potvrzeno pomocí F-testu a výsledné P hodnoty. Při posuzování rovnosti průměrů byla rovnost průměrů zamítnuta, tedy soubory se vzájemně liší jinak než náhodou.

Potvrzením těchto výsledků a vizualizace průběhových grafů měření lze konstatovat, že je zde určitá variabilita, kterou lze klasifikovat jako diferenci průměrů při stejném rozptylu. Za tímto účelem lze diferenci mezi soubory klasifikovat jako korekční parametr optimálních procesních podmínek, při nichž se nebude měnit rozptyl výsledných hodnot. Díky tomu lze pomocí simulace vstříkování a vyhodnocení skutečných zkušebních vzorků nalézt optimum.



Obr. 2.16: Rozdíl průměrů simulovaných a skutečných dat

2.1.5 Shrnutí statistického vyhodnocení

Na základě metody Design of Experiment (DOE) byly provedeny simulace experimentů pro všechny tloušťky vzorků, s cílem optimalizovat procesní parametry a minimalizovat hloubku propadliny při vstříkování čoček. Na základě těchto simulací byla stanovena nejnižší dosažitelná hodnota hloubky propadliny pro každou tloušťku, spolu s konkrétními úrovněmi procesních podmínek, při nichž lze dosáhnout této hodnoty. Tyto údaje ze simulací vstříkování pak sloužily

jako okrajové podmínky pro výrobu zkušebních vzorků, na jejichž povrchu byla změřena skutečná hloubka propadliny. Získaná data byla následně podrobena evaluaci a srovnání s hodnotami získanými ze softwarových simulací, což umožnilo identifikovat přesnost výsledků simulace v porovnání s reálnými experimentálními výsledky.

Následující evaluace byla systematicky provedena z hlediska aplikovaných statistických metod a z perspektivy výroby vzorků, přičemž byla zachována konzistence ve vyhodnocování vlivu procesních parametrů na vznikající hloubku propadliny. Vstřikování vzorků bylo realizováno při optimálně nastavených procesních parametrech, které byly stanoveny pomocí optimalizátoru za účelem dosažení minimálních možných hloubek propadliny. Pro všechny tloušťky vzorků byly použity stejné hodnoty vstřikovacího tlaku (100 MPa), teploty formy (120 °C) a teploty taveniny (250 °C). Celkem bylo vyrobeno 30 vzorků pro každou tloušťku, což poskytlo dostatečný soubor skutečných hodnot hloubek propadlin pro následné statistické zpracování.

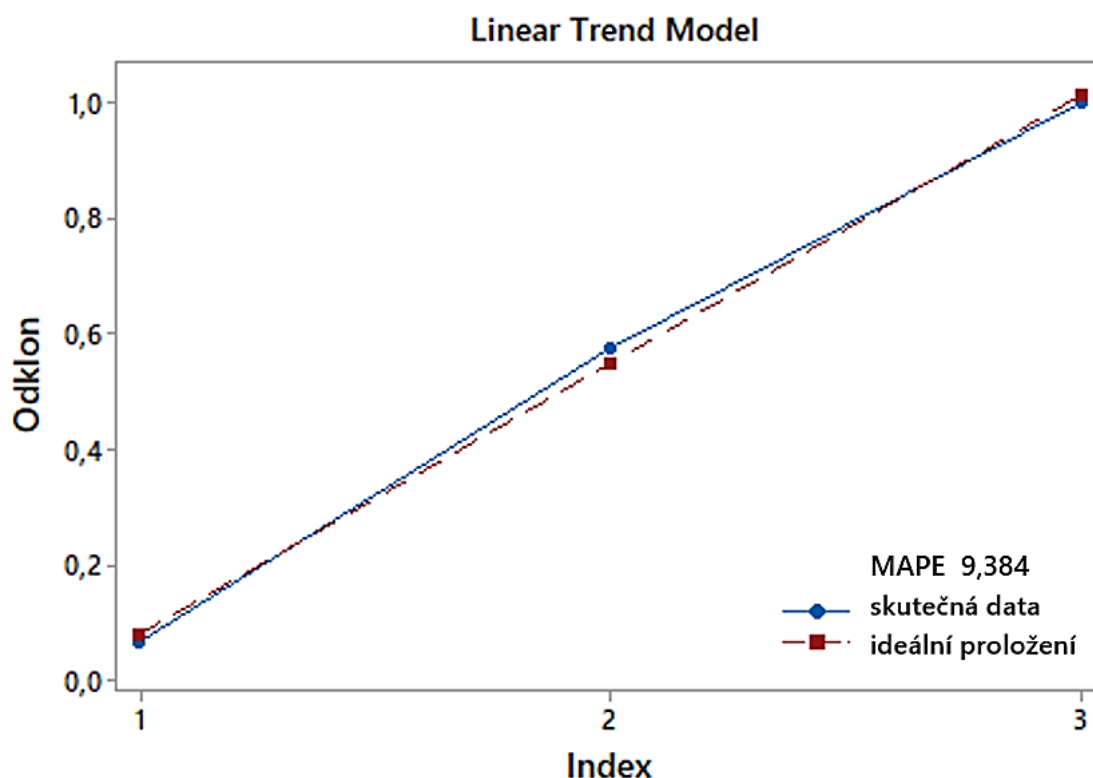
Další fáze evaluace byla systematicky provedena z pohledu aplikovaných statistických metod a výroby vzorků, a to pro všechny tři tloušťky optických čoček se zachováním konzistence ve vyhodnocování vlivu procesních parametrů na vznikající hloubku propadliny, i když vyhodnocení bylo provedeno pro každou tloušťku čočky separátně.

Prvním krokem při hodnocení měřených parametrů bylo využití funkce Graphical Summary, která zahrnovala základní statistické výpočty, jako je odhad aritmetického průměru, směrodatné odchylky od aritmetického průměru a variační koeficient. Pro kontrolu odlehlých hodnot byl použit Grubbsův test. Následně byla uskutečněna statistická analýza a samotné srovnání měřených hodnot s výsledky simulace, potvrzující statisticky významnou odlišnost mezi oběma soubory dat. Tato odlišnost může být způsobena jednak idealizovaným průběhem podmínek v prostředí simulace a jednak okamžikem vyhodnocení simulované hloubky propadliny. Párový T-test potvrdil statistickou významnost rozdílu mezi reálnými naměřenými daty a simulovanými hodnotami, přičemž zanedbání dodatečného smrštění v simulaci může být klíčovým faktorem pro vyšší odlišnost u vzorků s větší tloušťkou.

Tabulka 2.7: Shrnutí vyhodnocených dat

tloušťka čočky [mm]	12,5 mm	16,5 mm	20,5 mm
min. hloubka p ze simulace [mm]	0,348	0,481	0,600
průměrná měřená hloubka p [mm]	0,412	1,053	1,616
rozdíl [mm]	0,064	0,574	1,000

Na základě vyhodnocených dat byla sestavena tabulka 3.8, v níž jsou uvedeny minimální dosažitelné hloubky propadliny u všech tloušťek čočky zjištěné optimalizací na základě dat ze simulace. Pro srovnání jsou uvedeny i průměrné hodnoty naměřené skutečné hloubky propadliny. Lze konstatovat, že s rostoucí tloušťkou vzorku vzrůstá simulovaná i skutečná hloubka propadliny, přičemž míra odklonu skutečné hodnoty od simulované také vzrůstá a to lineárně (obrázek 3.22). Zatímco u čočky s tloušťkou 12,5 mm je rozdíl 0,064 mm, u střední tloušťky (16,5 mm) se jedná o 0,574 mm a u nejtlustšího vzorku (20,5 mm) tato hodnota nabývá 1,000 mm. Pro potvrzení lineárního by bylo nutné provést dodatečná měření na více tloušťkách čočky, přičemž pro experimentální účely této práce byla provedena měření dostačující.



Obr. 2.17: Skutečná data proložena ideálním lineárním trendem

3. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Dosažené výsledky disertační práce se zaměřují na problematiku konvenčního vstřikování tlustostěnných optických dílů z polykarbonátu. V rámci výzkumu byly uvažovány dvě geometrické koncepce zkušebních vzorků zahrnující funkční světlovod a experimentální optickou čočku ve třech tloušťkových variantách. Vyhodnocené poznatky vyplývají jak z predikcí, které byly vypočteny v prostředí simulačních softwarů, tak ze skutečných poznatků pozorovaných při reálném vstřikování. To umožnilo verifikovat spolehlivost simulací u nestandardních geometrií výrobků tlustostěnného charakteru a stanovit při daných okrajových podmínkách vhodné vstupní parametry procesu tak, aby kvalitativní aspekty dílu byly co nejpříznivější.

Úvodní studie průběhu výroby a výsledných vlastností tlustostěnného optického světlovodu představovala podstatný prvek výzkumu, kde byla provedena simulace procesu vstřikování pomocí softwaru Autodesk Moldflow 2023 a Simcon Cadmould 16. Analyzovány byly různé výrobní faktory, včetně toku polymerní taveniny, dotlaku, chladicího procesu a vzniku deformací. Tato analýza umožnila sledovat jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu, identifikovat vady a nežádoucí jevy včetně jejich příčin. Získané výsledky byly důležité pro stanovení klíčových faktorů ovlivňujících kvalitu těchto vstřikovaných vzorků.

V průběhu simulace bylo zjištěno, že dutina formy je kompletně zaplněna taveninou přibližně za 5,2 s, přičemž nedochází k vytváření nedostříknutých oblastí. Identifikovaly se klíčové parametry procesu ovlivňující kvalitu výsledných vzorků. Simulace s filmovým vtokovým ústím prokázaly požadovaný fontánový tok taveniny a částečně nerovnoměrné zaplňování dutiny v závislosti na vzdálenosti od vtokového ústí. Výsledky byly dále porovnány s alternativním tříbodovým vtokovým ústím, které vykazovalo ještě více neuniformní plnění. Docházelo k nerovnoměrnému zaplňování v závislosti na čase, což mohlo vést mimo jiné k vzniku nežádoucích studených spojů. Analýza dotlakové fáze ukázala, že filmové vtokové ústí umožňuje delší efektivní dobu působení dotlaku, což může přispět k účinnější kompenzaci vznikajících objemových změn a deformací. V případě tříbodového vtokového ústí byla zjištěna nižší efektivní doba působení dotlakové fáze, což by mohlo způsobit větší deformace a rozměrové odchylky výsledného výrobku. Vznikající deformace výsledného vzorku byly důkladně posuzovány s využitím vizualizace a srovnání dvou různých vtokových systémů. Zjištění naznačují, že filmové vtokové ústí má tendenci vést k menším deformacím ve srovnání s tříbodovým ústím. Tyto deformace mohou negativně ovlivnit funkci výrobku, jeho optické vlastnosti i jeho samotný design. Celkově lze shrnout, že při použití filmového vtokového ústí byly prokázány příznivější výsledky z hlediska rovnoměrnosti plnění, minimalizace studených spojů a efektivity dotlakové fáze. Identifikované nedostatky a odchylky poskytují podněty pro optimalizaci procesních parametrů

a geometrie vtokového systému s cílem dosáhnout kvalitnějších výsledků při vstřikování tlustostěnných optických světlovodů.

Po provedení a vyhodnocení simulací následovalo vstřikování první série zkušebních vzorků s cílem ověřit, jaké skutečné jevy, vady a deformace budou vznikat. Taktéž bylo snahou vyrobit testovací vzorky s minimálním množstvím vad, jako jsou nedotečená místa, studené spoje, spáleniny, žloutnutí, lunkry nebo vzduchové bubliny. Vstřikování všech zkušebních vzorků probíhalo na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 470 E 1000-290 Golden Electric doplněným o olejovou temperační jednotku a sušárnu. Nastavené procesní podmínky byly odvozeny z materiálového listu a doporučení simulačního softwaru Moldflow 2023. U vstřikování první série vzorků bylo zaznamenáno žloutnutí a hnědnutí materiálu vlivem tepelné degradace polykarbonátu. Vysoký tlak a rychlost vstřikování způsobovaly spálené místo v oblasti studeného spoje. Redukcí vstřikovacího tlaku a rychlosti vstřikování se žloutnutí minimalizovalo, ale docházelo k borcení optických žebér a vzniku bublin. Další úpravy parametrů, včetně snížení teploty taveniny, vedly k eliminaci žloutnutí a redukci spáleniny.

Zvolený postup vyhodnocování a rozměrové inspekce s využitím laserového 3D skeneru a srovnání s referenčním CAD modelem představoval účinný nástroj pro hodnocení deformací vstřikovaného plastového výrobku. Barevná mapa výsledků jasně ilustruje rozsah odchylek. Srovnání simulovaných s naměřenými odchylkami naznačuje, že simulace často podhodnocují skutečné deformace v důsledku práce s idealizovanými a konstantními podmínkami, nedosažitelnými v reálném prostředí. Přesto výsledky simulací dobře korespondují s velikostí a směrem skutečných deformací vstřikovaného dílu. Celkově lze konstatovat, že zvolená metodologie trojrozměrného skenování s následnou vizualizací odchylek poskytují důležité informace pro posouzení stability výroby a vznikajících deformací vstřikovaných tlustostěnných dílů.

Na základě poznatků z úvodní studie byla další, stěžejní, sekce práce zaměřena na experimentální analýzu procesu výroby vstřikovaných optických čoček tlustostěnného charakteru s důrazem na vliv nastavení jednotlivých procesních parametrů na kvalitativní aspekty výrobku. V úvodu proběhla softwarová analýza vstřikování, zkoumající plnění dutiny formy, dotlak, chlazení a rozměrové nestability. Studie získaných poznatků ze simulací jednotlivých fází vstřikování tlustostěnných optických čoček a průvodních jevů v dutině formy poskytuje důležité informace o procesu výroby a potenciálních vadách. Simulace v programech Moldflow a Simcon Cadmould umožnily také detailní analýzu rozměrových a tvarových nestabilit.

Výsledky ukázaly schopnost simulací predikovat a identifikovat možné vznikající vady. Obdržené poznatky naznačují, že při vstřikování nastává homogenní plnění dutiny bez výrazného rizika vzniku pohledových vad. Sledování efektivního působení dotlakové fáze a teplotního pole formy poskytlo další vhled do procesu tuhnutí a smršťování vstřikovaného materiálu. Vyhodnocování deformací, objemového smrštění a hloubky vznikající propadliny

umožnilo posouzení rozměrových aspektů vyráběných vzorků. Velikost deformací při konstantním objemu je pozorovatelná, ale v porovnání s objemovými změnami, které přispívají k vytváření propadliny na rubové straně čočky, je jejich vliv na celkovou rozměrovou nestabilitu výrobku méně významný. Za stěžejní kvalitativní nedostatek lze tedy považovat vznikající propadlinu.

Cílem experimentální studie tedy bylo redukovat hloubku propadliny na nejnižší možné minimum s předpokladem, že tím souběžně dojde i k minimalizaci deformací. Zjištění, že vtokové ústí o tloušťce 2 mm přispívá k nežádoucím jevům, vedlo k plánovanému výzkumu využívajícímu pouze vtok s tloušťkou 3 mm. Tento poznatek spolu s výsledky provedených simulací byl klíčový pro optimalizaci procesu vstřikování a výrobě kvalitních optických čoček s minimálními vadami.

Praktický experiment potvrdil, že dodržení specifikovaných rozsahů procesních parametrů eliminuje významné defekty, jako je žloutnutí, stopy po toku taveniny a tvorbu bublin. Výsledky experimentu sloužily k definování optimálních podmínek pro výrobu tlustostěnných optických čoček s minimálními rozměrovými a tvarovými odchylkami. Série provedených a vyhodnocených experimentů měly za cíl minimalizovat hloubku propadliny. Výsledky simulací poskytly statisticky významné informace o procesních parametrech, které ovlivňují vznik propadliny. Následná verifikace provedená v reálné výrobě potvrdila schopnost simulací předpovídat optimální podmínky pro minimalizaci hloubky propadliny.

Z analýzy experimentů vyplývá, že vstřikovací tlak a teplota formy mají vliv na vznik propadliny, s převažujícím vlivem vstřikovacího tlaku u čoček o tloušťce 12,5 mm a teploty taveniny u vzorků s větší tloušťkou. Snížení teploty taveniny vedlo ke snížení hloubky propadliny, což lze vysvětlit menší termální kontrakcí materiálu při chlazení. Výsledky naznačují, že simulace mohou být náchylné k nepřesnostem, zejména u tlustostěnných dílů. Párový T-test potvrdil statistickou významnost rozdílu mezi reálnými naměřenými daty a simulovanými hodnotami. Odklon skutečných hodnot od simulací roste se zvyšující se tloušťkou vzorku, což je důležité brát v úvahu při plánování výrobního procesu.

V závěru je nutné zdůraznit, že experimentální a simulační přístup přináší komplexní pohled na proces vstřikování optických čoček. Optimalizace procesních parametrů na základě simulací poskytuje užitečné směrnice pro produkci s minimálními vadami. Nicméně, sledování a porovnání s reálnými experimentálními daty je klíčové pro ověření přesnosti simulací a zajištění spolehlivého výrobního procesu. Lze konstatovat, že kombinace simulací a praktického experimentu umožnila identifikovat vhodné podmínky pro výrobu tlustostěnných optických čoček při uvažování konvenčního vstřikování. Tato studie představuje stěžejní krok k dosažení maximální kvality vstřikovaných tlustostěnných výrobků optického charakteru s minimálním vznikem vad a rozměrových nestabilit.

4. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Disertační práce přináší důležitý pohled na stávající problematiku v oblasti vstřikování tlustostěnných optických dílů a vliv procesu na kvalitu výsledných produktů. Zásadní principy konstrukce vstřikovaných dílů jsou tradičně spojeny s tenkostěnnými skořepinami, což odpovídá efektivnímu průběhu vstřikovacího procesu. Tato zásada byla zavedena s cílem minimalizovat rizika spojená s nesrovnalostmi ve smrštění materiálu, jako jsou propadliny či lunkry, a současně dosáhnout snížení spotřeby materiálu a hmotnosti vstřikovaných dílů. Nicméně, v reakci na rostoucí poptávku a specifické požadavky na některé komponenty, zejména v oblasti optických prvků, se stává nezbytným vyrábět díly s větší tloušťkou stěny. V případě optických dílů, jako jsou čočky a světlovody, má tloušťka stěny přímý vliv na jejich funkční vlastnosti. S rostoucí důležitostí těchto prvků v různých odvětvích, včetně automobilového průmyslu, sensorového inženýrství a osvětlovací techniky, vyvstává náročný úkol přizpůsobit výrobní proces tak, aby splňoval specifické funkční, pohledové i konstrukční požadavky.

Tato práce tedy přináší poznatky pro oblast vstřikování tlustostěnných dílů, zejména s ohledem na optické prvky, jako jsou čočky a světlovody používané v automobilovém průmyslu. Zabývá se vlivem vstupních parametrů na kvalitu výsledného výrobku a přináší důležité poznatky pro optimalizaci procesu vstřikování tlustostěnných komponentů s ohledem na minimalizaci vad a nákladů.

V současné době je technologie vstřikování jednou z nejrozšířenějších metod zpracování plastů. Práce tedy popisuje specifické jevy spojené se vstřikováním tlustostěnných optických dílů a zaměřuje se na problematiku, která vzniká v důsledku jejich tlustostěnné geometrie. Právě v oblasti optických prvků, kde je tlustostěnný charakter nezbytný pro dosažení požadovaných optických vlastností, je třeba porozumět vlivu konstrukčních aspektů a procesních parametrů na kvalitu výsledných výrobků.

Stěžejním přínosem disertační práce je využití simulačních softwarů (Autodesk Moldflow a Cadmould) k předpovídání chování taveniny během vstřikování tlustostěnných dílů. Tyto simulace umožňují detailní analýzu toku taveniny, dotlakové fáze, chladícího procesu a deformací, což vede k identifikaci klíčových faktorů ovlivňujících kvalitu vstřikovaných dílů. Úvodní softwarová analýza výroby tlustostěnných optických světlovodů poskytla důležité informace o toku taveniny, dotlaku a chladícím procesu, což bylo stěžejní pro popis vznikajících vad a deformací.

Další část práce byla věnována experimentálnímu výzkumu, kde bylo realizováno samotné vstřikování vzorků a ověření výsledků predikovaných simulacemi. Tato kombinace simulačních přístupů a praktických experimentů byla zásadní pro vytvoření komplexního pohledu na proces vstřikování tlustostěnných optických dílů. Během vstřikování byly vyráběny testovací vzorky s minimálními pohledovými vadami, a ty byly následně analyzovány pomocí metodiky rozměrové inspekce s využitím 3D skeneru. Tato fáze ověření

simulovaných výsledků pomohla potvrdit jejich spolehlivost a využitelnost v průmyslových aplikacích. Vyhodnocené poznatky odhalily, že volba konkrétních parametrů může výrazně ovlivnit vlastnosti vstřikovaných dílů, zejména v oblasti deformací a objemového smrštění. Zmíněná poznání jsou cenná pro průmyslová odvětví zaměřená na konstrukci a výrobu tlustostěnných optických komponentů.

Celkově lze konstatovat, že disertační práce poskytuje hlubší pochopení procesu vstřikování tlustostěnných optických dílů a přináší konkrétní poznatky, které jsou přenosné do praxe. Její výsledky mohou být využity při návrhu konstrukce tlustostěnných dílů, optimalizaci vstřikovacích forem a nastavování procesních parametrů s cílem dosáhnout efektivní a kvalitní výroby. Přínos této práce spočívá v propojení teoretických poznatků se simulacemi a experimentálním výzkumem, což přispívá k rozvoji oblasti konvenčního vstřikování tlustostěnných komponentů.

V kontextu rostoucí poptávky po plastových výrobcích s vyšší tloušťkou stěny, zejména v oblasti optických prvků, je disertační práce významným příspěvkem k pochopení a zdokonalení výrobního procesu. Získané poznatky nejen přispějí k inovacím ve vývoji forem a procesů vstřikování, ale také pomohou optimalizovat výrobu tlustostěnných optických dílů s ohledem na požadované optické vlastnosti, konstrukční faktory a ekonomickou efektivitu produkce. Obdržené poznatky mohou také posloužit jako podklad pro další výzkum a inovace v oblasti vstřikování plastů.

Stěžejní přínosy této práce lze shrnout v následujících bodech:

- poskytnutí hlubšího vhledu do problematiky vstřikování tlustostěnných optických dílů (světlovodů a čoček) z hlediska vlivu vstřikovacího procesu na dosahovanou kvalitu výrobků,
- identifikace specifických jevů a vad, ke kterým při vstřikování dílů tlustostěnného charakteru dochází,
- vyhodnocení vlivu vstupních parametrů na kvalitu vstřikovaného dílu a definice klíčových faktorů ovlivňujících jeho tvarové a rozměrové nestability,
- srovnání a vyhodnocení vhodnosti různých geometrií vtokového ústí s cílem minimalizovat defekty u tlustostěnných výrobků,
- nalezení stěžejních procesních parametrů a jejich kombinací včetně určení jejich optimálních hodnot pro dosažení co nejkvalitnější a nejefektivnější produkce,
- ověření spolehlivosti predikcí ze softwarových simulací a stanovení míry odklonů těchto výsledků od experimentálně vyhodnocených dat,
- získání relevantních poznatků pro rozvoj konstrukce vstřikovacích forem a optimalizace vstřikovacího procesu s potenciálem pro inovace v oblasti produkce tlustostěnných, zejména optických dílů.

5. ZÁVĚR

Dosažené výsledky této disertační práce poskytují hlubší vhled do problematiky konvenčního vstřikování tlustostěnných optických dílů z polykarbonátu. Studie dvou geometrických koncepcí zkušebních vzorků s funkčním světlovodem a experimentální optickou čočkou v různých tloušťkových variantách otevírá nové perspektivy ve výrobě optických prvků s větší tloušťkou stěny. Teoretická analýza a simulace provedené v prostředí softwarů Autodesk Moldflow 2023 a Simcon Cadmould 16 ukázaly, že filmové vtokové ústí a jeho modifikace představují vhodnější volbu pro vstřikování tlustostěnných optických dílů než vtoky bodové. Vliv geometrie vtokového na uniformní plnění dutiny formy a efektivní dotlakovou fázi se ukázal jako stěžejní pro minimalizaci vad a deformací.

Praktický experiment do jisté míry potvrdil spolehlivost simulačních výsledků a přinesl důležitá data o reálném chování materiálu při vstřikování. Získané informace poskytují cenné podklady pro optimalizaci procesních parametrů a konstrukce vtokového systému, což má za následek dosažení maximální kvality vstřikovaných čoček a světlovodů s minimálními vadami. Výsledky této práce jsou nejen přínosem pro teorii v oblasti vstřikování, ale také popisují konkrétní postupy aplikovatelné v rámci průmyslové praxe. Vzhledem k rostoucí poptávce po plastových výrobcích s větší tloušťkou stěny, zejména v oblasti optických prvků, mohou tyto poznatky vést k inovacím ve vývoji vstřikovacích forem a výrobních procesů.

Klíčové technologické parametry procesu, zejména teplotní charakteristiky taveniny, povrchu dutiny formy, vstřikovacího tlaku a dotlaku, byly důkladně analyzovány, a to jak prostřednictvím simulací, tak při reálném vstřikování. Bylo prokázáno, že tyto faktory mají významný vliv na rozměrovou a tvarovou stabilitu tlustostěnných výrobků, včetně jejich optických vlastností.

Cíle práce zahrnovaly přípravu a provedení simulací výrobního procesu, návrh experimentální vstřikovací formy pro výrobu testovacích vzorků, simulace vstřikování s následnou vizualizací a verifikací fází výrobního cyklu, studii vlivu procesních podmínek na kvalitu výrobků a aplikaci reverzního inženýrství pro porovnání tvaru povrchu s referenčními CAD modely. Naměřená data byla dále zpracovávána a vyhodnocována aplikací vhodných statistických metod. Získané poznatky poskytují komplexní vhled do procesu vstřikování tlustostěnných optických dílů, a to jak z teoretického, tak experimentálního hlediska. Výsledky mohou být využity pro optimalizaci konstrukce nástroje, nastavení procesních parametrů a dosažení efektivní a kvalitní výroby tlustostěnných výrobků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAIER, CH., et al. Efficient production of Thick-Walled Parts: Thick-Walled Lenses. Special reprint from Kunststoffe international [online]. 2013 [cit. 28-03-2023]. Dostupné z: <https://en.kunststoffe.de/a/specialistarticle/>
- [2] HOPMANN, C., ROBIG, M. Application of a multilayer injection molding process for thick-walled optical components. *Journal of Polymer Engineering*, 2016, Vol. 36, Issue 6, pp. 557-562. DOI:10.1515/polyeng-2014-0259.
- [3] NIAN, S., et al. Multilayer injection molding of high-profile convex lens. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, Vol. 137, Issue 17. DOI: 10.1002/app.48600.
- [4] LIEMANN, S., et al. Reducing Production Cycle Times of Thick Lenses by Applying Simulation and Multi-Layer Technology. In: S. Luger, ed. 4th International LED Professional Symposium+Expo, Bregenz, 30 September – 02 October, 2014. Dornbirn: Luger Research e.U., Institute for Innovation & Technology, pp. 118-124, ISBN 978-3-9503209-5-4.
- [5] WANG, M. W., et al. Modeling and Analysis of Multi-Shot Injection Molding of Blu-Ray Objective Lens. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018. Vol. 32, Issue 10, pp. 4839–4849. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0932-z>.
- [6] HAN, S. R., et al. Numerical and experimental studies of injection compression molding process for thick plastic gas valve stem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, Vol. 89, Issues 1-4, pp. 651-660. DOI: 10.1007/s00170-016-9143-6.
- [7] MOTEGI, A., et al. Restraint of Voids Generated Inside Injection Molded Products by In-Mold Pressing Method. *International Journal of Automation Technology*, 2018, Vol. 12, Issue 6, pp. 930–943. DOI: 10.20965/ijat.2018.p0930.
- [8] LAI, H.E., Wang, P. J. Study of process parameters on optical qualities for injection-molded plastic lenses. *Applied Optics*, 2008, Vol. 47, Issue 12, pp. 2017-2027. DOI: 10.1364/AO.47.002017.
- [9] DICK, L., et al. Injection molded high precision freeform optics for high volume applications. *Advanced Optical Technologies*, 2012, Vol. 1, Issue 1-2, pp. 43-50. DOI: 10.1515/AOT-2011-0009.
- [10] SPECK, A., et al. Deflectometric analysis of high volume injection molds for production of occupational eye wear. *Zeitschrift Fur Medizinische Physik*, 2013, Vol. 23, Issue 4, pp. 314-323. DOI: 10.1016/j.zemedi.2013.08.003.
- [11] YOUNG, W.B., Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens. *Applied Mathematical Modelling*, 2005, Vol. 29, Issue 10, pp. 955-971. DOI: 10.1016/j.apm.2005.02.004.

- [12] HUANG, M. S., et al. Quality Monitoring of Micro-shrinkage Defects in Thick-walled Injection Molded Components. *Measurement*, 2022. Vol. 201, Article nr. 111733. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111733.
- [13] BU, Q. S., et al. Injection Compression Molding Process and Mould Design of Plastic Optical Lens. In: C. Zhang, ed. *Asian Workshop on Polymer Processing, Key Engineering Materials*, Qingdao, 04-07 November, 2011. Wollerau: Trans Tech Publications, Ltd., Vol. 501, pp. 321-324, DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.501.321.
- [14] WU, Ch., et al. Optimization of Compression Molding for Double-Concave Lenses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023. Vol. 125, Issue. 11–12, pp. 5089–5099. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11052-6>.
- [15] LIU, Y., et al. Multi-Layer Counter-Pressure Injection Molding for Thick-Walled Optical Lens. *International Polymer Processing*, 2021, Vol. 36, Issue 2, pp. 131-136. DOI: 10.1515/ipp-2020-4394.
- [16] GOTLIH, J., et al. Influence of Injection Molding Process Parameters on Part Quality. In: I. Karabegovic, ed. *International Conference on New Technologies, Development and Application*, Sarajevo, 28-30 June, 2018. Cham: Springer International Publishing AG, Vol. 42, pp. 33-40, ISBN 978-3-319-90892-2.
- [17] HOPMANN, C., Investigation of an inverse thermal injection mould design methodology in dependence of the part geometry. *International Journal of Material Forming*, 2021. Vol. 14, Issue 2, pp. 309-321. DOI: 10.1007/s12289-020-01604-6.
- [18] FU, J., et al. Partial Solidification Ejection Criteria for Injection Molding Production to Reduce Cycle Time. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022. Vol. 74, Article nr. 102263. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102263.
- [19] SOLANKI, B. S., et al. Modeling and analysis of cavity modification effect on quality of injection molded polymer gear. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2022. Vol. 16, Issue 4, pp. 1615–1632. DOI: 10.1007/s12008-022-00887-0.
- [20] DOGOSSY, G., et al. Experimental Investigation and Applicability of Multi-Stage Simulations in the Case of a Thick-Walled Injection-Moulded Composite. *Applied Sciences*, 2022. Vol. 12, Issue 17, Article nr. 8415. DOI: 10.3390/app12178415.
- [21] SPINA, R., et al. Analysis of Lens Manufacturing with Injection Molding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012. Vol. 13, Issue 11, pp. 2087–2095. DOI: 10.1007/s12541-012-0276-z.

- [22] PARK, H.S., DANG, P. Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. In: L. Wang, ed. 45th SME North American Manufacturing Research Conference, Los Angeles, 04-08 June, 2017. Amsterdam: Elsevier Science BV, Vol. 10, pp. 48-59. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.020.
- [23] TORRES-ALBA, A., et al. Application of New Triple Hook-Shaped Conformal Cooling Channels for Cores and Sliders in Injection Molding to Reduce Residual Stress and Warping in Complex Plastic Optical Parts. *Polymers*, 2021. Vol. 13, Issue 17, Article nr. 2944. DOI: 10.3430/polym13172944.
- [24] YANG, B., et al. 3D Simulation of Shrinkage Behaviour of Injection-Molded Poly(lactic acid): Effect of Processing Parameters and Part Thickness. *Asian Journal of Chemistry*, 2014. Vol. 30, Issue 5, pp. 1337-1340. DOI: 10.14233/ajchem.2014.17224.
- [25] STUDER, M., EHRIG, F. Minimizing Part Warpage in Injection Molding by Optimizing Wall Thickness Distribution. *Advances in Polymer Technology*, 2014. Vol. 33, Supplement 1, Article nr. 21454. DOI: 10.1002/adv.21454.
- [26] CH'NG, S. Q., et al. Warpage Analysis on Thick Shell Part Using Response Surface Methodology (RSM) to Optimize Parameter Setting in Injection Molding Process. In: MMAB, Abdullah, ed. 4th International Conference on Green Design and Manufacture, Ho Chi Minh City, 29-30 April, 2018. Melville: AIP Publishing LLC, Vol. 2030, Article nr. 020167. DOI: 10.1063/1.5066808.
- [27] NASIR, S.M., et al. Evaluation of shrinkage and weld line strength of thick flat part in injection moulding process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, Vol. 43, Article nr. 452. DOI: 10.1007/s40430-021-03060-y.
- [28] ROSLAN, N., et al. Optimisation of Shrinkage and Strength on Thick Plate Part Using Recycled LDPE Materials. *Materials*, 2021, Vol. 14, Issue 7. DOI: 10.3430/ma14071795.
- [29] LAI, H., E., WANG, P., J. Study of process parameters on optical qualities for injection-molded plastic lenses. *Applied Optics*, 2008, Vol. 47, Issue 12, pp 2017-2027. DOI: 10.1364/AO.47.002017.
- [30] TSAI, K., M., TANG B., H. Determination of injection molding process window based on form accuracy of lens using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. Vol. 75, Issue 5, pp. 947–958. DOI: 10.1007/s00170-014-6185-9.
- [31] LIN, Ch. M., CHEN W. Ch. Optimization of Injection-Molding Processing Conditions for Plastic Double-Convex Fresnel Lens Using Grey-Based Taguchi Method. *Microsystem Technologies: Sensors, Actuators, Systems Integration*, 2020. Vol. 26, Issue 8, pp. 2575–2588. DOI: 10.1007/s00542-020-04798-6.

- [32] WANG, M. W., et al. The Study of Optimal Molding of a LED Lens with Grey Relational Analysis and Molding Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2019. Vol. 63, Issue 4, pp. 278–294. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPme.13337>.
- [33] LIN, Ch. M. CHEN, Y., W., Grey Optimization of Injection Molding Processing of Plastic Optical Lens Based on Joint Consideration of Aberration and Birefringence Effects. *Microsystem Technologies: Sensors, Actuators, Systems Integration*, 2019. Vol. 25, Issue 2, pp. 621–631. DOI: 10.1007/s00542-018-4001-4.
- [34] LIN, Ch. M., WANG, Ch. K. Processing Optimization of Optical Lens in the Injection Molding. *Advanced Materials Research*, 2013. Vol. 813, pp. 161–164. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.813.161.
- [35] BENSINGH, R., et al. Minimization of Variation in Volumetric Shrinkage and Deflection on Injection Molding of Bi-Aspheric Lens Using Numerical Simulation. *Springer Nature: Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016. Vol. 30, Issue 11, pp. 5143–5152. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1032-6>.
- [36] CHENG, X., et al. Numerical Analysis of Compound Aspheric Lens Design and Fabrication. In: *ICO20 Optical Information Processing*, Yunlong, ed. SPIE Proceedings, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.668341>.
- [37] LIN, C. M., et al. Gate Design Optimization in the Injection Molding of the Optical Lens. *7Rapid Communications: Optoelectronics and Advanced Materials*, 2013. Vol. 7, Issue 7–8, pp. 580-584.[38] KWAK, T. S., et al. Application of Neural Network and Computer Simulation to Improve Surface Profile of Injection Molding Optic Lens. *Elsevier BV: Journal of Materials Processing Technology*, 2005. Vol. 170, Issues 1–2, pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.099.
- [39] LIU, X., et al. Fabrication of Plano-Concave Plastic Lens by Novel Injection Molding Using Carbide-Bonded Graphene-Coated Silica Molds. *ASME International: Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019. Vol. 141, Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043980>.
- [40] KOVÁCS, J. G. Construction of Pre-Deformed Shapes for Rapid Tooling in Injection Molding. *Wiley: Macromolecular Symposia*, 2006. Vol. 239, Issue 1, pp. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.200690105>
- [41] LI, W. Z., WANG, S. H. Pre-Deformed Design of Optical Lenses with Reverse Engineering and Virtual Manufacturing. *Applied Mechanics and Materials*, 2014. Vols. 599–601, pp. 391–395. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.599-601.391.

- [42] SHIEH, J.Y., et al. A feasible injection molding technique for the manufacturing of large diameter aspheric plastic lenses. The Optical Society of Japan, 2010, Vol. 17, Issue 4, pp. 439-403. DOI: 10.1007/s10043-010-0074-8.
- [43] FISCHER, J. M. Introduction to Injection Molding. Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage. Elsevier: Handbook Series, 2013. pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-2597-7.00001-x>.
- [44] Balage-Garage: New Peugeot 508 Led Taillights in Geneva Motor Show. Balage-Garage, 2019. [online]. [cit. 17-04-2023]. Dostupné z: <https://i.ytimg.com/vi/CJ7OIEhQTMI/maxresdefault.jpg>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Postup realizace experimentů</i>	11
<i>Obr. 2.2: Vizualizace a rozměry navržených zkušebních vzorků (čoček)</i>	12
<i>Obr. 2.3: Praktický zkušební vzorek (světlovod) [44]</i>	12
<i>Obr. 3.1: Deformace vznikající při vstřikování filmovým vtokem (Cadmould)</i>	13
<i>Obr. 3.4: Postup srovnání ideální a skutečné geometrie</i>	15
<i>Obr. 3.5: Barevná mapa vyjadřující odchylky výrobku od CAD modelu</i>	15
<i>Obr. 3.6: Výsledek hloubky propadliny</i>	17
<i>Obr. 3.8: Srovnání hl. propadlin pro všechny vzorky a různé teploty formy i taveniny</i>	18
<i>Obr. 3.11: Vyrobené čočky o tloušťce 12,5 mm, 16,5 mm a 20,5 mm bez zjevných vad</i>	20
<i>Obr. 3.12: Postup snímání povrchu vyrobeného vzorku</i>	20
<i>Obr. 3.13: Postup vyhodnocení hloubky propadliny</i>	21
<i>Obr. 3.14: Srovnání měřených a simulovaných hodnot (čočka 12,5 mm)</i>	25
<i>Obr. 3.15: Srovnání prům. měřené hodnoty s výsledkem simulace (čočka 12,5 mm)</i>	25
<i>Obr. 3.16: Srovnání měřených a simulovaných hodnot (čočka 16,5 mm)</i>	27
<i>Obr. 3.17: Srovnání prům. měřené hodnoty s výsledkem simulace (čočka 16,5 mm)</i>	27
<i>Obr. 3.18: Srovnání měřených a simulovaných hodnot (čočka 20,5 mm)</i>	28
<i>Obr. 3.19: Srovnání prům. měřené hodnoty s výsledkem simulace (čočka 12,5 mm)</i>	28
<i>Obr. 3.20: Variace simulovaných a reálných hodnot</i>	30
<i>Obr. 3.21: Rozdíl průměrů simulovaných a skutečných dat</i>	31
<i>Obr. 3.22: Skutečná data proložená ideálním lineárním trendem</i>	33

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2.1: Shrnutí výsledků ze simulací (světlovod)</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2.2: Vybrané výsledky provedených simulací (čočka)</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 2.3: Uvažované vstupní faktory a jejich úrovně.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 2.4: Srovnání statistické významnosti jednotlivých faktorů.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2.5: Shrnutí výsledků z optimalizátoru.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2.6: DOE pro srovnání simulované a reálné hloubky propadliny.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 2.7: Shrnutí vyhodnocených dat.....</i>	<i>32</i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

GIT	technologie vstřikování s asistencí plynu
WIT	technologie vstřikování s asistencí vody
RSM	metoda plochy odezvy
GRA	relační analýza úrovní
3D	trojdimenzionální
CAE	počítačem podporované inženýrství
UV	ultrafialové záření
PC	polykarbonát
mm	milimetr
PS	polystyren
%	procento
η	éta (smykový viskozita)
L	délka
D	průměr
Φ	ří (průměr)
MPa	megapascal
s	sekunda
°C	stupeň Celsia
R	poloměr
CAD	počítačem podporovaná konstrukce
DOE	metodika návrhu experimentu
LED	elektroluminiscenční dioda
kg	kilogram
cm ³	centimetr krychlový
min	minuta
m ³	metr krychlový
STEP	standard pro předávání produktových dat

s^{-1}	reciproká sekunda
mm/s	milimetr za sekundu
p_odezva	hloubka propadliny
min.	minimum
max.	maximum
t_formy	teplota formy
t_taveniny	teplota taveniny
α	alfa (hladina významnosti)
y	vypočtené minimum hloubky propadliny
Term	interakční prvek
H_0	nulová hypotéza
H_a	alternativní hypotéza
P	P-hodnota (statistický ukazatel)
p_měřeno	skutečná hloubka propadliny
p_real	skutečná hloubka propadliny
p_sim	hloubka propadliny ze simulace
p_simulováno	hloubka propadliny ze simulace
N	četnost měřených dat
sm. odch.	směrodatná odchylka
μ	mí (střední hodnota)
σ	sigma (rozptyl)
NON	nenáležící
dif.	diference

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Kvalifikační práce

1. **VANĚK, J.** Konstrukční návrh vstřikovací formy pro zpracování polymerů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 60 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/40780>. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce: Ovsík, M.
2. **VANĚK, J.** Konstrukční návrh vstřikovací formy pro plastový díl části motoru včetně simulace funkčnosti formy. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 111 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/45232>. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce: Ovsík, M.

Publikace Web of Science

1. **VANEK, J., STANEK, M., OVSIK, M., CHALUPA, V.** Injection Molding of Polycarbonate Thick-Walled Parts Using a Tool with Variously Designed Gate Inserts. *Materials in Tehnologije: Institute of Metals and Technology*, 2023. Vol. 57, pp. 299-305. DOI: <https://doi.org/10.17222/mit.2022.692>
2. **VANEK, J., PETER, O., HEINRICH, G., STOCEK, R.** 2D Transient Thermal Analytical Solution of the Heat Build-Up in Cyclically Loaded Rubber Cylinder. Springer Berlin, Heidelberg: *Advances in Polymer Science*, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/12_2023_165
3. **CHALUPA, V., STANEK, M., VANEK, J., STRNAD, J., OVSIK, M.** Design of Dual-Head 3D Printer. *UJEP: Manufacturing Technology*, 2023. Vol. 23, Issue 2, pp. 177–185. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2023.032>
4. **OVSIK, M., STANEK, M., DOCKAL, A., VANEK, J., HYLOVA, L.** Influence of Cross-Linking Agent Concentration/ Beta Radiation Surface Modification on the Micro-Mechanical Properties of Polyamide 6. *MDPI AG: Materials*, 2021. Vol. 14, Issue 21, p. 6407. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216407>
5. **OVSIK, M., MANAS, M., STANEK, M., DOCKAL, A., VANEK, J., MIZERA, A., ADAMEK, M., STOKLASEK, P.** Polyamide Surface Layer Nano-Indentation and Thermal Properties Modified by Irradiation. *MDPI AG: Materials*, 2020. Vol. 13, Issue 13, p. 2915. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13132915>

OBORNÝ ŽIVOTOPIS



Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Státní příslušnost: Česká republika

Datum narození: 26.5. 1993 Pohlaví: Muž

☎ Telefonní číslo: (+420) 732309316

✉ E-mailová adresa: j4_vanek@utb.cz

📍 Bydliště: Záhumní 553, 687 61 Vlčnov

VZDĚLÁNÍ A ODBORNÁ PŘÍPRAVA

Doktorský studijní program, Ph.D.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická [2019 – dosud]

Adresa: Vavrečkova 275, 760 01 Zlín

Studijní obory: Nástroje a procesy

Disertační práce: Vstřikování tlustostěnných dílů

Magisterský studijní program, Ing.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická

Adresa: Vavrečkova 275, 760 01 Zlín

Studijní obory: Konstrukce technologických zařízení

Diplomová práce: Konstrukční návrh vstřikovací formy pro plastový díl části motoru včetně simulace funkčnosti formy

Bakalářský studijní program, Bc.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická

Adresa: Vavrečkova 275, 760 01 Zlín

Studijní obory: Technologická zařízení

Bakalářská práce: Konstrukční návrh vstřikovací formy pro zpracování polymerů

KURZY A SEMINÁŘE

Cadmould – Uživatelský seminář

Kuřim, 29. 11. 2023

Výzkumné centrum INTEMAC

PolyWorks – Rozměrová inspekce v praxi

Zlín, 21. 02. 2023

InnovMetric Software

Mould4Plast – Rozvoj znalostí v oblasti forem a plastů

Zlín, 25.11. 2020

Moravskoslezský automobilový klastr

Kurz základů vědecké práce

Praha, 20.10. 2019 – 24.10. 2019

Akademie věd ČR

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

Přípravář výroby, konstruktér

Kovovýroba FOX, s.r.o. [2010–2014]

Uherský Brod

Seřizovač tvářecích lisů

Kovovýroba HOFFMAN, s.r.o. [2013–2014]

Ostrožská Nová Ves

Kontrolor výstupní kvality

Kovárna VIVA a.s. [2014–2015]

Zlín

Provozování živnosti

[2016–2022]

Uherské Hradiště

Předmět podnikání: nástrojářství, zámečnictví

Letní stáž – konstruktér

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [2014–2015]

Zlín

Návrh a výroba kompozitní kapotáže

AKADEMICKÁ ČINNOST

Člen řešitelského kolektivu

9. 2019–12. 2019

UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství

Projekt: IGA/FT/2019/002

Tvůrce/realizátor přednášek

10. 2020–12. 2020

UTB ve Zlíně, FT

Projekt: IKAROS

Člen řešitelského kolektivu

1. 2020–12. 2020

UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství

Projekt: IGA/FT/2020/003

Člen řešitelského kolektivu

1. 2021–12. 2021

UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství

Projekt: IGA/FT/2021/005

Hlavní řešitel projektu

1. 2022–12. 2022

UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství

Projekt: IGA/FT/2022/002

Mezinárodní mobilita – odborná stáž

3. 2022–4. 2022

Technická univerzita v Košiciach

Fakulta výrobných technologií so sídlom v Prešove

Projekt: CEEPUS

Hlavní řešitel projektu – konstruktér

2. 2021–1. 2023

UTB ve Zlíně, FT

Projekt: JUNG/2020/009

Člen řešitelského kolektivu

1. 2023–12. 2023

UTB ve Zlíně, FT – Ústav výrobního inženýrství

Projekt: IGA/FT/2023/005

Výuka odborných předmětů v rámci FT UTB

9. 2019 – Aktuální

Výuka cvičení a seminářů napříč ročníky v prezenční i kombinované formě studia

- Inženýrská grafika
- Technické kreslení I
- Technické kreslení II
- Úvod do CAD
- CAD I
- CAD II
- Tepelné úpravy kovů
- Výrobní stroje a zařízení I
- Technologie II
- Konstrukce a modelování tvářecích procesů

Vedení závěrečných prací v rámci FT UTB

9. 2019 – Aktuální

Počet úspěšně obhájených závěrečných prací

Bakalářské práce: **9**

Diplomové práce: **1**

OSTATNÍ ČINNOST

Člen Akademického senátu Fakulty technologické

5. 2021 – Aktuální

Člen ekonomické komise AS Fakulty technologické

5. 2021 – Aktuální

DIGITÁLNÍ DOVEDNOSTI

CATIA V5 / Autodesk Moldflow / CADMOULD / Moldex 3D / Autoform Forming / PolyWorks / Autodesk Inventor / Autodesk AutoCAD / Fusion 360

ZNALOST JAZYKŮ

Mateřský jazyk: čeština

Další jazyk: angličtina

POSLECH C1 ČTENÍ C1 PSANÍ C1

SAMOSTATNÝ ÚSTNÍ PROJEV B2 MLUVENÁ KOMUNIKACE B2

ŘIDIČSKÝ PRŮKAZ

Osobní automobil: B

Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Vstřikování tlustostěnných dílů

Injection Molding of Thick-walled Parts

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2024

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80- 7678-243-3