

Teze habilitační práce

**Mechanické vlastnosti vstřikovaných dílů
z polypropylenu: vliv nástroje a procesu**

**Mechanical Properties of Injection Molded Polypropylene
Products: Influence of Tool and Process**

Autor: Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Obor: Nástroje a procesy

Zlín, říjen 2022

© Martin Ovsík

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Habilitation Thesis Summary**.

Publikace byla vydána v roce 2022

Klíčová slova: polypropylen, vstřikování, procesní parametry, povrch nástroje, vzdálenost od vtoku, mechanické vlastnosti, morfologie

Key words: polypropylene, injection molding, process parameters, tools surface, flow length, mechanical properties, morphology

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-092-7

ABSTRAKT

Habilitační práce se zabývá studiem lokálních změn mechanických vlastností vstřikovaných dílů z polypropylenu a jejich vztahu k jakosti povrchu nástroje a procesním parametřům.

V práci byl studován vliv typicky používaných povrchů dutiny formy (Ra 0,06 – 1,6 μm) a speciálních povlaků (TiB_2 a TiCN), které se nemalou mírou podílejí na toku materiálu (délce zatečení) a finálních vlastnostech vstřikovaného dílu. Byly zaznamenány znatelné rozdíly mezi délkou zatečení, a to až o 13 % se změnou jednotlivých povrchů. Podobné tendence byly zjištěny i u replikace povrchu dutiny formy na povrch dílu, kdy se povrch replikoval v jednotlivých místech dílu rozdílně.

Klíčovou roli v lokálních změnách mechanických vlastností hraje morfologie vstřikovaných dílů (stupeň krystalinity, velikost skin a core vrstvy), na kterou má vliv tok materiálu a procesní podmínky. Ze získaných výsledků lze vyvodit, že indentační metoda je natolik citlivá, aby byla schopna zachytit změnu morfologie polypropylenu, která je klíčová pro výsledné mechanické vlastnosti dílu. Bylo prokázáno, že mechanické vlastnosti nejsou v různých částech dílu stejné, ale z důvodu nerovnoměrného chlazení, jakosti povrchu dutiny formy a procesním parametřům, může být rozdíl v jednotlivých místech až 37 %. Dále lze konstatovat, že mechanické vlastnosti nejsou homogenní nejen po délce výrobku (ve směru toku), ale také se liší přes celý průřez dílu. Díky toku materiálu a chlazení ve formě vznikají ve výrobku rozdílné vrstvy s různým podílem krystalické fáze – povrchová (skin) vrstva, přechodová (smyková) vrstva a jádro (core). Jednotlivé vrstvy vykazují rozdílné mechanické vlastnosti, kdy rozdíl v hodnotách byl až 32 %. V technické praxi se čím dál více využívají povlaky na dutiny formy, které mají pozitivní vliv nejen na životnost formy, tok materiálu, ale také na mechanické vlastnosti vstřikovaného dílu. Aplikací povlaku se zvýšily mechanické vlastnosti dílu až o 35 % vůči dílu vyrobeného do formy bez povlaku.

Z výše uvedených výsledků je patrný možný dopad na výrobu polymerních výrobků technologií vstřikování v technické praxi. Pomocí vhodné volby umístění vtoku, jakosti povrchu dutiny formy a vhodně zvolených procesních parametřů lze zajistit v namáhaných oblastech vstřikovaných výrobků lokální zlepšení mechanických vlastností.

ABSTRACT

This habilitation thesis investigates changes in local mechanical properties of injected polypropylene parts and the manner in which they are influenced by tool's surface, process parameters and flow length.

In this work, typically used surfaces of the cavity (Ra 0.06 – 1.6 μm) and special coatings (TiB_2 and TiCN) were used. These surface treatments can significantly alter material flow (flow length) and final mechanical properties of injection parts. As can be seen from the results, noticeable differences in flow length (up to 13 %) were measured. Similar tendencies were found in replication ability of the cavity's surface on the surface of product. The surface was copied unevenly in various places of the article.

The key area from the view of mechanical properties is the morphology creation (degree of crystallinity and size of skin/core layer) of the entire product, which is significantly affected by material flow and process parameters of injection moulding. It can be said from the measurements that applied indentation method is sufficiently sensitive to capture the changes to polypropylene's morphology, which is important for final mechanical properties of an injection moulded part. It was demonstrated that mechanical properties are not uniform over the entire injected product. Contrary to popular belief, mechanical properties can vary along the flow length due to uneven cooling, surface quality and process parameters. The difference in individual spots in injected article was up to 37 %. Furthermore, it can be said that mechanical properties are non-homogenous not only along the flow length, but also across the cross section of a sample. Due to the way a material flows and cools in the mould, layers with varying fraction of crystalline phase get created. These layers are usually called skin, shear and core, and they all demonstrate differing mechanical properties which can vary by up to 32 %. Besides the traditional surface finishing methods in mould design, coatings laid upon the cavity are encountered with increased frequency in current technical practice. These coating have a positive effect not only on longevity of the mould, but also on material flow and subsequently mechanical properties of injected articles. Application of a coating can lead to 35 % increase of mechanical properties of the product in comparison with traditionally manufactured article.

As is evident from aforementioned results, the possible benefits of this work for injection moulding of polymer products is apparent. Suitably chosen gate location, surface of the cavity and process parameters can ensure targeted improvement of mechanical properties in stressed parts of a product.

OBSAH

ABSTRAKT.....	3
ABSTRACT.....	4
ÚVOD.....	6
SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	7
CÍLE PRÁCE.....	9
1. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	10
1.1 Příprava experimentů.....	10
1.2 Zkušební tělesa.....	10
1.3 Vstřikování zkušebních těles.....	11
1.4 Mechanické vlastnosti.....	12
1.5 Měření morfologie.....	12
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	13
2.1 Statistické vyhodnocení naměřených dat.....	13
2.2 Podnět z praxe – technický díl (rámeček světlometu).....	14
2.2.1 Mechanické vlastnosti (1 N) – povrchová (skin) vrstva.....	14
2.2.2 Mechanické vlastnosti (5 N) – (skin-core) vrstva.....	15
2.2.3 Jakost povrchu.....	16
2.3 Tribologie povrchu formy.....	17
2.4 Simulace vstřikovacího procesu.....	17
2.5 Měření vlastností povrchové (skin) vrstvy.....	18
2.5.1 Vliv povrchu formy na mechanické vlastnosti.....	18
2.5.2 Vliv vzdálenosti od vtoku na morfologii polypropylenu.....	19
2.5.3 Vliv vzdálenosti od vtoku na jakost povrchu.....	20
2.6 Měření vlastností (skin-core) vrstvy.....	21
2.6.1 Vliv povrchu formy a vzdálenosti od vtoku na mechanické vlastnosti.....	22
2.6.2 Vliv povrchu formy a vzdálenosti od vtoku na morfologii polypropylenu.....	22
2.6.3 Vliv teplota formy a vzdálenosti od vtoku na mechanické vlastnosti.....	24
2.6.4 Vliv teploty formy a vzdálenosti od vtoku na morfologii polypropylenu.....	25
2.7 Měření mechanických vlastností přes průřez zkušební tělesa.....	25
DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	27
PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	30
ZÁVĚR.....	31
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	32
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	34
SEZNAM TABULEK.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	35
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA.....	36

ÚVOD

Polymerní materiály nacházejí v poslední době stále větší uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. V mnoha aplikacích dochází k nahrazování dosud běžně používaných kovových materiálů, skla či dřeva, právě polymerními materiály. Důležitou roli v tomto ohledu nehrají jen samotné polymerní materiály, ale taktéž technologie, které umožňují velmi efektivní produkci polymerních výrobků. Mezi nejčastěji používané technologie patří vstřikování. Hlavními důvody rozšíření této technologie jsou především vysoká produktivita výroby, automatizace procesu, možnost vyrábět složité díly při vysoké reprodukovatelnosti a univerzálnost, díky níž lze vstřikovat většinu druhů polymerních materiálů. Nevýhodou technologie vstřikování jsou však vysoké pořizovací náklady na vstřikovací stroj či vstřikovací formu.

Při požadavku zákazníka vyrábět součást procesem vstřikování je zapotřebí realizovat několik základních kroků. Prvním krokem je konstrukční návrh součásti, který zahrnuje její tvar, funkčnost, vhodný polymerní materiál a vyrobitelnost. Dalším krokem je návrh vstřikovací formy. Při návrhu vstřikovací formy se musí brát zřetel na vyrobitelnost součásti, konstrukci formy, použitý stroj a ekonomické náklady na výrobu. Důležitou roli hraje také volba materiálu formy a její následné tepelné zpracování. Během výroby samotné vstřikovací formy je nutno zvolit vhodnou technologii obrábění, kterou může být dosaženo požadovaných mechanických a estetických vlastností výrobků se zachováním určené jakosti povrchu. Kvalitnější povrch formy může poté zabezpečit mnohem lepší podmínky pro tok taveniny. Znalost tokových vlastností polymerní taveniny v praxi poskytuje četné možnosti optimalizace výrobního procesu vstřikovacích forem a s tím i významné snížení nákladů kladených na výrobu.

V dnešní době je neodmyslitelnou součástí návrhu formy ověření její funkčnosti pomocí simulace procesu vstřikování. K tomuto ověření jsou vyvinuty simulační nástroje, kterými lze zjistit možné vady, problémy a procesní parametry při vstřikování součásti. Díky ověření funkčnosti odpadají dodatečné úpravy formy, tím časové a ekonomické ztráty při opravě formy. Další významnou součástí optimalizace vstřikování, je nastavení procesních parametrů, kterými jsou například velikost vstřikovacího tlaku, dotlaku a doba chlazení. Tyto parametry se významně podílejí na výsledných mechanických vlastnostech a jakosti povrchu vstřikovaného výrobku. Při volbě vstřikovaného materiálu musí být brán taktéž zřetel na jeho molekulární strukturu a reologické vlastnosti, jež mají značný vliv na vzhled, mechanické vlastnosti a jakost povrchu budoucího vstřikovaného výrobku.

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Předmětem této habilitační práce je výzkum změn vybraných vlastností vstřikovaných dílů podél tokové dráhy v závislosti na kvalitě povrchu dutiny formy a procesních podmínkách. Pozornost byla věnována především mikro-mechanickým vlastnostem a jejich vztahu k nadmolekulární struktuře vstřikovaných polymerních dílů. K těmto účelům bylo využito zejména měření indentační tvrdosti a indentačního modulu a charakterizace struktury pomocí rentgenové difrakce a diferenciální snímací kalorimetrie.

Práce, které by se zabývaly změnou mechanických vlastností vstřikovaných dílů podél tokové dráhy, nebyly v rámci provedené literární rešerše nalezeny. Ve většině případů jsou mechanické vlastnosti a případně tvrdost zjišťovány v lokálním místě a výsledek těchto měření reprezentuje vlastnost v celém objemu dílu. V pracích uvedených níže jsou tudíž popsány jen dílčí poznatky, které se zabývají vlivem procesních parametrů vstřikování na mechanické vlastnosti, případně vlivem jakosti povrchu nástroje na délku zatečení a replikaci povrchu. Existuje více studií, které se zabývají změnou krystalinity, ale opět zpravidla v jednom místě testovaného dílu. V oblasti mikro-vstřikování se problematikou vlivu drsnosti povrchu na zatečení polymerního materiálu zabývalo několik studií. Výsledky studií jsou v některých případech obdobné jako u běžné technologie vstřikování, avšak rozměry finálního produktu se pohybují v řádu mikrometrů a ovlivnění toku polymerní taveniny vlivem změny drsnosti povrchu je mnohem větší. Tyto výsledky z důvodu značného rozdílu ve velikosti výrobku nelze přímo aplikovat na vstřikování dílů běžných rozměrů.

V této části jsou uvedeny studie, které se zabývají problematikou vlivu procesních podmínek na mechanické vlastnosti výrobku. Studie [1] byla zaměřena na vliv procesních parametrů (především vstřikovací rychlosti) na mechanické vlastnosti mikro-vstřikovaného vzorku z PP. Bylo zjištěno, že se vzrůstající vstřikovací rychlostí se zvyšuje i tvrdost, a že tento parametr má větší vliv na vlastnosti kolmo k toku než ve směru toku. Obdobnou problematikou se zabývala také Glogowska et al. [2], která studovala chování materiálu při opětovném zpracování mikro-vstřikováním. Sykutera et al. [3] zjišťoval vliv procesních podmínek na viskozitu polymeru, kterou měřili přímo v dutině formy. Standardně se reologické parametry měří v reometru, ovšem cílem této práce bylo poskytnout reálné hodnoty pocházející přímo z výrobního procesu vstřikování. Publikace [4, 5, 6] řešili také vliv procesních podmínek, například tlaku a indexu toku taveniny, či důvod vzniku tokových značek. V neposlední řadě, je důležité zdůraznit vliv procesních parametrů na délku zatečení, které byly předmětem studie řady prací [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Problematicou krystalizace při vstřikování se zabýval Le et al. [14], kdy práce pojednává o vlivu tlaku na krystalizační kinetiku při vstřikování. Liu et al. [15] porovnával morfologii PP vzorků připravených konvenčním vstřikováním a mikro-vstřikováním. Výsledky ukázaly, že ačkoliv měly vzorky připravené

jinými metodami podobnou morfologickou strukturu, tak u mikro-vstříkovaných vzorků byl nalezen mnohem větší podíl smykově orientované vrstvy. Problematikou krystalizace v rozdílných místech vstříkovaného dílu se zabývají autoři Sun et al. [16] a Pantani et al. [17], kteří se zaměřují na vznik skin-core vrstvy u vstříkovaných dílů. Změnu morfologie polypropylenu popisují prostřednictvím uspořádání a velikostí sférolitů ve vzdálenosti od povrchu. Problematikou krystalizace se zabývá také autoři v dalších studiích [18, 19].

Kromě procesních podmínek a vlastností vstříkovaného materiálu, má na délku zatečení vliv také kvalita vstříkovací formy. Schopnost taveniny replikovat povrch dutiny formy na výrobek se pozoruje nejen u konvenčního vstříkovaní, ale také u mikro-vstříkovaní. Vliv povrchu formy v oblasti mikro-vstříkovaní řeší ve svých publikacích například Surace et al. [20], který zjistil, že délka zatečení se zvyšuje se zvyšující se drsností formy. Touto problematikou se zabývali také další studie [21, 22, 23], jejichž autoři se zaměřili na jiné polymerní materiály. Na druhou stranu, v oblasti konvenčního vstříkovaní se vlivem různých drsností povrchu dutiny formy na délku zatečení a mobilitu polymeru v tenkostěnných vstříkovaných výrobcích zaměřil Otsuka et al [24]. Jako poslední stojí za zmínku výzkum Lucchetta et al. [25], který se věnoval vlivu různých povlaků na tok taveniny v tenkostěnných výrobcích. Kromě reálného procesu vstříkovaní je pozornost věnována také simulacím, které mají za úkol se co nejvíce přiblížit realitě [26, 27, 28, 29].

CÍLE PRÁCE

Cílem habilitační práce je popsat vliv nástroje a procesu na mechanické vlastnosti vstříkovaných dílů z polypropylenu. Mechanické vlastnosti vstříkovaných dílů mohou být ovlivněny nejen nástrojem (povrchem dutiny formy), ale také procesem vstříkování (procesními parametry a tokem polymeru). Tyto aspekty mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti, jakost povrchu dílu (replikaci povrchu) a morfologii polypropylenu po délce vstříkovaného dílu, a to v různých vzdálenostech od místa vtoku.

Cíle práce je možné shrnout v následujících bodech:

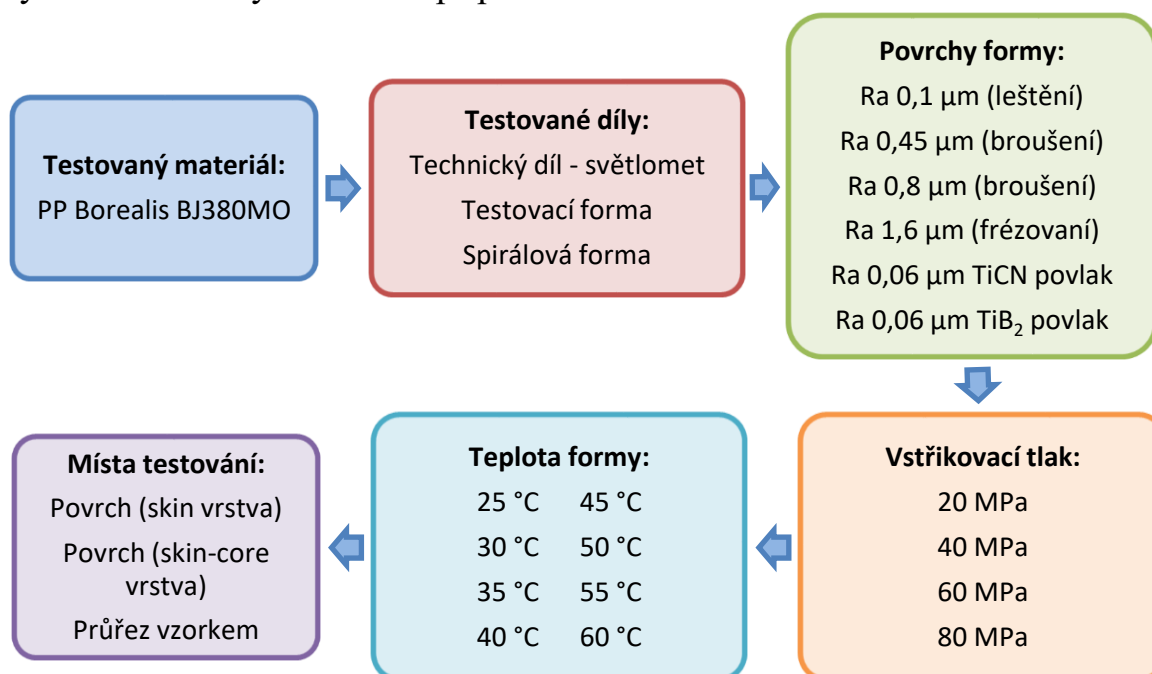
1. Simulace toku polymeru dutinou formy a ověření funkčnosti testovacích forem. Výsledky simulace slouží k nastavení procesu vstříkování na stroji a také k porovnání s reálným zkušebním tělesem.
2. Posouzení vlivu jakosti povrchu formy a naneseného povlaku na délku zatečení při různých vstříkovacích tlacích. Dle zjištěných výsledků lze navrhnout místa měření v rozdílné vzdálenosti od vtoku.
3. Popis vlastností skin-core vrstvy podél tokové dráhy a vztah této morfologie k lokálním mechanickým vlastnostem.
4. Popis vlivu procesních parametrů vstříkování na strukturu a mechanické vlastnosti zkušebních těles.
5. Popis změn replikace povrchu dutiny formy na povrch zkušebních těles podél tokové dráhy.

1. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Příprava experimentu vychází z požadavků praxe na výrobu technických výrobků technologií vstřikování. Jednotlivé návrhy byly ověřeny pomocí simulací procesu vstřikování a na základě získaných informací byly voleny technologické parametry.

1.1 Příprava experimentů

Pro přípravu zkušebních těles bylo zvoleno 6 skupin proměnných (Obr. 1.1.). Jednotlivá zkušební tělesa byla připravena z polypropylenu, za použití 2 typů testovacích forem, které byly opatřeny různými povrchy i s použitím speciálních povlaků a při různém nastavení technologických parametrů. Jednotlivé testy byly provedeny i na reálném díle z technické praxe. Pro každou z těchto kombinací bylo ze statistických důvodů připraveno minimálně 10 těles.



Obr. 1.1: Příprava experimentu

1.2 Zkušební tělesa

Pro testování byl zvolen polypropylen s označením Borealis BJ380MO. Základní vlastnosti, které byly čerpány z materiálového listu výrobce, jsou index toku taveniny 80 g/10 min, hustota 905 kg/m³ a modul pružnosti 1,30 GPa.

Pro výrobu zkušebních těles byly použity 2 testovací vstřikovací formy. Jedná se o testovací formu, která má dutinu ve tvaru spirály (navržené tak, aby tavenina z důvodu porovnání nedotekla až do konce) a testovací vstřikovací forma, která má dutinu stejného průřezu (6 x 1 mm) jako spirálová forma, ale předem dané délky, které jsou volitelné ve 4 různých variantách. Schéma zkušebních těles je uvedeno na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Zkušební tělesa: (a) spirála, (b) pásek

Tvarové dutiny formy

Při experimentu bylo použito 6 výměnných zkušebních desek. Pro obrobení povrchu zkušebních desek bylo použito frézování, broušení, leštění a nanesen speciální povlak TiCN a TiB₂. Použité obráběcí operace a jakost povrchu jednotlivých desek jsou zobrazeny v Tab. 1.1.

Tabulka 1.1: Jakost povrchu zkušebních desek

Způsob obrábění	Jakost povrchu (μm)	
	Ra	Rz
TiCN, TiB ₂ – leštění	0,06	0,49
Leštění	0,10	0,86
Broušení	0,45	3,43
Broušení	0,80	6,54
Frézování	1,60	9,23

1.3 Vstřikování zkušebních těles

Pro přípravu zkušebních těles byl použit vstřikovací stroj Allrounder 470 E 1000-290 Golden Edition od firmy Arburg. Na základě simulací vstřikovacího procesu a z materiálového listu polypropylenu byly zvoleny technologické parametry vstřikování (tab. 1.2).

Tabulka 1.2: Technologické parametry vstřikování

Technologické parametry	Nastavené hodnoty
Vstřikovací tlak (MPa)	20, 40, 60, 80
Dotlak	80 % vstřikovacího tlaku
Doba chlazení (s)	20
Teplota formy (°C)	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60
Teplota taveniny (°C)	215

1.4 Mechanické vlastnosti

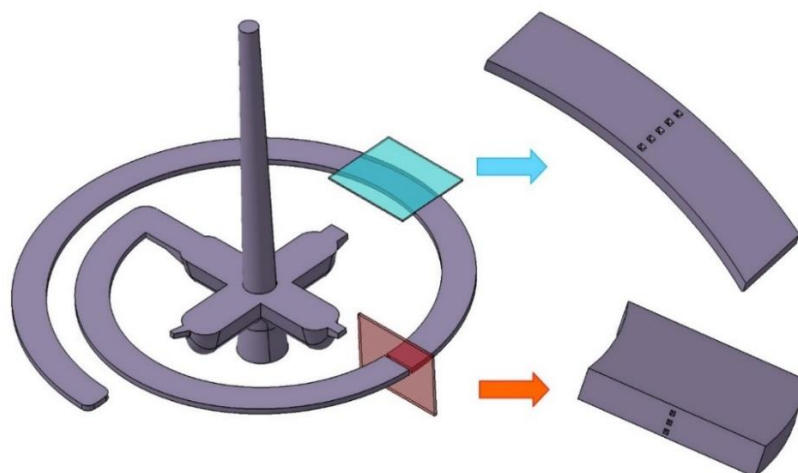
Měření mechanických vlastností bylo realizováno na mikro-tvrdoměru MCT³ do firmy CSM Instrument, metodou DSI (Depth Sensing Indentation). Jako vnikací tělíčko byl použit Vickersův indentor. Vyhodnocení mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr, dle normy ČSN EN ISO 14557. Nastavené parametry měření jsou uvedeny v tabulce 1.3. Z naměřených mechanických vlastností byly vyhodnoceny Vtisková tvrdost a Vtiskový modul.

Tabulka 1.3: Parametry měření mechanických vlastností

Parametr měření	Měření skin vrstvy	Měření skin-core vrstvy
Aplikované zatížení (N)	1	5
Výdrž na zatížení (s)	90	90
Zatěžující a odtěžující rychlost (N/min)	2	10

Měření průřezu těles

Pro určení mechanických vlastností a morfologie v různých vzdálenostech od povrchu zkušebních těles byla tato tělesa řezána, zalita do pryskyřice a následně vyleštěna. Na obrázku 1.3 jsou uvedeny řezy těles pro měření vlastností v různých hloubkách. Modrou barvou je naznačeno odbrušování vrstev směrem od povrchu tělesa do středu (povrch 0 mm a následně v hloubce 0,125 mm, 0,250 mm, 0,375 mm, 0,500 mm). Červenou barvou je naznačen řez tělesem tak, aby bylo možno změřit vlastnosti kolmo na testované těleso.



Obr. 1.3: Schéma měření průřezu těles

1.5 Měření morfologie

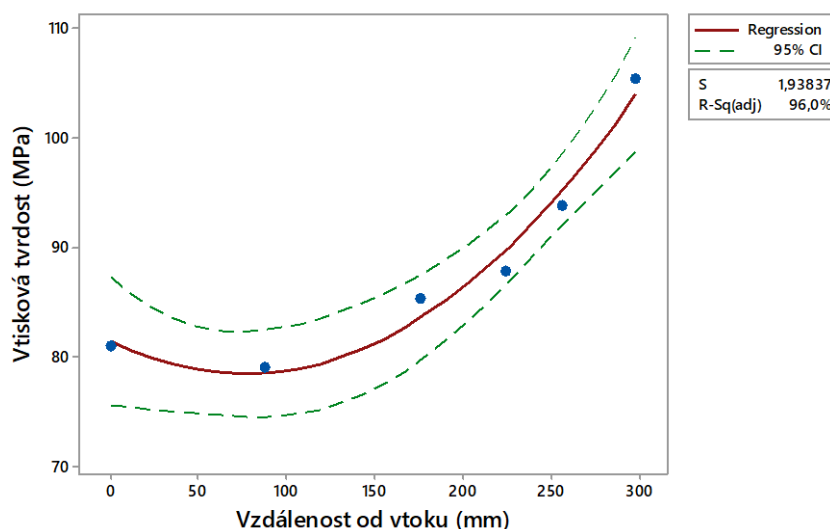
Změny morfologie polypropylenu, připraveného při různých technologických podmínkách vstřikování byly ověřeny pomocí diferenciální snímací kalorimetrie (DSC), širokoúhlé rentgenové difrakce (WAXD) a polarizační optické mikroskopie.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byl zjišťován vliv vzdálenosti od vtoku u vstříkovaných dílů na sledované parametry, jako jsou mechanické vlastnosti (vtisková tvrdost a vtiskový modul), jakost povrchu a morfologie dílu. Tyto vlastnosti byly měřeny jak v povrchové vrstvě, tak i přes celý průřez testovaného tělesa.

2.1 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data byla statisticky vyhodnocena pomocí boxplotových diagramů doplněných o základní statistiku a kvadratické regrese s vyjádřením rovnice modelu s příslušnými odhady koeficientů modelu.



Obr. 2.1: Regresní závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti od vtoku –TiB₂

Na základě naměřených výsledků byl navržen vhodný regresní (matematický) model (obr. 2.1), který popisuje vliv vzdálenosti od vtoku na každou ze sledovaných charakteristik. Při hledání regresního modelu bylo provedeno testování statistické významnosti s výsledkem „zamítnutí hypotézy o nevýznamnosti“ regresního modelu. Dále byl proveden výpočet „predikovaného korelačního koeficientu (R-Sq)“ a „střední kvadratické chyby predikce (S)“ za účelem nalezení typu regresní funkce a odhad regresních parametrů, včetně určení statistické významnosti každého jednotlivého parametru na konfidenční úrovni $1 - \alpha = 0,95$ (tedy $\alpha = 0,05$). Rovnice pro vyjádření regresního modelu:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (2.1)$$

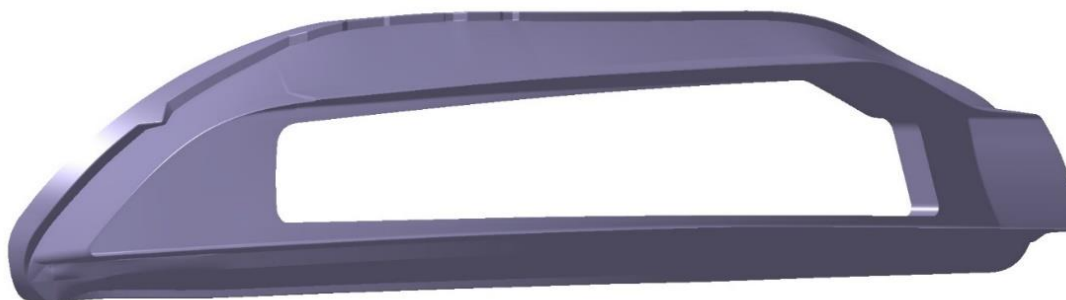
kde x je vzdálenost od vtoku, y je sledovaná charakteristika a b_0 , b_1 , b_2 jsou regresní odhady koeficientů modelu.

Tabulka 2.1: Odhady koeficientů modelu – TiB₂

Proměnná	b_0	b_1	b_2
Ra 0,06 μm – TiB ₂	8,15E+01	7,95E-02	5,21E-04

2.2 Podnět z praxe – technický díl (rámeček světloometu)

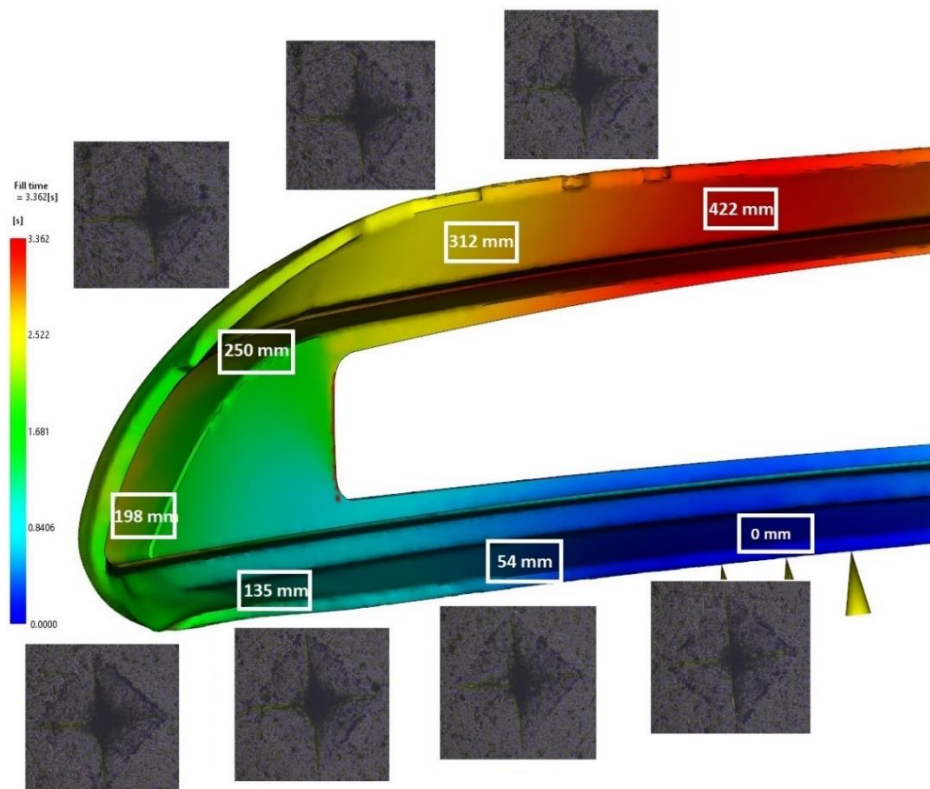
Habilitační práce vychází z podnětu z praxe, kde na technickém dílu – rámeček světloometu (obr. 2.2), se v některých místech vyskytovalo mechanické poškození. Tato místa byla specifikována a na základě dráhy toku polymeru byly stanoveny vzdálenosti od vtoku, kde byly měřeny sledované parametry, jako jsou mechanické vlastnosti (vtisková tvrdost, vtiskový modul), jakost povrchu apod.



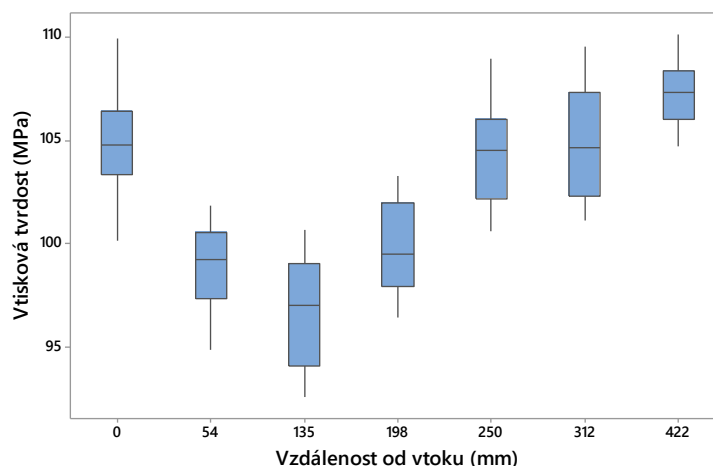
Obr. 2.2: Technický díl – rámeček světloometu

Na rámečku světloometu, který byl vyroben z polypropylenu, byla provedena analýza vstřikování v programu Moldflow. Na obrázku 2.3 je znázorněn výsledek plnění, který zobrazuje dráhu toku polymeru od vtoku až po úplné zaplnění (označeno červenou barvou) v čase 3,4 s.

2.2.1 Mechanické vlastnosti (1 N) – povrchová (skin) vrstva



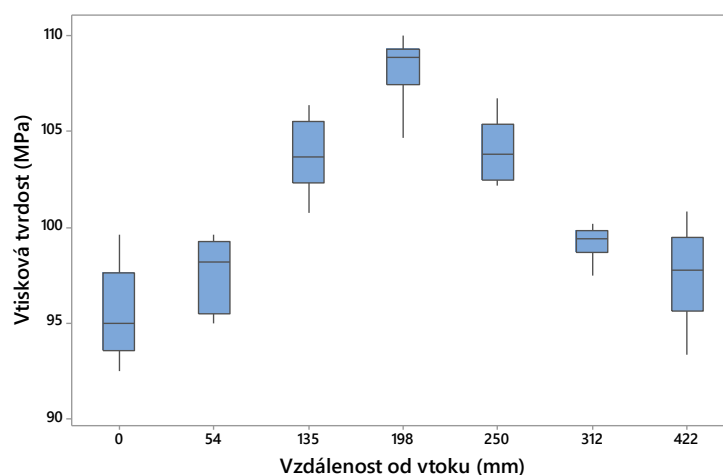
Obr. 2.3: Zobrazení míst měření po délce výrobku s vyobrazením vtisků



Obr. 2.4: Vliv vzdálenosti od vtoku na vtiskovou tvrdost povrchové vrstvy

Na základě dráhy toku polymeru v dutině formy bylo stanoveno 7 míst měření, která byla zvolena s ohledem na umístění vtoku v různých vzdálenostech od vtoku (0 mm – místo vtoku, 54 mm, 135 mm, 198 mm, 250 mm, 312 mm a 422 mm – místo konce plnění). Na obrázku 2.3 jsou zobrazena jednotlivá místa měření s příslušnými snímky vtisku. Povrchová (skin) vrstva byla měřena při aplikovaném zatížení 1 N, u kterého byla dosažena maximální hloubka průniku indentoru přibližně 20 μm . Výsledky ukazují, že vtisková tvrdost povrchové vrstvy má u vtoku i na konci dílu přibližně stejnou hodnotu vtiskové tvrdosti (obr. 2.4). Směrem ke středu dílu, až do vzdálenosti 135 mm od vtoku má vtisková tvrdost klesající tendenci. Od této vzdálenosti až po konec dílu (422 mm) je trend opačný. Rozdíl mezi koncem dílu a vzdáleností 135 mm je 10 %. To je způsobeno rozdílnou tloušťkou skin vrstvy, která má největší tloušťku ve středu dílu a směrem ke vtoku a ke konci dílu se zmenšuje.

2.2.2 Mechanické vlastnosti (5 N) – (skin-core) vrstva

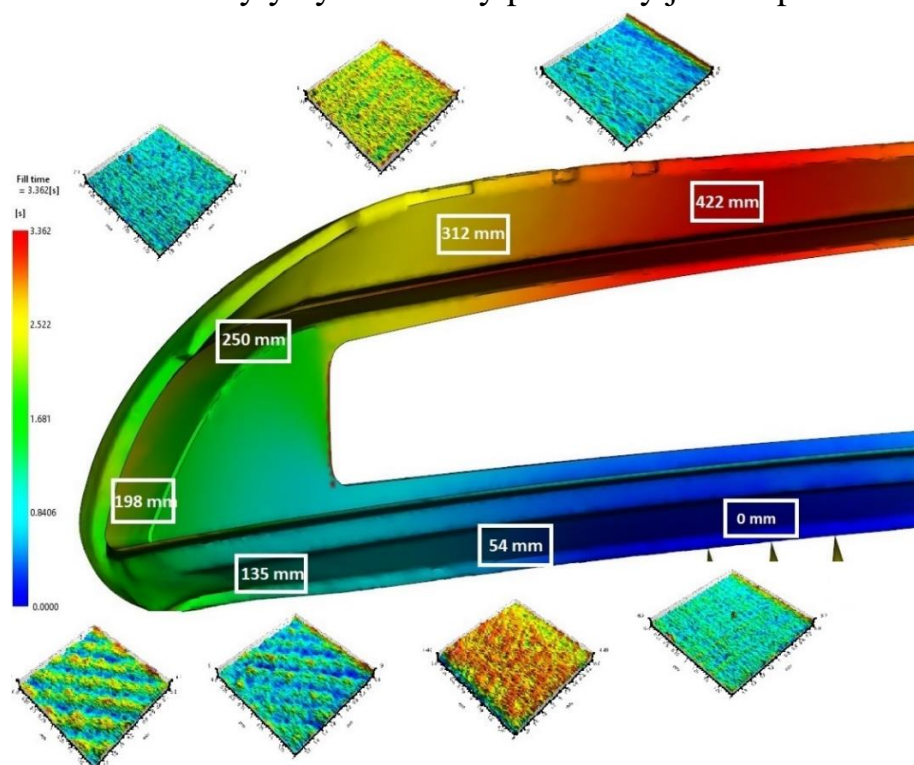


Obr. 2.5: Vliv vzdálenosti od vtoku na vtiskovou tvrdost hloubějších vrstev

Pro posouzení mechanických vlastností v hlubších vrstvách dílu, bylo použito zatížení 5 N, kde indentor pronikl do hloubky až 100 μm . V této hloubce byla měřena soustava skin-core. Dominantní zastoupení zde měla core vrstva, u které byl naměřen trend v hodnotách vtiskové tvrdosti opačný (obr. 2.5), ve srovnání s povrchovou vrstvou. U vtoku a na konci dílu byla zjištěna vtisková tvrdost přibližně ve stejných hodnotách jako při měření se zatížením 1 N ve středu dílu. Ve vzdálenosti 198 mm od vtoku byla naměřena nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti. Rozdíl mezi vtokem a vzdáleností 198 mm činí 14 %. Tento trend je pravděpodobně způsoben uspořádáním struktury a typem sférolitů, které mají dominantní zastoupení v jednotlivých místech dílu.

2.2.3 Jakost povrchu

Jakost povrchu byla měřena ve stejných místech jako mechanické vlastnosti. Na obrázku 2.6 jsou uvedeny 3D skeny povrchu v jednotlivých vzdálenostech od vtoku. V těchto bodech byly vyhodnoceny parametry jakosti povrchu Ra a Rz.

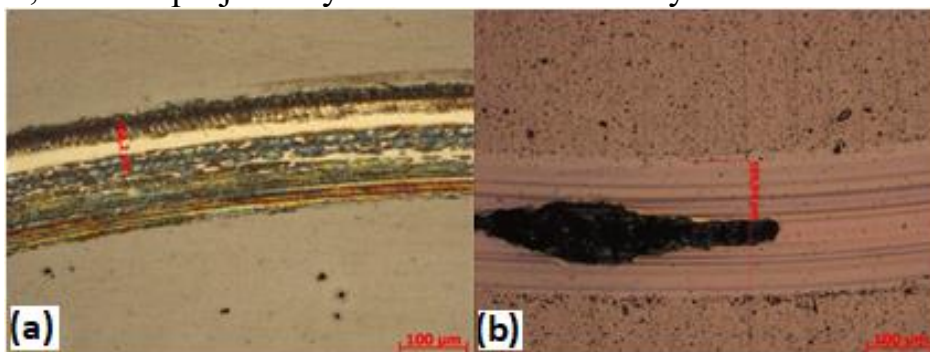


Obr. 2.6: Zobrazení míst měření po délce výrobku s 3D skenem povrchu

U vtoku byla naměřena jakost povrchu přibližně stejná (R_a 0,25 μm), jako na konci dílu. Směrem ke středu dílu byl naměřen stoupající trend, který kulminuje ve vzdálenosti 135 mm (R_a 0,5 μm). Rozdíl v jakosti povrchu R_a mezi místem vtoku a vzdáleností 135 mm je 108 %. Tento rozdíl může být způsoben rozdílným vstřikovacím tlakem, lokální teplotou v konkrétním místě, ale také uzavřeným vzduchem, který vyplňuje nerovnosti povrchu. Vyšší hodnoty jakosti povrchu v místech 135 mm a 198 mm mohou být způsobeny nedokonalým vyleštěním hůře dostupných míst v záhybech formy.

2.3 Tribologie povrchu formy

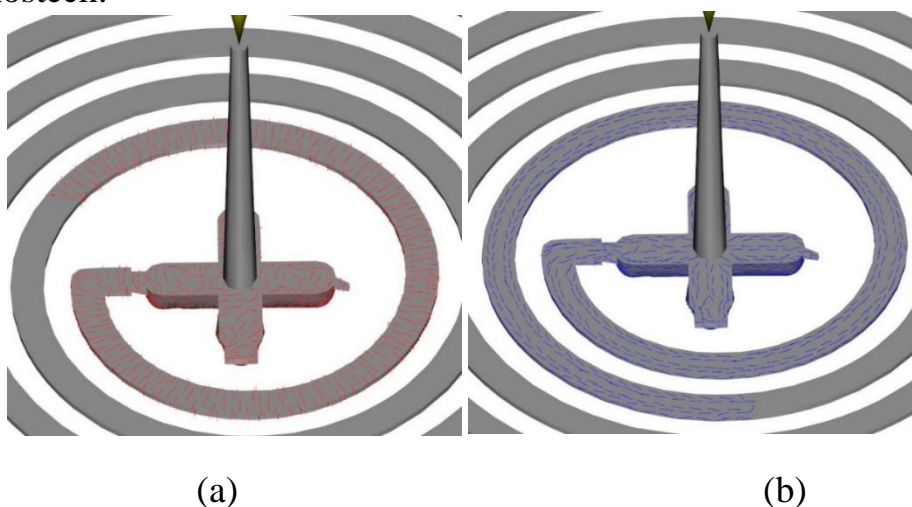
Se zvyšujícími se nároky na povrchy forem a kvalitu vyráběných dílů se čím dál více uplatňuje nanášení speciálních povlaků na povrchy dutin forem, které zvyšují životnost jednotlivých dílů formy, zlepšují proces vstřikování a kvalitu finálního dílu. Optické vyhodnocení tribologie povrchu je zobrazeno na obrázku 2.7. Na obr. 2.7 (a) je stopa, která je na rozhraní tenké vrstvy a substrátu. U okraje stopy jsou patrné trhlinky pravděpodobně kohezního charakteru. Na obrázku 2.7 (b) je vidět lokální výrazné poškození vrstvy, po kterém byl test ukončen, ačkoliv nedochází k souvislému odstranění vrstvy. Při posouzení vlastností základního materiálu 1.2343 a nanesených povlaků TiB_2 a $TiCN$ vyplývá, že nanášením povlaku se zvýší několikanásobně tvrdost povrchu a také zvýší odolnost proti opotřebení, která se projeví zvýšením životnosti formy.



Obr. 2.7: Tribologické stopy: (a) TiB_2 10 000 cyklů, (b) $TiCN$ 10 000 cyklů

2.4 Simulace vstřikovacího procesu

Pro nastavení podmínek vstřikování a také porovnání reálných výsledků byla provedena analýza vstřikovacího procesu v programu Moldflow. Na obrázku 2.8 je uvedena orientace polymerních řetězců v povrchové vrstvě (skin) a v jádru (core) vykazující zásadní rozdíly, které se budou dále projevovat i v testovaných vlastnostech.



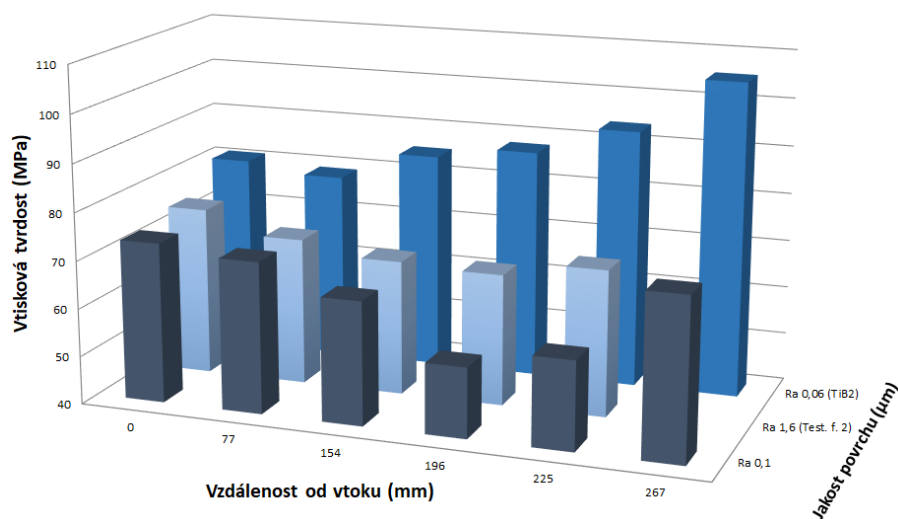
Obr. 2.8: Výsledky analýzy: (a) core vrstva, (b) skin vrstva

2.5 Měření vlastností povrchové (skin) vrstvy

Mechanické vlastnosti jsou klíčovým parametrem u vstříkovaných dílů. Získané výsledky naznačují, že mechanické vlastnosti se liší skrz průřez materiálu. Z tohoto důvodu byl výzkum dále zaměřen na sledování mechanických vlastností v povrchové vrstvě, a to v různých vzdálenostech od vtoku. Hloubka měření mechanických vlastností dosahovala přibližně 20 μm . Měření bylo doplněno studiem morfologie (krystalinity) a replikace jakosti povrchu.

2.5.1 Vliv povrchu formy na mechanické vlastnosti

V této kapitole byl sledován vliv vzdálenosti od vtoku a na mechanické vlastnosti v rámci vybraných povrchů forem a při vstříkovacím tlaku 80 MPa.



Obr. 2.9: Vliv vzdálenosti od vtoku a povrchu formy na vtiskovou tvrdost

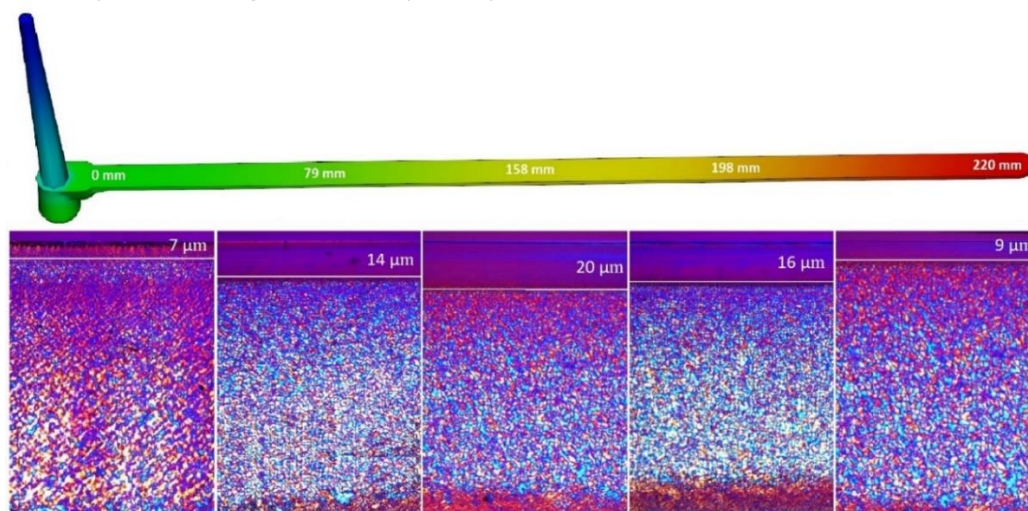
U všech zkušebních těles připravených na různých površích formy lze konstatovat, že vzdálenost od vtoku má výrazný vliv na mechanické vlastnosti, jako je vtisková tvrdost a vtiskový modul. U všech povrchů forem, které byly vyrobeny obráběním (Ra 0,1 μm , Ra 0,45 μm , Ra 0,8 μm , Ra 1,6 μm) byl zjištěn pokles tvrdosti ve vzdálenosti od vtoku až po vzdálenost 196 mm. Tento pokles činil např. u frézované formy (Ra 1,6 μm) až 60 % a u leštěné (Ra 0,1 μm) až 33 %. Od této vzdálenosti až po konec testovaných těles byl naměřen opačný trend. Hodnoty na konci tělesa se blížily hodnotám kolem místa vtoku (obr. 2.9). Z uvedených výsledků, kde forma byla opatřena povlakem TiB₂ a TiCN vyplývá, že se zvyšující se vzdáleností od vtoku narůstají hodnoty vtiskové tvrdosti (vtiskového modulu). Při porovnání místa u vtoku (0 mm) a ve vzdálenosti 267 mm od vtoku byl zjištěn nárůst až 33 %. Při porovnání běžných povrchů formy (např. Ra 0,1 μm) s povrchy opatřenými povlaky (např. TiCN) se vtisková tvrdost u zkušebního tělesa v místě vtoku zvýšila přibližně o 13 %, a na konci dílu až o 38 %. Jak je popsáno v následující kapitole, změny vlastností v různých vzdálenostech od vtoku jsou způsobeny rozdílnou tloušťkou povrchové (skin) vrstvy podél výrobku.

2.5.2 Vliv vzdálenosti od vtoku na morfologii polypropylenu

V této kapitole byly sledovány změny morfologie, která vznikala při plnění a chlazení zkušebních těles v dutině formy. Jednotlivé strukturní změny byly měřeny ve stejných vzdálenostech od vtoku jako u měření mechanických vlastností.

Polarizační optický mikroskop

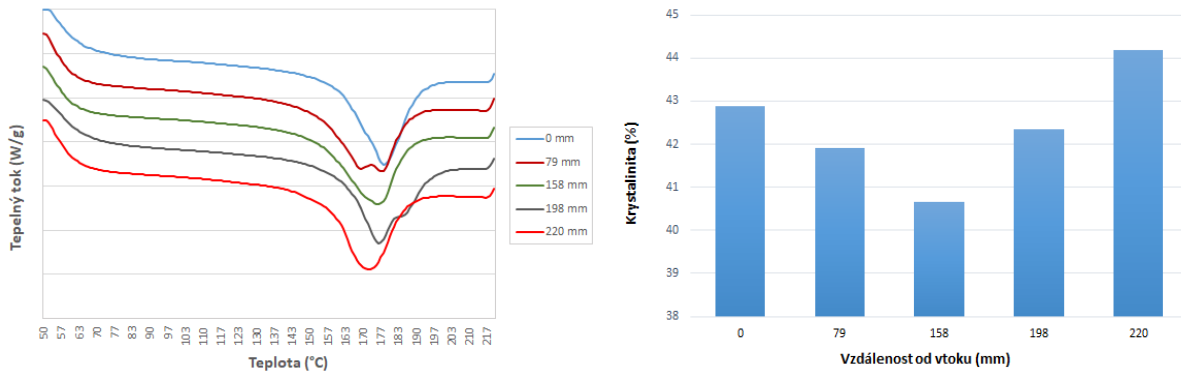
Pomocí polarizačního optického mikroskopu byla studována změna tloušťky povrchové (skin) vrstvy po délce výrobku. U zkušebního tělesa (testovací forma Ra 1,6 μm – pásek) byly vyrobeny v jednotlivých vzdálenostech od vtoku mikrotomové řezy o tloušťce 20 μm , u kterých byla studována změna morfologie povrchové vrstvy. Díky fontánovému toku je tavenina nucena téci směrem ke studenému povrchu formy, kde se prudce ochladí a vytvoří zatuhlou vrstvu. Tato vrstva vykazuje vysokou míru orientace, což se projeví na výsledných vlastnostech. Jak je vidět na obrázku 2.10 povrchová skin vrstva není stejná po celé délce výrobku. Ve středu dílu je tato vrstva nejtlustší (až 20 μm), naopak směrem ke koncům dílu se zmenšuje (až na tloušťku 7 μm). Povrchová vrstva díky vysoké orientaci a vzniklé struktuře se podílí na rozdílných mechanických vlastnostech po délce výrobku. U zkušebního tělesa vyrobeného do povlakovaných desek jsou změny dány rozdílnou (menší) tloušťkou této vrstvy.



Obr. 2.10: Změna tloušťky povrchové vrstvy v různých vzdálenostech od vtoku

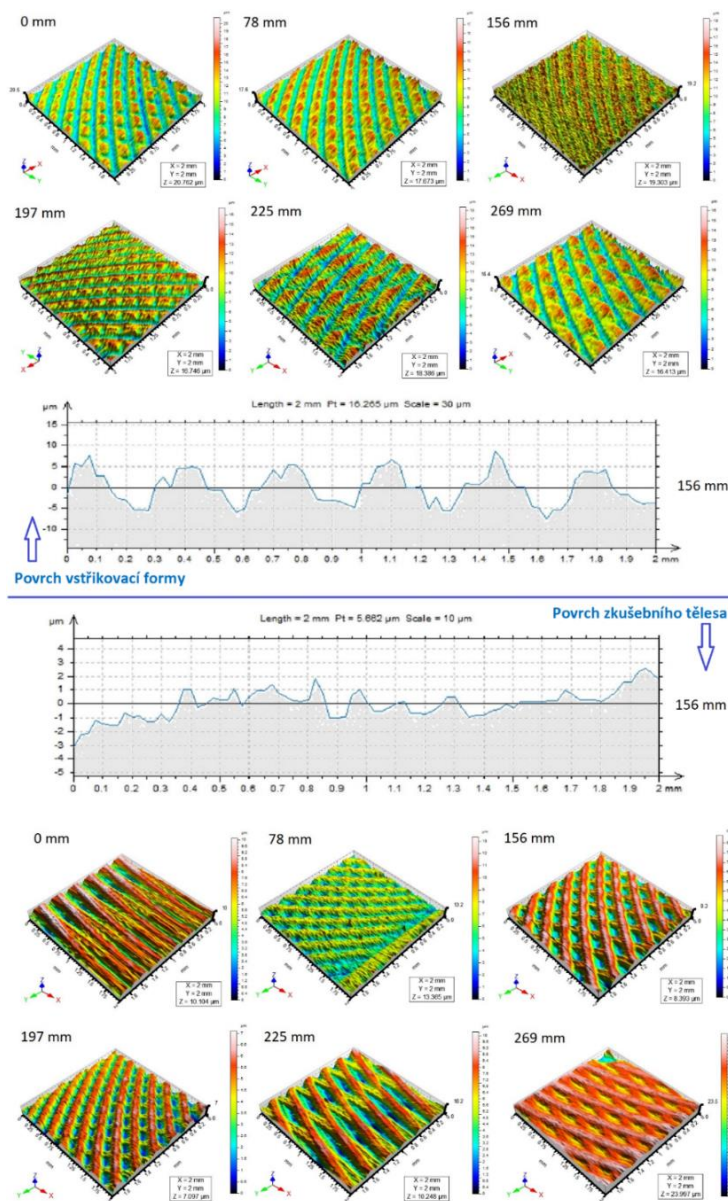
Diferenciální skenovací kalorimetrie – DSC

V této kapitole byla sledována změna krystalinity podél tokové dráhy u zkušebního tělesa vyrobeného v testovací formě 2 (pásek). Z výsledků krystalinity povrchové vrstvy (skin) vyplývá, že největší množství krystalické fáze je poblíž vtoku a na konci dílu. Směrem ke středu zkušebního tělesa byl zjištěn pokles krystalinity (obr. 2.11). Tyto výsledky podporují měření mechanických vlastností, kde byl sledován obdobný trend.



Obr. 2.11: Vliv vzdálenosti od vtoku na krystalinitu povrchové (skin) vrstvy

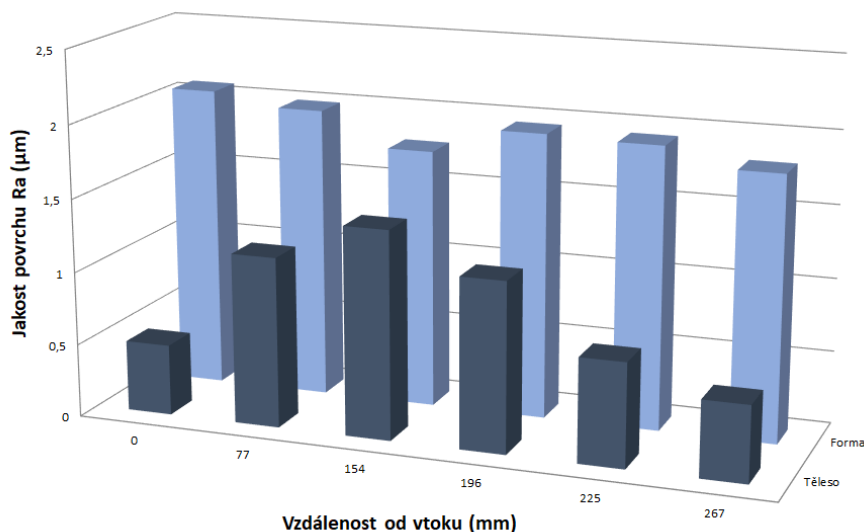
2.5.3 Vliv vzdálenosti od vtoku na jakost povrchu



Obr. 2.12: Replikace povrchu formy na povrch zkušebního tělesa – Ra 1,6 μm

V této kapitole byl posuzován vliv vzdálenosti od vtoku na jakost povrchu (R_a a R_z) a také byla upřena pozornost na replikaci povrchu tvarové desky formy na povrch zkušební tělesa. Pro zobrazení replikace povrchu formy na povrch výrobku byla vybrána frézovaná deska s jakostí povrchu R_a 1,6 μm . Na obrázku 2.12 jsou zobrazeny 3D snímky povrchu v jednotlivých vzdálenostech od vtoku a 2D profil povrchu ve vzdálenosti 156 mm. Při pohledu na 3D snímky povrchu, především na profil povrchu, lze konstatovat, že rozdíl v replikaci povrchu je výrazný. Polymer při toku nevyplnil vlivem teplotního profilu v dutině formy největší nerovnosti drsnosti a tím není povrch formy a zkušební tělesa identický. Ve všech místech byl naměřen pozitivní trend v replikaci povrchu.

Z výsledků replikace povrchu (obr. 2.13) je patrné, že jakost povrchu formy se na jakost povrchu zkušební tělesa replikuje v omezené míře a rozdílně v jednotlivých místech. Při pohledu na povrch zkušební tělesa se jakost povrchu mění po délce výrobku. V blízkosti vtoku byla naměřena jakost povrchu tělesa R_a 0,5 μm , vůči povrchu formy 2,1 μm . U konce zkušební tělesa (vzdálenost 267 mm) byly naměřeny podobné hodnoty. Ve vzdálenosti 77 a 154 mm byl naměřen nárůst jakosti povrchu až na hodnotu 1,42 μm a od této vzdálenosti následoval klesající trend. Na replikaci povrchu formy na povrch výrobku má vliv celá řada faktorů, jako je vstřikovací tlak, teplota formy, vzduch uzavřený v dutině formy aj. Hlavním parametrem ovlivňujícím replikaci povrchu je tlakový spád, který se projevil na pokles jakosti povrchu od vzdálenosti 154 mm až po konec dílu.



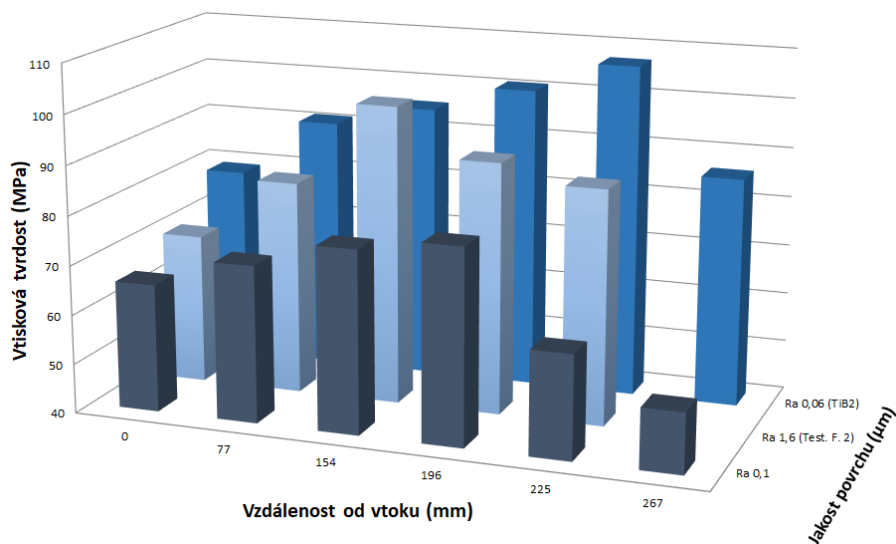
Obr. 2.13: Vliv replikace povrchu v různých vzdálenostech od vtoku – R_a 1,6 μm

2.6 Měření vlastností (skin-core) vrstvy

Výzkum této části byl zaměřen, na sledování vlivu vzdálenosti od vtoku na mechanické vlastnosti (vtisková tvrdost a vtiskový modul) v hloubce přibližně 100 μm při zatížení 5 N. Měření bylo doplněno studiem morfologie.

2.6.1 Vliv povrchu formy a vzdálenosti od vtoku na mechanické vlastnosti

V této kapitole byl zkoumán vliv vzdálenosti od vtoku na mechanické vlastnosti v rámci vybraných povrchů formy a pro variantu vstřikovacího tlaku 80 MPa.



Obr. 2.14: Vliv vzdálenosti od vtoku a povrchu formy na vtiskovou tvrdost

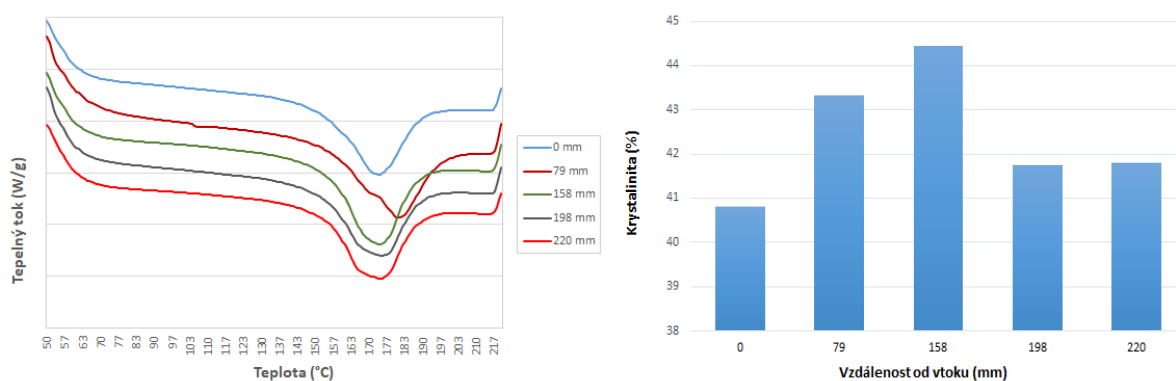
Z výsledků lze vyvodit, že vzdálenost od vtoku (tok polymeru dutinou formy) má významný vliv na změnu mechanických vlastností u všech specifikovaných povrchů formy. U zkušebních těles, které byly vyrobeny do obráběné formy (Ra 0,1 μm , Ra 0,45 μm , Ra 0,8 μm , Ra 1,6 μm) byl patrný rostoucí trend v hodnotách vtiskové tvrdosti, a to ve většině případů až do vzdálenosti 196 mm (obr. 2.14). Například u zkušebního tělesa vyrobeného do leštěné formy (Ra 0,1 μm) bylo zvýšení vtiskové tvrdosti mezi místem kolem vtoku (0 mm) a vzdáleností 196 mm přibližně 21 %. U frézované formy je tento nárůst až 37 %. Naopak ke konci zkušebního tělesa je pozorován výrazný pokles mechanických vlastností až o 49 % u leštěné formy a až o 63 % u frézované formy. Z výsledků měření zkušebních těles, které byly vyrobeny do povlakované formy TiB₂ lze vidět výrazné zlepšení mechanických vlastností s maximem u vzdálenosti 256 mm. Při porovnání místa u vtoku (0 mm) a ve vzdálenosti 256 mm od vtoku byl zjištěn nárůst až 36 %.

2.6.2 Vliv povrchu formy a vzdálenosti od vtoku na morfologii polypropylenu

Mechanické vlastnosti finálního dílu jsou ovlivněny nejen procesními parametry vstřikování, ale také proměnnými podmínkami v dutině formy, které se následně podílejí na vznik výsledné morfologie polypropylenu. Tyto změny byly studovány pomocí diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) a širokoúhlé rentgenové difrakci (WAXD) na zkušebním tělese ve tvaru pásku (Ra 1,6 μm).

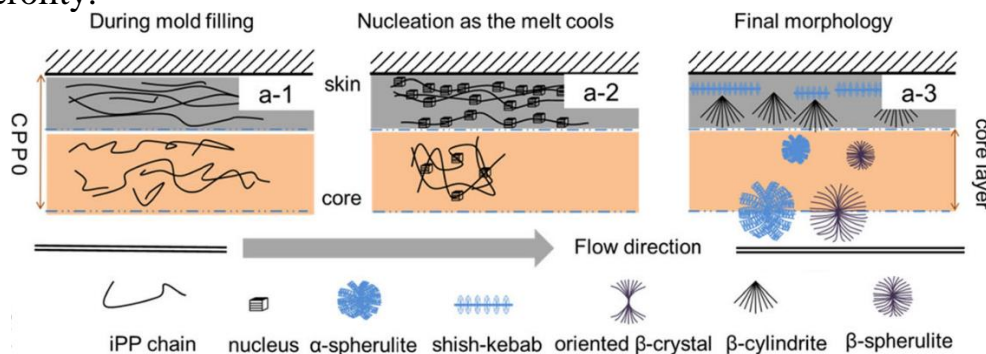
Diferenciální skenovací kalorimetrie – DSC

V této kapitole byla sledována změna obsahu krystalické fáze, která byla měřena metodou DSC. Na obrázku 2.15 jsou uvedeny průběhy měření DSC a změny obsahu krystalické fáze v různých vzdálenostech od vtoku. Z výsledků DSC měření v různých vzdálenostech od vtoku je zřejmé, že podél toku se mění obsah krystalické fáze, a tím i mechanické vlastnosti. Tato změna přesně odpovídá změně mechanických vlastností. Při chladnutí polymeru v dutině formy v různých vzdálenostech od vtoku dochází k rozdílné krystalizaci, kdy kromě uspořádání molekul dochází ke vzniku zárodků sférolitů, které se v rozdílných místech vytváří různě velké s rozdílnými vlastnostmi.



Obr. 2.15: Vliv vzdálenosti od vtoku na krystalinitu (DSC)

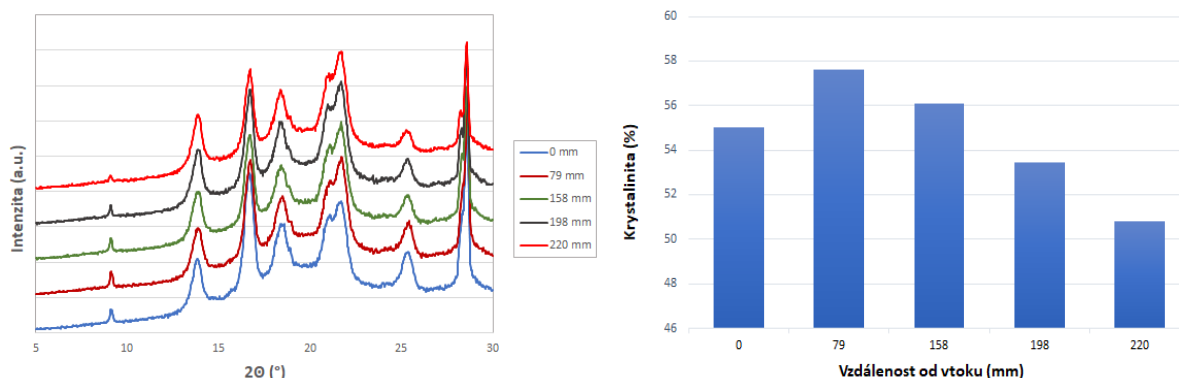
Schéma mechanismu vývoje hierarchických struktur v povrchové (skin) vrstvě a hlouběji v (core) vrstvě při plnění dutiny formy a následné chlazení ve formě zobrazily autoři z článku [32] na obrázku 2.16. V procesu vstřikování jsou důležité pochody hlavně tok polymeru a teplota polymeru (chlazení), kdy dochází při ochlazování taveniny k orientaci molekulových řetězců ve směru toku během plnění formy. Ve vnitřní (core) vrstvě mohou delší řetězce zůstat v nataženém stavu, zatímco krátké řetězce jsou během fáze plnění formy náhodně orientovány (jak je znázorněno na obr. 2.16 a-1 a b-1). V konečné struktuře převažují velké sférolity (obr. 2.16 a-3). Vzhledem k teplotě formy dojde ke spuštění α - β transformace a dále se indukuje růst β -krystalu. Jádrová (core) vrstva je tvořena α a β sférolity.



Obr. 2.16: Změna krystalické fáze (skin-core) [32]

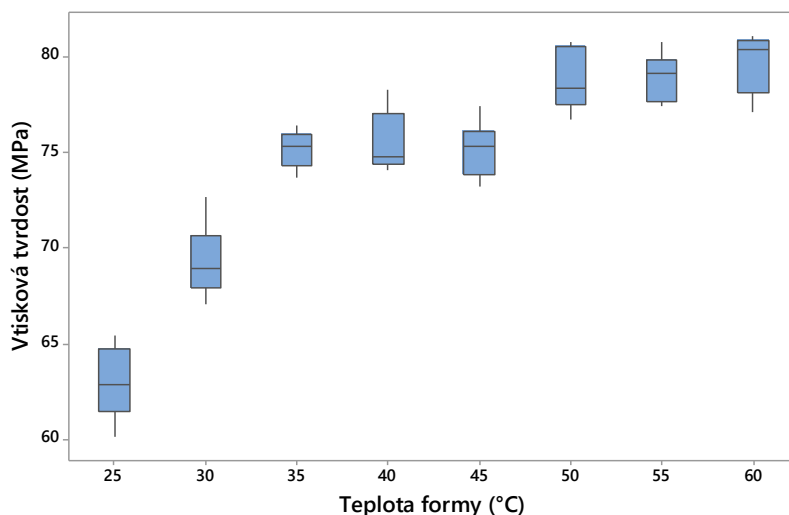
Širokoúhlá rentgenová difrakce (WAXD)

Pomocí širokoúhlé rentgenové difrakce byla zjištěna změna krystalinity v jednotlivých vzdálenostech od vtoku. Z výše uvedených výsledků krystalinity určené pomocí širokoúhlé rentgenové difrakce lze konstatovat, že krystalinita se mění v různých vzdálenostech od vtoku, jak je vidět na obrázku 2.17. To potvrzuje výsledky získané pomocí metody DSC. Tato zjištění korespondují se změnou mechanických vlastností. Změna krystalinity je zapříčiněna tokem polymeru dutinou formy, chladnutím polymeru v dutině a procesními parametry vstřikovacího procesu.



Obr. 2.17: Vliv vzdálenosti od vtoku na podíl krystalinity (WAXD)

2.6.3 Vliv teploty formy a vzdálenosti od vtoku na mechanické vlastnosti



Obr. 2.18: Vliv teploty formy na vtiskovou tvrdost ve vzdálenosti od vtoku 0 mm

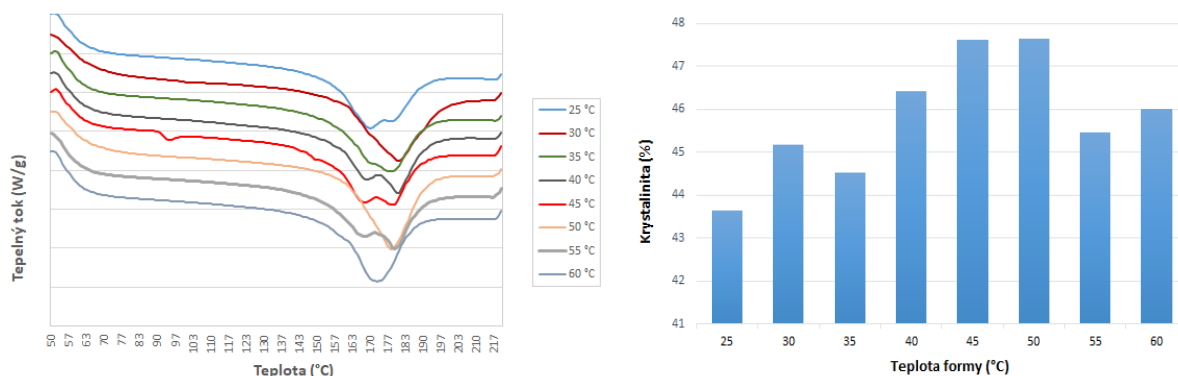
V této kapitole byl sledován vliv teploty formy na mechanické vlastnosti. Teplota formy má významnou roli při plnění a následnému chlazení polymeru. Projevuje se také na vzniku a rozložení struktury polymeru. Teplota formy byla zvolena v rozmezí 25 – 60 °C (dle materiálového listu) a byla měněna po 5 °C.

Jak lze vidět na obrázku 2.18 teplota formy má vliv na mechanické vlastnosti. Nižší teploty formy 25 °C a 30 °C vykazují nižší mechanické vlastnosti a nejeví

se jako vhodné. Od teploty 35 °C až po 60 °C dojde k ustálení vlastností a nejsou patrné výrazné rozdíly v mechanických vlastnostech. Z výsledků měření vlivu teploty formy lze konstatovat, že teplota formy 40 °C se jeví jako vhodná pro vstřikování polypropylenu. Nebyl naměřen výrazný pokles po délce výrobku, spíše došlo ke zlepšení mechanických vlastností ve středu dílu. Tyto výsledky odpovídají i změně krystalinity (kapitola 2.6.4).

2.6.4 Vliv teploty formy a vzdálenosti od vtoku na morfologii polypropylenu

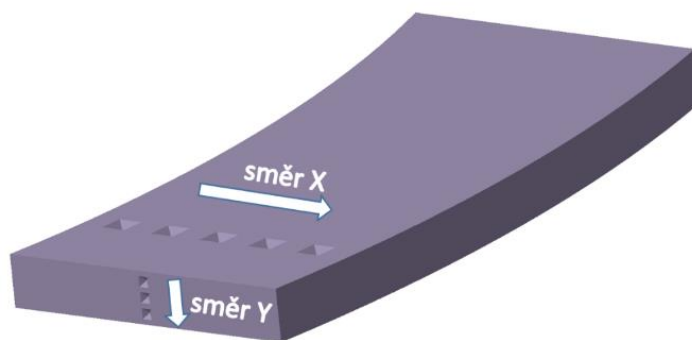
V této kapitole byl sledován vliv vzdálenosti od vtoku na změnu obsahu krystalické fáze, která byla měřena metodou DSC. Na obrázku 2.19 je uvedena změna krystalinity při rozdílných teplotách formy v místě vtoku (0 mm). Tok polymeru, teplota formy a teplota čela taveniny jsou důležité parametry, které se podílejí na vznik výsledné struktury polypropylenu. Tyto parametry mají významný vliv na heterogenitu vlastností v různých místech výrobku. Díky nastavení těchto parametrů je možné přizpůsobovat vznik struktury v jednotlivých místech výrobku a tím ovlivnit mechanické vlastnosti finálního výrobku. Z výše uvedených výsledků vyplývá, že se zvyšující se teplotou formy (od 25 °C do 60 °C) dochází ke zvýšení obsahu krystalické fáze. Výrazný nárůst je do teploty 40 °C a od této teploty dochází k ustálení hodnot krystalinity. Změny krystalinity jsou patrné i v rozdílných vzdálenostech od vtoku. Tyto výsledky odpovídají změně mechanických vlastností.



Obr. 2.19: Vliv teploty formy na krystalinitu – vzdálenost od vtoku 0 mm

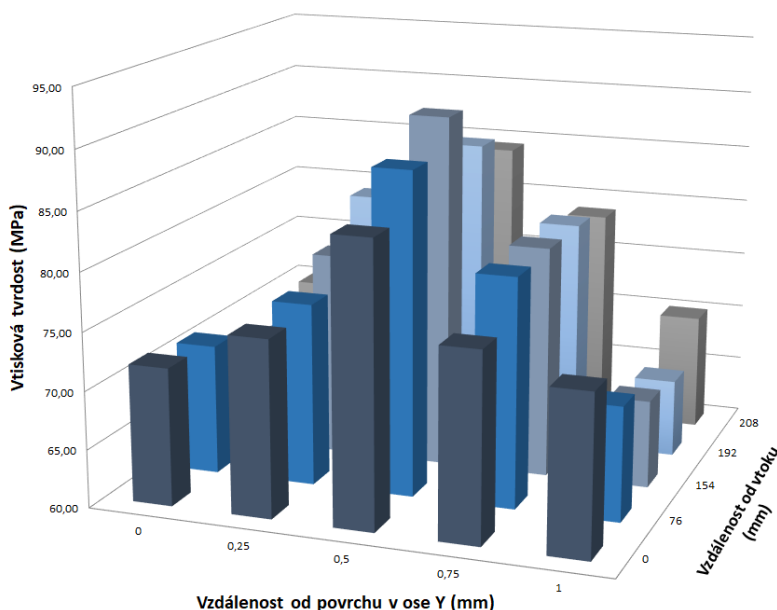
2.7 Měření mechanických vlastností přes průřez zkušebního tělesa

V této kapitole byl sledován vliv vzdálenosti od vtoku v různých hloubkách zkušebního tělesa (obr. 2.20) na mechanické vlastnosti. Ve směru osy X byly měřeny vlastnosti přes celou šířku tělesa (6 mm) a následně byly odbrušovány vrstvy po hloubce 0,125 mm až do středu zkušebního tělesa. Měření v ose Y bylo provedeno tak, že byly připraveny řezy zkušebním tělesem v jednotlivých vzdálenostech od vtoku a měření bylo realizováno přes tloušťku (1 mm).



Obr. 2.20: Směr měření průřezu vrozku

Z velkého množství dat a variant bylo pro názornost vybráno zkušební těleso ve tvaru pásku a místo ve vzdálenosti od vtoku 154 mm. Z uvedených výsledků je možné vyvodit závěr, že vzdálenost od povrchu zkušební tělesa v ose X i v ose Y má vliv na mechanické vlastnosti, kdy směrem ke středu vzorku mechanické vlastnosti rostou. Ve směru osy X v hloubce 0 mm je nárůst od povrchu až do středu asi 28 %, v hloubce 0,25 mm je tento nárůst už jen 11 % a v hloubce 0,5 mm jen 9 %. Ve směru osy Y je nárůst mezi povrchem a středem vzorku až 21 % v místě 0,3 mm a už jen 6 % ve vzdálenosti 3,3 mm. Tyto výsledky ukazují na to, že struktura polymeru není stejná přes celý průřez zkušební tělesa, podstatně se mění, jak u povrchu, tak ve středu zkušební tělesa. Jednotlivé hloubky byly měřeny ve všech vzdálenostech od vtoku. Ve všech vzdálenostech od vtoku jsou mechanické vlastnosti ve středu dílu (0,5 mm) podstatně vyšší než u povrchu zkušební tělesa (0 mm). Tyto rozdíly jsou např. u vtoku až 15 % a ve vzdálenosti 152 mm od vtoku až 32 % (obr. 2.21). Výše uvedené výsledky potvrzují poznatky z předchozích měření povrchové vrstvy a hlouběji ve zkušebním tělese.



Obr. 2.21: Vliv vzdálenosti od povrchu zkušební tělesa na vtiskovou tvrdost

DISKUSE VÝSLEDKŮ

Předložené výsledky habilitační práce popisují vývoj vybraných vlastností polypropylenových vstřikovaných dílů podél tokové dráhy. Práce vychází z měření na průmyslovém technickém dílu (rámeček světloometu), u kterého byly pozorovány rozdílné vlastnosti v různých místech. Na základě tohoto zjištění byla na díle specifikována místa v různé vzdálenosti od vtoku a v těchto bodech byly měřeny mechanické vlastnosti. Výsledky vykazují změnu mechanických vlastností směrem od vtoku ke konci dílu s výraznou kulminací poblíž středu dílu. Tento vývoj mechanických vlastností byl odlišný v povrchové vrstvě a uvnitř stěny dílu. V povrchové vrstvě v hloubce přibližně 20 μm , byl zjištěn pokles hodnot mechanických vlastností až 10 % při porovnání místa u vtoku (0 mm) a ve vzdálenosti 135 mm. Směrem ke konci dílu se hodnoty blížily hodnotám u vtoku. U měřené hloubky 100 μm se trend otočil a směrem ke středu dílu (198 mm) byl naměřen nárůst hodnot až o 14 % v porovnání s místem vtoku (0 mm) a koncem dílu (422 mm). Tyto změny jsou dány změnou morfologie po délce výrobku a rozdílnou morfologií jednotlivých vrstev stěny polypropylenového dílu. Jakost povrchu dílu vykazovala také rozdílné vlastnosti po délce dílu s kulminací ve vzdálenosti 198 mm.

Na základě výše uvedeného zjištění byl stanoven postup testování s navrženými metodami měření. Pro přípravu zkušebních těles byla použita forma s možností výměny tvarových desek s rozdílným povrchem. Povrch formy byl vyroben rozdílnými způsoby výroby: frézováním (R_a 1,6 μm), broušením (R_a 0,8 μm a R_a 0,45 μm), leštěním (R_a 0,1 μm) a také byl opatřen povlakem TiCN a TiB_2 (R_a 0,06 μm – leštění). Rozdílné povrchy dutiny formy se projeví na toku polypropylenu v dutině formy a také měly vliv na výsledné vlastnosti zkušebního tělesa. Kromě povrchu formy se do zaplňování formy projevují i parametry vstřikovacího procesu (vstřikovací tlak a teplota formy).

Zjištěné výsledky byly statisticky vyhodnoceny pomocí vybraných statistických parametrů a boxplotových diagramů. Zjištěné závislosti byly popsány regresními modely. Z uvedených regresních modelů, a jim odpovídajících regresních odhadů, lze konstatovat, že u stanovených vlastností zkušebních těles, které jsou ovlivněny nástrojem a procesem jsou zjištěné změny signifikantní.

Další související oblastí výzkumu je ověření replikace povrchu formy na povrch výstřiku. Z výsledků replikace povrchu je patrné, že jakost povrchu formy se na jakost povrchu dílu replikuje v omezené míře a rozdílně v jednotlivých místech. U povrchů, které měly jakost nižší než R_a 0,45 μm , se povrch replikoval na výstřik s negativním efektem (zhoršení jakosti povrchu), naopak nad touto hodnotou byl zjištěn pozitivní efekt v replikaci povrchu. Hranice mezi pozitivní a negativní replikací povrchu je R_a 0,45 μm . V různých vzdálenostech od vtoku se povrch nástroje replikoval s rozdílnou hodnotou jakosti povrchu. Z výsledků 2D profilu jakosti povrchu nástroje a zkušebního tělesa je možné soudit, že nejhlubší

nerovnosti profilu povrchu formy nebyly replikovány na povrch tělesa, což se projevilo rozdílnou jakostí povrchu v jednotlivých místech dílu. Tyto tendence jsou ve značné míře ovlivněny tlakovým spádem v dutině formy, uzavřeným vzduchem v dutině a také teplotou taveniny.

Stěžejní oblastí výzkumu jsou mechanické vlastnosti podél dráhy toku polymeru, které vykazovaly výrazné rozdíly v povrchové vrstvě (do 20 μm) a také v hlubších vrstvách (do 100 μm) až přes celý průřez zkušebního tělesa. Z výsledků měření je možné konstatovat, že dráha toku a následné chladnutí materiálu v dutině formy má významný vliv na mechanické vlastnosti i morfologii. V povrchové vrstvě bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti (vtisková tvrdost a modul) nejsou homogenní po celé délce výrobku. V místě vtoku (0 mm) a na konci dílů (267 mm) vyrobených ve formě se standardním povrchem bylo naměřeno maximum a směrem ke středu dílu (196 mm) došlo k poklesu mechanických vlastností. Tento pokles činil až 60 % u zkušebního tělesa vyrobeného do frézované formy (R_a 1,6 μm) a asi 33 % u zkušebních těles vyrobených do leštěné formy (R_a 0,1 μm). U zkušebních těles vyrobených ve formě opatřené povlakem (TiB_2 a TiCN) nebyl pozorován výrazný pokles směrem od vtoku dále ke konci výrobku, spíše došlo k nárůstu hodnot mechanických vlastností, a to až o 33 %. Tyto změny jsou zapříčiněny morfologií výrobku, kdy při chladnutí materiálu dochází ke vzniku rozdílných struktur na povrchu i ve středu stěny. Na povrchu vzniká skin vrstva, která je podél tokové dráhy heterogenní. Obsah krystalické fáze po délce zkušebního tělesa toto tvrzení potvrzuje, jelikož ve středu dílu (196 mm) je menší obsah krystalické fáze než v místě poblíž vtoku (0 mm). Také u snímků z optického mikroskopu lze pozorovat rozdílnou tloušťku skin vrstvy po délce výrobku.

Navazující oblastí výzkumu je měření mechanických vlastností hlouběji pod povrchem výrobku. V hlubších vrstvách byl pozorován opačný trend v mechanických vlastnostech v různých vzdálenostech od vtoku, ve srovnání s povrchovou vrstvou. U zkušebních těles vyrobených ve formách se standardním povrchem (frézovaných, broušených a leštěných) byl zaznamenán rostoucí trend v mechanických vlastnostech zkušebního tělesa, a to ve většině případů od vtoku (0 mm) až do vzdálenosti 50 % dráhy (196 mm). Tento nárůst mechanických vlastností v některých případech činil až 37 %. Naopak ke konci zkušebního tělesa byl pozorován výrazný pokles mechanických vlastností. U zkušebních těles, které byly vyrobeny v povlakovaných formách byl zaznamenán nárůst (36 %) mechanických vlastností, a to až do vzdálenosti 256 mm. U zkušebních těles vyrobených v povlakovaných deskách, nebyl pozorován výrazný pokles mechanických vlastností směrem ke konci tělesa.

Zjištěné změny mechanických vlastností jsou dány distribucí krystalické fáze a změnou uspořádání struktury (velikost a tvar sférolitů) podél tokové dráhy, na které má zásadní vliv velikost dotlaku a teplota formy. Oba tyto parametry byly studovány a byl prokázán jejich vliv na heterogenní chování mechanických vlastností. Jako hraniční teplota formy se projevila teplota 40 $^{\circ}\text{C}$, pod touto

hodnotou mechanické vlastnosti vykazovaly nižší hodnoty s výraznou různorodostí, naopak při teplotě formy nad 40 °C se prokázalo zvýšení a ustálení hodnot mechanických vlastností. Měření krystalinity odpovídá měření mechanických vlastností, kdy se zvyšující se teplotou formy narůstala i krystalinita. Na základě zjištěných závěrů je možno doporučit jako vhodnou teplotu formy pro vstřikování polypropylenu 40 °C, kde byly získány homogenní mechanické vlastnosti i obsah krystalické fáze.

Zmíněné výsledky souvisí s charakterem toku materiálu v dutině formy, díky kterému mohou makromolekulární řetězce nabývat různých konformací (způsobů uložení řetězce v prostoru). Tavenina polymeru, která teče dutinou formy fontánovým tokem směrem od středu ke studenému povrchu formy, kde se tavenina prudce ochladí a vytvoří tak zatuhlou vrstvu. Toto výrazné ochlazení má za následek velkou míru molekulární orientace povrchových vrstev, zatímco v hlubších vrstvách mají řetězce více času relaxovat. Kombinovaný efekt tuhnutí a relaxace vytváří několik regionů s rozdílnou mírou orientace (povrchová zóna, smyková zóna a jádro). Povrchová zóna tuhne po velmi krátké nebo žádné relaxaci, a obsahuje vysoce orientované molekuly, způsobené elongační deformací vlivem fontánového toku. Smyková zóna ztuhne před tím, než dojde k relaxaci smykové orientace. Kolem jádra je rychlost chlazení relativně pomalá, dochází v něm k významné relaxaci, což vede k malé nebo žádné zbytkové molekulární orientaci. U polypropylenu mají tyto zóny velké rozdíly v morfologii. V okamžiku, kdy je forma naplněna, odpovídá míra orientace délce zatečení. Po tokové dráze se mohou tyto konformace řetězců měnit a tím po zatuhnutí materiálu pak vznikají různě tlusté lamely s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Finální orientace podél dráhy toku je silně ovlivněna také fází dotlaku. Míra orientace, a hlavně rozdíly v morfologii v jednotlivých vrstvách dílu, mají zásadní vliv na studované mechanické vlastnosti.

Z poznatků plynoucích z této habilitační práce je možné konstatovat, že na vstřikovaný díl není možné nahlížet jako na homogenní výrobek v celé jeho délce (z hlediska mechanických vlastností a morfologie). Při vhodné volbě umístění vtoku a procesních parametrů, jako je dotlak nebo teplota formy, je možné docílit v předem stanoveném místě lepších vlastností než v jiných místech výstřiku. To se může uplatnit u namáhaných lokálních míst finálního výrobku, kde tato místa mohou být konkrétním způsobem modifikována bez nutnosti použití lepšího (dražšího) materiálu či následných dodatečných úprav.

PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

S ohledem na zaměření této práce lze její přínos rozdělit do několika oblastí.

Přínos habilitační práce z pohledu vědy spočívá v detailním studiu mechanických vlastností vstříkovaných dílů z polypropylenu podél tokové dráhy při aplikaci různých procesních parametrů vstříkování a povrchů nástroje. Velká část poznatků byla publikována ve vědeckých časopisech indexovaných v databázích Web of Science a Scopus.

Poznatky získané z této práce již jsou nebo budou využity ve výuce v předmětech Nástroje pro zpracování polymerů (TP9NZ), CAE (T8CAE) a Konstrukce forem (T5KF), kdy se studenti seznamují s problematikou vstříkování, navrhování nástrojů a simulacemi procesů vstříkování.

Přínos této práce pro technickou praxi spočívá v uplatnění získaných výsledků v oblasti vstříkování polymerních materiálů. V současné době se v průmyslové výrobě na vlastnosti polymerního dílce dívá poměrně zjednodušeně, bez ohledu na lišící se vlastnosti podél tokové dráhy ve vstříkovací formě. Na základě poznatků z této habilitační práce je možné konstrukčními úpravami formy, případně změnou povrchu formy nebo změnou procesních parametrů vstříkování, upravit příslušným způsobem finální vlastnosti vyráběného dílu. Místa, která budou na dílci více mechanicky namáhána, mohou být těmito změnami lokálně upravena. Na rozdílné mechanické vlastnosti podél výrobku má stěžejní vliv umístění vtoku, ale také chladnutí polymeru v dutině formy. Lokální změnou teploty formy v konkrétním bodě výrobku může dojít k výrazným změnám mechanických vlastností. Díky zmíněným vlivům dochází ke změně morfologie v jednotlivých místech výrobku, což se projevuje na změně mechanických vlastností. Tím se otevírají nové cesty k modifikacím výstřiků v konkrétních místech a jejich uplatnění v náročných aplikacích. Indentační metoda se také jeví jako velmi citlivá a použitelná metoda pro stanovení mechanických vlastností nejen v povrchové vrstvě, ale také v různých hloubkách tělesa a umožňuje podrobný popis komplexního chování polymerních materiálů. Díky poměrně nízkým hodnotám zatěžující síly a dosažené hloubky indentace (v řádech μm) je možné zachytit změny krystalické morfologie polymeru a dát je do korelace se získanými mechanickými vlastnostmi.

Z experimentů věnovaných replikaci povrchu dutiny formy na povrch výrobku vyplynuly prakticky aplikovatelné poznatky popisující změny jakosti povrchu výstřiku podél tokové dráhy. Získané výsledky ukazují, že vhodně zvolené parametry vstříkovacího procesu mohou zajistit kvalitní povrch výrobku bez nutnosti leštění dutiny formy. Toto zjištění má pozitivní dopad především na náklady spojené s výrobou dutin vstříkovacích forem, kdy nebude nutné v opodstatněných případech používat nákladné dokončovací metody výroby.

ZÁVĚR

Habilitační práce se zabývá vývojem vybraných vlastností polypropylenových vstřikovaných dílů podél tokové dráhy polymeru a vlivem povrchu nástroje a procesu na tyto vlastnosti. Zkušební tělesa byla vyrobena ve formě, u které byla měněna jakost opracování a způsob povlakování povrchu dutiny. Při přípravě těles byly měněny parametry vstřikování, jako je vstřikovací tlak a teplota formy. Na takto připravených zkušebních tělesech byla studována délka zatečení, mechanické vlastnosti (vtisková tvrdost a vtiskový modul), jakost povrchu a její replikace na vstřikovaný výrobek a také změny struktury stěny výstřiku.

Prvotní poznatky a podklad pro tuto práci dalo měření technického dílu z praxe (rámeček světlometu), který vykazoval heterogenní vlastnosti po délce výrobku. Na základě tohoto zjištění byla připravena zkušební tělesa, u kterých byla následně měřena délka zatečení. Podle získaných výsledků byla na zkušebních tělesech specifikována jednotlivá místa měření, od vtoku až po konec dílu. Zkušební tělesa vykazovala heterogenní chování po své délce a také v jednotlivých hloubkách dílu. V povrchové vrstvě (hloubka měření max. 20 μm) byl zjištěn klesající trend mechanických vlastností směrem ke středu dílu, naopak hlouběji pod povrchem dílu byl naměřen opačný trend mechanických vlastností (maximum ve středu dílu). Také replikace povrchu formy na povrch výrobku vykazovala podstatné změny po délce výrobku. Na zjištěné výsledky měl vliv jak povrch dutiny formy, tak i procesní parametry vstřikování. Tyto parametry se projevily na podmínkách plnění dutiny formy a vzniku výsledné skin-core struktury, která je proměnná po délce výrobku a ta se podílí na heterogenitě mechanických vlastností. Vzniklá skin-core struktura, lišící se molekulární orientací a morfologií v jednotlivých vrstvách, má zásadní vliv na zjištěné vlastnosti výrobku. Z výsledků lze vyvodit závěr, že pomocí indentační metody je možné zachytit změny mechanických vlastností, které jsou ovlivněny vzniklou morfologií vstřikovaného dílu. Tuto morfologii lze dát do korelace s mechanickými vlastnostmi.

Z výsledků je možné konstatovat, že není nutné vždy povrch dutiny formy leštit, nýbrž věnovat pozornost aplikaci speciálních povlaků, které zlepšují tokové vlastnosti materiálu v dutině formy a podílí se na zlepšení mechanických vlastností. Důležité je také zaměřit pozornost na nastavení procesních parametrů, hlavně teploty formy, která má zásadní vliv na heterogenitu mechanických vlastností.

Při pohledu na závěry plynoucí z této práce je možné usoudit, že vlastnosti vstřikovaných výrobků nejsou uniformní, ale lokálně se mění podle podmínek ve formě. To podstatně mění pohled na vstřikované díly v praxi, kdy není možné považovat vstřikovaný výrobek za homogenní. Důležitou roli hraje komplexní způsob plnění formy, který ovlivňuje výsledné vlastnosti v konkrétních místech výrobku i celkovou distribuci molekulární orientace ve výrobku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WANG, L., ZHANG, Y., JIANG, L., YANG, X., ZHOU, Y., WANG, X., LI, Q., SHEN, C., & TURNG, L. S. (2018). Effect of injection speed on the mechanical properties of isotactic polypropylene micro injection molded parts based on a nanoindentation test. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(14).
- [2] GŁOGOWSKA, K., SIKORA, J., & DULEBOVÁ, L. (2016). The effect of multiple processing of polypropylene on selected properties of injection moulded parts. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 65–72.
- [3] SYKUTERA, D., WAJER, Ł., KOŚCIUSZKO, A., SZEWCZYKOWSKI, P. P., & CZYŻEWSKI, P. (2018). The influence of processing conditions on the polypropylene apparent viscosity measured directly in the mold cavity. *Macromolecular Symposia*, 378(1), 1700056.
- [4] MEISTER, S., & DRUMMER, D. Investigation on the achievable flow length in injection moulding of polymeric materials with dynamic mould tempering. (2013). *The Scientific World Journal*, 2013, pp. 1–7.
- [5] VERA, J., BRULEZ, A. C., CONTRAIRES, E., LAROCLETTE, M., VALETTE, S., & BENAYOUN, S. Influence of the polypropylene structure on the replication of nanostructures by injection molding. (2015). *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(11), 115027.
- [6] SOLOMON, N., SOLOMON, I., & SANDULEAC, E. Material flow influence on the quality of molded parts. (2019). *Polymer Bulletin*, 76(11), 5981–6000.
- [7] LAFRANCHE, E., KRAWCZAK, P., CIOLCZYK, J. P., & MAUGEY, J. Injection moulding of long glass fiber reinforced polyamide 66: Processing conditions/microstructure/flexural properties relationship. (2005). *Advances in Polymer Technology*, 24(2), pp. 114–131
- [8] MORITZER, E., HEIDERICH, G., & HIRSCH, A. Fiber length reduction during injection molding. (2019). *AIP Conference Proceedings*.
- [9] RAMZY, A. Y., EL-SABBAGH, A. M., STEUERNAGEL, L., ZIEGMANN, G., & MEINERS, D. Rheology of natural fibers thermoplastic compounds: Flow length and fiber distribution. (2013). *Journal of Applied Polymer Science*, 131(3).
- [10] LIPAROTI, S., SPERANZA, V., DE MEO, A., DE SANTIS, F., & PANTANI, R. Prediction of the maximum flow length of a thin injection molded part. (2020). *Journal of Polymer Engineering*, 40(9), pp. 783–795.
- [11] SCANTAMBURLO, A., GAZZOLA, L., SORGATO, M., & LUCCHETTA, G. Influence of injection molding process parameters on fiber concentration distribution in long glass fiber reinforced polypropylene. (2018). *AIP Conference Proceedings*.
- [12] HUANG, P. W., PENG, H. S., HWANG, S. J., & HUANG, C. T. The low breaking fiber mechanism and its effect on the behavior of the melt flow of injection molded ultra-long glass fiber reinforced polypropylene composites. (2021). *Polymers*, 13(15), pp. 2492.
- [13] HOU, X. Q., CHEN, X. Y., LIU, B. C., CHEN, S. C., LI, H. M., & CAO, W. Fracture and orientation of long-glass-fiber-reinforced polypropylene during injection molding. (2019). *Polymer Engineering*, 60(1), pp. 13–21.
- [14] LE, M. C., BELHABIB, S., NICOLAZO, C., VACHOT, P., MOUSSEAU, P., SARDA, A., & DETERRE, R. (2011). Pressure influence on crystallization kinetics during injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(11), 1757–1763.
- [15] LIU, F., GUO, C., WU, X., QIAN, X., LIU, H., & ZHANG, J. (2011). Morphological comparison of isotactic polypropylene parts prepared by micro-injection molding and conventional injection molding. *Polymers for Advanced Technologies*, 23(3), 686–694.
- [16] SUN, H., ZHAO, Z., YANG, Q., YANG, L., WU, P. The morphological evolution and β -crystal distribution of isotactic polypropylene with the assistance of a long chain branched structure at micro-injection molding condition, *J. Polym. Res.* (2017) 24: 75.

- [17] PANTANI, R., COCCORULLO, I., SPERANZA, V., TITOMANLIO, G. Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers, *Prog. Polym. Sci.* 30 (2005) 1185–1222.
- [18] LEI XIE, GRUENEBERG, T., STEUERNAGEL, L., ZIEGMANN, G., & MILITZ, H. Influence of particle concentration and type on flow, thermal, and mechanical properties of wood-polypropylene composites. (2009) *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (13), pp. 1940–1951.
- [19] KOCIC, N., KRETSCHMER, K., BASTIAN, M., & HEIDEMEYER, P. The influence of talc as a nucleation agent on the nonisothermal crystallization and morphology of isotactic polypropylene: The application of the lauritzen-hoffmann, Avrami, and Ozawa theories. (2012) *Journal of Applied Polymer Science*, 126 (4), pp. 1207–1217.
- [20] SURACE, R., SORGATO, M., BELLANTONE, V., MODICA, F., LUCCHETTA, G., & FASSI, I. Effect of cavity surface roughness and wettability on the filling flow in micro injection molding. (2019) *Journal of Manufacturing Processes*, 43, pp. 105–111.
- [21] GRIFFITHS, C. A., DIMOV, S. S., BROUSSEAU, E. B., & HOYLE, R. T. The effects of tool surface quality in micro-injection moulding. (2007). *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1-3), pp. 418–427.
- [22] BELLANTONE, V., SURACE, R., MODICA, F., & FASSI, I. Evaluation of mold roughness influence on injected thin micro-cavities. (2017). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), pp. 4565–4575.
- [23] WHITESIDE, B. R., MARTYN, M. T., COATES, P. D., ALLAN, P. S., HORNSBY, P. R., & GREENWAY, G. Micromoulding: Process Characteristics and product properties. (2003). *Plastics, Rubber and Composites*, 32(6), pp. 231–239.
- [24] OTSUKA, M., OYABE, A., & ITO, H. Effects of mold surface conditions on flow length in injection molding process. (2011). *Polymer Engineering & Science*, 51(7), pp. 1383–1388.
- [25] LUCCHETTA, G., MASATO, D., SORGATO, M., CREMA, L., & SAVIO, E. Effects of different mould coatings on polymer filling flow in thin-wall injection moulding. (2016). *CIRP Annals*, 65(1), pp. 537–540.
- [26] ELSABBAGH, A., RAMZY, A., STEUERNAGEL, L., & ZIEGMANN, G. Models of flow behaviour and fibre distribution of injected moulded polypropylene reinforced with natural fibre composites. (2019). *Composites Part B: Engineering*, 162, pp. 198–205.
- [27] TOSELLO, G., & COSTA, F. S. High precision validation of micro injection molding process simulations. (2019). *Journal of Manufacturing Processes*, 48, pp. 236–248.
- [28] SANDU, I. L., SUSAC, F., STAN, F., & FETECAU, C. Prediction of polymer flow length by coupling finite element simulation with artificial neural network. (2020). *Materiale Plastice*, 57(3), pp. 202–223.
- [29] SALIMI, A., SUBAŞI, M., BULDU, L., KARATAŞ, Ç. Prediction of flow length in injection molding for engineering plastics by fuzzy logic under different processing (2012) *Iranian Polymer Journal*, 22(1), 33–41.
- [30] LANYI, F. J., WENZKE, N., KASCHTA, J., SCHUBERT, D. W. On the Determination of the Enthalpy of Fusion of α -Crystalline Isotactic Polypropylene Using Differential Scanning Calorimetry, X-Ray Diffraction, and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy: An Old Story Revisited. *Advanced Engineering Materials*, (2020), 22, 9.
- [31] PANTANI, R., COCCORULLO, I., SPERANZA, V., TITOMANLIO, G. Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers, *Prog. Polym. Sci.* 2005, 30, 1185–1222.
- [32] SUN, H., ZHAO, Z., YANG, Q., YANG, L., WU, P. The morphological evolution and β -crystal distribution of isotactic polypropylene with the assistance of a long chain branched structure at micro-injection molding condition, *J. Polym. Res.* 2017, 24: 75, DOI 10.1007/s10965-017-1234-3.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Příprava experimentu	10
Obr. 1.2: Zkušební tělesa: (a) spirála, (b) pásek.....	11
Obr. 1.3: Schéma měření průřezu těles.....	12
Obr. 2.1: Regresní závislost vtiskové tvrdosti na vzdálenosti od vtoku –TiB ₂	13
Obr. 2.2: Technický díl – rámeček světloometu.....	14
Obr. 2.3: Zobrazení míst měření po délce výrobku s vyobrazením vtisků.....	14
Obr. 2.4: Vliv vzdálenosti od vtoku na vtiskovou tvrdost povrchové vrstvy	15
Obr. 2.5: Vliv vzdálenosti od vtoku na vtiskovou tvrdost hloubějších vrstev.....	15
Obr. 2.6: Zobrazení míst měření po délce výrobku s 3D skenem povrchu	16
Obr. 2.7: Tribologické stopy: (a) TiB ₂ 10 000cyklů, (b) TiCN 10 000 cyklů	17
Obr. 2.8: Výsledky analýzy: (a) core vrstva, (b) skin vrstva.....	17
Obr. 2.9: Vliv vzdálenosti od vtoku a povrchu formy na vtiskovou tvrdost	18
Obr. 2.10: Změna tloušťky povrchové vrstvy v různých vzdálenostech od vtoku.....	19
Obr. 2.11: Vliv vzdálenosti od vtoku na krystalinitu povrchové (skin) vrstvy	20
Obr. 2.12: Replikace povrchu formy na povrch zkušební tělesa – Ra 1,6 μm	20
Obr. 2.13: Vliv replikace povrchu v různých vzdálenostech od vtoku – Ra 1,6 μm.....	21
Obr. 2.14: Vliv vzdálenosti od vtoku a povrchu formy na vtiskovou tvrdost	22
Obr. 2.15: Vliv vzdálenosti od vtoku na krystalinitu (DSC)	23
Obr. 2.16: Změna krystalické fáze (skin-core) [32]	23
Obr. 2.17: Vliv vzdálenosti od vtoku na podíl krystalinity (WAXD)	24
Obr. 2.18: Vliv teploty formy na vtiskovou tvrdost ve vzdálenosti od vtoku 0 mm	24
Obr. 2.19: Vliv teploty formy na krystalinitu – vzdálenost od vtoku 0 mm.....	25
Obr. 2.20: Směr měření průřezu vrozku	26
Obr. 2.21: Vliv vzdálenosti od povrchu zkušební tělesa na vtiskovou tvrdost.....	26

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Jakost povrchu zkušebních desek.....	11
Tabulka 1.2: Technologické parametry vstřikování	11
Tabulka 1.3: Parametry měření mechanických vlastností	12
Tabulka 2.1: Odhady koeficientů modelu – TiB ₂	13

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PP	Polypropylen
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rz	Největší výška profilu
E _{IT}	Vtiskový modul
H _{IT}	Vtisková tvrdost
CVD	Chemická depozice vrstev (Chemical Vapour Deposition)
PVD	Fyzikální depozice vrstev (Physical Vapour Deposition)
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti (Depth Sensing Indentation)
DSC	Diferenciální skenovací kalorimetrie
WAXD	Širokoúhlá rentgenová difrakce
W	Koeficient opotřebení
V	Opotřebený objem
F _n	Zatěžující síla
S	Dráha testu
S	Střední kvadratická chyba predikce
R-Sq	Predikovaný korelační koeficient

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno a příjmení: Martin Ovsík
Tituly: Ing., Ph.D.
Datum narození: 6. 3. 1986
Adresa: Košíky 227, 68704 Košíky
Zaměstnavatel: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Vzdělání

2013 **Ph.D.**, UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
obor: *Nástroje a procesy*
2010 **Ing.**, UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
studijní obor: *Výrobní inženýrství*
2008 **Bc.**, UTB ve Zlíně, Fakulta technologická
studijní obor: *Technologická zařízení*

Odborná praxe

2013 – dosud odborný asistent, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství

Jazykové dovednosti angličtina

Mateřský jazyk čeština

Zastávané funkce

2012 – 2013 Člen Akademického senátu FT, UTB ve Zlíně
2012 – 2013 Člen studentské komory Rady vysokých škol

Publikační aktivity autora

WoS (Article): 27 publikací
Scopus (Article): 45 publikací
WoS (Proceedings Paper): 16 publikací
Scopus (Proceedings Paper): 35 publikací
WoS (citace): 87
Scopus (citace): 113
h-index (WoS): 7
h-index (Scopus): 4

Odborné zaměření

- Konstrukce nástrojů pro zpracování polymerů
- Plošné tváření kovů
- Simulace procesů
- Tepelné a povrchové úpravy kovů a polymerů
- Mechanické vlastnosti materiálů

Pedagogická činnost

- Garant a přednášející 3 předmětů
- Výuka předmětů Nauka o materiálu I, CAD I, Konstrukce forem, Tepelné úpravy kovů, Výrobní stroje a zařízení I, Výrobní stroje a zařízení II, CAE, Návrh nástrojů pro zpracování polymerů, Formy, Simulace a modelování tvářecích procesů
- Konzultant 3 obhájených disertačních prací
- Vedoucí 39 obhájených diplomových prací
- Vedoucí 35 obhájených bakalářských prací
- Člen komise státních závěrečných zkoušek
- Člen komise SVOČ

Řešené projekty

- Centrum bezpečnostních, informačních a pokročilých technologií (CEBIA Tech), číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0089 – spoluřešitel
- Podpora udržitelnosti a rozvoje Centra bezpečnostních, informačních a pokročilých technologií (CEBIA Tech) v rámci Národního programu udržitelnosti I., číslo projektu je LO1 303 – spoluřešitel
- Spolupráce s firmou TREVOS, a.s. na řešení projektu TA03010724 AV a EV LED svítidel s vyšším stupněm krytí – spoluřešitel
- Projekt V3 Formy na vstřikování silikonu Moravskoslezský automobilový klastr, o.s. – spoluřešitel
- Projekt Plasty, kovy a technologie (PLAKOTECH), CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_007/0003397, podprojekt Plasty Tlustostěnné výstřiky – spoluřešitel
- IP UTB 2020, Inovace předmětů Nauka o materiálu a Tepelné a povrchové úpravy kovů, FT2A/2020 – řešitel
- IP UTB 2022, Inovace předmětů Strojírenská technologie II, FT2A/2020 – spoluřešitel

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Mechanické vlastnosti vstřikovaných dílů z polypropylenu: vliv nástroje a procesu

Mechanical Properties of Injection Molded Polypropylene Products: Influence of Tool and Process

Teze habilitační práce

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

Náklad: 50 výtisků

Sazba: Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2022

Pořadí vydání: První

ISBN 978-80-7678-092-7