

Vliv povrchu nástroje na zatékavost polymeru

Ing. Petr Fluxa, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

Vliv povrchu nástroje na zatékavost polymeru

Influence of Tool Surface on Polymer Flow

Autor: **Ing. Petr Fluxa, Ph.D.**

Studijní program: P3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: 3909V013 Nástroje a procesy

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

Konzultant: doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Ivan Hudec, PhD.
prof. Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.
prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Zlín, červen 2023

© Petr Fluxa

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2023.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací forma, zatékavost polymeru, drsnost povrchu, reometrie, úhel smáčení, polypropylen

Key words: injection molding, injection mold, polymer fluidity, surface roughness, rheometry, contact angle, polypropylene

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

ISBN 978-80-7678-169-6

ABSTRAKT

Tato disertační práce se zabývá vlivem drsnosti povrchu dutiny formy na zatečení polymeru. Předchozí studie ukázaly, že vyšší hodnota drsnosti povrchu formy nejen že nebrání toku polymeru dutinou formy, ale naopak v mnoha případech tok zlepšuje. Cílem této práce je získat hlubší poznání o tokovém chování polymerní taveniny v dutině formy. Měření bylo realizováno za použití 4 typů polypropylenu, které se od sebe liší indexem toku taveniny. Zkušební tělesa byla vyráběna za použití 5 různých povrchů, 3 teplot taveniny a 3 teplot formy. Následně byly provedeny měření smáčivosti povrchu desek testovací formy, replikace povrchu dutiny formy a stupeň krystalinity v různých vzdálenostech od vtoku. Práce dále zahrnovala vyhodnocení tokových závislostí na vstřikovacím stroji při procesních podmínkách a zjištění přítomnosti skluzu na stěně. Z poznatků pak byly navrženy konkrétní doporučení pro nastavení technologických parametrů či úpravy nástroje pro technické aplikace v praxi.

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with the effect of injection mold surface roughness on polymer flow. Previous studies have shown that a higher value of mold surface roughness does not hinder the flow of polymer through the mold cavity, but on the contrary in many cases improves the flow. The aim of this work is to gain a deeper understanding of the flow behavior of the polymer melt in the mold cavity. Four types of polypropylene that differ from each other in melt flow index were used in the measurement. Test specimens were produced using five different surfaces, three melt temperatures and three mold temperatures. The conclusions were made by measuring the wettability of the surface of the test mold plates, the replication of the surface of the mold cavity and the degree of crystallinity at different distances from the gate. The work also included the evaluation of flow curves on the injection machine under process conditions and the detection of the presence of wall slip. Based on the findings, specific recommendations were proposed for setting technological parameters or modifying the tool for technical applications in practice.

OBSAH

ÚVOD.....	5
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	6
2. TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	9
2.1 Vstřikovací cyklus.....	10
2.2 Vstřikovací formy.....	10
2.3 Ekonomické zhodnocení	11
3. CÍLE PRÁCE	12
4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	13
4.1 Materiál	13
4.2 Vstupní podmínky pro výrobu zkušebních těles	13
4.3 Způsob vyhodnocení dat zatékavosti	14
5. HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE.....	16
5.1 Výsledky zatékavosti polymeru	16
5.2 Výsledky měření krystalinity	18
5.3 Výsledky replikace povrchu dutiny formy	18
5.4 Výsledky smáčivosti povrchu dutiny formy	21
5.5 Výsledky měření tokových závislostí.....	22
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	23
PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	27
ZÁVĚR	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	33
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	34
SEZNAM TABULEK.....	34
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA.....	35
CV AUTORA	37

ÚVOD

Polymerní materiály jsou v dnešní době neodmyslitelnou součástí běžného života. Vyskytují se prakticky ve všech odvětvích průmyslu a lze se s nimi setkat každý den. Před 10 lety přesáhla celosvětová produkce plastů 300 miliónů tun za rok a toto číslo každým dalším rokem roste. [1] Postupně rostoucí produkce plastů umožnila vznik mnoha různých zpracovatelských technologií, které jsou průběžně modernizovány a obměňovány. Jednou z nejčastěji využívaných technologií pro zpracování polymerů je vstřikování, a to v celé škále odvětví průmyslu. Za cenu poměrně vysokých vstupních nákladů je možné produkovat tvarově složité výrobky různých rozměrů bez nutnosti dalších dokončovacích operací. Jedná se zpravidla o velkosériovou, či hromadnou výrobu. Stanovení konečné tržní ceny produktu je samozřejmě založeno na výrobní ceně samotného výrobku. Z tohoto důvodu je základním požadavkem při optimalizaci zkrácení času vstřikovacího cyklu, či snížení finančních nákladů spojených s produkcí výrobků. Cena vstřikovaného výrobku je ovlivněna velikostí vyráběné série, nastavením procesních podmínek, cenou materiálu před samotným zpracováním atd. Nezanedbatelnou část celkových nákladů tvoří pořizovací cena samotného nástroje – vstřikovací formy. Tyto formy jsou složeny desítek až stovek dílů, z nichž většina dílů je standardizována. Využitím standardizovaných prvků při konstrukci formy dochází k výraznému snížení celkové ceny nástroje a do popředí se dostává část finančních nákladů na obrobení dutiny formy a dosažení požadované jakosti povrchu. Dutina formy (části formy, které jsou ve styku s polymerem) je zpravidla opatřena leštěným povrchem, přičemž vytvoření takového povrchu je finančně a časově náročné.

Ačkoli je použití leštěného povrchu v některých případech opodstatnitelné z estetického hlediska výrobku, předešlé studie [2-5] ukazují, že leštěný povrch dutiny formy nepřispívá lepšímu zatečení polymeru do dutiny formy. Naopak bylo ve většině případů dosaženo lepších hodnot zatékavosti použitím dutiny formy, u které nebyly použity dokončovací metody obrábění (broušení a leštění). Tato práce se zabývá vlivem povrchu dutiny vstřikovací formy na zatékavost polymeru. Oproti předešlým studiím došlo mimo jiné k rozšíření škály použitých procesních parametrů. Cílem práce je prohloubení znalostí v oblasti chování polymeru v dutině formy. Tyto poznatky pak mohou posloužit k vyvození konkrétních aplikací v procesu, které povedou ke snížení nákladů při výrobě.

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Vliv povrchu vstřikovací formy na zatékavost polymeru byl v minulosti již vyhodnocován. K experimentům byly používány jak termoplastické materiály, tak i elastomery. Dále byly použity různé variace vstřikovacích tlaků, typu vtokového ústí, povrchu dutiny formy apod. Tato práce navazuje na studie [2-5], kde bylo prokázáno, že použití nástroje s dutinou o vyšší hodnotě drsnosti nemá negativní vliv na zatečení polymeru. V některých případech naopak došlo ke zlepšení toku a zvýšení hodnoty zatečení. Aplikací tohoto poznatku je pak možné dosáhnout významného snížení ceny vstřikovací formy. Předmětem této práce je zkoumání vlivu povrchu dutiny formy na zatékavost polymeru a prohloubení znalostí v oblasti chování toku taveniny při vstřikování polymerů. Plnění dutiny formy je komplexní proces, a pro jeho pochopení je třeba uvažovat velké množství činitelů, které se podílí na výsledné podobě toku taveniny. Dosavadní výzkum se zabýval samotným výsledkem toku polymeru vstřikovací formou, přičemž nebyla potvrzena žádná teorie vysvětlující pozitivní vliv povrchu s vyšší drsností.

V oblasti mikrovstřikování se problematikou vlivu drsnosti povrchu na zatečení polymeru zabývalo několik studií. Studie [6, 7] poukazují na významnou roli skluzu na stěně. Dojde-li ke skluzu na stěně, dojde k usnadnění toku polymeru, což vede k vyšším hodnotám délky zatečení. V případě mikrovstřikování je ovšem vliv drsnosti povrchu na tok polymeru výrazně vyšší a tyto výsledky nelze přímo aplikovat na běžnou metodu vstřikování. Zhang et al. ve studii [8] řeší tuto problematiku z hlediska změny teploty taveniny a formy. Výsledky potvrzují, že vliv drsnosti povrchu na zatečení je závislý na teplotě formy i teplotě taveniny a rovněž záleží i na rozměrech průřezu dutiny formy. Rozsáhlých výsledků z hlediska predikce zatékavosti bylo dosaženo ve studii od Liparoti et al. [9]. Ovlivnění toku při použití dutin formy o různé drsnosti povrchu ovšem není součástí odvozených vztahů a nelze proto výše uvedené výsledky přímo využít pro potřeby této práce. Ve studiích [10-12] autoři upozorňují na nezanedbatelnou roli styčné plochy mezi polymerní taveninou a povrchem dutiny formy. Po vyhodnocení smáčivosti povrchu bylo zjištěno, že délka zatečení roste se zvyšující se drsností povrchu a zároveň se zvyšujícím se úhlem smáčení. Ačkoli byly tyto experimenty prováděny pouze v případě mikrovstřikování, jsou přínosem pro realizaci experimentů v oblasti běžného vstřikování.

Studie [13-15] zabývající se problematikou vlivu povrchu nástroje na tok polymeru při vytlačování poukazují na účinek smáčivosti povrchu a povrchové

energie. Dosažené výsledky ovšem není možné aplikovat, jelikož se nezabývají problematikou vstřikování, kde je dosahováno řádově vyšších smykových rychlostí. Berger et al. [16] dosáhl zajímavých výsledků v oblasti vlivu smáčivosti povrchu při vstřikování. Použitím různých materiálů dutiny formy, včetně využití povlakování povrchu, bylo dosaženo rozdílných hodnot povrchové energie. Dále byl výzkum zaměřen na změnu povrchové energie a tím i smáčivosti povrchu v závislosti na teplotě formy. Tato práce hodnotí vliv smáčivosti na změnu koeficientu tření a výsledky jsou pak aplikovatelné v oblasti odformování výrobků. Avšak drsnost povrchu formy byla zanedbána, a navíc nebyl řešen samotný tok polymeru a jeho zatečení do dutiny formy.

Hodnotných výsledků bylo dosaženo ve studiích zabývajících se replikací povrchu nástroje. [17-21] Tyto výsledky bezpochyby úzce souvisí s danou problematikou a mohou být přínosem pro tuto práci, nicméně nezabývají se problematikou samotného toku polymeru. Zmíněné studie řeší z velké části pouze důsledek dějů při toku polymerní taveniny formou, a to pro technologii vstřikování nebo mikrovstřikování.

Liu et al. [22] se zabýval vlivem procesních parametrů a povrchu dutiny formy na koeficient přestupu tepla mezi polymerem a stěnou dutiny formy při vstřikování. Výsledky vypovídají o zvýšení koeficientu s rostoucí teplotou taveniny z důvodu nižší viskozity při toku a tedy lepší replikace povrchu dutiny formy. Při zvýšení drsnosti povrchu formy dochází ke zvětšení teplosměnné plochy a tím dojde i ke zvýšení přestupu tepla. Tyto výsledky hrají důležitou roli při vyhodnocování vlivu drsnosti povrchu na zatékavost polymeru.

Z hlediska zatékavosti polymeru do dutiny formy je nedílnou součástí této problematiky povrchová úprava povrchu, jež přichází do kontaktu s polymerem. V praxi jsou používány různé druhy povlaků a nanopovlaků, jejichž úkolem je snížit napětí při toku polymeru a zvýšit tak zatékavost polymeru do dutiny formy. Další výhodou povlakování je snížení napětí při vyhazování výrobků z formy a prodloužení životnosti dutiny formy. Rozsáhlá studie [23] se zabývá podstatou povlakování, mechanickými a tribologickými vlastnostmi vrstev a klade si za cíl sumarizovat dosavadní poznatky v této oblasti.

Z publikací, zabývajících se povlakováním, stojí za zmínku studie [24-26], které se zabývají hodnocením smáčivosti povrchů opatřených povlakem v porovnání s povrchem bez povlaku. Z výsledků je mimo jiné patrné, že každý polymer se chová jinak v kontaktu s různými povlaky. Dalším faktorem je teplota povrchu, která má vliv na velikost úhlu smáčení. Z teplotního hlediska se problematice povlaků věnuje studie [27]. Je zde vyhodnocován koeficient přestupu tepla, izolační vlastnosti povlaku a ovlivnění plnění dutiny formy.

Lucchetta et al. [28] se zabývají vlivem různých typů povlaku na skluz na stěně. Bylo zjištěno, že všechny typy povlaků lze využít k nezanedbatelnému snížení napětí při toku. Všechny zmíněné publikace se vzájemně doplňují a poskytují přehled o účinnosti různých typů povlaků při plnění dutiny formy. V oblasti mikrovstříkování se pak této problematice věnují např. Hopmann et al. ve studiích [29-30]. V případě mikrovstříkování je využití povlakování klíčové z hlediska úspěšného zaplnění dutiny formy a realizace výroby.

Otsuka et al. se ve studii [31] zabývá hodnocením vlastností povrchu formy na délku zatečení při běžném vstříkování. Pro účely testování byl zvolen polykarbonát, který byl vstříkován při čtyřech rozdílných teplotách taveniny. Experiment byl realizován na 8 různých testovacích površích, z nichž 3 byly povlakovány, 4 povrchy byly připraveny pomocí elektroerozivního obrábění (EDM) a 1 povrch byl leštěný. Leštěný povrch byl určen jako výchozí povrch k porovnání. Výsledky byly dále podloženy vyhodnocením volné povrchové energie jednotlivých povrchů. Závěry této studie se částečně shodují s výsledky studií [2-4].

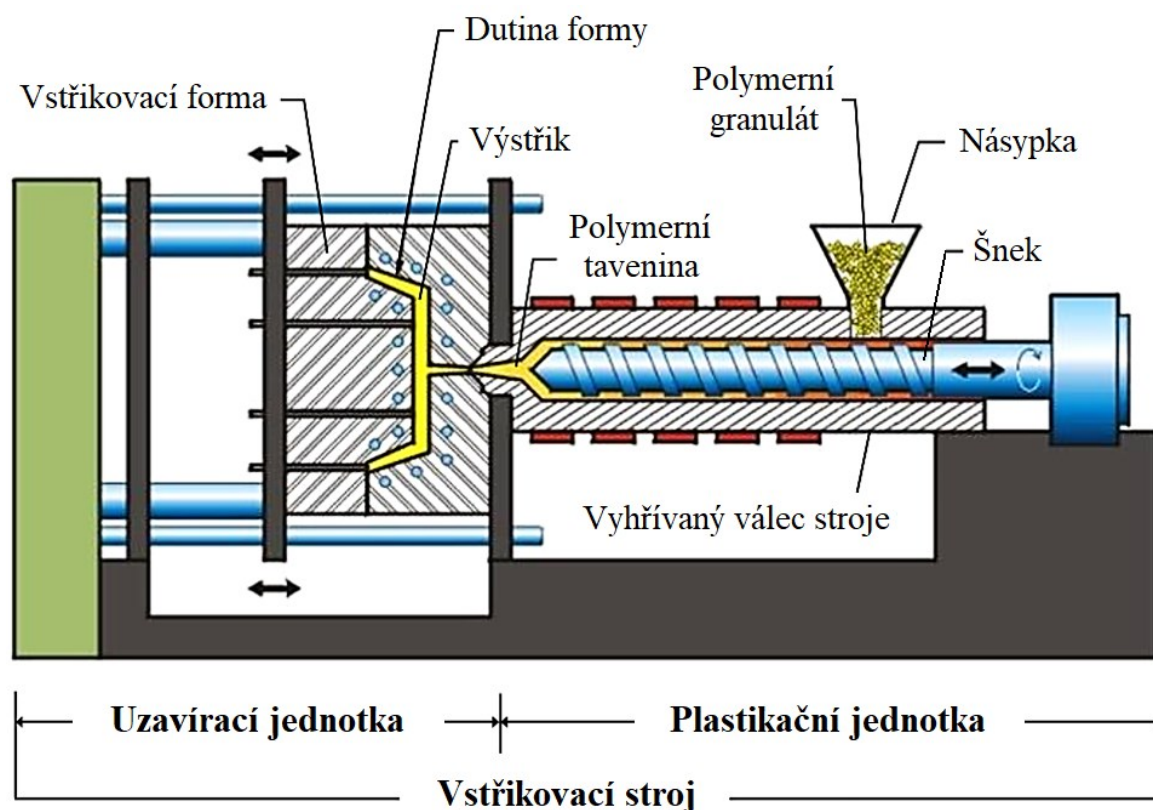
Z provedené rešerše vyplývá, že ačkoli se větší množství studií zabývá podobnou problematikou jako tato práce, nelze z těchto výsledků jednoznačně vyvodit obecný závěr. Velké množství prací se věnuje zatékavosti v oblasti mikrovstříkování, při kterém jsou používány dutiny formy mnohonásobně menších rozměrů. Ovlivnění toku drsností povrchu je pak kompletně odlišné. Práce, které se věnují běžnému vstříkování, se vlivem drsnosti povrchu často zabývají spíše okrajově. Studie [31] se nejvíce blíží problematice této práce, nebere ovšem v úvahu další proměnné jako je teplota formy, či index toku taveniny (ITT) materiálu. Testované povrchy (mimo povlakované) byly vytvořeny za použití EDM a dosahují vyšších drsností, které by mohly způsobovat komplikace při odformování výrobku. V této oblasti je tedy stále potřeba hlubšího poznání, aby bylo možné výsledky uplatnit v praxi.

Řešená práce má za cíl další rozšíření znalostí v oblasti zatékavosti polymeru do dutiny vstříkovací formy. Oproti již provedeným studiím se mimo jiné částečně zabývá i plněním dutiny formy opatřené nanopovlakem. Výsledky byly následně porovnány se vstříkováním do leštěné dutiny formy, a do dutiny formy, u které nebyly použity dokončovací metody obrábění.

2. TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je nejdůležitějším zpracovatelským procesem pro výrobu polymerních dílů. Vstřikování je cyklický proces, při kterém je možné vyrábět díly o hmotnosti od 1 mg do více než 10 kg. Tyto díly pak z pravidla nevyžadují další úpravy. Hlavními třemi činiteli u technologie vstřikování je vstřikovací stroj, vstřikovací forma a materiál. Podstatou je roztavení materiálu, nejčastěji ve formě granulátu, a následné vstříknutí polymerní taveniny do dutiny formy, kde materiál získá podobu výsledného výrobku a dále je ochlazen na vyhazovací teplotu (v případě termoplastů). [32, 33]

Vstřikovací stroj se skládá z plastikační a uzavírací jednotky (Obr. 1.). V plastikační jednotce je připravována polymerní tavenina. Následně je dopředným pohybem šneku dopravena skrze trysku stroje a vtokový systém formy do tvarové dutiny. Vstřikovací forma je upevněna v uzavírací jednotce, která rovněž zajišťuje uzavírání a otevírání formy a zpravidla také odformování výrobku. V dnešní době lze z hlediska pohonu rozlišit vstřikovací stroje hydraulické, elektrické nebo hybridní. [32, 34]



Obr. 1. Schéma vstřikovacího stroje [35]

2.1 Vstřikovací cyklus

Posloupnost jednotlivých úkonů plastikační a uzavírací jednotky se nazývá vstřikovací cyklus. Tento cyklus je základním parametrem produktivity vstřikování a může trvat od jednotek sekund do několika minut. Délka cyklu závisí především na tloušťce stěn výrobku, kdy od tloušťky stěny 1,5 mm dochází ke značnému nárůstu času potřebného na ochlazení výrobku. Vstřikovací cyklus začíná uzavřením formy a příjezdem plastikační jednotky. Následuje vstříknutí a zpravidla také dotlak (plnění dutiny formy za účelem kompenzace smrštění výrobku během ochlazování taveniny při působení nižšího tlaku než v případě vstříknutí). Jakmile je dutina formy vyplněna polymerem, plastikační jednotka odjíždí a dochází k plastikaci nové dávky materiálu. Ve formě probíhá chlazení výrobku, a jakmile je dosaženo vyhazovací teploty, dojde k otevření formy a k odformování výrobku. Čím kratší je doba cyklu, tím více výrobků je možné vyprodukovat za určitý časový úsek. Ovšem při snaze cyklus urychlit a zkrátit některé úseky cyklu může docházet ke vzniku vad na výrobku a ke znehodnocení výroby. Proto je potřeba najít optimální parametry k dosažení co možná nejvyšší efektivity. [36, 37]

2.2 Vstřikovací formy

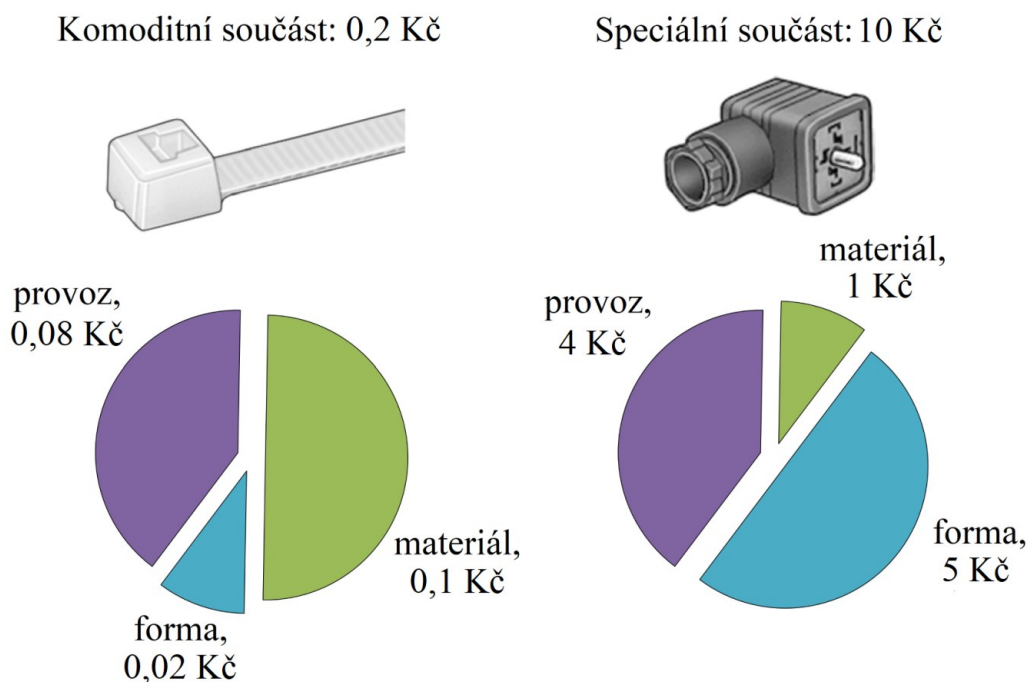
Vstřikovací forma je komplexním nástrojem, který udává výsledný tvar výrobku. Každá forma musí splňovat tři hlavní funkce: dopravu taveniny, odvod tepla a odformování výrobku. Mimo hlavní úkony je zde celá řada dalších funkcí, z nichž některé si navzájem odporují a je nutné hledat kompromis. [38]

Rozvržení vstřikovací formy není jednotné a existuje mnoho různých provedení. Nejběžnějším typem je dvoudeskové uspořádání, kdy je dutina formy vytvořena do dvou protilehlých desek, případně tyto dvě desky slouží k ukotvení tvarových vložek. Mezi další typy provedení vstřikovacích forem patří například třídeskové formy, formy s bočním odformováním, formy s vytáčecími trny, etážové formy, formy pro vícekomponentní vstřikování atd. [38, 39]

Vstřikovací formy je možné dělit také podle vtokového systému, a to na formy se studeným vtokovým systémem, formy s vyhřívaným vtokovým systémem a formy, které využívají kombinaci vyhřívaného a studeného vtokového systému. Hlavním úkolem vtokového systému je zajištění dopravy taveniny do dutiny formy, přičemž každé z provedení má své výhody i nevýhody. [32, 39]

2.3 Ekonomické zhodnocení

Technologie vstřikování se vyznačuje poměrně vysokými vstupními náklady. Vynaložené prostředky na produkci se pak odráží do ceny výrobků, přičemž konečná cena se odvíjí od ceny materiálu, nákladů na provoz výroby a od ceny formy a její údržby. Poměr jednotlivých složek se může výrazně měnit s ohledem na vlastnosti požadovaného produktu (Obr. 2.). [40, 41]



Obr. 2. Příklad rozložení nákladů na jeden výrobek [41]

V případě menších sérií, či v případě výroby produktů složitých tvarů může cena výroby formy tvořit i více jak polovinu ceny konečného produktu. Z tohoto hlediska je vhodné se zaměřit právě na pořizovací cenu formy a identifikovat možnosti snížení nákladů. Díky normalizaci drtivé většiny součástí formy je převážná část nákladů vynaložena na obrábění, které mohou tvořit i více než 70 % celkové ceny vstřikovací formy. Nejvíce obráběcích operací je v případě složitých součástí zapotřebí právě pro vytvoření dutiny formy. [40, 41]

Jak naznačují předešlé studie [2-4, 31], odstraněním dokončovacích operací v oblasti tvarové dutiny formy nedochází ke zhoršení plnění formy a je možné snížit náklady na vstřikovací formu a následně i cenu konečného produktu. Předešlé práce se ve velké míře zabývaly povrchem o vysokých hodnotách drsnosti, které mohou být z estetického hlediska nepřijatelné. Dalším problémem je odformování, které může být vlivem drsného povrchu problematické. Z tohoto důvodu se tato práce věnuje povrchu o poměrně nízké drsnosti povrchu.

3. CÍLE PRÁCE

Cílem disertační práce je studium vlivu drsnosti povrchu formy a procesních parametrů na zatékavost polymeru. Na základě předešlých výsledků budou provedeny další experimenty vedoucí k prohloubení poznání v oblasti toku polymeru při vysokých smykových rychlostech a při plnění dutiny formy.

Nejdůležitější kroky k dosažení popsaného cíle jsou:

1. Vytvoření literární rešerše.
2. Příprava zkušebních těles v testovací formě za použití různých procesních parametrů (oproti předešlým studiím doplněno o vliv teploty formy a taveniny a různé procentuální zastoupení testovaného povrchu).
3. Návrh konstrukčního řešení modifikace vstřikovacího stroje pro účely vyhodnocování tokových křivek materiálu a ověření přítomnosti skluzu na stěně.
4. Určení smáčivosti testovaných povrchů desek formy.
5. Statistické vyhodnocení získaných dat.

4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

V této kapitole je popsán použitý materiál, podmínky při přípravě zkušebních těles a vyhodnocení délky zatečení. Kompletní metodika je součástí disertační práce.

4.1 Materiál

Testovaný materiál byl zvolen polypropylen TATREN od firmy Slovnaft a.s. Jedná se o semikrystalický polymer, který nachází široké využití při zpracování technologií vstřikování. Byly zvoleny 4 blokové kopolymery, jejichž vybrané parametry jsou zobrazeny v Tab. 1. Volba materiálů probíhala s ohledem na jejich podobnost, přičemž hlavní rozdíl je v hodnotě ITT.

Tab. 1. Vybrané vlastnosti materiálů vybraných pro realizaci měření

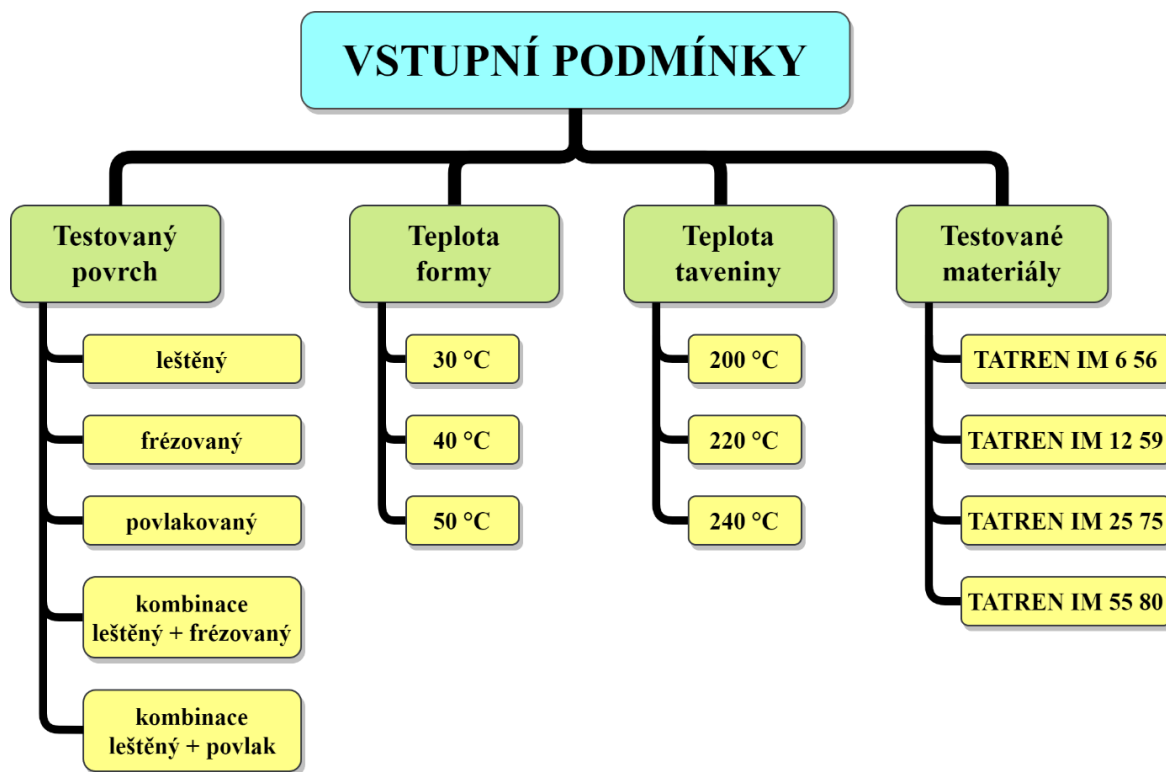
Materiál	ITT [g·10 min ⁻¹]	Zpracovatelská teplota [°C]	E [MPa]
TATREN IM 6 56	6	190 - 250	1530
TATREN IM 12 59	12		1500
TATREN IM 25 75	25		1150
TATREN IM 55 80	55		1400

4.2 Vstupní podmínky pro výrobu zkušebních těles

Pro přípravu zkušebních těles byly zvoleny 4 skupiny proměnných (Obr. 3.). Výsledkem je 180 kombinací vstupních podmínek, přičemž pro každou z těchto kombinací bylo vytvořeno 10 těles.

Pro zhotovení testovacích těles použit vstřikovací stroj řízený vstřikovací rychlostí a z tohoto důvodu nebyl vstřikovací tlak nijak variován. S použitím jedné nastavené vstřikovací rychlosti ovšem docházelo ke kolísání tlaku, přičemž i minimální změna tlaku má za následek změnu v délce zatečení. Proto byla u každého zkušebního tělesa zaznamenána i hodnota vstřikovacího tlaku změřená na stroji, aby nedocházelo ke zkreslení dat. Tento fakt vedl ke zpřesnění výsledků a rozdíly v zatečení jsou způsobeny pouze variací výše uvedených vstupních podmínek. Vstřikovací tlak je uváděn v jednotkách bar, ve kterých pracují použitá zařízení a zároveň se jedná o běžně používanou jednotku v praxi (1 bar = 0,1 MPa).

Hodnota vstřikovací rychlosti byla nastavena na 110 mm·s⁻¹. Celková doba cyklu byla 40 s, která je z největší části tvořena délkou chlazení výrobku ve formě. Působení dotlaku bylo vzhledem k charakteru výrobku nastaveno na 1 s při hodnotě vstřikovací rychlosti 90 mm·s⁻¹.

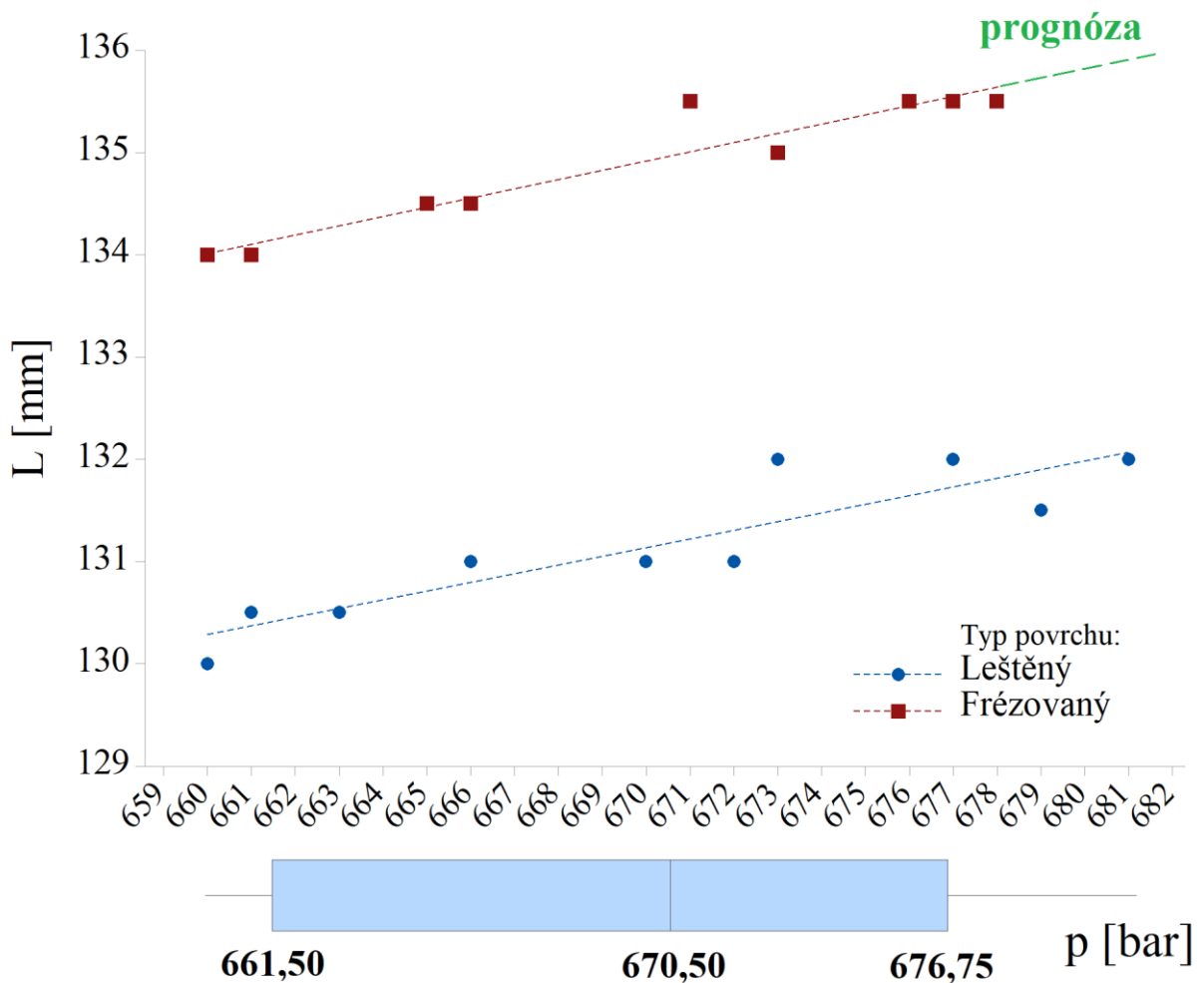


Obr. 3. Variace zvolených vstupních podmínek pro výrobu zkušebních těles

4.3 Způsob vyhodnocení dat zatékavosti

Jak již bylo zmíněno, každé ze zkušebních těles bylo připraveno při daném vstřikovacím tlaku. Tyto hodnoty tlaků byly měřeny na stroji a zaznamenány do souboru dat. Výsledkem je soubor dat, kdy je při konkrétních vstupních podmínkách výstupem 10 hodnot vstřikovacího tlaku a 10 hodnot délky zatečení. Z tohoto důvodu není možné přímo porovnat jednu skupinu hodnot s další skupinou hodnot s jinými vstupními podmínkami.

Aby bylo možné data vyhodnotit, byly pro jednotlivé skupiny dat určeny lineární regrese. Dvě skupiny dat délky zatečení L byly pak vyhodnoceny pro jednu společnou skupinu vstřikovacích tlaků. Tato skupina tlaků byla proložena boxplotovým diagramem, který tvoří osu x (Obr. 4.). Pro určitou hodnotu tlaku (omezenou rozsahem měřených hodnot v daných skupinách) je tedy možné dopočítat výsledné zatečení pro obě skupiny vstupních podmínek a následně stanovit rozdíl v délce zatečení.



Obr. 4. Porovnání dat zatékavosti při různých podmínkách (příklad)
 (Materiál TATREN IM 6 56, Teplota taveniny 200 °C, teplota formy 30 °C)

Byly uvažovány tři různé tlaky ze skupiny naměřených vstřikovacích tlaků, u kterých byly dopočítány z lineárních regresí hodnoty zatečení. Jedná se o hodnoty tlaku v 1. a 3. kvartálu boxplotového diagramu a medián. Pokud se vypočtená hodnota zatékavosti vyskytuje mimo původní rozsah tlaků ve skupině, byla učiněna prognóza, že bude lineární trend pokračovat i nadále. V případě příkladu (Obr. 4) je medián tlaku roven 670,5 bar. Pro vyjádření rozdílu v zatečení byl stanoven index poměrného zatečení (IPZ), který vypovídá o změně zatečení vzhledem k leštěné desce. Ten je po zaokrouhlení roven 2,89 %, přičemž nepřesnost zavedeného indexu byla stanovena na základě odklonu lineárních regresí. Ke stanovení chyby byl vypočítán IPZ i v obou kvartilech a jejich hodnoty pak byly odečteny od hodnoty indexu v mediánu. Hodnota chyby se v datovém souboru zpravidla pohybovala řádově v desetínách až setinách procent. Dosažená přesnost výsledků je pro tuto práci vyhovující.

5. HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Výsledky práce jsou rozděleny do několika sekcí dle provedeného experimentu. Při přípravě testovacích těles z materiálu TATREN 55 80 docházelo ke vzniku výrazných přetoků, což vedlo k vyřazení výsledků pro tento materiál. Kompletní soubor výsledků je k dispozici v příloze disertační práce.

5.1 Výsledky zatékavosti polymeru

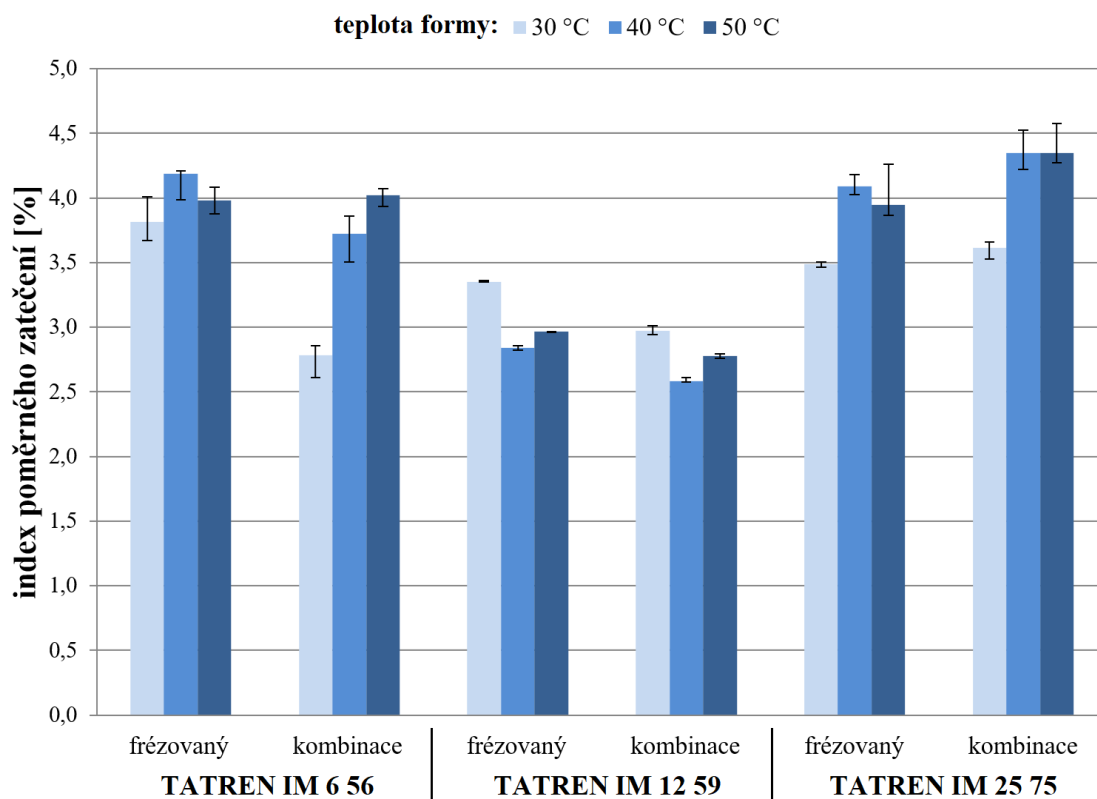
Zatékavost polymeru byla vyhodnocována dle kap. 4.3. V následujících grafech jsou zobrazeny vypočtené hodnoty IPZ, které udávají změnu hodnoty zatečení v % s použitím daného testovacího povrchu oproti leštěnému povrchu testovací dutiny formy. Jedna hodnota IPZ vyjadřuje změnu v zatečení polymeru pouze při změně testovacího povrchu formy. Ostatní vstupní parametry jsou shodné pro oba porovnávané povrchy.

Vyhodnocení délky zatečení je v tezi uvedeno pouze pro leštěný a frézovaný povrch. Výsledky povlakovaného povrchu jsou uvedeny v disertační práci.

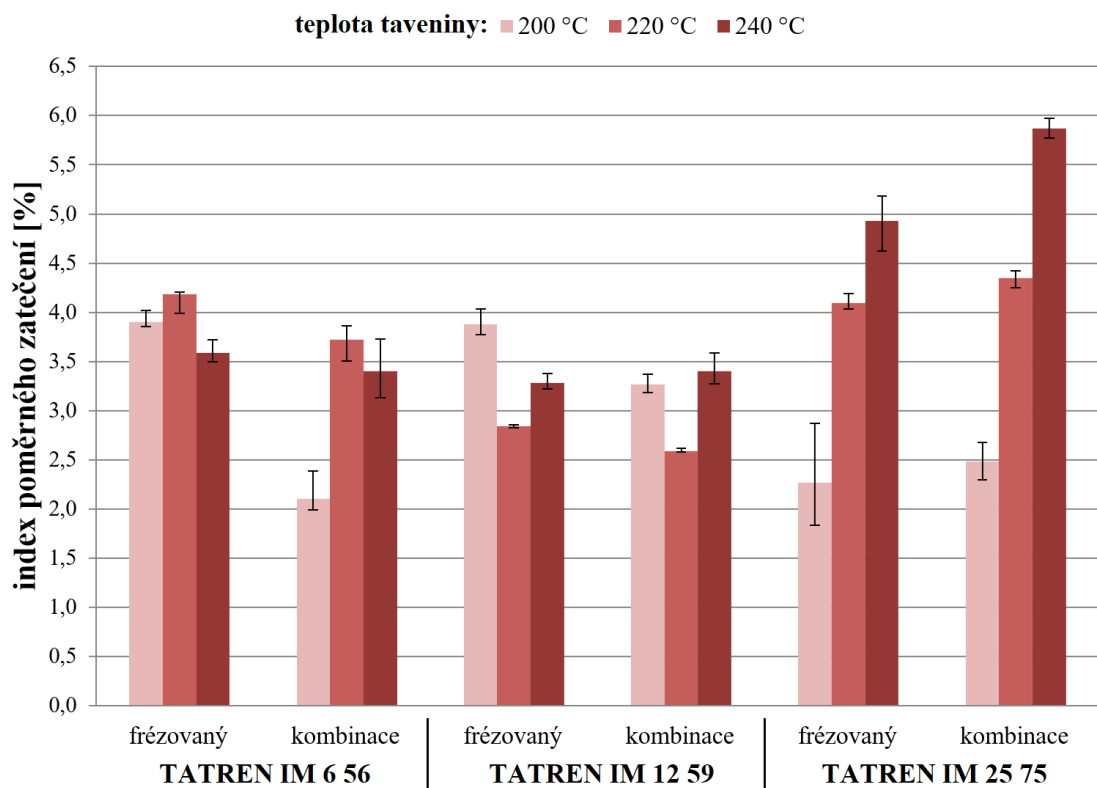
Prvním výsledkem (Obr. 5.) je vyhodnocení hodnot zatečení při použití frézovaného povrchu (R_a 0,59 μm) a kombinovaného povrchu (57 % frézovaný, 43 % leštěný povrch). Drsnost leštěného povrchu byla R_a 0,06 μm .

V grafu jsou vyneseny hodnoty IPZ materiálů TATREN IM 6 56, TATREN IM 12 59 a TATREN IM 25 75 pro teploty formy 30, 40 a 50 °C. Teplota taveniny byla ve všech případech 220 °C. Z výsledků je patrné, že ve všech případech došlo ke zvýšení hodnoty zatečení polymeru oproti leštěnému povrchu, a to bez ohledu na použitý materiál, či teplotu formy.

Na Obr. 6. jsou uvedeny výsledky pro teplotu formy 40 °C, stejné povrchy i materiály, a rozdílné teploty taveniny (200, 220 a 240 °C). Stejně jako v předchozím případě došlo ke zvýšení hodnoty zatečení s použitím drsnějšího povrchu, a to bez ohledu na změnu materiálu, či teploty taveniny polymeru.



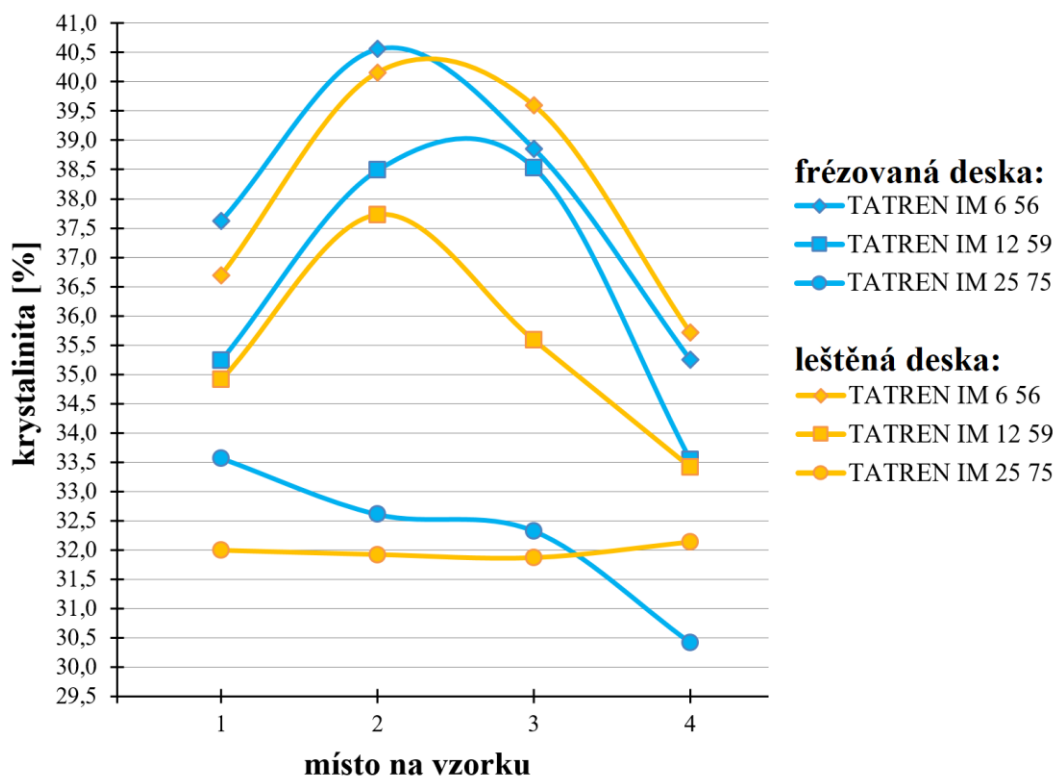
Obr. 5. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty formy, 3 testovací materiály, teplota taveniny 220 °C)



Obr. 6. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty taveniny, 3 testovací materiály, teplota formy 40 °C)

5.2 Výsledky měření krystalinity

Krystalinita byla měřena metodou DSC u zkušebních těles z materiálů TATREN IM 6 56, TATREN IM 12 59 a TATREN IM 25 75, kdy z každého tělesa byly odebrány 4 vzorky. Na Obr. 7. jsou vidět naměřené hodnoty krystalinity po délce zkušebního tělesa. Z výsledků je patrné, že se stupeň krystalinity mění po délce vzorku a změna nevykazuje lineární charakter. Při porovnání testovacích povrchů bylo dosaženo vyššího stupně krystalinity v případě použití frézované desky.



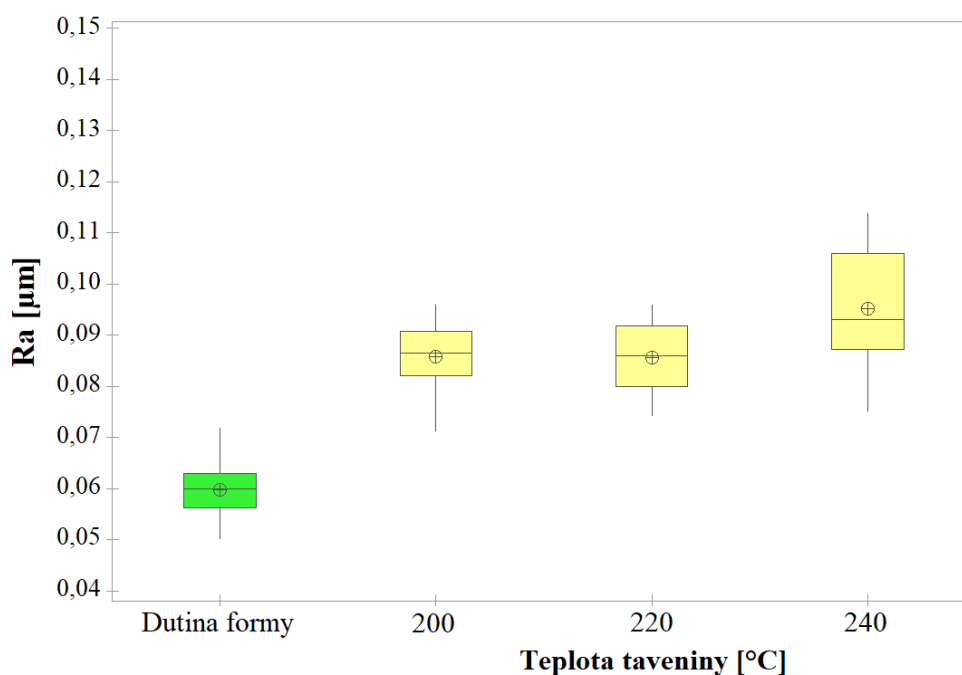
Obr. 7. Výsledky DSC při prvním tavení, frézovaná vs. leštěná deska

5.3 Výsledky replikace povrchu dutiny formy

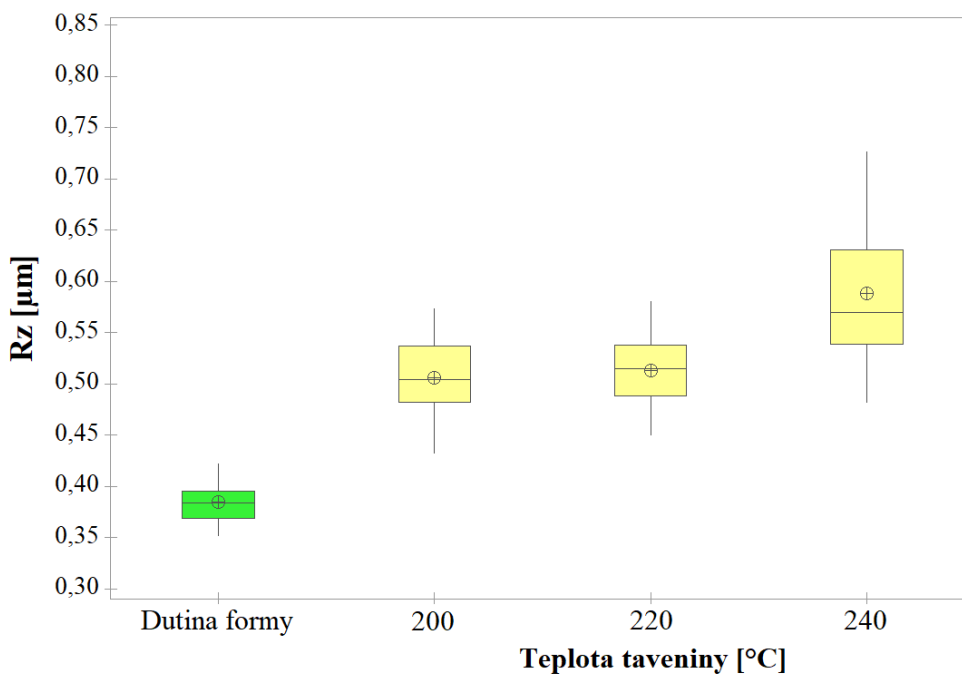
Jednotlivé naměřené hodnoty drsnosti povrchu zkušební testovací formy a zkušebních těles byly zpracovány do boxplotových diagramů. V prvním sloupci grafu se vždy nachází naměřená drsnost dutiny formy (zelená barva), která slouží pro porovnání. V dalších sloupcích jsou pak vyobrazeny hodnoty drsnosti povrchu (R_a a R_z) zkušebních těles vyrobených při uvedených vstupních parametrech. Z důvodu velkého množství naměřených dat jsou uvedeny pouze některé z výsledků pro místo měření na vzorku B u zkušebních těles z materiálu TATREN IM 6 56.

Na Obr. 8. a Obr. 9 jsou uvedeny výsledky drsnosti povrchu R_a a R_z leštěného testovacího povrchu a zkušebních těles z materiálu TATREN IM 6 56

vstříkovaných při teplotách taveniny 200, 220 a 240 °C a teplotě formy 40 °C. Ze získaných výsledků je patrné, že došlo k negativní replikaci a drsnost povrchu zkušebních těles byla vyšší než drsnost povrchu dutiny formy.

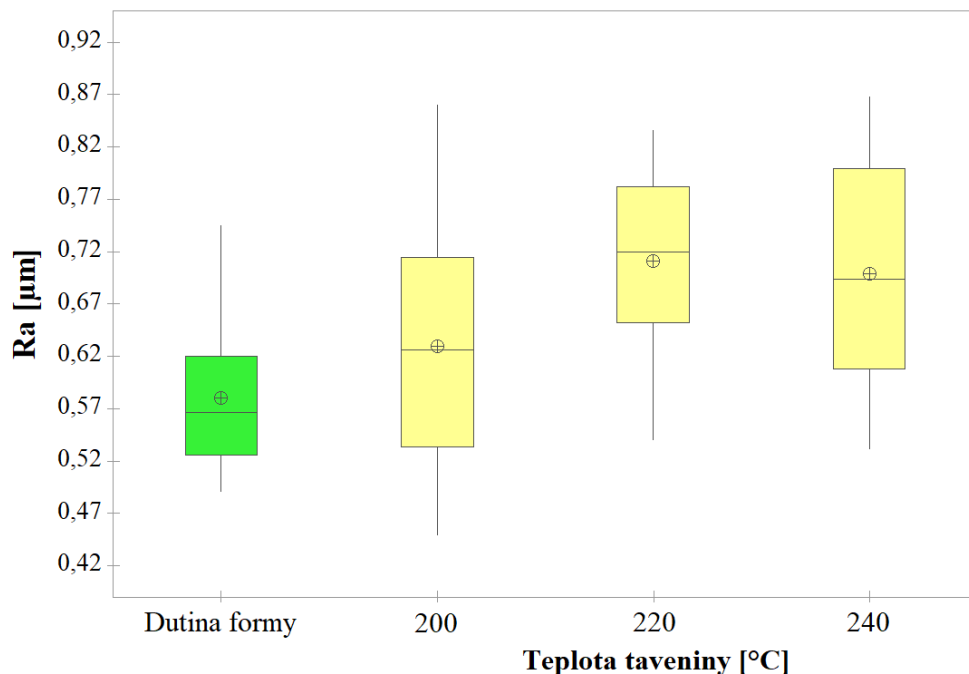


Obr. 8. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)

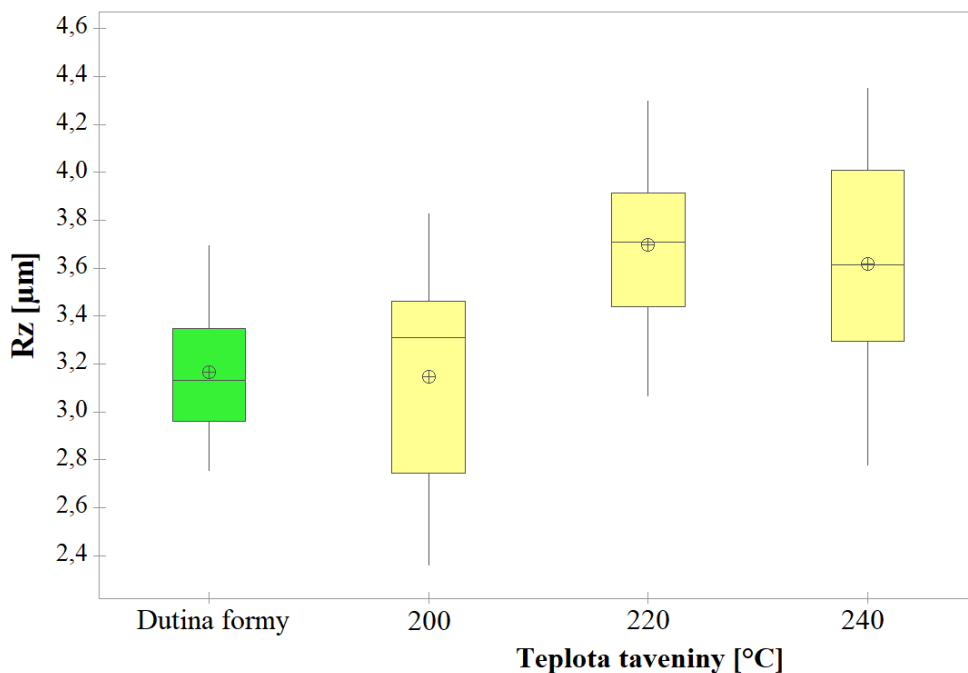


Obr. 9. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)

Na Obr. 10. a Obr. 11 jsou uvedeny výsledky drsnosti povrchu Ra a Rz frézovaného testovacího povrchu za použití stejného materiálu a vstupních podmínek jako v předchozím případě. Výsledky opět ukazují, že došlo k negativní replikaci povrchu jako v případě leštěného povrchu, ačkoli v případě frézovaného povrchu je rozdíl v drsnosti relativně velmi malý.



Obr. 10. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)

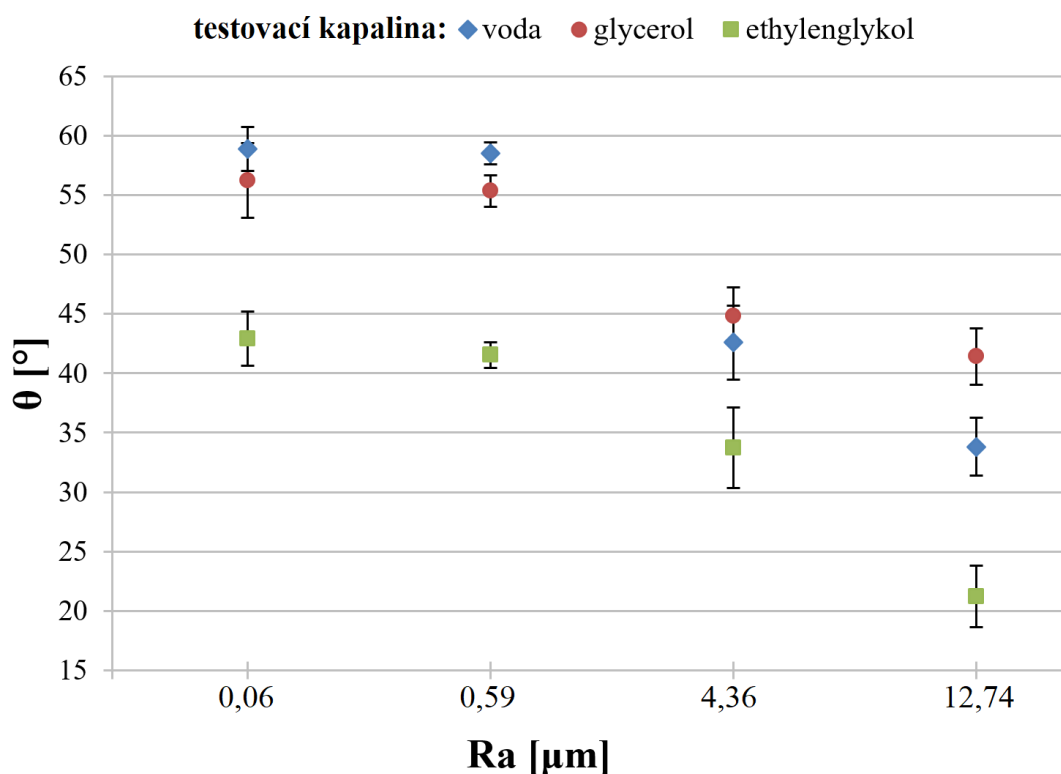


Obr. 11. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)

5.4 Výsledky smáčivosti povrchu dutiny formy

V této kapitole jsou prezentovány výsledky úhlu smáčení testovacích povrchů. Výsledky adhezní práce a povrchové energie jsou součástí disertační práce.

V grafu (Obr. 12.) jsou zobrazeny naměřené hodnoty úhlu smáčení, který byl přímo měřen z nasnímaných kapek testovacích kapalin (destilovaná voda, glycerol a ethylenglykol), pro leštěný a frézovaný povrch, které byly použity v této práci. Zároveň byla smáčivost povrchu měřena i pro dva testovací povrchy s vyšší hodnotou drsnosti povrchu (jemný a hrubý dezén), které byly použity v dřívějších studiích [3, 4]. Z grafu je patrné, že se zvyšující se hodnotou drsnosti povrchu R_a se snižuje úhel smáčení, tedy že povrch s vyšší drsností povrchu je lépe smáčen kapalinou.

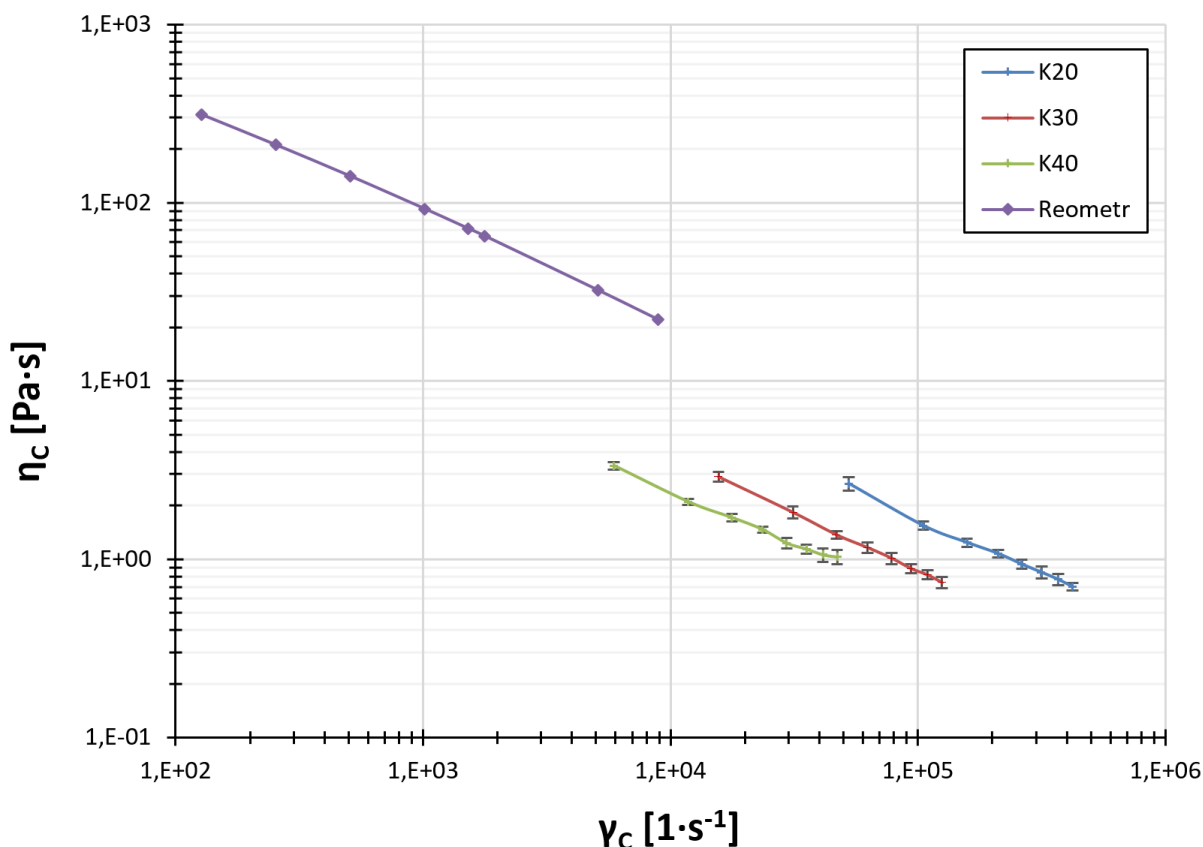


Obr. 12. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na úhel smáčení

5.5 Výsledky měření tokových závislostí

Navržená úprava trysky vstřikovacího stroje byla realizována a použita pro měření tokových závislostí při procesních podmínkách technologie vstřikování. Vstupní hodnotou byla rychlost pohybu šneku (pístu) a měřen byl tlak před vstupem do kapiláry. Získané hodnoty byly přepočteny a korigovány a jsou prezentovány ve formě závislosti smykové viskozity na rychlosti smykové deformace.

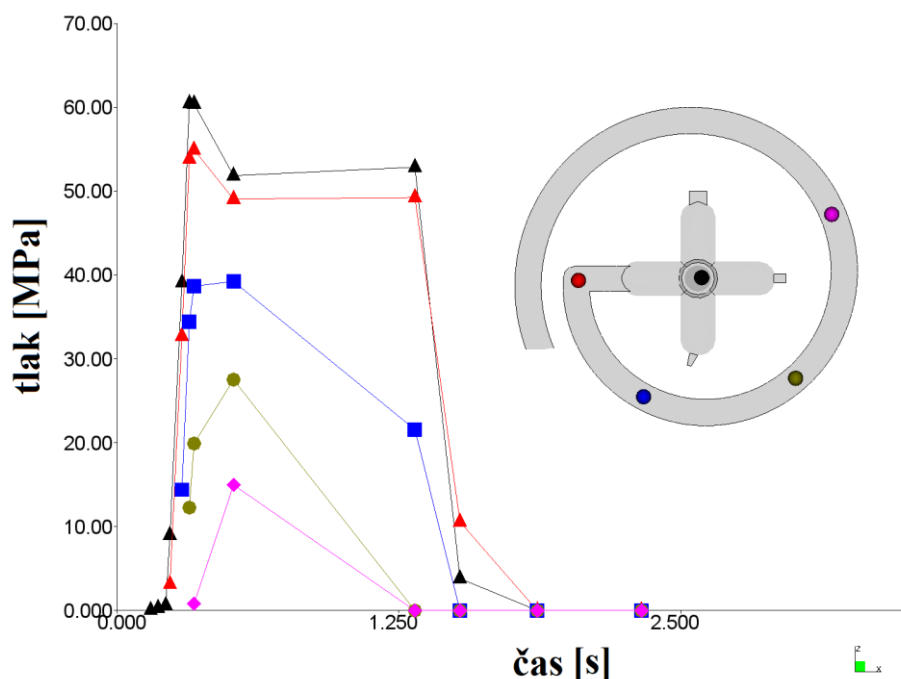
Na Obr. 13. jsou vidět výsledné tokové křivky materiálu TATREN IM 12 59 při teplotě taveniny 200 °C v porovnání s naměřenou tokovou charakteristikou na výtlačném reometru. Kladné i záporné hodnoty chybových úseček odpovídají třem hodnotám směrodatné odchylky. Z grafu je zřejmé, že při použití kapilár o stejném poměru L/D docházelo k rozdílnému chování polymerní taveniny při toku.



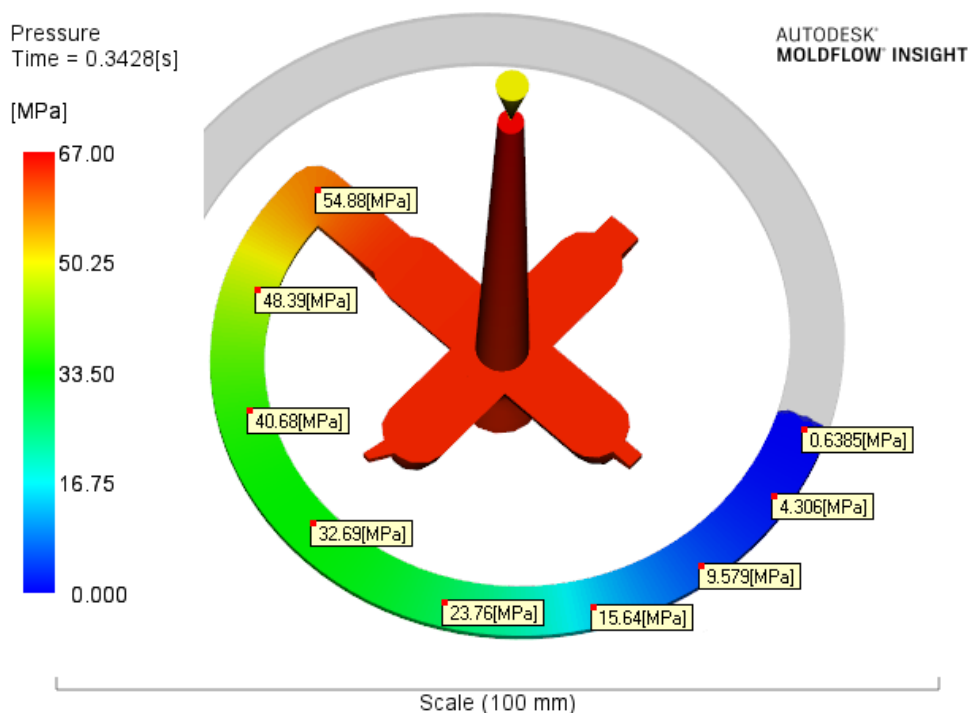
Obr. 13. Získané tokové křivky v porovnání s daty z výtlačného reometru (teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 12 59)

6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Uvedené výsledky disertační práce popisují vliv drsnosti povrchu dutiny vstřikovací formy na zatékavost polymeru. V případě frézovaného povrchu (R_a 0,59 μm) došlo ke zvýšení hodnoty délky zatečení oproti leštěnému povrchu (R_a 0,06 μm), a to pro všechny testované materiály, teploty taveniny i teploty formy. Zlepšení zatékavosti v případě frézované desky se pohybovalo od 2 do 6 % oproti leštěné desce při stejných vstupních podmínkách. Výsledky replikace povrchu ukazují v případě leštěné i frézované desky negativní tendenci, tedy že povrch zkušebního tělesa měl vyšší drsnost R_a a R_z , než povrch dutiny formy. Při použití frézované desky se povrch zkušebních těles blížil drsnosti povrchu desky, a jak naznačují předchozí studie [53], s vyšší drsností povrchu desky by došlo k pozitivní replikaci povrchu. V tomto případě tedy není možné konstatovat, že zvýšení hodnoty zatečení je důsledek uzavření vzduchu v nerovnostech povrchu, který by částečně omezoval intenzitu ochlazování polymeru při toku dutinou formy. Na druhou stranu ovšem není možné tento jev vyloučit, jelikož rozdíl v zatečení se pohybuje v řádech jednotek procent a replikace povrchu se výrazně mění s délkou toku polymeru v důsledku klesajícího tlaku v dutině formy (Obr. 14.). V průběhu toku polymeru je navíc upřednostněn tok prázdnou dutinou formy před vyplňováním povrchových nerovností z důvodu téměř nulových hodnot tlaku v místě čela taveniny (Obr. 15.).



Obr. 14. Průběh tlaku v dutině formy (toková simulace)

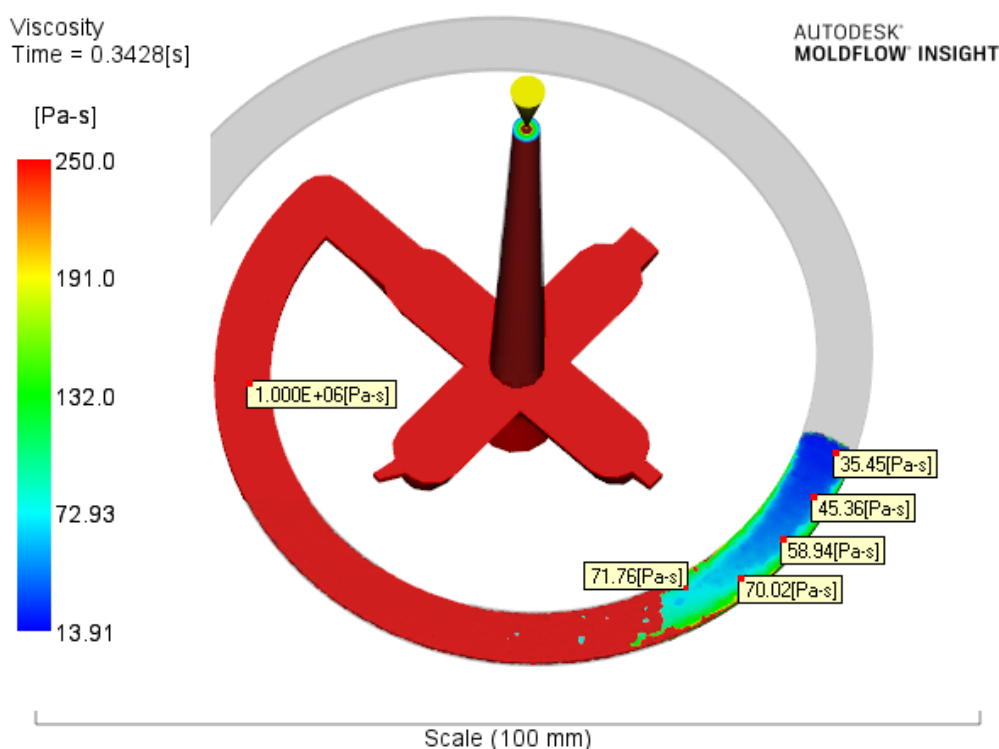


Obr. 15. Hodnoty tlaku fáze plnění v čase 0,34 s (toková simulace)

Výsledky měření krystalinity ukázaly rozdílné hodnoty krystalinity se vzdáleností od vtoku, přičemž nejvyšší stupeň krystalinity byl přibližně v polovině délky zkušební tělesa. Ve většině případů byla hodnota krystalinity vyšší za použití frézovaného testovacího povrchu. Frézovaný povrch je z hlediska ochlazování materiálu ve formě teoreticky výhodnější, jelikož dochází k intenzivnějšímu ochlazení vlivem větší teplosměnné plochy (vyšší hodnota R_a). Ovšem při fázi plnění dutiny formy může docházet k uzavírání vzduchu vlivem drsnosti povrchu, což má naopak za následek snížení odvodu tepla. V tomto případě pravděpodobně převažoval důsledek uzavření vzduchu a ochlazování polymeru ve formě bylo při použití frézovaného povrchu pozvolnější. Stupeň krystalinity má nezanedbatelný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Zmíněný aspekt ovšem není předmětem disertační práce a poznatky z této oblasti lze nalézt ve studii [42].

Výsledky smáčivosti povrchu ukazují, že drsnější povrch je lépe smáčen kapalinami. Rozdíl mezi testovaným leštěným a frézovaným povrchem je ovšem minimální a změnu v zatečení nelze přisuzovat vlivu povrchové energie dutiny formy. Při použití povrchů s vyšší drsností povrchu (dezén) došlo k poklesu úhlů smáčení, a tedy nárůstu povrchové energie. V případě posuzování těchto povrchů tedy není možné tento fakt vyloučit a může hrát jistou roli při toku polymeru dutinou vstřikovací formy.

Konstrukční úprava trysky vstřikovacího stroje a následné měření tokových charakteristik přineslo hodnotné výsledky. Tokové křivky by se při použití kapilár se stejným poměrem L/D měly dle Mooneyho metody prolínat v případě, že nedochází ke skluzu na stěně. V tomto případě byly získány 3 rozdílné tokové křivky a je zřejmé, že při použití vysokých rychlostí smykové deformace dochází ke skluzu na stěně. Tokové křivky získané z laboratorních reometrů se zároveň liší od křivek získaných přímo na vstřikovacím stroji. To je způsobeno právě vlivem skluzu na stěně a zároveň i jinou konstrukcí náběhu do kapiláry, který má zásadní vliv na hodnoty rychlostí smykové deformace. Z důvodu velkého rozdílu mezi tokem v kapiláře o teplotě taveniny a tokem v relativně studené dutině formy, není možné tyto výsledky přímo aplikovat na proces přípravy zkušebních těles. I přes to je velmi pravděpodobné, že při plnění dutiny formy dochází ke skluzu na stěně. Z výsledků tokové analýzy (Obr. 16.) lze pozorovat podmínky umožňující tok polymeru i za čelem taveniny. Vzhledem k vysokým rychlostem plnění není rychlost ochlazování dostatečně vysoká, a to může přispívat k možnosti vzniku skluzu na stěně. Tokové analýzy navíc nezohledňují strukturu povrchu dutiny formy a je tedy pravděpodobné, že míra ochlazování bude ještě nižší u drsnějších povrchů.



Obr. 16. Hodnoty smykové viskozity povrchu polymeru, fáze plnění, $t = 0,34$ s

V případě měření délky zatečení bylo dosaženo dalších zajímavých výsledků. Konkrétně se jedná o výsledky kombinovaného povrchu, kdy testovaný povrch tvořil pouze 57 % celkového povrchu dutiny formy. Oproti původnímu předpokladu nedošlo ke snížení hodnoty délky zatečení, ale naopak byly tyto srovnatelné s hodnotami pro 100 % testovaného povrchu. V některých případech došlo dokonce ke zlepšení hodnoty délky zatečení při použití kombinovaného povrchu. Tento fakt naznačuje, že hlavním faktorem ovlivňujícím délku zatečení by mohl být skluz na stěně. Pokud nastane skluz na stěně pouze na jedné ze stěn kanálu dutiny formy, mohou začít vznikat nestability toku, které následně vyvolají skluz i na protější stěně a dojde ke snížení napětí při toku a zvýšení hodnoty zatékavosti polymeru.

Z výsledků této práce je zřejmé, že i relativně malý rozdíl v drsnosti povrchu má vliv na zatékavost polymeru. Ačkoli není zvýšení zatékavosti při použití povrchu vyrobeného frézováním příliš vysoké, důležitý je v tomto případě fakt, že nedochází k jakémukoli snížení zatékavosti. Pokud by byla vstříkovací forma opatřena povrchem vyrobeným frézováním, pak by nedošlo ke zhoršení z hlediska plnění dutiny formy. Dalším aspektem je vyhazovací síla, kdy dle studií [43-45] s vyšší hodnotou drsnosti povrchu formy roste její požadovaná hodnota. Z dostupných studií je ovšem patrné, že při drsnosti povrchu, jež lze v dnešní době frézováním dosáhnout, není zvýšení vyhazovací síly příliš výrazné a v praxi by mělo mít reálný dopad pouze ve specifických případech. Posledním aspektem je samotný design výrobku a požadavek na jakost pohledových ploch. V takovém případě je nutné použití dokončovacích technologií pro dosažení odpovídající jakosti povrchu.

Za předpokladu, že se nejedná o pohledovou plochu výrobku a zároveň se nejedná o plochu problematickou z hlediska odformování výrobku či vtokového systému (kuželová plocha vtokové vložky, plocha dlouhých jader apod.), pak je dostačující použití technologie frézování k obrobění finálního povrchu. Díky tomu lze významně snížit náklady na obrábění dutiny formy, které v případě složitých výrobků mohou tvořit až polovinu celkových nákladů na výrobu vstříkovací formy (kap. 2.3).

PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Tato disertační práce se zabývá vlivem drsnosti povrchu formy a procesních parametrů na zatékavost polymeru. Předchozí studie naznačily, že s vyšší hodnotou drsnosti povrchu dochází ke zlepšení plnění dutiny formy. Předmětem předložené práce bylo rozšíření vstupních podmínek experimentů ve snaze objasnění jevů spojených se zvýšením zatékavosti a sestavení doporučení pro aplikace v praxi.

Provedené experimenty ukázaly, že použití povrchu s vyšší drsností vede ke zvýšení hodnoty zatečení polymeru, a to ve všech případech. Zároveň byly zaznamenávány i hodnoty vstřikovacího tlaku, což vedlo k výraznému zpřesnění měření. Tato práce rovněž vede k prohloubení znalostí z hlediska povrchové energie dutiny formy a vlivu struktury povrchu a parametrů vstřikování na replikaci povrchu. Výsledkem jsou data aplikovatelná na reálný vstřikovací proces a doporučení pro praxi vedoucí ke snížení nákladů na obrábění dutiny formy a také snížení časové náročnosti výroby vstřikovací formy.

ZÁVĚR

Předmětem této disertační práce bylo vyhodnocení zatékavosti polymeru při použití povrchů o různé drsnosti. Pro tyto účely byly použity 4 testovací materiály (PP) s různým ITT, ze kterých byly pomocí technologie vstřikování vyrobena zkušební tělesa při teplotách taveniny 200, 220 a 240 °C a teplotách formy 30, 40 a 50 °C.

Výsledky zatékavosti ukázaly, že při použití frézovaného testovacího povrchu došlo při všech kombinacích vstupních podmínek ke zvýšení hodnoty délky zatečení. V případě použití formy s kombinovaným testovacím povrchem (frézovaný povrch 57 %, leštěný 43 %) rovněž došlo ke zvýšení hodnoty délky zatečení, a to ve stejné míře, jako v případě použití frézovaného povrchu.

Z výsledků úhlů smáčení a povrchové energie není možné vyvodit relevantní závěry, jelikož použitý leštěný a frézovaný povrch vykazují téměř shodné výsledky. V případě desek použitých u dřívějších studií byl zjištěn pokles úhlu smáčení, a tedy zvýšení povrchové energie, což by mohlo hrát roli při plnění dutiny formy opatřené dezénem.

Replikace povrchu byla v obou případech negativní, tedy drsnost povrchu formy byla nižší než drsnost povrchu zkušebních těles. Tento jev je spojen s nízkými hodnotami drsnosti povrchu obou testovacích desek formy a drsnost povrchu zkušebních těles je pak odrazem tokových nestabilit při zpracovatelském procesu. Z tohoto důvodu nelze vyloučit možnost uzavírání vzduchu v povrchové struktuře dutiny formy, což má za následek snížení

odvodu tepla z polymerního výrobku a zvýšení hodnoty zatečení. Tomu nasvědčují i výsledky DSC, kdy bylo zjištěno, že zkušební tělesa vyrobená s použitím frézovaného povrchu obsahují vyšší krystalický podíl, než tělesa vyrobená v leštěné dutině formy.

V rámci této práce byl vypracován konstrukční návrh úpravy trysky stroje, který byl následně realizován za účelem zjištění tokových charakteristik přímo na vstřikovacím stroji a k prověření přítomnosti skluzu polymerní taveniny na stěně. Výsledkem byly tokové křivky, které jsou důkazem přítomnosti skluzu na stěně při rychlostech vstřikování 20 až 160 mm·s⁻¹. Podmínky toku polymeru vyhřívanou kapilárou a toku polymeru ve vstřikovací formě se výrazně liší, je ale velmi pravděpodobné, že dochází ke skluzu na stěně při vysokých rychlostech smykové deformace i při plnění dutiny formy. Takto by bylo možné vysvětlit i stejné hodnoty délky zatečení při použití 100 % nebo 57 % testovacího povrchu.

Část této práce se věnuje zatékavosti polymeru do dutiny formy opatřené nanopovlakem. Výsledky ukázaly, že použití tohoto povlaku usnadňuje tok polymeru dutinou formy a došlo ke zvýšení hodnoty zatečení o více než 14 % oproti leštěnému povrchu pro všechny variace vstupních podmínek.

Ze získaných výsledků je zřejmé, že z hlediska zatékavosti polymeru do dutiny formy je výhodnější použití drsnějšího povrchu, a to i v případě povrchu obrobeného frézováním. Takto vyrobený povrch má relativně nízkou drsnost povrchu (drsnost povrchu Ra testovaného povrchu byla 0,59 μm) a poměrně vysokou rozměrovou přesnost. Dle studií dochází při odformování k růstu potřebné vyhazovací síly při použití povrchu s vyšší drsností, ovšem v případě drsností v rozmezí od 0,5 do 0,8 μm by se nemělo jednat o výrazný nárůst a frézovaný povrch není vhodné použít pouze v případě kanálu vtokové vložky, dlouhých jader v dutině vstřikovací formy, nebo ploch opatřených příliš malým nebo žádným úkosem. Ostatní plochy, u kterých není požadavek na určitou jakost povrchu (pohledové plochy výrobku), je možné obrábět základními technologiemi obrábění, jako je frézování, vrtání či soustružení. Zmíněné poznatky lze uplatnit i pro plochy rozvodných kanálů a vtokových ústí. V takových případech není nutná další úprava povrchu dutiny formy v podobě dokončovacích operací jako je broušení a leštění, což má za následek výrazné snížení nákladů na obrábění dutiny formy, a to především v případě tvarově složitějších dutin vstřikovací formy.

V případě, že je požadavkem na vstřikovaný výrobek vysoká jakost většiny povrchu výrobku, pak je výhodné použití povlakovaného povrchu, který přináší výhody z hlediska zatékavosti, snížení míry opotřebení dutiny formy apod.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SHANMUGAM, V., O. DAS, R. E. NEISIANY, et al. *Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy*. Materials Circular Economy [online]. 2020. DOI: 10.1007/s42824-020-00012-0. ISSN 2524-8146.
- [2] OVSÍK, M., M. STANĚK, A. DOČKAL, P. FLUXA a V. CHALUPA. *The Influence of Surface Quality on Flow Length and Micro-Mechanical Properties of Polycarbonate*. Materials [online]. 2021, s. 3878-3881. DOI: 10.3390/ma14205910. ISSN 1996-1944.
- [3] FLUXA, P., M. STANĚK, M. OVSÍK a A. DOČKAL. *Polyoxymethylene flow enhancement using the rough surface injection mould cavity*. MM Science Journal [online]. 2020, s. 3878-3881. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2019018. ISSN 18031269.
- [4] STANĚK, M., M. MAŇAS, V. JANOŠTÍK, P. FLUXA, et al. *How the surface quality of injection mold influence polymer flow*. MATEC Web of Conferences [online]. 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201821002042. ISSN 2261-236X.
- [5] OVSÍK, M., M. STANĚK, A. DOČKAL a M. ŘEZNÍČEK. *The influence of tool's surface topography on mechanical properties of injection moulded product*. Surface Topography: Metrology and Properties [online]. 2022. DOI: 10.1088/2051-672X/ac843c. ISSN 2051-672X.
- [6] ZHUANG, J., Y. J. ZHANG, D. M. WU, L. Z. LIU, C. J. SUN, W. WANG a S. X. LIU. *Effects of Wall Slip on Filling Flow for Polymer Melt in Micro Injection Molding*. Key Engineering Materials [online]. 2014, s. 609-610, 617-622. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.609-610.617. ISSN 1662-9795.
- [7] TROTTA, G., B. STAMPONE, I. FASSI a L. TRICARICO. *Study of rheological behaviour of polymer melt in micro injection moulding with a miniaturized parallel plate rheometer*. Polymer Testing [online]. 2021. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107068. ISSN 01429418.
- [8] ZHANG, H. L., N. S. ONG a Y. C. LAM. *Experimental investigation of key parameters on the effects of cavity surface roughness in microinjection molding* [online]. 2008, s. 490-495. DOI: 10.1002/pen.20981. ISSN 0032-3888
- [9] LIPAROTI, S., V. SPERANZA, A. DE MEO, F. DE SANTIS a R. PANTANI. *Prediction of the maximum flow length of a thin injection molded part*. Journal of Polymer Engineering [online]. 2020, s. 783-795. DOI: 10.1515/polyeng-2019-0292. ISSN 2191-0340.

- [10] BELLANTONE, V., R. SURACE, F. MODICA, I. FASSI a R. PANTANI. *Effect of Surface Roughness in Micro Injection Moulding Process of Thin Cavities*. 21st Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 10th International Conference on Micro- and Nanosystems [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2016. DOI: 10.1115/DETC2016-59968. ISSN 2191-0340.
- [11] BELLANTONE, V., R. SURACE, F. MODICA, I. FASSI a R. PANTANI. *Evaluation of mold roughness influence on injected thin micro-cavities*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2018, s. 4565-4575. DOI: 10.1007/s00170-017-1178-0. ISSN 0268-3768.
- [12] SURACE, R., M. SORGATO, V. BELLANTONE, F. MODICA, G. LUCCHETTA a I. FASSI. *Effect of cavity surface roughness and wettability on the filling flow in micro injection molding*. Journal of Manufacturing Processes [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2019, s. 105-111. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.032. ISSN 1526-6125.
- [13] EBRAHIMI, M., V. K. KONAGANTI, S. MORADI a S. G. HATZIKIRIAKOS. *Surface roughness and energy on slip of polymer melts*. Annual Technical Conference ANTEC, Conference Proceedings; Society of Plastics Engineers: Brookfield, CT, USA, 2017.
- [14] EBRAHIMI, M., V. K. KONAGANTI, S. MORADI, A. K. DOUFAS a S. G. HATZIKIRIAKOS. *Slip of polymer melts over micro/nano-patterned metallic surfaces*. Soft Matter [online]. 2016, s. 9759-9768. DOI: 10.1039/C6SM02235A. ISSN 1744-683X.
- [15] ANASTASIADIS, S. H. a S. G. HATZIKIRIAKOS. *The work of adhesion of polymer/wall interfaces and its association with the onset of wall slip*. Journal of Rheology [online]. 1998, s. 795-812. DOI: 10.1122/1.550909. ISSN 0148-6055.
- [16] BERGER, G. R., C. STEFFEL a W. FRIESENBICHLER. *A study on the role of wetting parameters on friction in injection moulding*. International Journal of Materials and Product Technology [online]. 2016. DOI: 10.1504/IJMPT.2016.073632. ISSN 0268-1900.
- [17] GUAN, B., M. CHERRILL, J. H. PAI a C. PRIEST. *Effect of mould roughness on injection moulded poly (methyl methacrylate) surfaces: Roughness and wettability*. Journal of Manufacturing Processes [online]. 2019, s. 313-319. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.10.024. ISSN 1526-6125
- [18] PICCOLO, L., K. PULEO, M. SORGATO, G. LUCCHETTA a D. MASATO. *Modeling the replication of submicron-structured surfaces by micro injection molding* [online]. 2021. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109272. ISSN 0264-1275.

- [19] QUADRINI, F., D. BELLISARIO, L. SANTO, L. BOTTINI a A. BOSCHETTO. *Mold replication in injection molding of high density polyethylene* [online]. 2020, s. 2459-2469. DOI: 10.1002/pen.25484. ISSN 0032-3888.
- [20] SURACE, R., V. BELLANTONE, G. TROTTA a I. FASSI. *Replicating capability investigation of micro features in injection moulding process*. Journal of Manufacturing Processes [online]. 2017, s. 351-361. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.07.004. ISSN 1526-6125.
- [21] HOPMANN, C., K. BOBZIN, T. BRÖGELMANN, M. ORTH, N. KRUPPE a M. NADERI. *Replication of micro-structured injection molds using physical vapor deposition coating and dynamic laser mold tempering*. Journal of Polymer Engineering [online]. 2018, s. 315-322. DOI: 10.1515/polyeng-2017-0131. ISSN 2191-0340.
- [22] LIU, Y. a M. GEHDE. *Effects of surface roughness and processing parameters on heat transfer coefficient between polymer and cavity wall during injection molding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. DOI: 10.1007/s00170-015-7816-5. ISSN 0268-3768.
- [23] SAHA, B., W. Q. TOH, E. LIU, S. B. TOR, D. E. HARDT a J. LEE. *A review on the importance of surface coating of micro/nano-mold in micro/nano-molding processes*. Journal of Micromechanics and Microengineering [online]. 2016. DOI: 10.1088/0960-1317/26/1/013002. ISSN 0960-1317.
- [24] BOBZIN, K., C.H. HOPMANN, A. GILLNER, T. BRÖGELMANN, N.C. KRUPPE, M. ORTH, M. STEGER a M. NADERI. *Enhanced replication ratio of injection molded plastic parts by using an innovative combination of laser-structuring and PVD coating*. Surface and Coatings Technology [online]. 2017. s. 474-483. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.09.068. ISSN 02578972.
- [25] YIU, P., N. BÖNNINGHOFF a J. P. CHU. *Evaluation of Cr-based thin film metallic glass as a potential replacement of PVD chromium coating on plastic mold surface*. Surface and Coatings Technology [online]. 2022. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128274. ISSN 02578972.
- [26] VERA, J., E. CONTRAIRES, A. BRULEZ, M. LAROCLETTE, S. VALETTE a S. BENAYOUN. *Wetting of polymer melts on coated and uncoated steel surfaces*. Applied Surface Science [online]. 2017. s. 87-98. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.067. ISSN 01694332.
- [27] SORGATO, M., D. MASATO, L. PICCOLO a G. LUCCHETTA. *Plastic intensity reduction using thermally insulating coatings for injection molds*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology [online]. 2020. s. 79-86. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.04.004. ISSN 17555817.

- [28] LUCCHETTA, G., D. MASATO, M. SORGATO, L. CREMA a E. SAVIO. *Effects of different mould coatings on polymer filling flow in thin-wall injection moulding*. CIRP Annals [online]. 2016. s. 537-540. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.006. ISSN 00078506.
- [29] HOPMANN, Ch., K. BOBZIN, T. BRÖGELMANN, Ch. SCHÄFER, M. SCHÖNGART, M. RÖBIG a M. NADERI. *Improved molding of micro structures using PVD-coated mold inserts*. Journal of Polymer Engineering [online]. 2016. s. 575-582. DOI: 10.1515/polyeng-2015-0270. ISSN 2191-0340.
- [30] HOPMANN, Ch., K. BOBZIN, T. BRÖGELMANN, M. ORTH, N. KRUPPE a M. NADERI. *Replication of micro-structured injection molds using physical vapor deposition coating and dynamic laser mold tempering*. Journal of Polymer Engineering [online]. 2018. s. 315-322. DOI: 10.1515/polyeng-2017-0131. ISSN 2191-0340.
- [31] OTSUKA, Masaki, Aya OYABE a Hiroshi ITO. *Effects of mold surface conditions on flow length in injection molding process*. Polymer Engineering and Science [online]. 2011. s. 1383-1388. DOI: 10.1002/pen.21931. ISSN 00323888.
- [32] OSSWALD, T. A., E. BAUR a N. RUDOLPH. *Plastics handbook: the resource for plastics engineers. 5th edition*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2019, 680 s. ISBN 978-1-56990-559-3.
- [33] AGASSANT, J. F., P. AVENAS, P. CARREAU, B. VERGNES a M. VINCENT. *Polymer processing: principles and modeling. 2nd edition*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2017, 841 s. ISBN 978-1-56990-606-4.
- [34] SEIDL, M. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Verze knihy: 17. [Online], 2015. ISBN 978-80-88058-69-4.
- [35] Robotics in Injection Moulding. RNA. [online]. 2021. Dostupné z: <https://www.rnaautomation.com/robotics-in-injection-moulding/>
- [36] TADMOR, Z. a C. G. GOGOS. *Principles of Polymer Processing. 2nd Edition*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2006, 984 s. ISBN 978-0-471-38770-1.
- [37] WILCZYŃSKI, K. *Rheology in polymer processing: modeling and simulation*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2021, 377 s. ISBN 978-1-56990-660-6.
- [38] BOBEK, J. *Vstříkovací formy pro zpracování termoplastů*. [online]. 2014. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [39] BRUDER, U. *User's guide to plastic: a handbook for everyone*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2015, 227 s. ISBN 9781569905722.

- [40] JAROSCHEK, Ch. *Design of injection molded plastic parts*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2022. ISBN 9781569908945.
- [41] KAZMER, D. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Michov, Německo: Hanser Publications, 2016, 529 s. ISBN 978-1-56990-570-8.
- [42] OVSÍK, M. *Mechanické vlastnosti vstříkovaných dílů z polypropylenu: vliv nástroje a procesu*. Habilitační práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2022, 226 s.
- [43] SASAKI, T., N. KOGA, K. SHIRAI, Y. KOBAYASHI a A. TOYOSHIMA. *An experimental study on ejection forces of injection molding*. Precision Engineering [online]. 2000, s. 270-273. DOI:10.1016/S0141-6359(99)00039-2. ISSN 01416359.
- [44] CORREIA, M. S., A. S. MIRANDA, M. C. OLIVEIRA, C. A. CAPELA a A. S. POUZADA. *Analysis of friction in the ejection of thermoplastic mouldings*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2012, s. 977-986. DOI:10.1007/s00170-011-3573-2. ISSN 0268-3768.
- [45] POUZADA, A. S., E. C. FERREIRA a A. J. PONTES. *Friction properties of moulding thermoplastics*. Polymer Testing [online]. 2006, s. 1017-1023. DOI:10.1016/j.polymertesting.2006.06.009. ISSN 01429418.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DSC	Differential Scanning Calorimetry - diferenciální skenovací kalorimetrie
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
EDM	Electrical Discharge Mechnining – elektroerozivní obrábění
IPZ	index poměrného zatečení [%]
ITT	index toku taveniny [$\text{g} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$]
L	délka zatečení [mm]
p	vstříkovací tlak [bar]
PP	polypropylen
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
Rz	největší výška profilu [μm]
t	čas [s]
$\dot{\gamma}_C$	korigovaná rychlost smykové deformace [s^{-1}]
η_C	korigovaná smyková viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
θ	úhel smáčení [$^\circ$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma vstřikovacího stroje [35]</i>	9
<i>Obr. 2. Příklad rozložení nákladů na jeden výrobek[41]</i>	11
<i>Obr. 3. Variace zvolených vstupních podmínek pro výrobu zkušebních těles</i>	14
<i>Obr. 4. Porovnání dat zatékavosti při různých podmínkách (příklad)</i>	15
<i>Obr. 5. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty formy, 3 testovací materiály, teplota taveniny 220 °C).....</i>	17
<i>Obr. 6. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty taveniny, 3 testovací materiály, teplota formy 40 °C).....</i>	17
<i>Obr. 7. Výsledky DSC při prvním tavení, frézovaná vs. leštěná deska</i>	18
<i>Obr. 8. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)</i>	19
<i>Obr. 9. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)</i>	19
<i>Obr. 10. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56) ...</i>	20
<i>Obr. 11. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56) ...</i>	20
<i>Obr. 12. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na úhel smáčení.....</i>	21
<i>Obr. 13. Získané tokové křivky v porovnání s daty z výtlačného reometru</i>	22
<i>Obr. 14. Průběh tlaku v dutině formy (toková simulace)</i>	23
<i>Obr. 15. Hodnoty tlaku fáze plnění v čase 0,34 s (toková simulace)</i>	24
<i>Obr. 16. Hodnoty smykové viskozity povrchu polymeru, fáze plnění, t = 0,34 s</i>	25

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vybrané vlastnosti materiálů vybraných pro realizaci měření</i>	13
--	----

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

Kvalifikační práce:

FLUXA, P. *Návrh konstrukce výrobku a nástroje pro jeho zpracování.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2016, 62 s. (50 000 znaků). Bakalářská práce. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/38132>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Ovsík, Martin.

FLUXA, P. *Vliv povrchu formy na zatékavost polymeru.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018, 77 s. (84 000 znaků). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Staněk, Michal.

Publikace uvedené v databázi Web of Science:

OVSÍK, M., M. STANĚK, A. DOČKAL, **P. FLUXA** a V. CHALUPA. *The Influence of Surface Quality on Flow Length and Micro-Mechanical Properties of Polycarbonate.* Materials [online]. 2021, s. 3878-3881. DOI: 10.3390/ma14205910. ISSN 1996-1944.

FLUXA, P., M. STANĚK, M. OVSÍK a A. DOČKAL. *Polyoxymethylene flow enhancement using the rough surface injection mould cavity.* MM Science Journal [online]. 2020, s. 3878-3881. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2019018. ISSN 18031269.

OVSÍK, M., M. STANĚK, A. DOČKAL a **P. FLUXA**. *Improvement of polymer surface layer by electron radiation.* MM Science Journal [online]. 2020, s. 3882-3886. DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2019019. ISSN 18031269.

OVSÍK, M., M. MAŇAS, M. STANĚK, A. DOČKAL, A. MIZERA, **P. FLUXA**, M. BEDNAŘÍK a M. ADÁMEK. *Nano-Mechanical Properties of Surface Layers of Polyethylene Modified by Irradiation.* Materials [online]. 2020. DOI: 10.3390/ma13040929. ISSN 1996-1944.

DOČKAL, A., M. OVSÍK, **P. FLUXA**, M. STANĚK a V. ŠENKEŘÍK. *Implementation of natural fillers in polyethylene and the resulting mechanical properties.* Materiali in Tehnologije [online]. 2020, s. 341-343. DOI: 10.17222/mit.2019.154. ISSN 15802949.

OVSÍK, M., P. FLUXA, M. STANĚK, A. DOČKAL a M. ŘEZNÍČEK. *Influence of applied electron radiation on the properties of a polyamide 11 surface layer*. *Materiali in Tehnologije* [online]. 2020, s. 345-347. DOI: 10.17222/mit.2019.155. ISSN 15802949.

OVSÍK, M., M. STANĚK, A. DOČKAL a P. FLUXA. *Local nano-mechanical properties of cross-linked polybutylene*. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* [online]. 2020, s. 112-115. DOI: 10.14311/APP.2020.27.0112. ISSN 2336-5382.

OVSÍK, M., M. STANĚK, A. DOČKAL a P. FLUXA. *Electron radiation effect on indentation creep of construction polymers*. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* [online]. 2020, s. 116-120. DOI: 10.14311/APP.2020.27.0116. ISSN 2336-5382.

STANĚK, M., M. MAŇAS, V. JANOŠTÍK, M. ŘEZNÍČEK, P. FLUXA a J. MORÁVEK. *How the surface quality of injection mold influence polymer flow*. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201821002042. ISSN 2261-236X.

Publikace uvedené v databázi SCOPUS:

JANOŠTÍK, V., M. STANĚK, V. ŠENKEŘÍK, P. FLUXA a L. HÝLOVÁ. *Effect of the Pigment Concentration on the Dimensional Stability and the Melt Flow Index of Polycarbonate*. *Manufacturing Technology* [online]. 2019, s. 404-408. DOI: 10.21062/ujep/304.2019/a/1213-2489/MT/19/3/404. ISSN 12132489.

STANĚK, M., M. OVSÍK, M. MAŇAS, M. ŘEZNÍČEK a P. FLUXA. *Fluidity of Rubber and TPE Influenced by Mold Surface Roughness*. *Materials Science Forum* [online]. 2019, s. 198-206. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.198. ISSN 1662-9752.

STANĚK, M., M. MAŇAS, M. OVSÍK, M. ŘEZNÍČEK, V. ŠENKEŘÍK a P. FLUXA. *Surface quality of injection molds*. *International Journal of Mechanics*. 2018, s. 246-251. ISSN 1998-4448.

CV AUTORA

Osobní údaje

Jméno a příjmení, titul **Ing. Petr Fluxa, Ph.D.**
Datum a místo narození 19. 4. 1994, Vsetín
Trvalé bydliště Hovězí 677, Hovězí 756 01
E-mail fluxa@utb.cz
Státní příslušnost Česká

Vzdělání

2018 – dosud Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Nástroje a procesy

2016 – 2018 Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

2013 – 2016 Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení

2009 – 2013 Střední průmyslová škola strojnická Vsetín
Studijní obor: Strojírenství

Pracovní zkušenosti

6/2019 – dosud **Testování v rámci VaV**
Plastikářský klastr z. s.
Šedesátá 7046, 760 01 Zlín, Česká republika

Pedagogická činnost

2/2019 – dosud **Výuka předmětů prezenční a kombinované formy studia**
UTB ve Zlíně, FT, Ústav výrobního inženýrství
Vavrečkova 5669, 760 01 Zlín, Česká republika
Předměty: Úvod do CAD, CAD II, CAD III, CAD Catia I,
Technické kreslení, Simulace a modelování tvářecích
procesů, Výkresová dokumentace, Základy počítačové
geometrie a konstrukce
Počet vedených bakalářských prací: 2

Ostatní činnost	
2/2019 – 2/2022	Člen akademického senátu UTB ve Zlíně
2/2019 – 2/2022	Člen legislativní komise AS UTB ve Zlíně
1/2019 – 12/2021	Hlavní řešitel projektu UTB ve Zlíně, FT, Ústav výrobního inženýrství Vavrečkova 5669, 760 01 Zlín, Česká republika Projekt: IGA/FT/2019/002, 2020/003 a 2021/005
1/2022 – 12/2022	Člen řešitelského kolektivu UTB ve Zlíně, FT, Ústav výrobního inženýrství Vavrečkova 5669, 760 01 Zlín, Česká republika Projekt: IGA/FT/2022/002
Jazykové dovednosti	
Mateřský jazyk	Čeština
Další jazyky	Angličtina
Osobní dovednosti	
Počítačové dovednosti	Výborná znalost nástrojů Microsoft Office Výborná znalost prostředí Windows a práce s internetem Výborná znalost softwarů Catia V5 a V6, AutoCAD Dobrá znalost softwarů Solid Edge, Autodesk Inventor, Minitab, Autodesk Moldflow, Autoform Forming R8
Řidičský průkaz	B

Ing. Petr Fluxa, Ph.D.

Vliv povrchu nástroje na zatékavost polymeru

Influence of Tool Surface on Polymer Flow

Teze disertační práce

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

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: autor

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2023

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-169-6

