



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Disertační práce

Vliv povrchu nástroje na zatékavost polymeru

Influence of Tool Surface on Polymer Flow

Autor: **Ing. Petr Fluxa**

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

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

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat mému školiteli prof. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za ochotu, cenné připomínky a vynaložený čas. Poděkování rovněž patří mému konzultantovi doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za jeho cenné rady, které mi pomohly při řešení disertační práce.

Dále bych rád poděkoval prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi, prof. Ing. Martinu Zatloukalovi, Ph.D. DSc. a doc. Ing. Karlu Stoklasovi, CSc., kteří mi během mé práce poskytli odborné rady při realizaci experimentů a následném vyhodnocení získaných dat. Mé poděkování rovněž patří Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D., který pomáhal s realizací mých konstrukčních návrhů. Chtěl bych také poděkovat Ing. Jiřímu Vaňkovi za jeho čas a ochotu při přípravě zkušebních těles a dalších činnostech spojených s disertační prací.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni, jež mi byli oporou během celého mého studia.

Tato práce vznikla za podpory projektu Interní grantové agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně IGA/FT/2022/02.

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 byla provedena 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	8
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	9
2. TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	12
2.1 Vstřikovací cyklus	13
2.2 Materiály zpracovávané vstřikováním.....	14
2.2.1 Termoplasty.....	14
2.2.2 Polypropylen.....	16
2.2.3 Příprava materiálu	17
2.3 Vstřikovací formy.....	18
2.3.1 Vtokové systémy forem	19
2.3.2 Temperace forem.....	20
2.3.3 Vyhazovací systém a odvzdušnění forem.....	21
2.3.4 Materiály forem.....	22
2.3.5 Dutina vstřikovací formy.....	23
2.4 Ekonomické zhodnocení.....	24
3. DUTINA FORMY – TECHNOLOGIE VÝROBY	26
3.1 Základní metody obrábění	26
3.1.1 Frézování.....	26
3.1.2 Vrtání.....	28
3.1.3 Soustružení	28
3.1.4 CNC obrábění.....	29
3.2 Vysokorychlostní obrábění (HSC).....	29
3.3 Elektroerozivní obrábění (EDM).....	30
3.4 Broušení.....	31
3.5 Leštění.....	32
3.6 Další metody obrábění tvarové dutiny formy	32
4. INTEGRITA POVRCHU	34
4.1 Parametry profilu povrchu	35
4.2 Měření drsnosti povrchu	36
4.2.1 Přístroje kontaktní.....	36
4.2.2 Přístroje bezkontaktní.....	37

4.3	Dosahovaná drsnost povrchu a vynaložené náklady	38
5.	POVRCHOVÉ NAPĚTÍ, ÚHEL SMÁČENÍ	40
5.1	Adhezní a kohezní práce	41
5.2	Úhel smáčení	41
5.3	Měření úhlu smáčení	42
5.3.1	<i>Přímé metody</i>	42
5.3.2	<i>Nepřímé metody</i>	43
5.4	Smáčivost povrchů – uplatnění	44
6.	REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN.....	46
6.1	Hodnocení tokových vlastností polymerů	47
6.2	Skluž na stěně	49
6.3	Tok materiálu dutinou vstříkovací formy	51
6.4	Parametry ovlivňující tokové chování polymerních tavenin.....	51
7.	CÍLE PRÁCE	53
8.	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	54
8.1	Materiál	54
8.1.1	<i>Měření tokových křivek použitých materiálů</i>	54
8.2	Příprava zkušebních těles vstříkováním	54
8.2.1	<i>Vstříkovací stroj</i>	54
8.2.2	<i>Zkušební vstříkovací forma</i>	55
8.2.3	<i>Vstupní podmínky pro výrobu zkušebních těles</i>	57
8.3	Způsob vyhodnocení dat zatékavosti	58
8.4	Diferenciální skenovací kalorimetrie	59
8.5	Replikace povrchu	60
8.6	Měření úhlu smáčení testovacích povrchů	62
8.7	Konstrukční úprava trysky vstříkovacího stroje.....	65
8.8	Toková analýza.....	68
9.	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE.....	69
9.1	Výsledky zatékavosti polymeru	69
9.2	Výsledky měření krystalinity	72
9.3	Výsledky replikace povrchu dutiny formy	73
9.4	Výsledky smáčivosti povrchu dutiny formy	80
9.5	Výsledky měření tokových závislostí.....	82

10. DISKUZE VÝSLEDKŮ	84
PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	89
ZÁVĚR.....	90
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	92
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	104
SEZNAM OBRÁZKŮ	107
SEZNAM TABULEK	110
SEZNAM PŘÍLOH.....	111
SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA	112
CV AUTORA.....	114

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 at 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 vstříkovan 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].

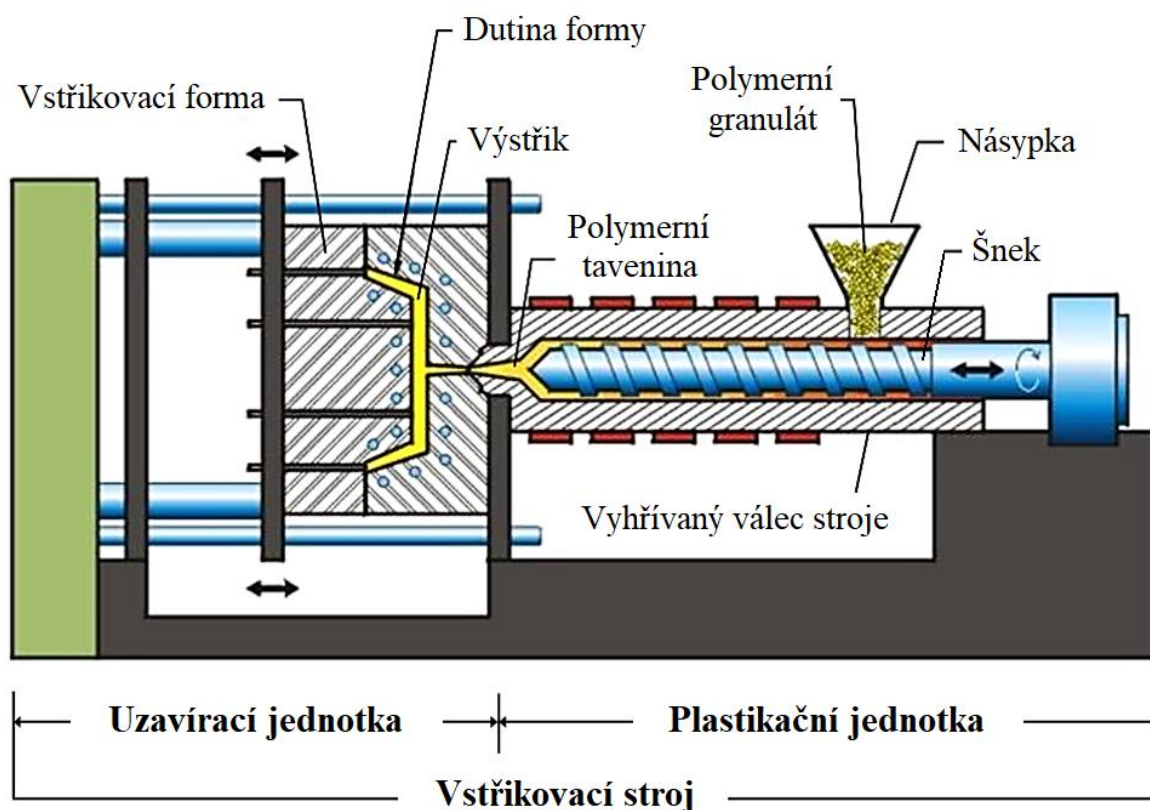
Z provedené rešerše vyplývá, že ačkoli se větší množství studií zabývá podobnou problematikou jako tato práce, nelze z těchto výsledků jednoznačně vyvodit obecný závěr. Velké množství prací se věnuje zatékavosti v oblasti mikrovstříkování, při kterém jsou používány dutiny formy mnohonásobně menších rozměrů. 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]

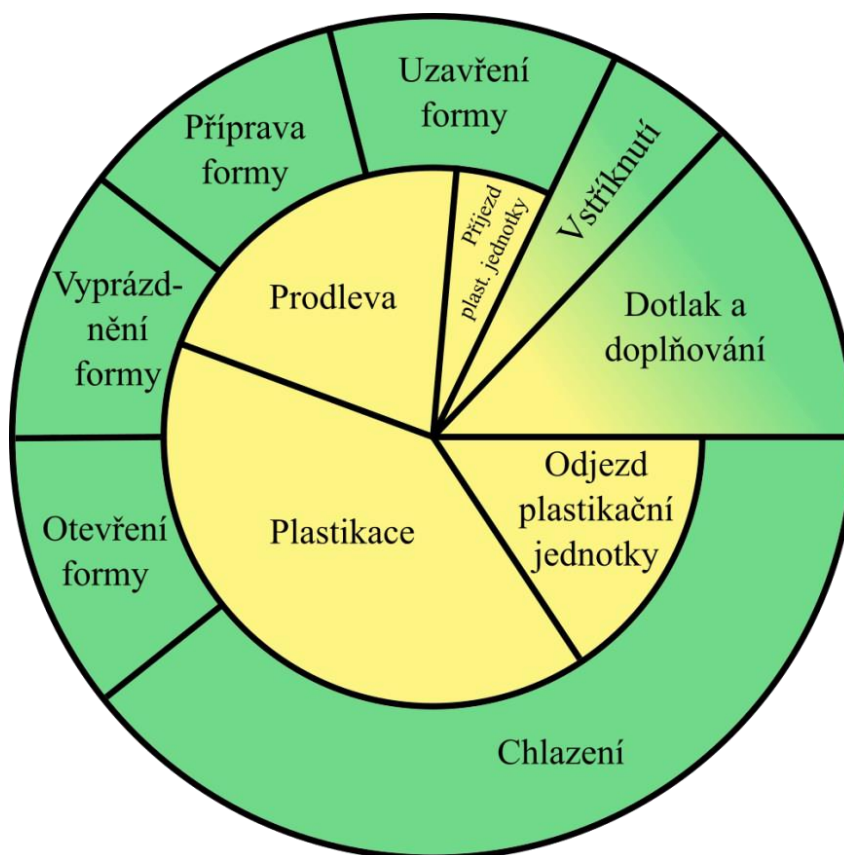
Vstřikovací stroj se skládá z plastikační a uzavírací jednotky (Obr. 1.). V plastikační jednotce je připravována polymerní tavenina. Následně je dopředným pohybem šneku dopravena skrze trysku stroje a vtokový systém formy do tvarové dutiny. Vstřikovací forma je upevněna v uzavírací jednotce, která rovněž 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 (Obr. 2.) 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]



Obr. 2. Příklad vstřikovacího cyklu [32]

2.2 Materiály zpracovávané vstřikováním

Technologií vstřikování lze zpracovávat široké množství druhů polymerů. Jedná se o polymery, které lze přeměnit do tekutého stavu (tavenina) a které mají schopnost vytvořit požadovaný tvar za působení tlaku a tepla. Polymery jsou tvořeny dlouhými molekulárními řetězci, které mezi sebou navzájem tvoří tzv. zapleteniny. Při nízkých teplotách se tyto řetězce shlukují a materiál se stává tvrdým a křehkým. Naopak při zvýšení teploty je řetězcům umožněno navzájem prokluzovat a materiál se chová až elasticky. Jednotlivé polymery mají svou specifickou molekulární strukturu. Dle struktury je lze rozdělit do dvou skupin na zesíťované a nezesíťované. [38, 39]

Zesíťované polymery jsou charakteristické chemickou změnou při zahřívání, kdy dochází k vytvoření vazeb mezi původními molekulami. Tento proces se nazývá vytvrzování a jedná se o nevratnou reakci. Materiál, který prošel vytvrzením, není možné opětovně tavit, ani jej dále tvarovat, a to ani za použití vysokých teplot. Další ohřev způsobí pouze degradaci polymeru. Mezi zesíťované materiály se řadí reaktoplasty a elastomery. [39]

Ve většině případů se vstřikováním zpracovávají materiály, které netvoří makromolekulární síť. Tyto materiály se nazývají termoplasty a jejich zpracování je předmětem řešené práce.

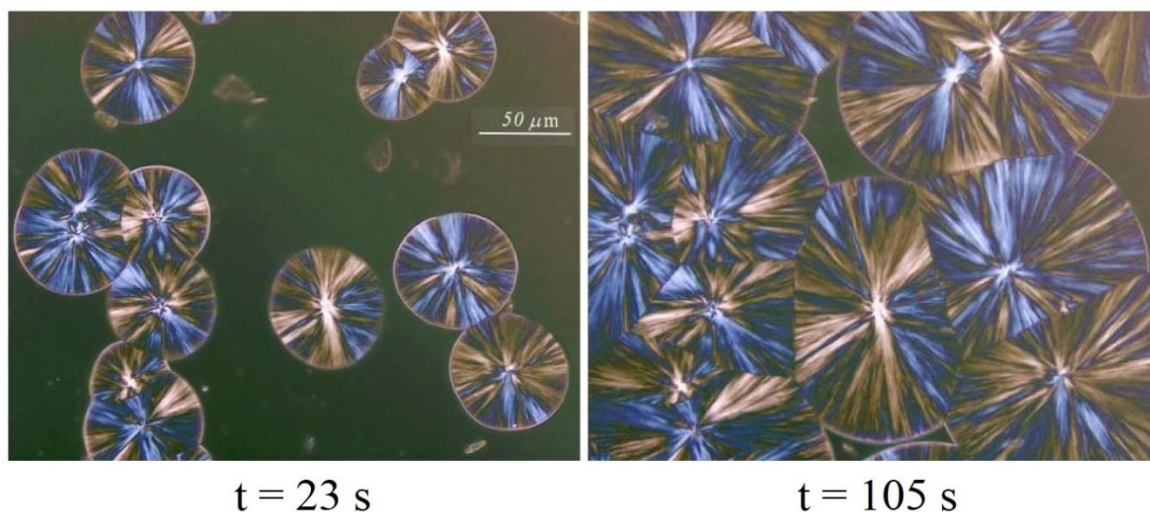
2.2.1 Termoplasty

Termoplastické polymery obsahují dlouhé řetězce, které mohou být lineární nebo větvené a jsou u sebe drženy pouze mezimolekulárními interakcemi. Takové materiály je možné opakovaně tavit a ochlazovat, přičemž nedochází k chemickým změnám. Zmíněný proces lze teoreticky opakovat neomezeně, což by umožnilo dokonalou recyklaci. Termoplasty jsou recyklovatelné, avšak vlivem oxidace a teplotní degradace při zpracování dochází k negativní změně materiálových vlastností takto vzniklého materiálu. [38-40]

Termoplasty lze dále rozdělit na amorfnní a semikrystalické. V případě amorfnního polymeru jsou molekuly uspořádány náhodně bez jakékoli pravidelnosti. Při zahřátí amorfnního polymeru dojde k postupnému uvolňování zapletených řetězců, které pak mohou navzájem prokluzovat, což způsobí jeho měknutí a případně úplnou tekutost. Po vytvarování polymeru (např. při zaplnění dutiny formy) je polymer ochlazen a molekuly se opět vrátí do stavu s omezeným pohybem. Mezi amorfnní termoplasty patří např. polystyren (PS), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polykarbonát (PC), polyvinylchlorid (PVC) nebo polymethylmethakrylát (PMMA). Amorfnní termoplasty se vyznačují

rozměrovou stabilitou, rovnoměrným smrštěním (změna rozměrů vlivem teplotní roztažnosti), nízkou hodnotou dodatečného smrštění, či možnosti průhlednosti. Mezi jejich nevýhody pak patří tendence vzniku vnitřních napětí a nízká chemická odolnost vůči adekvátnímu typu rozpouštědla. [39-41]

Semikrystalické termoplasty mají schopnost vytvářet uspořádanou strukturu a vytváří tzv. sférolity (Obr. 3). Tato struktura nikdy nevznikne v celém objemu materiálu, ale tvoří pouze jeho část. Každý takový termoplast má tedy krystalický i amorfní podíl a liší se stupněm krystalinity (tj. relativní procento krystalické vs. amorfní části v objemu materiálu). Stupeň krystalinity je ovlivněn jak chemickou strukturou polymeru, tak zpracovatelským procesem, konkrétně při ochlazování polymeru. V případě snížení intenzity ochlazování materiálu v dutině formy je možné zvýšit procento krystalického podílu. Mezi semikrystalické polymery patří např. nízko a vysokohustotní polyethylen (LDPE a HDPE), polypropylen (PP), polyamid (PA), polyoxymethylen (POM), polyethylentereftalát (PET) nebo polybutelentereftalát (PBT). Tyto termoplasty se vyznačují únavovou a chemickou odolností, nízkou hodnotou vnitřních napětí a lepší tekutostí než v případě amorfních polymerů. Je ovšem potřeba zohlednit vyšší hodnoty smrštění, které může být z důvodu anizotropní struktury nesouměrné. Zároveň mohou být pouze průsvitné nebo neprůhledné. [39-41]



Obr. 3. Příklad růstu sférolitů u PP vzorku ($T_{pr} = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$) [42]

Termoplastů jsou na trhu v současnosti stovky typů. Téměř všechny komerčně dostupné polymery jsou do jisté míry upraveny pomocí aditiv. Aditiva jsou pomocné materiály, které jsou v malém množství přidávány při produkci, či zpracování polymeru. Účelem aditiv je zlepšení zpracovatelských vlastností nebo zajištění speciálních vlastností výsledného produktu, které by pouze za použití nemodifikovaného polymeru neměl. Jedná se o zpracovatelské

stabilizátory, antioxidanty, UV stabilizátory, lubrikanty, retardéry hoření atd. Pro dosažení požadovaného barevného odstínu je možné přidat pigmenty. Ty jsou zpravidla přidávány na polymerním nosiči v podobě granulátu. [40, 44]

Další možností modifikace termoplastů jsou plniva. Používají se organická i anorganická plniva, která umožňují snížení ceny materiálu nebo zlepšení mechanických, optických a dalších vlastností výsledného produktu. Jako plniva se používají skelné vlákna, mastek, dřevo, textil, uhlíková vlákna, slída atd. [44]

2.2.2 Polypropylen

Jedním z důvodů použití PP pro tuto práci byla skutečnost, že se jedná o jeden z nejpoužívanějších polymerních materiálů. Výroba PP byla zahájena roku 1954 a v současnosti se jedná o všestranný materiál, který nachází uplatnění v aplikacích od vláken, fólií, součástí spotřebičů až po nárazníky automobilů. Mezi jeho typické parametry se řadí: [38, 41]

- tvrdost a poměrně vysoká mez kluzu,
- dobrá nárazová odolnost při pokojové teplotě,
- dobré elektroizolační a odhlučňovací vlastnosti,
- teplota tání 165 až 175 °C,
- smrštění 1,2 až 2,5 %
- chemická odolnost proti kyselinám a rozpouštědlům,
- nízká hustota (okolo 0,9 g/cm³).

PP je produkován stereospecifickou polymerací z monomerů propylenu a může se vyskytovat ve třech typech uspořádání: izotaktický, syndiotaktický a ataktický. Hlavním typem je izotaktický PP, který se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi. Jeho vlastnosti je možné dále upravovat přidáním nukleačních činidel nebo plniv. Všechny typy PP jsou citlivé na oxidaci, a proto je nutné přidávání antioxidantů. Další nevýhodou je degradace vlivem UV záření a hořlavost. Rovněž není odolný proti uhlovodíkům obsahujícím chlór a proti mědi, která urychluje oxidaci. [38,41]

V praxi jsou rovněž používány kopolymery PP, konkrétně blokové nebo náhodné kopolymery. Jedná se o kombinaci PP a etylenu, přičemž výsledný materiál dosahuje vyšší rázové houževnatosti. [41]

2.2.3 Příprava materiálu

Polymerní materiál je po opuštění reaktoru ve formě, která je často nevhodná pro další zpracování nebo přepravu, a proto je nejčastěji dodáván ve formě granulátu. Materiál ve formě granulí je pak snadné dávkovat a zároveň je možné jej míchat s dalšími materiály. V dnešní době se k výrobě granulátu používají zařízení na granulaci strun, a to buď za tepla (Obr. 4.), nebo za studena. V případě použití granulace za studena jsou struny vytlačeny skrze granulační hlavu a následně ochlazeny ve vodní lázni. Následně jsou sekány na granule, které jsou splachovány vodou k dalšímu chlazení. V případě granulace za tepla jsou vytlačované struny rovnou seřezávány z granulační hlavy. Tato metoda ovšem není vhodná pro polymery s nízkou viskozitou taveniny. Existují různá zařízení horizontálního, či vertikálního provedení, která disponují sušičkami různých designů. Sekací nože jsou vyrobeny z mnoha odlišných materiálů a s různými typy ochrany proti opotřebení. Lze se setkat s menšími zařízeními s produkcí 1000 kg/h až po velkoobjemové systémy s kapacitou až 20 t/h. [43]



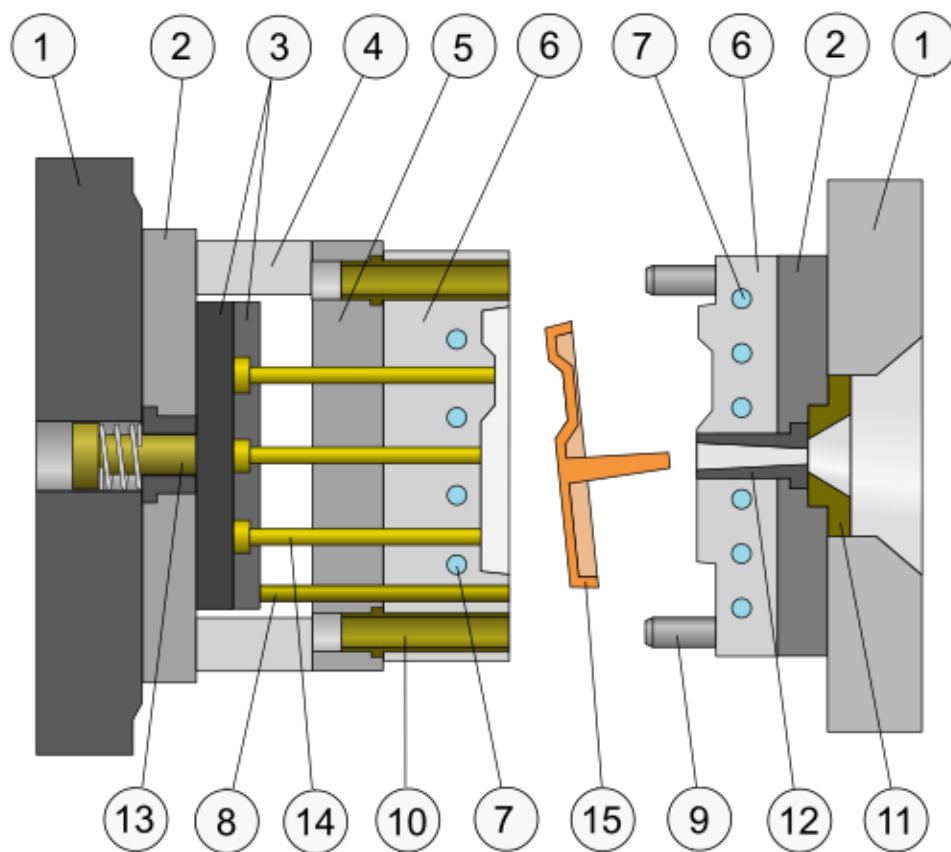
Obr. 4. Příklad univerzálního granulátoru pro termoplasty [43]

Před samotným vstřikováním je nejběžnější přípravnou operací sušení granulátu, jelikož přítomnost vody při zpracování může způsobovat vady na výrobku. Sušit lze granuláty buď odděleně, nebo v sušárně přímo napojené na násypku plastikační jednotky. Nevýhodou je finanční a prostorová náročnost. Parametry sušení granulátu se liší dle materiálu a jsou udávány výrobcem v materiálových listech. [43]

2.3 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. [44]

Rozvržení vstřikovací formy není jednotné a existuje mnoho různých provedení. Nejběžnějším typem je dvoudeskové uspořádání (Obr. 5.), 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 třidedkové formy, formy s bočním odformováním, formy s vytáčecími trny, etážové formy, formy pro vícekomponentní vstřikování atd. [44, 45]



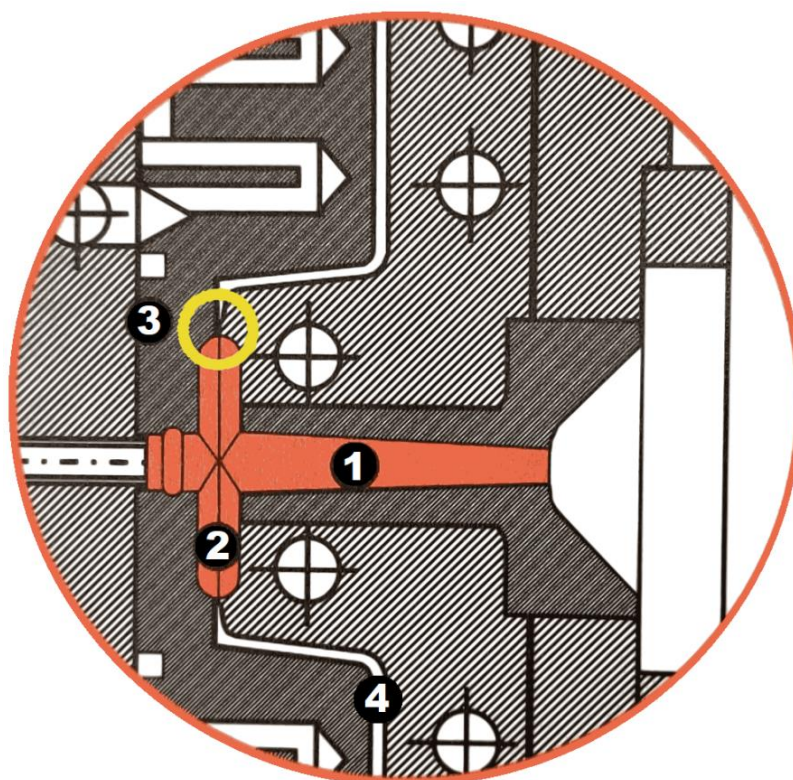
Obr. 5. Dvoudeskové řešení vstřikovací formy [46]

- 1 – upínací desky stroje, 2 – upínací desky formy, 3 – vyhazovací desky,
4 – rozpěrné desky, 5 – opěrná deska, 6 – tvarové desky, 7 – temperační
kanál, 8 – vraccí kolík, 9 – vodící čep, 10 – vodící pouzdro,
11 – středící kroužek, 12 – vtoková vložka, 13 – ovládání vyhazovačů,
14 – vyhazovací kolík, 15 – výrobek vč. vtokového zbytku

2.3.1 Vtokové systémy forem

Vstřikovací formy je možné dělit také podle vtokového systému, a to na formy se studeným vtokovým systémem, formy s vyhříváním vtokovým systémem a formy, které využívají kombinaci vyhřívání 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, 45]

Studené vtokové systémy (Obr. 6) se skládají z vtokového kanálu, rozvodných kanálů a vtokových ústí. Polymerní tavenina je dopravena ze stroje do formy pomocí vtokové vložky, jejíž vnitřní kanál má nejčastěji tvar kužele, aby bylo zajištěno bezproblémové odformování. Materiál je poté dopraven pomocí rozvodných kanálů, které mohou být rozličných průřezů a také různých tvarů v závislosti na násobnosti formy a tvaru výrobku. Délka tokových drah by měla být stejná, aby došlo k zaplnění všech tvarových dutin formy ve stejnou chvíli. Mezi rozvodnými kanály a dutinou formy odpovídající tvaru výrobku se nachází vtokové ústí. Umístění vtokového ústí je klíčové s ohledem na výslednou kvalitu výrobku, a to z hlediska mechanických i estetických vlastností. [45, 47, 48]



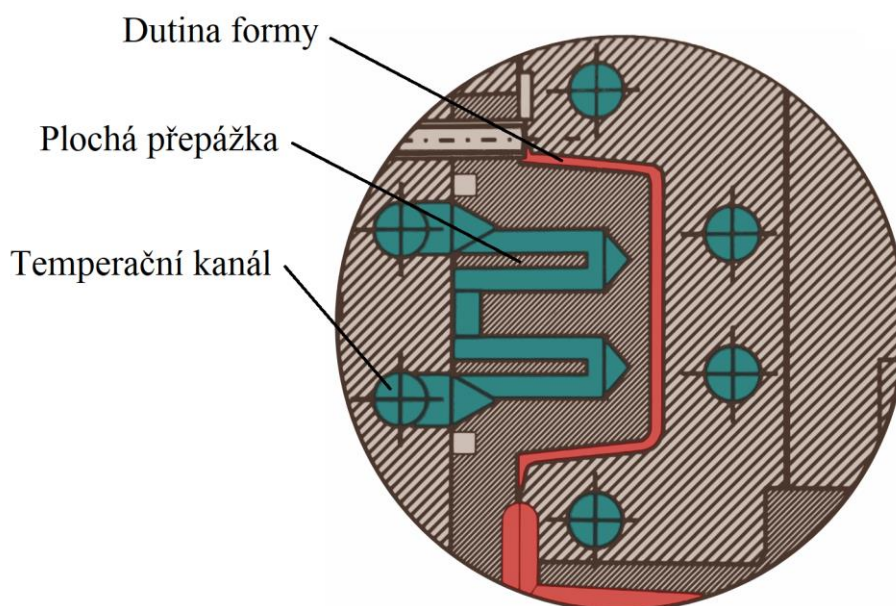
Obr. 6. Studený vtokový systém [45]
1 – vtokový kužel, 2 – rozvodný kanál,
3 – vtokové ústí, 4 – tvarová dutina formy

Druhým typem jsou vyhřívané vtokové systémy, které se stále častěji využívají v praxi díky jejich nesporným výhodám. Polymerní tavenina není ochlazována ihned po vstupu do vstřikovací formy, ale je vedena vyhřívaným blokem a skrze trysky následně vstříknuta přímo do tvarové dutiny formy. Na trhu je mnoho konstrukčních řešení rozvodných bloků i trysek a následná volba komponentů závisí na násobnosti formy, vstřikovaném polymeru a dalších požadavcích na výrobek. Výhodou oproti studeným vtokovým systémům je odstranění vzniku vtokového zbytku, a tedy minimalizace odpadu, možnost automatizace výroby a zkrácení výrobních cyklů, což vede ke zvýšení produktivity výroby. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, náročnost na technickou úroveň vstřikoven a také není možné tento typ aplikovat u všech vstřikovaných materiálů z důvodu tepelné degradace taveniny při přípravě výroby. [45, 47, 48]

V některých případech je výhodné využít kombinovaný vtokový systém. Vstřikovací forma pak obsahuje vyhřívaný vtokový systém, ale zároveň obsahuje studené rozvodné kanály, u kterých je nutné zajistit stejnou délku tokových drah. Tyto kanály pak tvoří vtokový zbytek. [48]

2.3.2 Temperace forem

Úkolem temperace forem (Obr. 7.) je udržovat požadovanou teplotu tvarových částí v průběhu vstřikovacího cyklu. V případě vstřikování termoplastů dochází k tuhnutí polymerní taveniny a k ochlazování výrobku, a to již během samotné fáze plnění formy. [41, 45, 49]



Obr. 7. Ukázka temperace dutiny formy [45]

Hlavními požadavky na temperační systém je udržení teploty dutiny formy v požadovaném rozmezí, zajištění rovnoměrného teplotního pole, reprodukovatelnosti v dalších cyklech a odvod tepla z výstřiku. Přestup tepla musí být dostatečně vysoký, aby nedocházelo ke zbytečnému prodlužování cyklu, ale zároveň je nutné dbát na jakost výstřiku. Mezi nejběžněji používaná temperační média patří voda nebo olej. Používají se beztlakové temperační jednotky pro nižší teploty a přetlakové temperační jednotky pro dosažení teplot až 400 °C. V případě použití vody je potřeba zajistit průchodnost a čistotu všech kanálů temperace. Především u teplot nad 60 °C dochází ke snížení účinku temperace vlivem usazenin na vnitřním povrchu kanálů. Teplota formy a rychlost ochlazování rovněž hrají důležitou roli v případě semikrystalických materiálů. Vyšší teplota formy umožní vzniku většího krystalického podílu (zvýšení krystalinity), zlepšení mechanických vlastností výrobku, stabilitu rozměrů a vyšší jakost povrchu výrobku. Nevýhodou je zvýšená energetická náročnost a delší doba chlazení, což vede k nežádoucímu prodloužení vstřikovacího cyklu. [41, 45, 49]

2.3.3 Vyhadzovací systém a odvzdušnění forem

Ve chvíli, kdy je výstřik ve formě ochlazen na vyhadzovací teplotu, dojde k jeho odformování. K odformování slouží vyhadzovací systém, který může mít velké množství provedení od použití jednoduchých válcových vyhadzovacích kolíků po složitější konstrukce využívající stírací desky, vytáčecích trnů, či stlačeného vzduchu. Konkrétní podoba vyhadzovacího systému se odvíjí od tvaru a konstrukce výrobku. Pohyb vyhadzovacího systému se skládá z dopředného vyhadzovacího pohybu a zpětného pohybu. Tyto pohyby mohou být realizovány mechanicky pomocí pružin a vraccích kolíků nebo je pohyb zajištěn uzavírací jednotkou stroje pomocí hydraulických nebo pneumatických válců. V případě studených vtokových systémů musí být vyhozen i vtokový zbytek. Běžně je pro úspěšné vyhození výrobku z formy předpokladem, že výstřik zůstane na pohyblivé straně formy opatřené vyhadzovacím systémem. Pro zajištění takové situace je součástí formy přidržovač vtoků. [44, 47]

Před začátkem vstřikování materiálu je dutina formy naplněna vzduchem, který musí být z dutiny odveden. Pokud není zajištěno odvzdušnění formy, mohou vznikat vady na výstřiku, jako je nedotečení, bubliny, vznik studených spojů, vnesení vnitřního pnutí do výrobku apod. Odvzdušnění může být realizováno únikem vzduchu do dělicí roviny nebo do prostorů mezi tvárníkem a vyhadzovači. Dochází-li k uzavírání vzduchu v jiných místech dutiny formy, je

třeba vytvořit odvzdušňovací kanály. Tyto kanály nesmí způsobovat přetoky materiálu, přičemž jejich tloušťka závisí na vstřikovaném materiálu a procesních podmínkách. [47, 49, 50]

2.3.4 Materiály forem

Vstřikovací forma je složena z mnoha dílů, přičemž je využito různých materiálů pro zajištění požadovaných funkcí. Volba jednotlivých materiálů se odvíjí jak od jejich vlastností, tak od požadovaných vlastností vyráběné formy. Výběr materiálů se může lišit s velikostí série, požadavky na odolnost proti opotřebení, například při použití plněných materiálů, nebo v závislosti na použitých teplotách a tlacích. Zároveň je potřeba zohlednit ekonomické hledisko, současné technické možnosti nástrojárny a také prostředí, ve kterém bude vstřikovací forma provozována. [44, 51]

V drtivé většině případů je vstřikovací forma vyrobena z oceli. V některých případech se využívají slitiny mědi či hliníku s dobrou tepelnou vodivostí. Naopak u izolačních desek, kdy je prostup tepla záměrně minimalizován, se nejčastěji využívá pryskyřicových desek se skelnými vlákny. Při výběru materiálu by mělo být zvaženo několik faktorů, z nichž některé se navzájem vylučují, a je tedy nutné hledat kompromis. Jedná se o: [44, 47, 51]

- **Dostupnost**, jelikož ne všechny položky v katalogích dodavatelů jsou k dispozici v požadovaných rozměrech a množství.
- **Pevnost**, z pravidla se jedná o pevnost v tahu, pevnost v ohybu a torzní pevnost. Ideální je zjištění těchto hodnot přímo od dodavatele.
- **Opotřebení**, ideálně aby byla zajištěna funkce vstřikovací formy po celou dobu provozu. Styčné plochy většinou bývají opatřeny mazivy pro zvýšení životnosti, nicméně např. u farmaceutických aplikací může docházet ke kontaminaci výrobku.
- **Odolnost proti korozi**, která může výrazně prodloužit životnost formy. Především se jedná o ochranu forem, které jsou provozovány nebo uskladněny ve vlhkém prostředí.
- **Únavu materiálu**, která může po velkém množství cyklů způsobit selhání formy, či nedodržení požadované jakosti výrobků.
- **Svařitelnost**, jelikož v některých případech může být nutné opravit opotřebovanou část formy právě svařováním. Ačkoli by se mělo jednat o výjimečné případy, lze takovou opravu provést pro dočasné zajištění výroby, než bude možné formu adekvátně opravit.

- **Cenu**, ačkoli samotné ekonomické hledisko by nikdy nemělo být důvodem k výběru daného materiálu.

Konkrétní druhy ocelí se liší s ohledem na samotnou aplikaci. Méně namáhané části formy (desky, které nepřichází do styku s polymerem) se mohou vyrábět z konstrukčních ocelí jako je 1.0577. Dnes již většina dodavatelů upřednostňuje nástrojové oceli, nejčastěji 1.2311. Jedná se o ocel vhodnou k nitridování a leštění a používá se i v případě mechanicky namáhaných dílů. Tvárníky, tvárnice a další díly, které jsou přímo ve styku se vstříkovaným polymerem, se používají legované nástrojové oceli, nejčastěji 1.2343 nebo 1.2344. Jedná se o oceli vhodné ke kalení v oleji i na vzduchu s vysokou pevností za tepla a odolností proti otěru. Další možností je použití nerezových ocelí, z nichž nejběžněji používaná je 1.2083. Ačkoli dosahuje podobných vlastností jako 1.2344, její houževnatost je nižší a má tedy sklon k praskání. Vodící čepy, pouzdra a lišty jsou nejčastěji vyráběny z cementačních ocelí, např. 1.7131. Jak už bylo zmíněno, materiály formy nejsou omezeny pouze na oceli. Některé výrobky mohou být z hlediska teploty problematické a je nutností zvýšit účinek odvodu tepla z dutiny formy. V takových případech se nejčastěji používají mědi, konkrétně berylliové mědi 2.1285. [44, 47, 51]

2.3.5 Dutina vstříkovací formy

Plocha povrch dutiny formy je tvořena z největší části tvárníkem a tvárnicí. Tyto tvarové části jsou vyráběny kombinací několika technologií pro dosažení požadované jakosti povrchu. Před zahájením samotného obrábění povrchu dutiny formy jsou vyvrtány upínací otvory a následně temperační kanály, aby nedocházelo ke vzniku deformací nebo vad vlivem vrtání. Následuje samotná výroba negativu tvaru výrobku od hrubovacích operací až po dokončovací operace jako je leštění. Leštění je zařazeno z důvodu odstranění stop nástroje po předchozím obráběcím procesu, což může mít negativní vliv na odformování výrobku, případně z důvodu designu výstřiku. Obecně platí, že nejsložitější a nejnákladnější je výroba forem pro díly s lesklým povrchem. Další možností úpravy povrchu je aplikace tenkých vrstev s požadovanými vlastnostmi pro zvýšení životnosti formy. Jedná se o technologii povlakování a nejčastěji se používají 3 typy: [44, 49, 50]

- PVD (fyzikální depozice par),
- CVD (chemická depozice par),
- PACVD (chemická depozice par pomocí plazmatu).

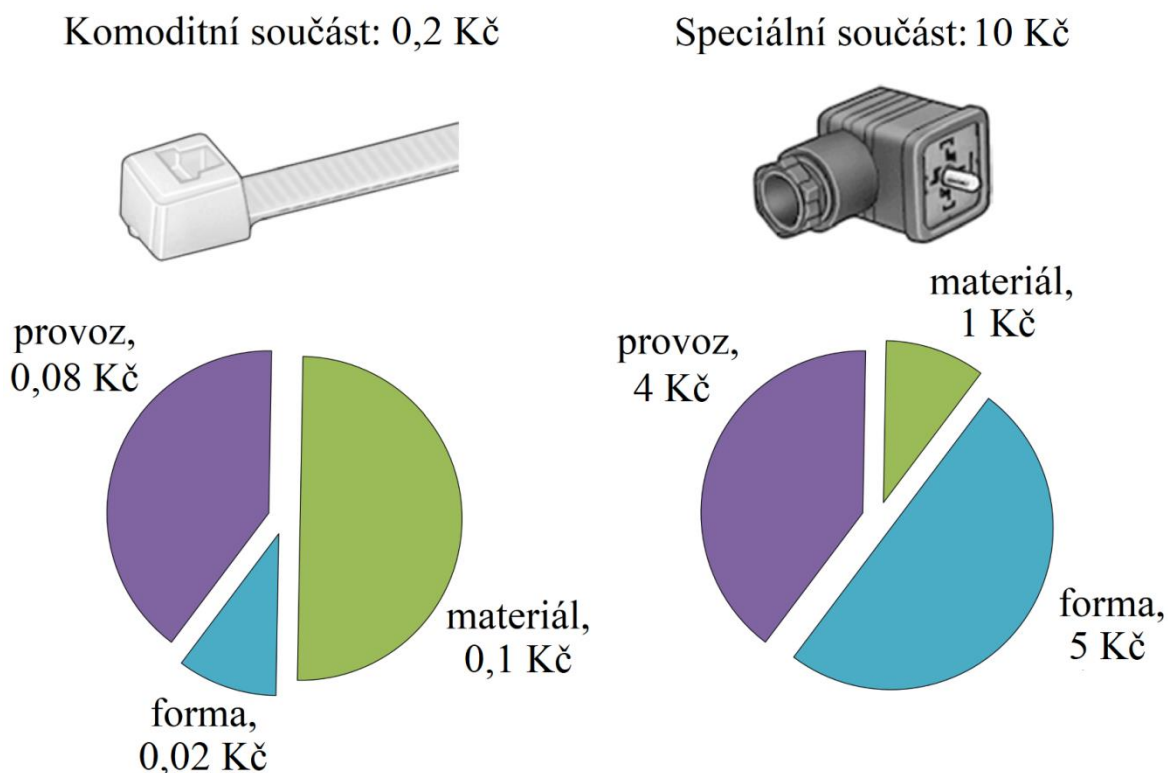
Povrch opatřený povlakem, či nanopovlakem snižuje napětí při toku polymeru, což vede k lepšímu plnění dutiny formy. To má za následek snížení celkových nákladů spojených s provozem vstřikovací formy. Další velkou výhodou je výrazné zvýšení odolnosti proti opotřebení díky mechanickým vlastnostem povlaků a také odolnost proti korozi. [52, 53]

Studie ukazují, že leštěný povrch není podmínkou pro úspěšnou výrobu dílů vstřikováním, a naopak povrch s vyšší drsností může být výhodnější z hlediska plnění formy. Další nevýhodou leštěného povrchu je, že některé materiály jako termoplastický polyuretan (TPU), termoplastické elastomery (TPE) a částečně i PP vykazují silnou přilnavost k leštěným povrchům, což může zkomplikovat odformování. [2-4, 50, 51]

Problematika plnění dutiny formy je podrobněji zpracována v kapitole 6.3.

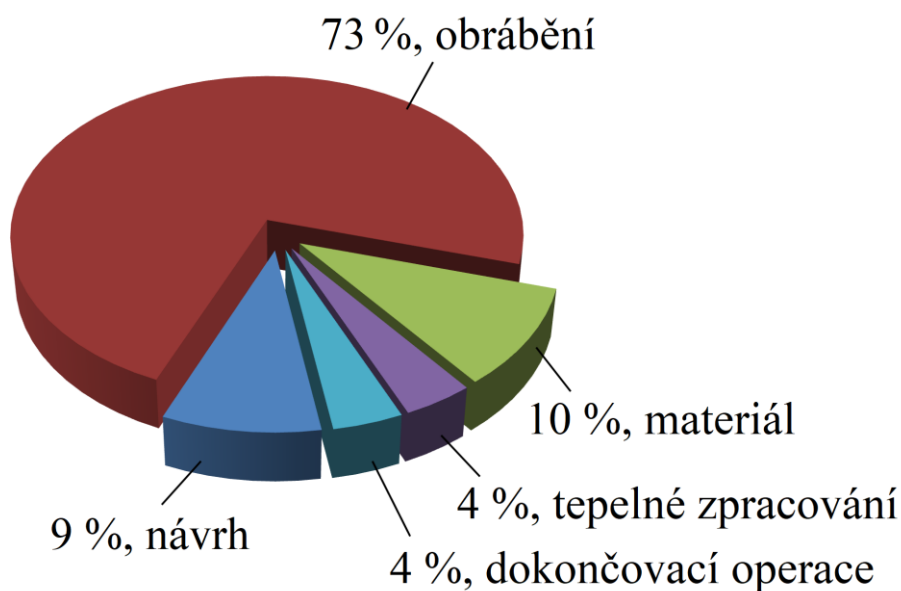
2.4 Ekonomické zhodnocení

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. 8.). [39, 54]



Obr. 8. Příklad rozložení nákladů na jeden výrobek[54]

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 (Obr. 9.). Nejvíce obráběcích operací je v případě složitých součástí zapotřebí právě pro vytvoření dutiny formy. [39, 54]



Obr. 9. Hlavní složky celkové ceny vstřikovací formy [39]

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 nepříjemné. 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. DUTINA FORMY – TECHNOLOGIE VÝROBY

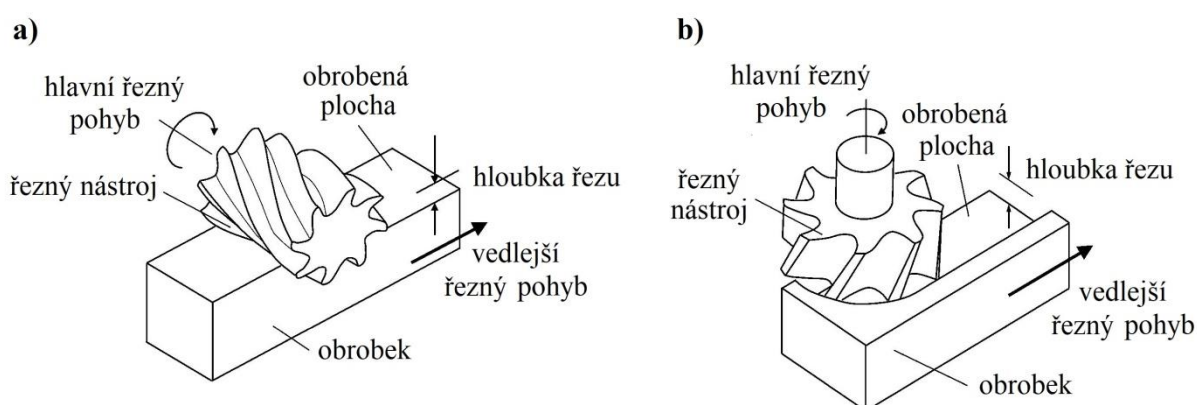
Výroba dutina formy je nejnáročnější operací při výrobě formy. Zvolené metody obrábění závisí na tvaru výrobku, obráběném materiálu a na možnostech dané nástrojárny. Používají se konvenční metody obrábění jako je frézování, vrtání, soustružení a vysokorychlostní obrábění (HSC). Další možností je využití nekonvenčních metod, jako je elektroerozivní nebo elektrochemické obrábění. Pro dosažení nižší drsnosti povrchu se pak používají dokončovací technologie, nejčastěji broušení a následně leštění. [39, 44]

3.1 Základní metody obrábění

Obecně se jedná o nejvíce používané metody obrábění strojírenských součástí. Jedná se o obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu a řadí se zde frézování, soustružení, vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování, protlačování, hoblování a obrážení, protahování a protlačování. [55]

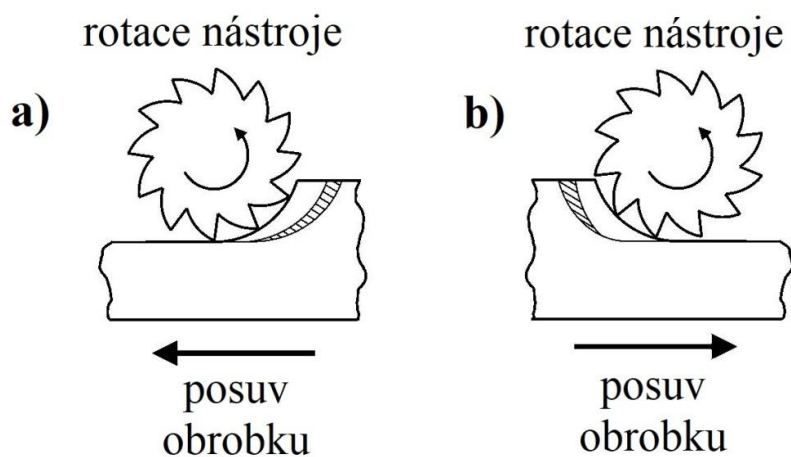
3.1.1 Frézování

Frézování je jednou z nejvšestrannějších technologií schopných vytvářet 3D tvary. Hlavní řezný pohyb je rotace nástroje (frézy). Vedlejší řezný pohyb, jehož osa je kolmá na osu hlavního řezného pohybu, je posuv obrobku. Lze rozlišit dva základní typy frézování, a to frézování obvodem nástroje a čelem nástroje (Obr. 10). [55, 56]



Obr. 10. Základní frézovací operace [57]
a) obvodové frézování, b) čelní frézování

V závislosti na směru posuvu obrobku vůči řeznému nástroji lze rozdělit frézování na nesousledné a sousledné (Obr. 11.). Nesousledné obrábění je charakteristické smyslem rotace nástroje proti posuvu obrobku. Výsledná obráběná plocha pak vzniká vnikáním nástroje do obrobku, přičemž tloušťka třísky se postupně zvětšuje z nulové hodnoty na maximální. Fréza před začátkem úběru materiálu částečně klouže po povrchu obrobku, což způsobuje zvýšené opotřebení břitu. Sousledné frézování nastává, když je smysl rotace nástroje ve stejném směru, jako posuv obrobku. Obrobená plocha je vytvořena ve chvíli, kdy zub vychází ze záběru. Při sousledném frézování může vlivem působení řezné síly dolů, proti stolu frézky, způsobovat zaklínění obrobku mezi stůl stroje a nástroj, což můžeme za následek poškození nástroje, případně i stroje. [55, 56]

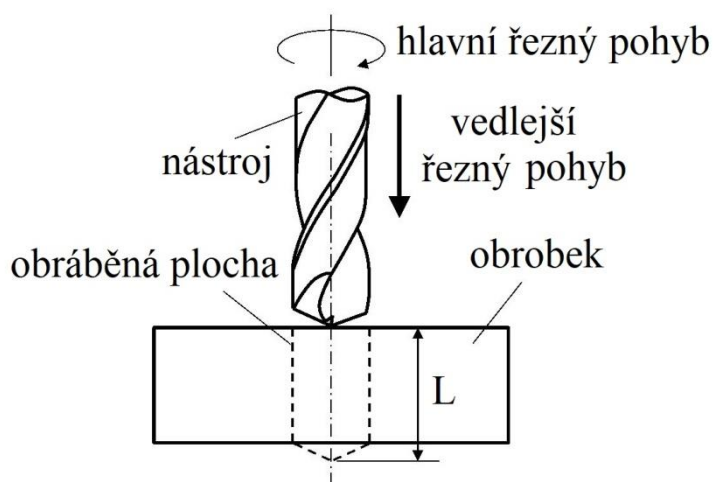


Obr. 11. Nesousledné (a) a sousledné (b) frézování [57]

Oba způsoby frézování mají své výhody i nevýhody. U nesousledného frézování je výhodou nezávislost trvanlivosti nástroje na okujích, písčitém povrchu apod. Není zapotřebí vymezování vůle mezi posuvným šroubem a maticí stolu stroje a také je sníženo jejich opotřebení a další výhodou je nezávislost záběru zubu frézy na hloubce řezu. U sousledného je výhodou vyšší trvanlivost břitů a tím možnost použití vyšších řezných rychlostí a posuvů. Směr řezné síly je výhodný z hlediska upnutí obrobku a také dochází k redukci chvění. Další výhodou je nižší drsnost povrchu u takto obrobené plochy. [55, 56]

3.1.2 Vrtání

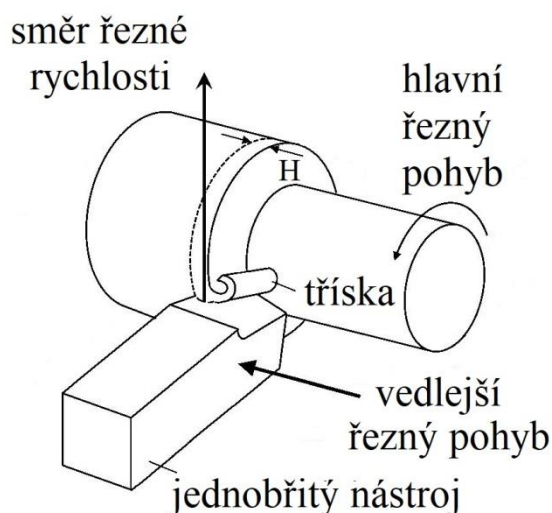
Vrtání, jako jedna ze základních obráběcích technologií, se využívá při zhotovení nebo zvětšení válcových děr. Další možností uplatnění vrtání je při vytváření sražení nebo zahloubení. Hlavní řezný pohyb je nejčastěji rotace nástroje (vrtáku), jehož osa je kolmá k ploše, ve které vstupuje vrták do obrobku (Obr. 12.). Vedlejší řezný pohyb je posuv nástroje v jeho ose. Při výrobě vstříkovací formy nachází vrtání široké uplatnění. Z hlediska výroby dutiny formy se pak jedná o válcové plochy dané konkrétním výrobkem, nebo vytváření děr pro válcové vyhazovače. [44, 55, 58]



Obr. 12. Princip vrtání [57]

3.1.3 Soustružení

Jedná se o metodu obrábění využívanou pro zhotovení součástí rotačních tvarů. Nástroj (soustružnický nůž) má pouze jeden břit, který je připevněn na stopce. Hlavní řezný pohyb je rotační, nejčastěji vykonáván obrobkem. Vedlejší řezný pohyb je posuv nástroje, přičemž se může jednat o přímočarý nebo obecný pohyb (Obr. 13.). Soustružnický nůž má stejně jako jiné nástroje konvenčního obrábění přesně definovanou geometrii. Jednotlivé nástrojové úhly mají přímý vliv na mechanismus tvorby třísky, velikost řezných sil a celkovou životnost nástroje. Na soustruhu lze vytvářet válcové, kuželové, či obecné rotační plochy. Samozřejmostí je zaoblování, či sražení hran, dále lze vytvářet zápichy nebo oddělovat materiál. Možné je i vytváření vnějších a vnitřních závitů. [55, 57]



Obr. 13. Princip soustružení [57]

3.1.4 CNC obrábění

Díky stále zvyšujícím se nárokům na obrábění se v dnešní době stále více používají numericky řízené stroje. Počítačem řízené obrábění (CNC) umožnilo produkci na úrovni, která je na běžných strojích nepředstavitelná. Složité operace je možné provádět rychleji a s vyšší přesností a stálostí. Nejčastěji jsou v dnešní době číslicovým řízením opatřovány frézky a soustruhy. Tyto stroje mohou být zároveň opatřeny o systém automatické výměny nástrojů (ATC). Pokud je CNC soustruh zároveň opatřen ATC, pak se jedná o soustružnické centrum. V případě CNC frézky opatřené ATC je to obráběcí centrum. Obráběcí centra nacházejí uplatnění právě při výrobě dutin formy, které se vyznačují tvarovou složitostí. Dělí se na vertikální a horizontální, které díky jejich všestrannosti získávají stále větší uplatnění. Na obráběcím centru lze kromě frézování provádět i vrtání, řezání závitů a některé jsou opatřeny i více vřeteny, což umožňuje zkrácení obráběcích časů, například při jemných dokončovacích frézovacích operacích. Největší nevýhodou soustružnických i frézovacích center je pořizovací cena. [56, 58, 59]

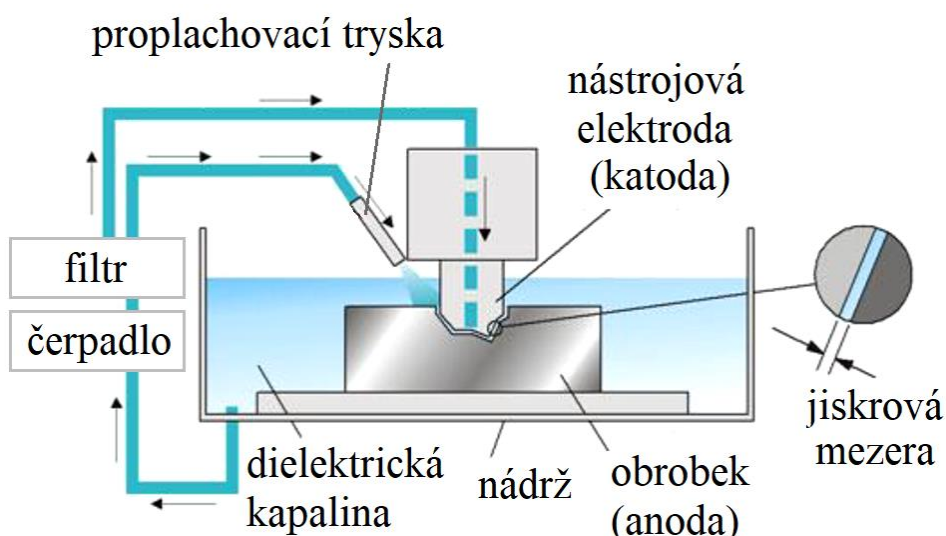
3.2 Vysokorychlostní obrábění (HSC)

Již ve 30. letech 20. století byl představen koncept vysokorychlostního obrábění, kdy bylo zjištěno, že s rostoucí řeznou rychlostí roste i teplota v místě řezu. Tento růst probíhá pouze do jisté hraniční teploty a následně dochází k poklesu řezné teploty. Je tedy možné obrábět rychlostí výrazně vyšší než při běžném obrábění, ale při stejné teplotě. Výhodou HSC je vysoká produktivita, vysoká kvalita obrobenej plochy bez otřepů, nízká vnitřní napětí a možnost

obrábění obrobků o malé výšce. Další výhodou je možnost obrábění bez chlazení nebo obrábění tepelně zpracovaných ocelí a dalších velmi tvrdých materiálů. HSC je možné provádět u frézovacích strojů i soustruhů. Nástroje musí být vyrobeny z materiálů s vysokou tvrdostí povrchu, houževnatostí a vysokou odolností proti chemickému opotřebení. V takových případech nachází uplatnění polykrystalický kubický nitrid bóru, slinuté karbidy, keramické materiály nebo mono a polykrystalické diamanty. Pro zvýšení životnosti břitů se rovněž využívá povlaků, které vytváří chemickou a tepelnou bariéru mezi nástrojem a obrobkem. [55, 60]

3.3 Elektroerozivní obrábění (EDM)

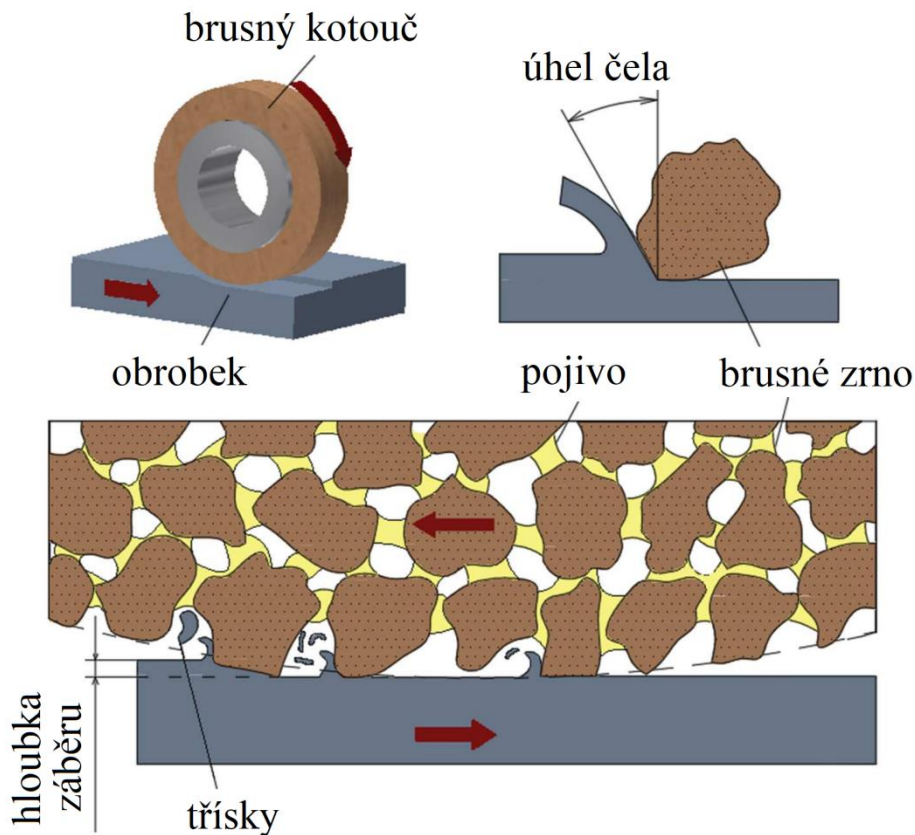
EDM je proces, při kterém je materiál odebrán pomocí elektrických výbojů elektrodou a obrobkem. Proces probíhá při úplném ponoření v dielektrické kapalině. Mezi nástrojem (kladnou elektrodou) a obrobkem (zápornou elektrodou) je vytvořena tzv. jiskrová mezera, kde vzniklé výboje působí na povrch obrobku a částečně natavují, spalují a odpařují materiál (Obr. 14.). Aby docházelo k výměně dielektrika v místě obrábění, je do procesu zařazeno proplachování. Nástrojová elektroda má tvar negativu obráběné plochy, přičemž v případě větších ploch je možné využít více elektrod ke snížení nákladů. Tento proces lze využít při obrábění velmi tvrdých, křehkých nebo teplotně náchylných materiálů, které je obtížné nebo nemožné obrábět běžnými technologiemi obrábění. Další výhodou je možnost plné automatizace a schopnost obrábění velmi složitých tvarů a proto nachází široké uplatnění při výrobě tvarových dutin formy. [39, 59]



Obr. 14. Princip EDM [61]

3.4 Broušení

Broušení se na rozdíl od frézování, soustružení, vrtání apod. řadí k technologiím s nedefinovanou geometrií břitu. K úběru materiálu je používán nástroj složený z tisíců zrníček náhodného tvaru i umístění tvořících řezné hrany (Obr. 15.). Při broušení vzniká velmi malá tříška (0,002 – 0,05 mm) v porovnání s většinou běžných obráběcích metod. Měrné řezné síly při obrábění jsou velké vlivem negativních úhlů čela zrn a jejich náhodné orientace. Zároveň vzniká poměrně velké množství tepla a je nutné zajistit dostatečné chlazení výrobku. Broušení je jednou z běžně využívaných technologií v případech, kdy je zapotřebí dosažení vyšší rozměrové přesnosti a nižší drsnosti povrchu než v případě běžných obráběcích technologií. Uplatnění nachází mimo dokončovací operace i v případě běžného obrábění tvrdých a křehkých materiálů, případně k vytváření komplexních tvarů. Mezi základní obráběcí procesy patří broušení rovinné, broušení vnějších válcových ploch hrotové a bezhroté, broušení vnitřních válcových ploch a speciální broušení (tvarové a závitové). V dnešní době je stále častější aplikace CNC, což přináší celou řadu výhod, především při broušení tvarových ploch. [56, 59]



Obr. 15. Princip broušení [62]

3.5 Leštění

Leštění je dokončovací operace, kde je dosaženo úběru materiálu pomocí tření mezi abrazivními částicemi a povrchem obrobku. Tyto částice jsou obsaženy v leštících pastách, kterých existuje řada druhů podle obráběného materiálu. Jako abraziva se používají práškové oxidy kovů, jako jsou CeO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 a SiO_2 . Leštěním je možné dosáhnout velmi nízkých drsností povrchu a až zrcadlového lesku. Jedná se ovšem o velmi zdlouhavý a finančně náročný proces. Mechanické leštění nachází uplatnění např. u vstříkovacích forem pro výrobu optických čoček. Mimo běžné typy leštění se lze setkat i s chemickým leštěním. Jedná se o produktivnější metodu, kdy k úběru materiálu nedochází pouze abrazí materiálu, ale rovněž chemickým odbouráváním. Nevýhodou chemického leštění je nízká homogenita lesku a možnost vzniku nežádoucích látek v průběhu procesu. V dnešní době se také rozšiřuje elektrolytické leštění nebo elektrolytické leštění plasmou. Nevýhodou je ovšem vysoká pořizovací cena a složité přípravné operace. [63, 64]

3.6 Další metody obrábění tvarové dutiny formy

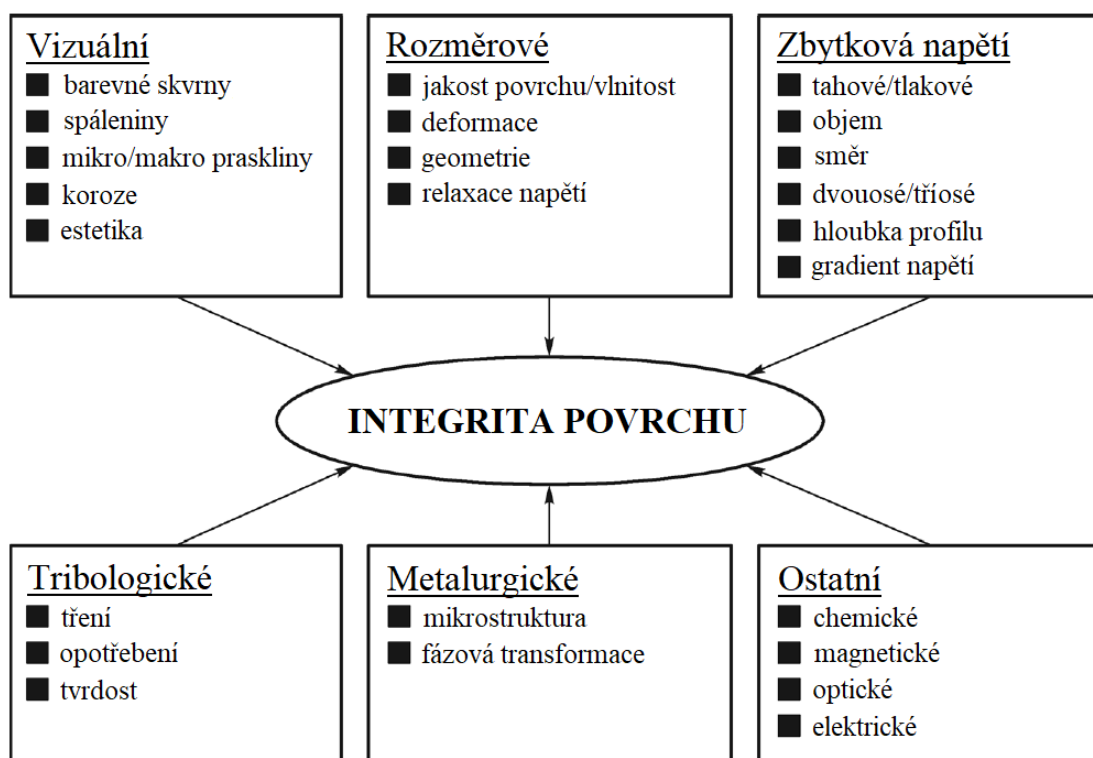
Mimo výše uvedené technologie je možné využít dalších nekonvenčních technologií, které nachází uplatnění nejen v oblasti obrábění dutin formy. Jednou z takových technologií je EDM vrtání děr malých průměrů. Tento proces využívá principu EDM, tedy využití nástrojové elektrody k obrábění a jedná se o rotující dutou elektrodu, která je postupně zaváděna do výrobku. Skrze elektrodu je pod vysokým tlakem přiváděna dielektrická kapalina a dále je možné přivádět kapalinu pomocí trysek v okolí místa obrábění. Výhody jsou obdobné, jako u běžného EDM, nevýhodou je intenzivnější opotřebení elektrod a nízká rychlost procesu u větších průměrů. Uplatnění nachází při výrobě děr pro vyhazovače nebo pro odvzdušnění. [59, 65]

Další technologií je elektrochemické obrábění (ECM), kterou lze přirovnat k EDM, avšak s několika rozdíly. Hlavním rozdílem je použití elektrolytu, což je elektricky vodivá kapalina (nejčastěji sůl s vodou). Nedochází ke vzniku výboje a materiál je ubírán pomocí elektrolyzy. Nástroj nepřichází ke styku s obrobkem, a proto nevzniká žádné tření, teplo nebo opotřebení. Obráběná plocha je bez otřepů, často dosahující vysoké jakosti. Výhodou je rovněž vysoká produktivita obrábění. Navzdory nesporným výhodám má ECM i výrazné nevýhody, jako je vysoká pořizovací cena, nutnost použití extrémně vysokých napětí a korozní agresivita elektrolytu. [59]

Jednou z možností obrábění povrchu dutiny formy je použití laserového paprsku. Nejčastěji se obrábění laserem používá ke tvorbě různých druhů textur povrchu, či dezénů. Principem je odpařování materiálu v oblasti dopadu laserového paprsku. Tloušťka laserového paprsku může dosahovat až 40 μm a je tedy možné vytvářet velmi detailní vzory, které jsou předem definovány počítačem. Výhodou je výroba povrchů vysoké jakosti o rozlišné výšce profilu. Povrch může obsahovat i ostré hrany a může se nacházet téměř na jakékoli 3D ploše. [39]

4. INTEGRITA POVRCHU

Znalost mechanismu vzniku povrchu součásti je z hlediska výroby klíčová a umožňuje vytvoření povrchu bez poruch, či optimalizaci použitých procesů. Originální koncept integrity povrchu je rozdělen do šesti základních skupin faktorů: vizuální, rozměrové, zbytková napětí, tribologické, metalurgické a další (Obr. 16.). Důležitost jednotlivých parametrů pak vyplývá z funkce vzniklé plochy. Nejspolehlivější zkouškou integrity je samotný provoz, jelikož zatím neexistuje způsob pro komplexní zhodnocení nově vytvořené plochy. Se stále rostoucími požadavky na integritu povrchu vznikají nové vysoce efektivní technologie výroby. Tento pokrok rovněž způsobil miniaturizaci komponentů zařízení v různých odvětvích. [66-70]

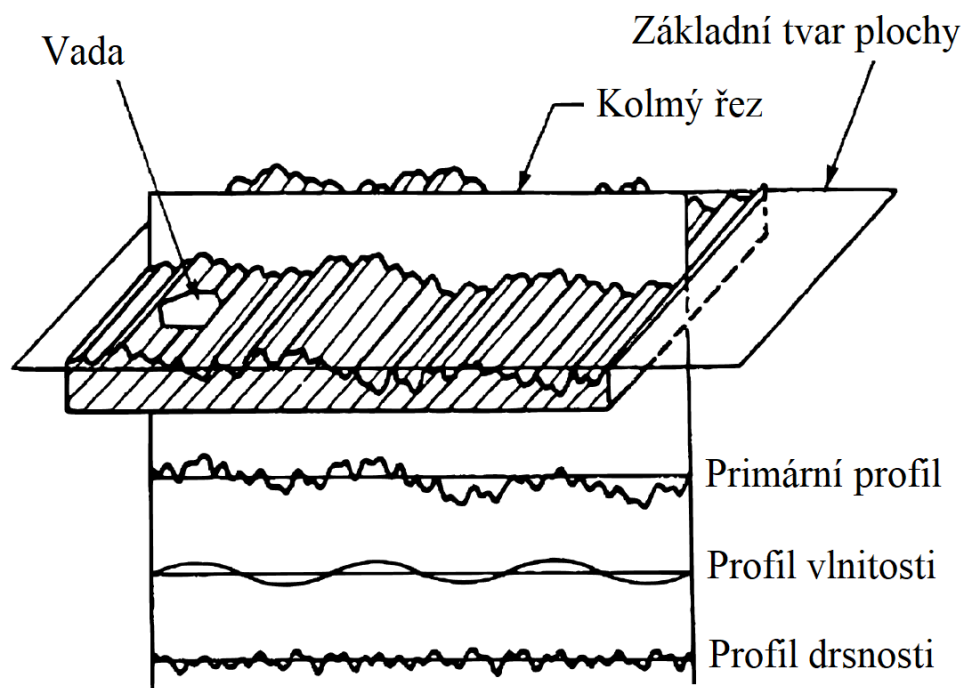


Obr. 16. Klíčové faktory integrity povrchu [66]

Jedním z parametrů integrity povrchu je v průmyslu běžně zmiňovaná jakost povrchu. Termín jakost povrchu zahrnuje přesnost rozměrů, geometrického tvaru, polohy a drsnost povrchu. Předmětem jakosti jsou rovněž fyzikální, či chemické změny v povrchu dílu, které vznikly v důsledku výroby takového povrchu. Celková jakost funkčních ploch strojních součástí má pak zásadní vliv na jejich funkci. U vstřikovacích forem je povrch dutiny formy přenášen na samotný výstřik, a navíc je jakost povrchu klíčová i z hlediska odolnosti proti opotřebení nebo korozi. [66-70]

4.1 Parametry profilu povrchu

Integrita povrchu, či jakost povrchu jsou termíny zahrnující komplexní charakteristiku obrobené plochy, ale aby bylo možné hodnotit např. samotnou drsnost povrchu, je nutno se zaměřit na samotnou texturu povrchu a stanovit tzv. profil povrchu. Profil povrchu vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (Obr. 17.). Takto je získán primární (nebo také základní) profil, který je základem pro hodnocení drsnosti nebo vlnitosti povrchu. [67, 71, 72]



Obr. 17. Profil povrchu a jeho struktura [73]

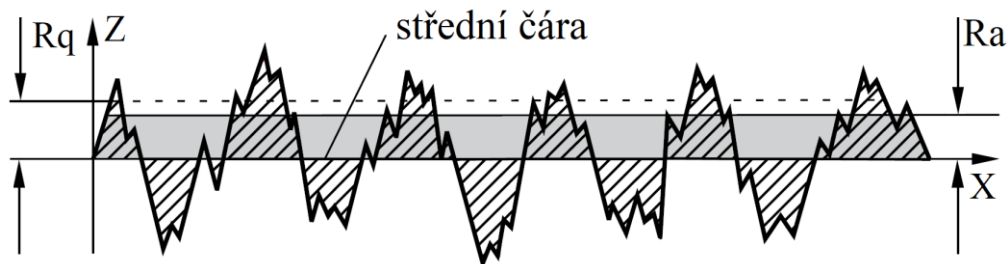
Po získání základního profilu na určené vyhodnocované délce, je nutné rozlišit jednotlivé parametry ovlivňující tvar profilu povrchu. Profil drsnosti povrchu je odrazem samotných stop nástroje po obrábění. Profil vlnitosti se vyznačuje větší délkou vln a jeho příčinou jsou často nedokonalosti při obrábění. Příkladem mohou být například vibrace mezi obrobkem a nástrojem. Dále mohou vznikat i velmi dlouhé délky vln, které jsou způsobeny rotačními součástmi stroje či tepelným ovlivněním řezu. Navíc může být profil povrchu narušen vlivy, jako je opotřebení nástroje, nízká homogenita obráběného materiálu nebo poruchy spojené s fyzikálními a chemickými změnami v materiálu obrobku. Pro vyhodnocování jednotlivých parametrů je tedy potřeba využít tzv. filtrů profilu, které rozdělují profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky (viz ISO 11562). Profil drsnosti pak vznikne potlačením dlouhovlnných složek profilu použitím patřičného filtru profilu. [67, 71, 72]

U profilu drsnosti je pak možné vyhodnotit výškové parametry, délkové parametry, tvarové parametry a křivky. Z hlediska vyhodnocování výškových parametrů výstupků a prohlubní je pak rozlišována: [67, 71, 72]

- největší výška výstupku profilu R_p ,
- největší hloubka prohlubně R_v ,
- největší výška profilu R_z ,
- průměrná výška prvků povrchu R_c ,
- celková výška profilu R_t .

Mezi další výškové parametry patří průměrné hodnoty pořadnic: [67, 71, 72]

- průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a (Obr. 18.),
- průměrná kvadratická úchylka posuzovaného povrchu R_q (Obr. 18.),
- šikmost posuzovaného povrchu R_{sk} ,
- špičatost posuzovaného povrchu R_{ku} .



Obr. 18. Vyhodnocení parametrů R_a a R_q [74]

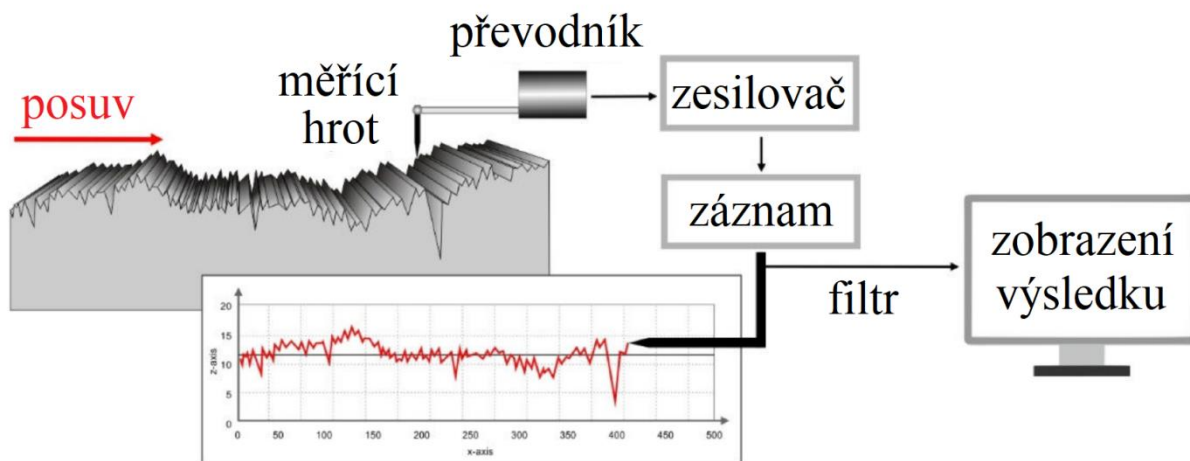
4.2 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu je v podstatě analýzou povrchových nedokonalostí, tedy odchylek reálné plochy od plochy jmenovité. Zatím co jmenovitá plocha je dokonalého geometrického tvaru, často udávaného technickou dokumentací, reálná plocha nikdy tohoto tvaru nedosahuje a je velmi obtížné ji měřit. Měření drsnosti povrchu lze rozdělit do dvou základních kategorií, a to kontaktní a bezkontaktní. [75, 76]

4.2.1 Přístroje kontaktní

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o způsob měření, při kterém je měřící zařízení přímo v kontaktu s měřeným povrchem. Tato metoda využívá jako nástroj měřící hrot (Obr. 19.), který při konstantním pohybu kopíruje měřený povrch. Vertikální pohyb hrotu je převeden na signál, který je zesílen a zaznamenán a následně za pomoci filtrů převeden na profil drsnosti povrchu. Aby bylo možné skutečně vyhodnotit drsnost povrchu plochy, je nutné měření

opakovat, aby byl získán profil drsnosti v rozdílných kolmých řezech. Z tohoto důvodu je tato technologie velmi časově náročná. Výhodou je kompletní vyhodnocení měřeného povrchu, a to bez ohledu na jeho optické vlastnosti a vysoké rozlišení měření. Nevýhodou je mimo časovou náročnost také možnost poškození povrchu měřícím hrotem, vysoká úroveň hluku při měření nebo případná fyziiochemická reakce mezi hrotem a testovaným materiálem. [75, 76]



Obr. 19. Kontaktní měření drsnosti povrchu [76]

4.2.2 Přístroje bezkontaktní

Další možností vyhodnocování drsnosti povrchu je využití bezkontaktních metod, jako jsou elektronové mikroskopy (SEM), optické rozptylové metody, optické interferometrie (OCT), skenovací mikroskopie atd. Obecnými výhodami bezkontaktního měření jsou vysoká rychlost měření, nulové opotřebení měřícího zařízení a rovněž žádné poškození testovaného povrchu nebo možnost měření měkkých, či adhezních materiálů. Zároveň je možné měřit s vyšší přesností než u kontaktní metody, kde je měření limitováno velikostí zaoblení špičky hrotu. Velkou výhodou je i opakovatelnost měření. Nevýhodou bezkontaktních přístrojů je velká citlivost na vibrace, které mohou kompletně znehodnotit měření. Zároveň je klíčové i osvětlení a světelná odrazivost povrchu. Oproti kontaktní metodě se musí jednat o pečlivě vyčištěný povrch. [75, 76]

Jednou ze zmíněných metod je skenovací mikroskopie, konkrétně využití skenovacího tunelového mikroskopu (STM). Princip metody byl poprvé představen roku 1960 a první mikroskop představen až v roce 1981. STM umožňuje zobrazení morfologie povrchu pevné látky s velmi vysokým rozlišením, a to až do úrovně atomů. Obraz je získáván mechanicky na rozdíl od jiných běžných mikroskopů, které pracují s optickými soustavami. Principem je využití tunelového jevu ke zjištění vzdálenosti hrotu stroje od testovaného

povrchu. Aby bylo možné drsnost povrchu měřit, musí se jednat o elektricky vodivý vzorek. Špička kovového hrotu (první elektroda) je zavedena poblíž (0,3 až 1 nm) testovaného povrchu (druhá elektroda) a poté je posouvána nad povrchem, přičemž je zároveň sledována vzdálenost hrotu od povrchu za pomoci tunelovacího proudu. [75]

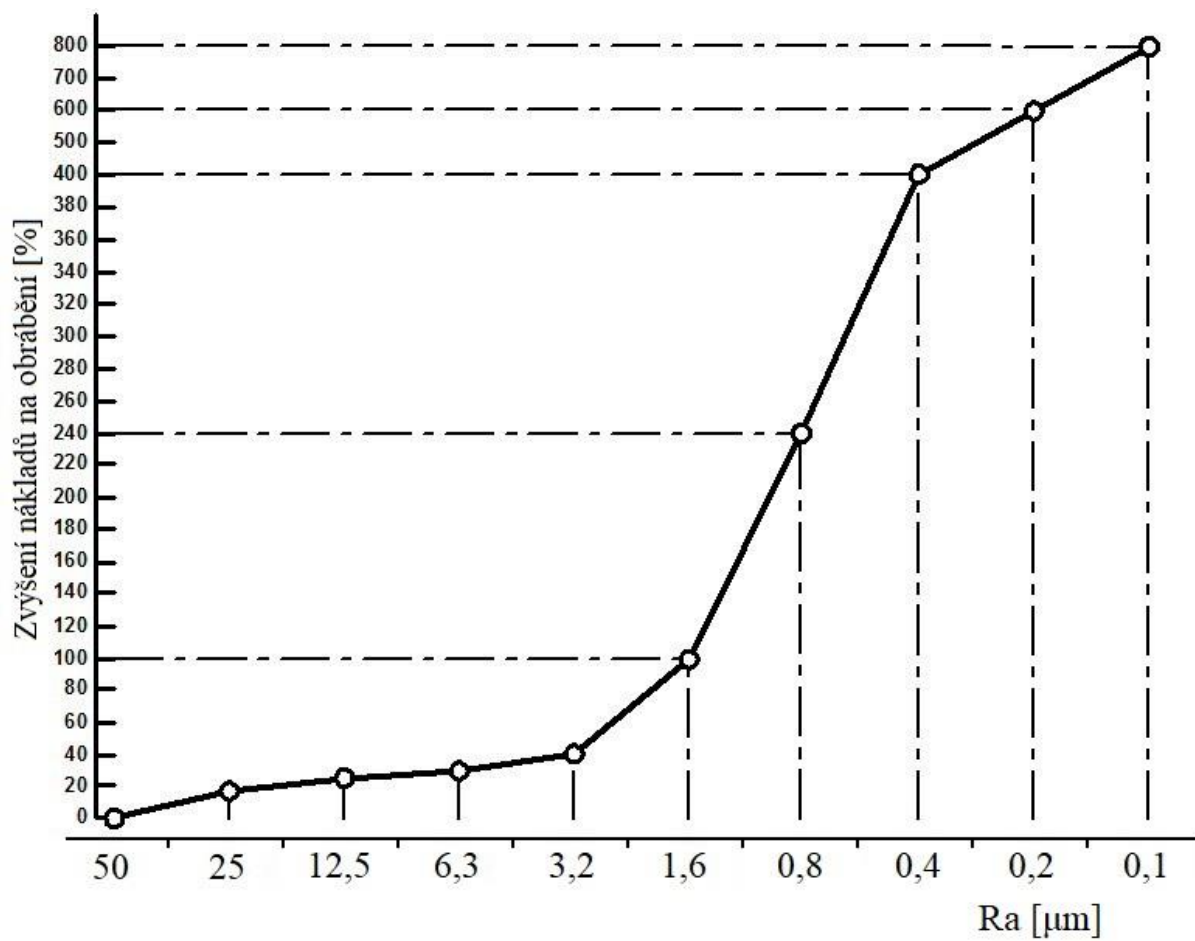
Do oblasti skenovací mikroskopie se řadí i mikroskop atomárních sil (AFM). Jedná se o metodu podobnou jako STM, ovšem s možností vyhodnocovat vodivé i nevodivé materiály. AFM funguje na principu měření velmi malých sil (Van der Waalsovy a elektrostatické síly, méně než 1 nN), jež jsou přítomné mezi povrchem hrotu stroje a testovaným povrchem. Ačkoli tato metoda dokáže pracovat i kontaktně, pro dříve zmíněné nevýhody kontaktních měření je více využíván bezkontaktní režim. [75]

4.3 Dosahovaná drsnost povrchu a vynaložené náklady

Existuje široká škála způsobu obrábění a využitím různých technologií je možné dosáhnout odlišné drsnosti povrchu. V Tab. 1. jsou uvedeny typické hodnoty drsnosti povrchu u vybraných technologií, přičemž konkrétní hodnoty se mohou lišit s rozlišnými reznými podmínkami, obráběným materiálem apod. Uvedené hodnoty jsou běžně dosažitelnými hodnotami a není vyloučeno dosažení vyšší jakosti povrchu. Je zřejmé, že obecně je snaha dosáhnout co nejvyšší jakosti povrchu za co nejnižší cenu. Hodnota drsnosti povrchu se z pravidla volí dle funkce vyráběné plochy. Ačkoli je v dnešní době možné vyrábět povrchy o vysoké jakosti, je nutné nalézt vhodný kompromis z důvodu rapidně rostoucích nákladů na obrobení dané plochy při zařazení dokončovacích operací (Obr. 20.). [67, 72]

Tab. 1. Drsnost povrchu po obrobení vybranými technologiemi [55, 67, 72]

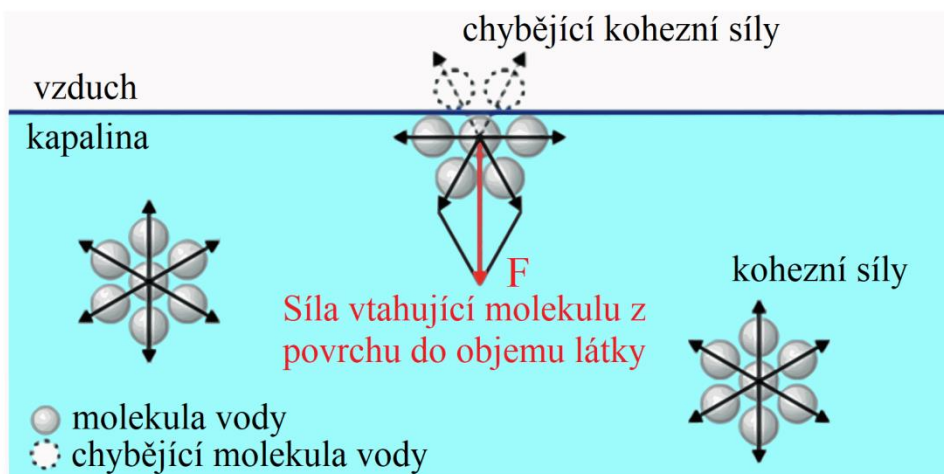
Technologie obrábění povrchu	Drsnost povrchu Ra [μm]
Vrtání	6,3 až 1,6
Vystružování	3,2 až 0,8
Frézování	6,3 až 0,8
HSC	0,8 až 0,6
Soustružení	6,3 až 0,4
EDM	6,3 až 0,2
Broušení	1,6 až 0,1
Leštění	0,4 až 0,1



*Obr. 20. Růst nákladů vynaložených na dosažení požadované hodnoty Ra [77]
(Zvýšení nákladů se může lišit v případě použití různých technologií)*

5. POVRCHOVÉ NAPĚTÍ, ÚHEL SMÁČENÍ

Jedním z důležitých odvětví fyzikální organické chemie je studie povrchu, tedy chování molekul materiálů povrchu, v jeho blízkosti nebo na fázovém rozhraní. Fázové rozhraní může být vytvořeno mezi látkami o pevném, kapalném, či plynném skupenství, případně kombinací všech tří. Pokud dojde ke kontaktu dvou fází, dochází k průniku atomů nebo molekul skrze pomyslnou kontaktní rovinu, což vede právě ke vzniku fázového rozhraní. Molekuly kapalně fáze jsou drženy pohromadě přitažlivými molekulárními silami, jejichž výslednice je rovna nule. V případě molekul na povrchu (často o tloušťce méně než $0,1 \mu\text{m}$) je výslednice nenulová a tyto molekuly mají tendenci se dostat z povrchové vrstvy do objemu fáze. Jedná se o tzv. kohezní sílu, a aby došlo ke zvětšení plochy povrchu, je třeba tuto sílu překonat. Energie vynaložená na tento proces je označována jako povrchová energie. [78, 79]



Obr. 21. Silové poměry v povrchové vrstvě kapaliny [80]

Silová nerovnováha na povrchu tedy způsobuje zmenšení povrchové plochy na minimum. Tento jev lze sledovat např. u kapky vody, kdy její povrch je tvaru koule, jelikož při uzavření daného objemu látky má kulová plocha nejmenší obsah. V případě kapalin je povrchová energie rovna povrchovému napětí. Povrchové napětí je definováno jako práce potřebná k isotermickému zvětšení (nebo zmenšení) povrchové plochy o jednotkové množství. Povrchové napětí kapalin lze přímo měřit a vyjádřit v jednotkách energie na jednotku plochu. V případě pevných látek ovšem rovnost mezi povrchovým napětím a povrchovou energií neplatí a jejich povrchovou energii nelze měřit stejným způsobem jako v případě kapalin. Povrchy pevných materiálů lze rozdělit do dvou kategorií, a to na povrchy s vysokou a nízkou povrchovou energií. Mezi materiály s vysokou povrchovou energií se řadí kovy, oxidy, nitridy apod.

Materiály s nízkou povrchovou energií jsou často organického původu a patří zde např. polymery. [78, 79]

5.1 Adhezní a kohezní práce

Adhezní práce je definována jako vratná termodynamická práce, která je potřebná k oddělení rozhraní z rovnovážného stavu dvou fází na vzdálenost nekonečna. Dupréova rovnice (5.1) znázorňuje adhezní práci v případě kontaktu povrchu pevné a kapalně látky. [78]

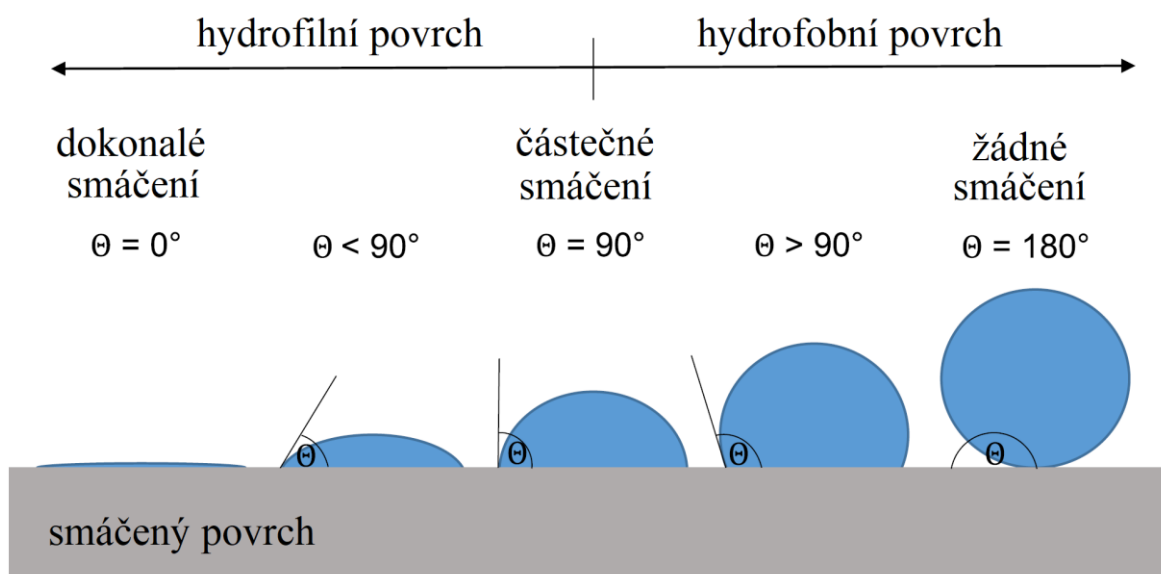
$$W_a = \gamma_L + \gamma_S - \gamma_{SL} \quad (5.1)$$

Adhezní práce W_a je tedy závislá na povrchové energii kapalného skupenství (γ_L), povrchové energii pevného skupenství (γ_S) a na napětí na fázovém rozhraní (γ_{SL}). Vztah (5.1) lze přepsat do tvaru ke stanovení kohezní práce (W_c) pro případ, kdy jsou dvě fáze identické a neexistuje tedy fázové rozhraní. [78]

$$W_c = 2\gamma_S \quad (5.2)$$

5.2 Úhel smáčení

Většina kapalin do jisté míry smáčí pevné povrchy, tedy pokud je na pevný povrch nanesena kapka kapaliny, je možné odečíst tzv. úhel smáčení θ (Obr. 22.). V případě takového měření je smáčený povrch uvažován jako dokonale hladký, tuhý, rovinný a nereaguje s danou kapalinou. V ustáleném stavu je pak možné úhel smáčení změřit. [78, 79]



Obr. 22. Smáčivost pevné látky kapalinou [81]

Vztah mezi jednotlivými mezifázovými energiemi a úhlem smáčení je dán Youngovou rovnicí:

$$\gamma_{LV} \cdot \cos \theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (5.3)$$

kde γ_{LV} je napětí na fázovém rozhraní kapalina-plyn a γ_{SV} je napětí na fázovém rozhraní pevná látka-plyn. Jelikož γ_{SV} není samotná hodnota povrchového napětí pevné látky, používá se vztah:

$$\gamma_{SV} = \gamma - \pi_e \quad (5.4)$$

kde γ je skutečná povrchová energie pevné látky a π_e je koeficient rozložení tlaku. Tento koeficient slouží jako korekce, jelikož se nejedná o čistý povrch pevné látky, ale o povrch, jež adsorboval výpary kapaliny. Skutečná energie je tedy nižší a lze ji vyjádřit jako:

$$\gamma = \gamma_{LV} \cdot \cos \theta + \gamma_{SL} + \pi_e \quad (5.5)$$

Po dalších úpravách lze získat Young-Duprého rovnici, která slouží ke stanovení adhezní práce W_a a má tvar:

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (5.5)$$

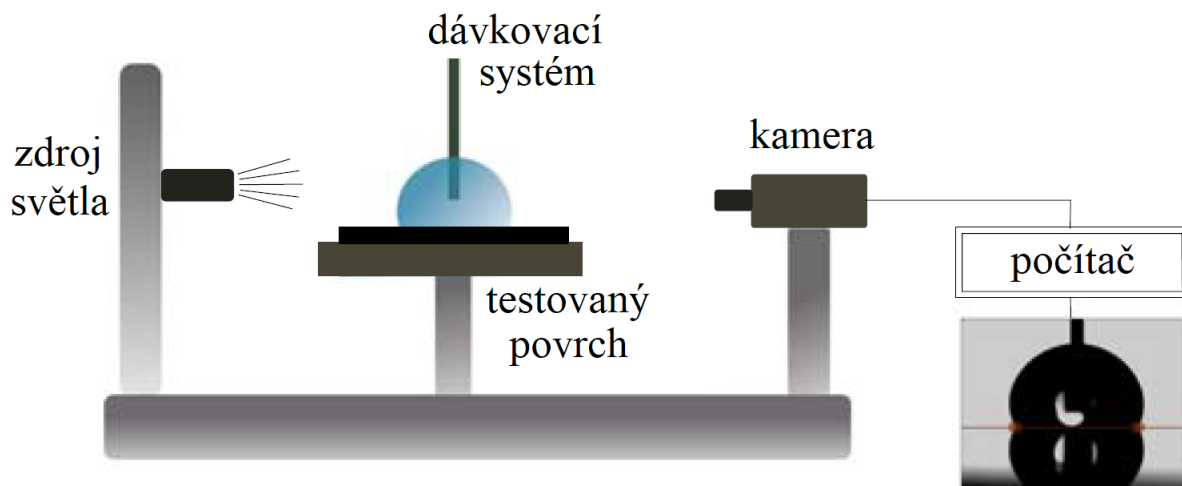
Takto je možné zjistit velikost adhezní práce pouze z úhlu smáčení a z napětí na fázovém rozhraní kapalina-plyn, přičemž obě hodnoty jsou poměrně jednoduše získatelné. V případě dokonalého smáčení ($\cos \theta = 1$) je dosažené stejného výsledku, jako v případě vztahu 5.2 a velikost adhezní a kohezní práce si jsou rovny. [78, 79, 82]

5.3 Měření úhlu smáčení

5.3.1 Přímé metody

Pro měření úhlu smáčení je možné využít několika možností. Nejjednodušší metodou je měření úhlu na naklánějící se desce. Deska z pevného materiálu, jehož smáčivost má být stanovena, je ponořena do kapaliny a následně nakláněna do chvíle, kdy je hladina kapaliny na jedné straně desky vodorovná až do místa dotyku mezi deskou a kapalinou. Úhel naklonění desky je pak roven úhlu smáčení. Podmínkou úspěšného měření je čistota měřeného povrchu. Používá se u měření menších úhlů (pod 10°) a jedná se o poměrně nepřesnou metodu v porovnání s ostatními. [82, 83]

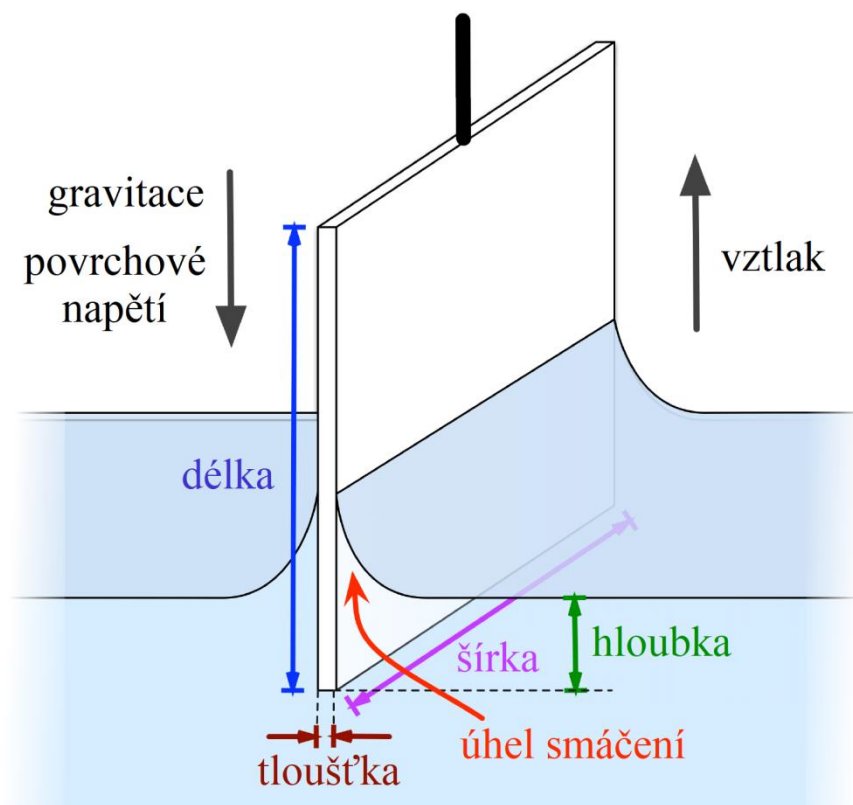
Další metodou je měření úhlu na přisedlé kapce. Kapka, která je kápnuta na pevný povrch, je pozorována mikroskopem s goniometrickým okulárem. Úhel smáčení je pak možné přímo odečíst z obrazu kapky. Výhodou je jednoduchost a nenáročnost z hlediska nízkého objemu testovací kapaliny. Nevýhodou je požadavek na zkušenost operátora a časová náročnost. Zároveň není dosahováno příliš vysoké přesnosti. Pro výrazné zpřesnění metody je možné provést analýzu profilu kapky, která porovnává reálný povrch kapky s teoretickým tvarem, který vychází z Young-Laplaceovy rovnice. Na Obr. 23. je znázorněn způsob měření přisedlé kapky na testovaném povrchu s využitím analýzy profilu kapky. Obraz kapky je přes mikroskop nasnímán kamerou a následně je vyhodnocen pomocí počítače. Tato metoda sdílí původní výhody metody přisedlé kapky a zároveň odstraňuje nevýhody, jako je časová náročnost. Měření je naopak možné provádět v poměrně rychlých intervalech a je možné rovněž sledovat změnu úhlu smáčení v čase. [82, 83]



Obr. 23. Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce [83]

5.3.2 Nepřímé metody

Další možností je využití nepřímých metod měření úhlu smáčení. Jednou z takových metod je metoda vyvažování Willhelmyho destičky (Obr. 24.). Zkoušený povrch ve formě tenké destičky je vertikálně vložen do vody, přičemž úhel smáčení je stanoven z měření síly. Změna měřené síly je kombinací vztlaku a smáčení. Výhodou je vyloučení chyby ze strany operátora, možnost automatizace a získání dat z plochy měřeného vzorku za krátký časový úsek. Nevýhodou je náročnost přípravy destičky, která musí být opatřena testovaným povrchem rovnoměrně ze všech stran a musí být vysoké rozměrové přesnosti. [82, 84]



Obr. 24. Metoda vyvažování Willhelmyho destičky [85]

Mimo výše uvedenou metodu je možné použití podobné metody vzestupu kapaliny na svislé desce. V případě, že je znám úhel smáčení je možné zjistit povrchové napětí nebo napětí na fázovém rozhraní. V opačném případě je možné měřit úhel smáčení za předpokladu, že je známá hodnota povrchového napětí nebo napětí na fázovém rozhraní. Tato metoda poměrně přesná (až $\pm 0,1^\circ$) a nachází využití i při měření úhlu smáčení při změně teploty. Výhody i nevýhody jsou v podstatě shodný s metodou vyvažování Willhelmyho destičky. [82, 84]

Další metodou měření úhlu smáčení je vyhodnocení úhlu smáčení na částečně ponořeném vlákně. Předpokladem je, že je vlákno kruhového průřezu o daném průměru. Tato metoda je ovšem poměrně nepřesná vlivem malých rozměrů vlákna. Existují i další metody, jako je použití kapilární trubice, či hodnocení úhlu smáčení u prášků, avšak jejich podrobný popis není důležitý pro potřeby této práce. [82, 84]

5.4 Smáčivost povrchů – uplatnění

Jak už bylo zmíněno, studium povrchu materiálu je samostatným vědním oborem. Problematika smáčení se těší obrovskému zájmu jak z fundamentálního, tak z aplikačního hlediska. V praxi nachází uplatnění

v oblasti tisku, nátěrů, lepení, mazání, tepelného zpracování atd. V posledních letech se zároveň zvýšil zájem o vysoce hydrofobní povrchy a jejich potenciální aplikace jako je např. samočištění. [84]

Tato problematika nachází uplatnění i v případě technologií vstřikování nebo vytlačování. Jak naznačují studie [12-17, 31], povrchová energie má nezanedbatelný vliv na plnění dutiny formy nebo vytlačování skrze vytlačovací hlavu, a na iniciaci skluzu na stěně při toku polymeru. Studie vypovídají o důležitosti smáčení i z hlediska ochlazování polymeru v dutině formy, kdy při lepším smáčení povrchu polymerem dochází ke zvětšení teplosměnné plochy a tím k rychlejšímu přestupu tepla mezi povrchem formy a výrobkem. Podobné výsledky přináší i studie [24-26] zabývající se problematikou povlakování dutiny formy a tokem materiálu v povlakovaném kanálu.

6. REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN

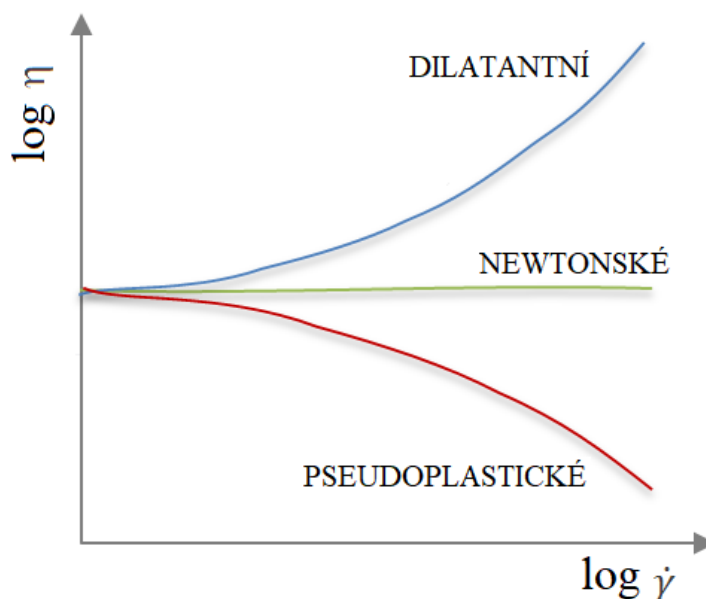
Reologie je vědní obor, jehož počátky sahají až do 17. století, zabývající se deformačními vlastnostmi materiálů vyvozenými aplikovanou silou a jinými vlivy. Termín reologie je běžně spojován se studiem kapalin nebo látek chovajících se jako kapaliny, jako jsou barvy, olej, kečup, krev, polymerní tavenina atd. Tento obor ovšem rovněž zahrnuje i elastické materiály, zejména pak elastomery. [86, 87]

Pro popis chování newtonských kapalin nebo čistě elastických materiálů stačily jednoduchá pozorování a experimenty ke stanovení obecných rovnic. V případě polymerních tavenin, které se vyznačují viskózním i elastickým chováním (viskoelastické látky), je popis a predikce toku výrazně složitější. S tokem polymerních tavenin jsou spojeny dva termíny – disipace a viskozita. Disipace je přeměna mechanické energie na tepelnou energii při smykovém toku. Viskozita charakterizuje vnitřní tření a vyjadřuje tedy míru odporu látky proti toku a je nejčastěji využívána pro popis polymerních tavenin. Viskozita se dělí na elongační a smykovou. Elongační viskozita představuje odpor látky proti elongačnímu toku. Smyková viskozita η pak vyjadřuje odpor proti smykovému toku a je dána vztahem (6.1), kde τ [Pa] je smykové napětí a $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] je rychlost smykové deformace. O smykový tok se jedná v případě, že se látka nachází mezi dvěma stěnami, přičemž jednou je udávána látce rychlost a druhá je stacionární. [86-88]

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6.1)$$

Newtonské kapaliny mají konstantní hodnotu viskozity při různých hodnotách rychlosti smykové deformace. Mimo newtonské kapaliny jsou rozlišovány kapaliny dilatantní a pseudoplastické (Obr. 25). Polymerní taveniny se řadí k látkám pseudoplastickým a vyznačují se poklesem smykové viskozity při zvyšování rychlosti smykové deformace. Vztah mezi smykovou viskozitou a rychlostí smykové deformace je často označován termínem toková křivka. Toková křivka polymerních tavenin zároveň vyjadřuje poměr rychlosti vzniku a zániku zapletenin polymerních řetězců. Z tohoto hlediska je možné rozdělit tokovou křivku na 3 části. První část (1. newtonské plató), kdy se při nízkých deformačních rychlostech polymerní tavenina chová jako newtonská kapalina – toková křivka je lineární. V druhé části převažuje rozpad zapletenin nad vznikem a dochází k poklesu viskozity. Toto chování je z hlediska zpracování výhodné a tato oblast se běžně nazývá zpracovatelskou oblastí. Ve třetí části

tokové křivky (2. newtonské plató) je vznik zapletenin zcela potlačen, tohoto stavu je ovšem nemožné v praxi dosáhnout. [86, 88, 89]



Obr. 25. Toková křivka různých typů kapalin [90]

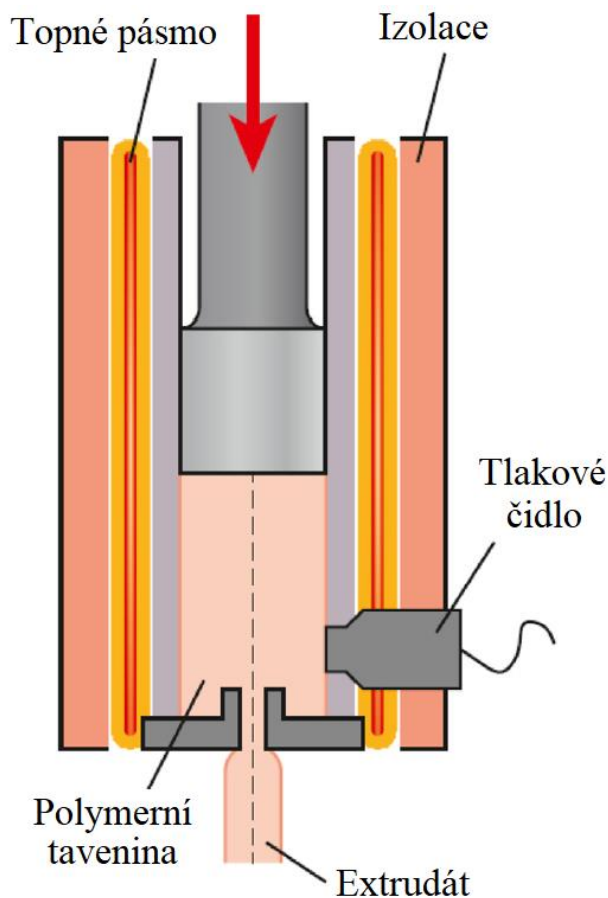
6.1 Hodnocení tokových vlastností polymerů

Měření reologických vlastností a vyhodnocení tokových modelů vyžaduje použití specifických zařízení zvaných reometry. Reometry nachází využití při výběru materiálu produktu, navrhování strojů a nástrojů, odvozování nových tokových modelů, vývoji nových materiálů, či při optimalizaci a zkvalitňování výroby. Na základě aplikace je pak možné reometry rozdělit na laboratorní (rotační, kapilární, dynamický smykový atd.) a inline reometry (výtokové, aplikace senzorů do dutiny formy atd.), používané při samotné produkci, umožňující kontrolu kvality výroby. [87]

Ačkoli je reometrů více typů, řešená práce se zabývá podrobněji pouze kapilárním reometrem, a to z důvodu zaměření práce na oblast vstřikování, kde je dosahováno poměrně vysokých rychlostí smykové deformace a z tohoto důvodu není možná aplikace jiných typů reometrů. [87]

Kapilární reometr (Obr. 26.) jedním z nejjednodušších zařízení pro měření viskozity. Tento typ reometru je vhodný pro rychlosti smykové deformace převyšující 100 s^{-1} , což odpovídá rychlostem při míchání, vytlačování a vstřikování. Ve většině kapilárních reometrů je tok generován pístem pohybujícím se v temperovaném válci. Polymerní tavenina je pak vytlačena skrz kapiláru, nejčastěji o průměru blízcímu se 1 mm. Při samotném měření může být dle normy ISO 11443 měřen průtok při kontrolovaném tlaku, nebo naopak

může být měřen tlak při konstantním průtoku. Používanější metodou je vyhodnocování poklesu tlaku z důvodu vyšší přesnosti měření. [87, 91, 92]



Obr. 26. Schematické zobrazení kapilárního reometru [87]

Při vyhodnocování naměřených dat jsou využívány vztahy (6.2) a (6.3). Tyto vztahy ovšem platí pouze pro newtonské kapaliny při absenci skluzu na stěně. Polymerní taveniny nejsou newtonské kapaliny a jejich viskozita silně závisí na rychlosti deformace. Získané hodnoty jsou tak označovány jako zdánlivé. Podle vztahu (6.4) je pak možné vypočítat zdánlivou viskozitu. [87, 91, 92]

$$\dot{\gamma}_A = \frac{4\dot{Q}}{\pi R^3} \quad (6.2)$$

$$\tau_A = \frac{p_v \cdot R}{2L} \quad (6.3)$$

$$\eta_A = \frac{\tau_A}{\dot{\gamma}_A} \quad (6.4)$$

Ke stanovení skutečné hodnoty viskozity, je nutné provést korekci rychlosti smykové deformace – Rabinowitsch korekce (6.5), kde je zaveden index nenewtonského chování (6.6). Navíc je nezbytné provést korekci smykového napětí z důvodu koncových jevů v kapiláře – Bagley korekce (6.7). [87, 91, 92]

$$\dot{\gamma}_c = \dot{\gamma}_A \cdot \left(\frac{3N + 1}{4N} \right) \quad (6.5)$$

$$N = \frac{d \log(\tau_c)}{d \log(\dot{\gamma}_A)} \quad (6.6)$$

$$\tau_c = \frac{\Delta p_2 \cdot R}{2L} \quad (6.7)$$

Korigovaná smyková viskozita je pak získána po dosazení do vztahu:

$$\eta_c = \frac{\tau_c}{\dot{\gamma}_c} \quad (6.8)$$

Podobně jako při jiných měřeních, i v případě kapilárního reometru nejsou data zcela přesná. Odchytky mohou vznikat vlivem plnění reometru, nepřesnostmi zařízení, vlivem okolního prostředí, či nepřesnostmi tlakového čidla. [91]

6.2 Skluz na stěně

Skluz na stěně je jev, který může vzniknout jako reakce polymerní taveniny na vysoké hodnoty smykové deformace. U tekutin složených z malých molekul je téměř nemožné najít důkaz o skluzu z makroskopického hlediska. Polymery jsou ovšem složeny z dlouhých makromolekulárních řetězců a prokazatelně může nastat skluz na stěně. [37]

V případě kapilárního reometru je předpoklad, že rychlost toku taveniny u stěny je rovna rychlosti pohybu stěny, tedy rychlost je nulová. Při dosažení určité kritické hodnoty smykového napětí dojde ke skluzu na stěně kapiláry, což je třeba zohlednit při vyhodnocování reologických dat. Skluzová rychlost je dána vztahem (6.9), kde A a b jsou materiálové parametry. [37, 93]

$$V_s = A\tau_w^b \quad (6.9)$$

Skluz na stěně poměrně složitý na vyhodnocení, ovšem je možné odvodit skluzovou rychlost využitím Mooney metody. Pro demonstraci této metody je třeba vyjádřit objemový průtok bez skluzu na stěně (6.10), kde V je průměrná rychlost toku.

$$\dot{Q} = \pi R^2 V \quad (6.10)$$

Po dosazení do vztahu (6.2) bude výpočet zdánlivé rychlosti smykové deformace:

$$\dot{\gamma}_A = \frac{4V}{R} \quad (6.11)$$

V případě, že dojde ke skluzu na stěně, bude výpočet vypadat následovně:

$$\dot{\gamma}_{As} = \frac{4(V - V_s)}{R} \quad (6.12)$$

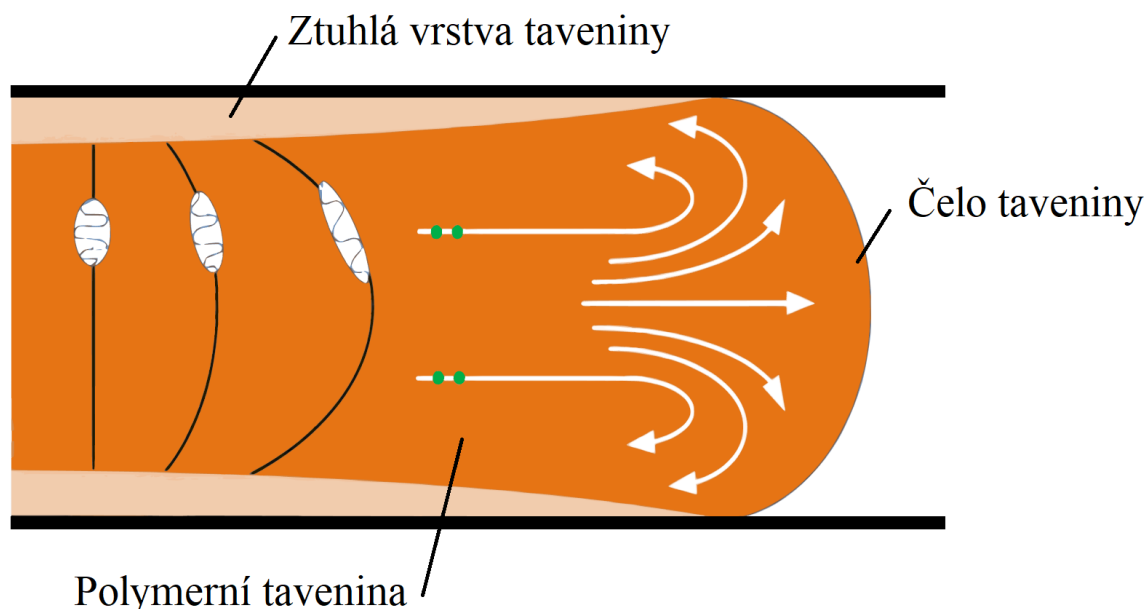
kde $(V - V_s)$ je průměrná rychlost toku materiálu vzhledem k jeho rychlosti na stěně kapiláry. Po použití vztahu (6.2) je možné pak získat vztah: [33, 37]

$$\dot{\gamma}_{As} = \frac{4\dot{Q}}{\pi R^3} - \frac{4V_s}{R} \quad (6.13)$$

Při tomto postupu je provedeno několik měření zdánlivých rychlostí smykové deformace s využitím kapilár o různých průměrech, ale poměr L/R zůstává stejný. Smykové napětí i tlakový spád zůstává stejný a v případě, že materiál nevykazuje skluz na stěně, měly by se naměřené tokové křivky prolínat. [37]

6.3 Tok materiálu dutinou vstřikovací formy

Plnění dutiny formy je realizováno tlakově řízeným tokem. Vzhledem k tomu, že povrch dutiny formy je temperován na výrazně nižší teplotu, dochází k tzv. fontánovému toku (Obr. 27.), kdy se tavenina na jejím čele rozděljuje a ulpívá na stěně dutiny formy, kde tuhne. [36, 48]



Obr. 27. Fontánový tok v dutině vstřikovací formy [94]

Fontánový tok má rovněž za následek rozdílnou orientaci vláken v průřezu výrobku, jelikož jsou jednotlivá vlákna středních vrstev protahována kolmo ke směru toku a následně vlivem oblého čela taveniny jsou naorientovány podélně ve směru toku. Výsledkem je anizotropní struktura, přičemž zvýšením teploty formy nebo taveniny je možné míru anizotropie snížit, a naopak zvýšení anizotropie a orientace je možné docílit zvýšením vstřikovacího tlaku. [36, 48]

Z hlediska plnění formy je fontánový tok výhodný, může ovšem docházet k nestabilitám toku, které mají za následek vznik vad na povrchu výrobku. Nestability mohou vznikat nejčastěji z důvodu skluzu na stěně. [36]

6.4 Parametry ovlivňující tokové chování polymerních tavenin

Tok polymerní taveniny dutinou formy je komplexním jevem a při jeho hodnocení je potřeba uvažovat velké množství vstupních parametrů. Z hlediska vstřikovaného materiálu je nutné zohlednit jeho viskozitu, teplotu taveniny, vstřikovací tlak a dotlak, či rychlost vstřikování. Se zvyšující se teplotou taveniny dochází k poklesu viskozity. Dalším důležitým aspektem je samotná koncepce výrobku, a to z hlediska tloušťky stěn, změn tloušťky stěn v průběhu

toku polymeru, přítomnost ostrých rohů a v neposlední řadě i požadovaná drsnost povrchu. To navazuje na posledního činitele, a to jsou vlastnosti vstříkovací formy, kdy je drsnost povrchu formy přenesena na výsledný produkt a rovněž hraje důležitou roli při samotném plnění dutiny formy. Nezanedbatelný vliv na plnění formy má vtokový systém, umístění vtokového ústí a přítomnost odvzdušnění. Dalším klíčovým aspektem je provedení temperace a z toho vyplývající teplota formy a její homogenita. Využitím znalostí v oblasti vlivu jednotlivých procesních parametrů na výsledný produkt je potom možné dosáhnout optimálního procesu výroby (snížení časů chlazení, úspory energie při provozu formy apod.), či dosáhnout požadovaných vlastností vstříkovaného dílu (anizotropie, stupeň krystalinity, snížení vnitřních pnutí apod.). [2-4, 37, 41]

7. 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.

8. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

V této kapitole je popsána metodika přípravy zkušebních těles, použitý materiál, software, nástroje a zařízení, použité metody měření a způsob vyhodnocení získaných dat.

8.1 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. 2. Volba materiálů probíhala s ohledem na jejich podobnost, přičemž hlavní rozdíl je v hodnotě ITT.

Tab. 2. 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

8.1.1 Měření tokových křivek použitých materiálů

Pro jednotlivé materiály byly naměřeny tokové křivky na kapilárním reometru Göttfert RG 20. Použitá kapilára byla o průměru 1 mm a délky 30 mm. Při měření bylo zvoleno 8 různých smykových rychlostí v rozpětí od 90 s⁻¹ do 6300 s⁻¹. Tyto rychlosti jsou typické pro technologie vytlačování a vstřikování. Tokové křivky všech 4 materiálů byly vyhodnocovány při 3 různých teplotách, konkrétně 200, 220 a 240 °C. Ty se shodují s teplotami taveniny při vstřikování testovacích těles.

8.2 Příprava zkušebních těles vstřikováním

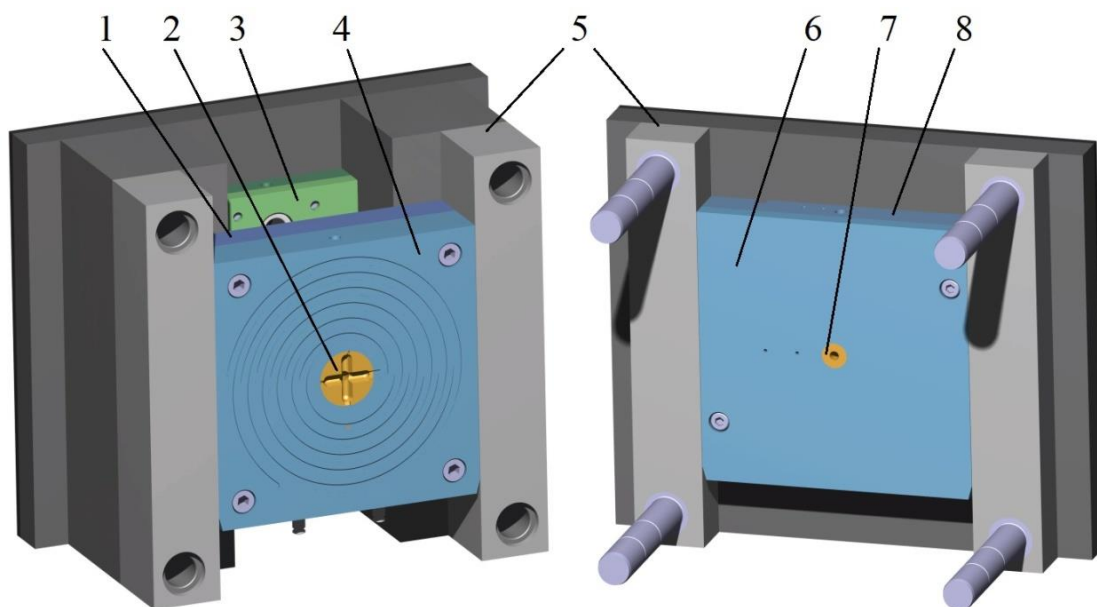
8.2.1 Vstřikovací stroj

Pro přípravu zkušebních těles byl zvolen stroj Allrounder 470 E 1000-290 Golden Edition od firmy Arburg. Jedná se o elektrický vstřikovací stroj s technologií pohonu s vřetenovými převody a servomotory s automatickou

regulací uzavírací síly pro zajištění stabilního procesu výroby a minimalizace doby instalace formy a údržby. Testovací forma je upnuta ve stroji pomocí univerzálního rámu formy. Pro další část experimentu, jehož předmětem je návrh konstrukční úpravy trysky stroje, byl zvolen hydraulický vstřikovací stroj Allrounder 170 U 150-30 od firmy Arburg.

8.2.2 Zkušební vstřikovací forma

Vstřikovací forma používaná při přípravě zkušebních těles (Obr. 28.) se skládá ze dvou tvarových desek, dvou opěrných desek a vyhazovacího systému. Přívod polymeru je zajištěn pomocí vtokové vložky a přidržovače vtoku obsahujícího rozvodné kanály a vtoková ústí (lze nastavit 4 různé průřezy vtokového ústí). Tato forma je upevněna v univerzálním rámu, který zajišťuje upnutí formy ve stroji. Nástroj je jednoduché konstrukce zajišťující snadnou manipulaci a rychlou výměnu zkušebních desek.

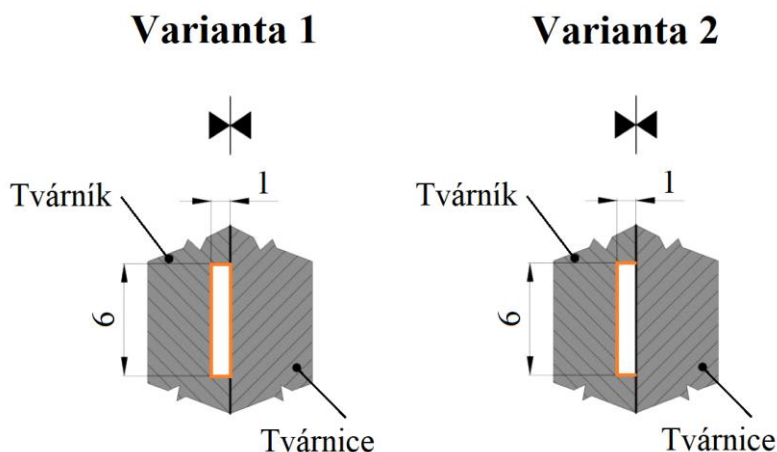


Obr. 28. Zkušební vstřikovací forma

1 – opěrná deska levá, 2 – přidržovač vtoku, 3 – vyhazovací systém, 4 – tvárník, 5 – univerzální rám formy, 6 – tvárnice, 7 – vtoková vložka, 8 – opěrná deska pravá

Tvarová deska levá je opatřena drážkou ve tvaru spirály. Délka spirály výrazně převyšuje možnosti plnění při zvolených procesních parametrech a nikdy tedy nedojde k jejímu úplnému zaplnění. Díky tomu je možné měřit a porovnávat délku zatečení takto vzniklých těles. Dutina formy není opatřena stupnicí, aby nedocházelo k ovlivnění toku polymeru, a proto je délka zatečení

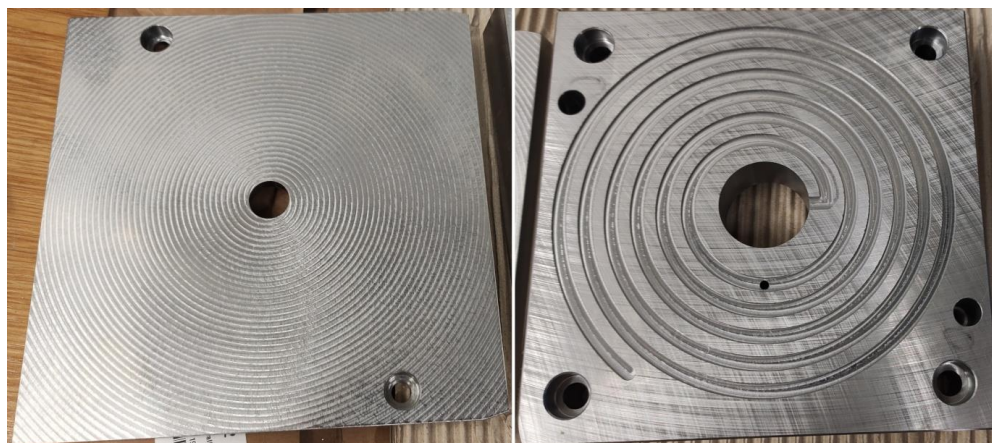
měřena mimo formu na speciálním přípravku. Průřez spirálovým kanálem je obdélníkový, přičemž jeho povrchová úprava je rozdělena do dvou variant (Obr. 29.). První variantou je kanál opatřen povrchem vzniklým použitím jedné konkrétní technologie. Jedná se o leštění, frézování a nanopovlak a jedná se tedy o 3 rozdílné povrchy kanálů. Druhou variantou je použití kombinace povrchů, kdy je povrch tvárníku vyroben frézováním a tvárnice je leštěná (zastoupení leštěného povrchu je tedy přibližně 43 %). Dohromady bylo zvoleno 5 testovacích povrchů.



Obr. 29. Varianty provedení průřezu kanálu dutiny formy

Aby byla zachována co možná nejvyšší homogenita povrchu v celé oblasti dutiny formy, byly použity stejné rezné podmínky pro obrábění drážky i ploché desky. Vzniklý povrch je zobrazen na Obr. 30.

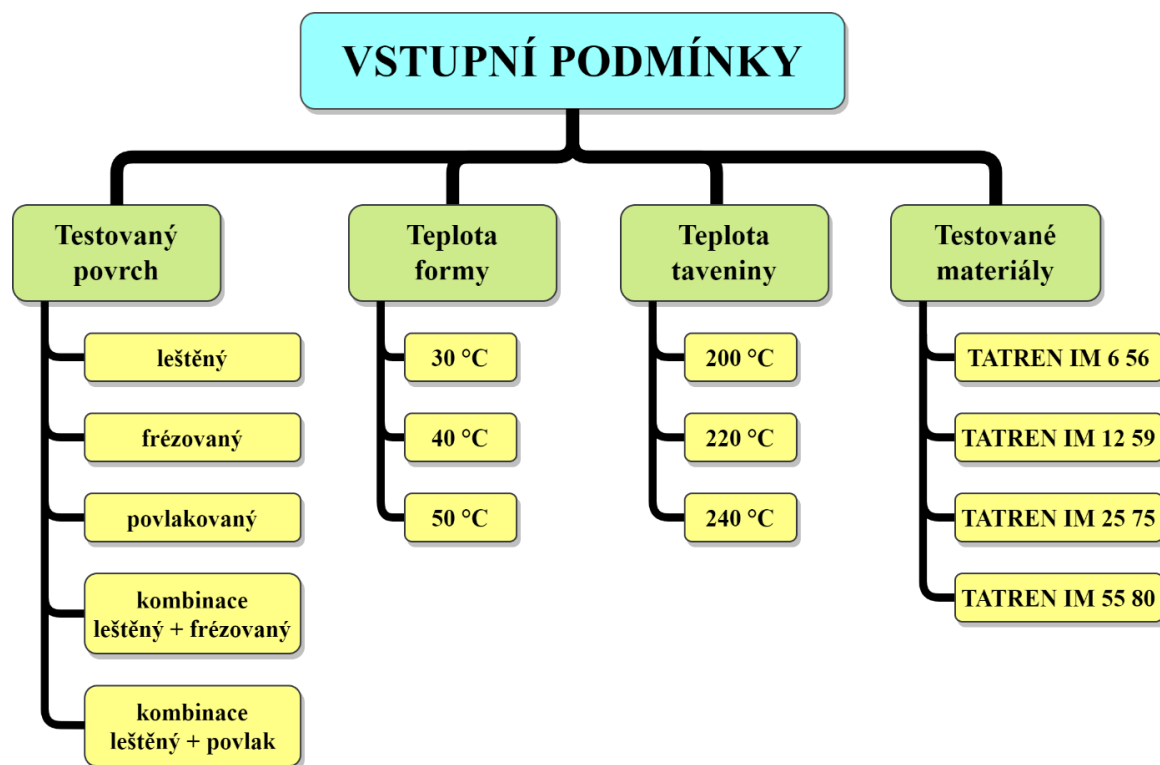
Povlakovaný povrch dutiny formy byl opatřen PACVD nanopovlakem NANOCOMP (TiB_2). Jedná se o povlak od společnosti VÚHŽ a. s., který je určen mimo jiné i pro vstřikovací formy. Dle výrobce se tloušťka povlaku pohybuje v rozmezí 2-3 μm a koeficient tření od 0,4 do 0,5.



Obr. 30. Frézované desky po obrábění

8.2.3 Vstupní podmínky pro výrobu zkušebních těles

Pro přípravu zkušebních těles byly zvoleny 4 skupiny proměnných (Obr. 31.). Jednotlivá zkušební tělesa byla připravena z různých typů materiálu, za použití různých testovacích povrchů a při různém nastavení procesních parametrů. Výsledkem je 180 kombinací vstupních podmínek, přičemž pro každou z těchto kombinací bylo vytvořeno 10 těles.



Obr. 31. Variace zvolených vstupních podmínek pro výrobu zkušebních těles

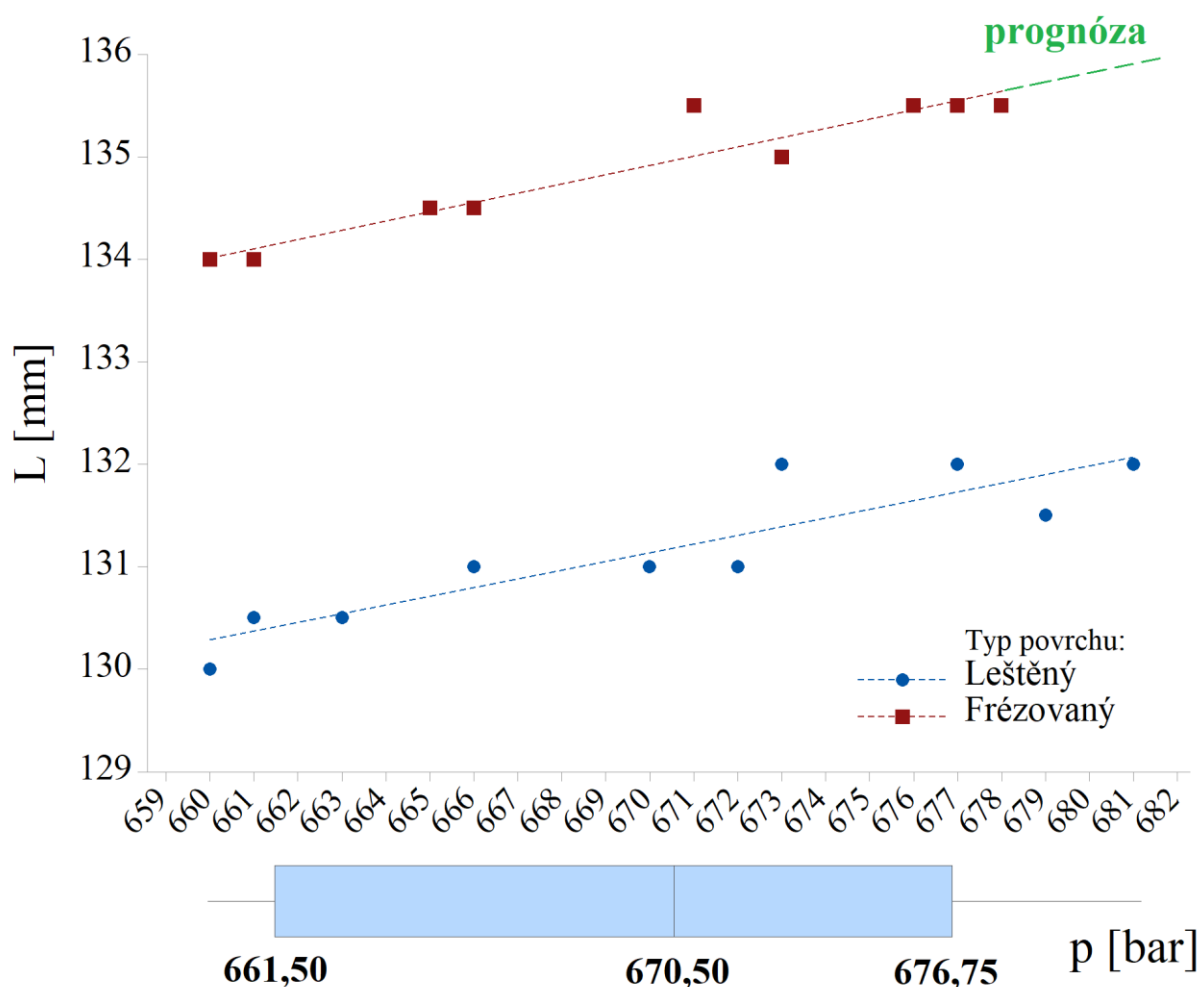
Pro zhotovení testovacích těles použit vstříkovací stroj řízený vstříkovací rychlostí a z tohoto důvodu nebyl vstříkovací tlak nijak variován. S použitím jedné nastavené vstříkovací rychlosti ovšem docházelo ke kolísání tlaku, přičemž i minimální změna tlaku má za následek změnu v délce zatečení. Proto byla u každého zkušebního tělesa zaznamenána i hodnota vstříkovacího 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. Vstříkovací 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 vstříkovací rychlosti byla nastavena na $110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. 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 vstříkovací rychlosti $90 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

8.3 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. 32.). 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.



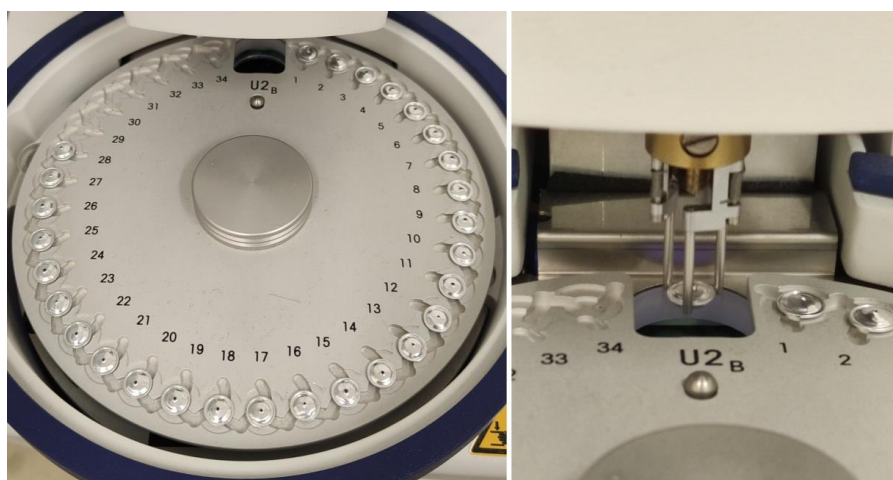
Obr. 32. Porovnání dat zatékavosti při různých podmínkách (příklad)
(Materiál TATREN IM 6 56, Teplota taveniny 200 °C, teplota formy 30 °C)

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. 32) 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.

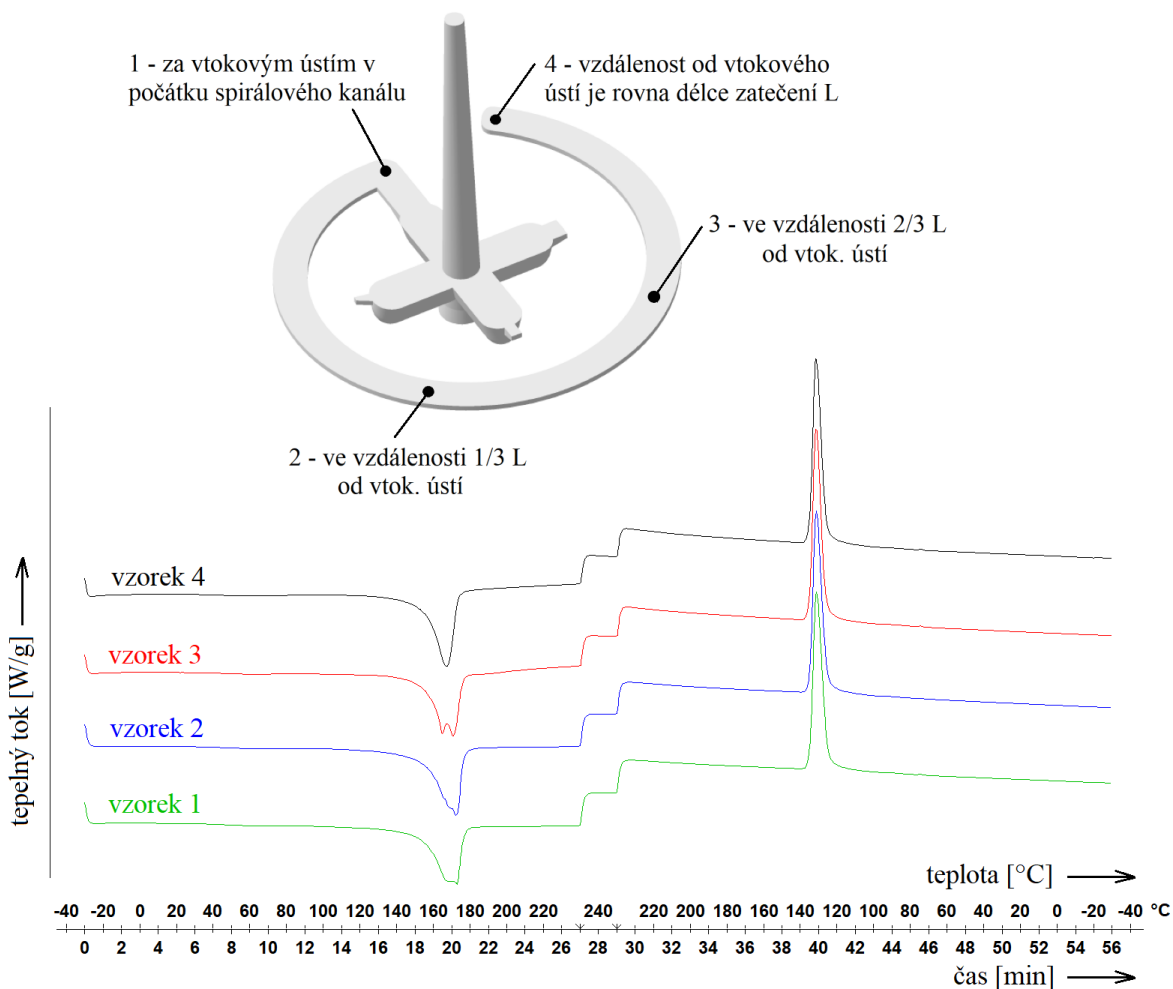
8.4 Diferenciální skenovací kalorimetrie

Jedním z měření provedených u vstřikovaných zkušebních těles bylo hodnocení stupně krystalinity. K tomu slouží metoda diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC). Jedná se o metodu popisující materiálové charakteristiky, při které jsou nádoba se vzorkem (Obr. 33.) a prázdná referenční nádoba podrobeny kontrolovanému ohřevu a ochlazení, přičemž je měřen rozdíl v tepelném toku do nádoby se vzorkem a do referenční nádoby. DSC je vhodné k určování teplot tání, skelných přechodů a krystalizací polymerů a dalších materiálů. [96, 97]

Pro měření byl použit přístroj DSC 1 firmy Mettler Toledo. Jednotlivé vzorky byly váženy na vahách MS105 od stejné firmy. Rychlost ohřevu i chlazení byla nastavena na $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 33. Ukázka nádob se vzorky a přesun k provedení měření



Obr. 34. DSC charakteristika vzorků z různých vzdáleností od vtokového ústí

Vzorky byly připravovány ze zkušebních těles dle Obr. 34, přičemž z každého zkušebního tělesa byly vytvořeny 4 vzorky. Z křivek, které byly měření získány, byla odečtena hodnota entalpie tání měřeného polymeru ΔH_m [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$] při prvním ohřevu. Jednotlivé hodnoty pak byly použity ke stanovení krystalinity dle vztahu:

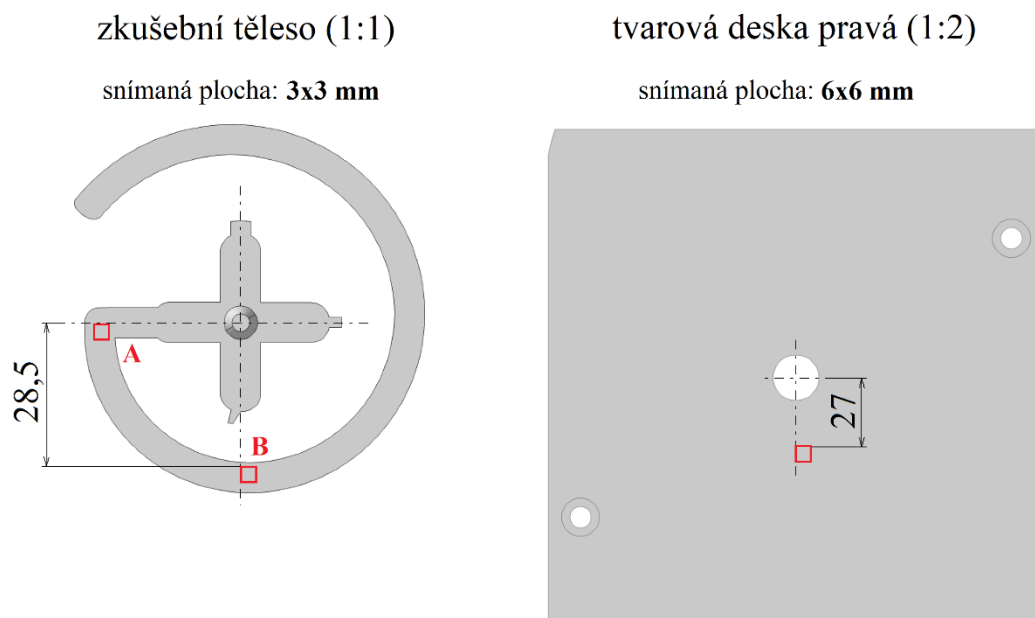
$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^{100}} \cdot 100 \quad (8.1)$$

kde X_c je krystalinita [%] a ΔH_m^{100} je entalpie tání pro 100 % krystalický polypropylen [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$]. Hodnota ΔH_m^{100} je dle současné odborné literatury rovna $207 \pm 5 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$. [98]

8.5 Replikace povrchu

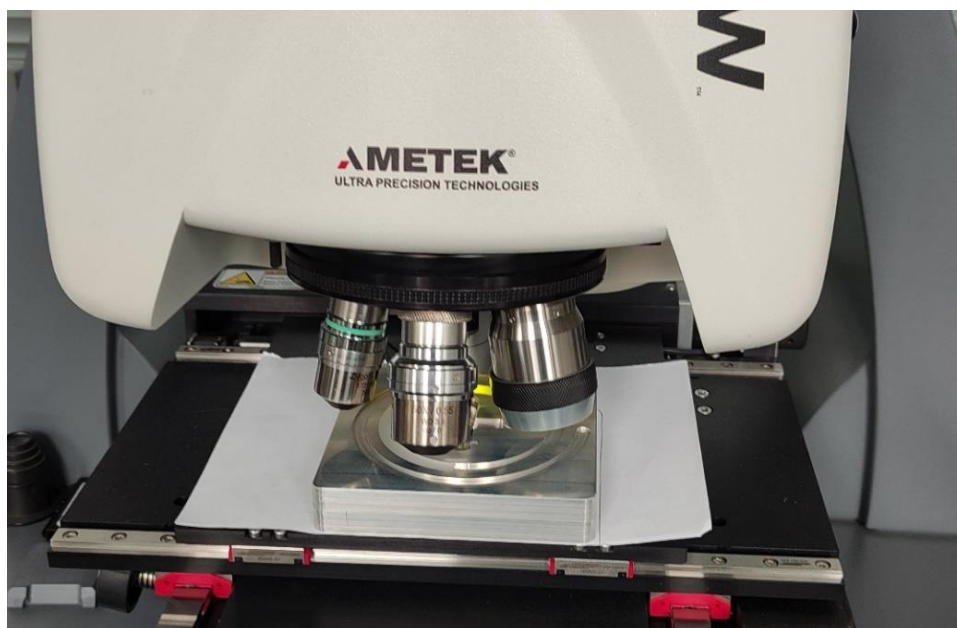
Studie zabývající se problematikou vlivu drsnosti povrchu poukazují na nezanedbatelný vliv uzavřeného vzduchu mezi vstříkovaným polymerem a

povrchem dutiny formy. Z tohoto důvodu byla měřena drsnost povrchu vstříkovaných zkušebních těles a následně porovnávána s naměřenými hodnotami drsnosti dutiny formy. Konkrétní místa měření společně s velikostí snímané plochy jsou uvedena na Obr. 35.



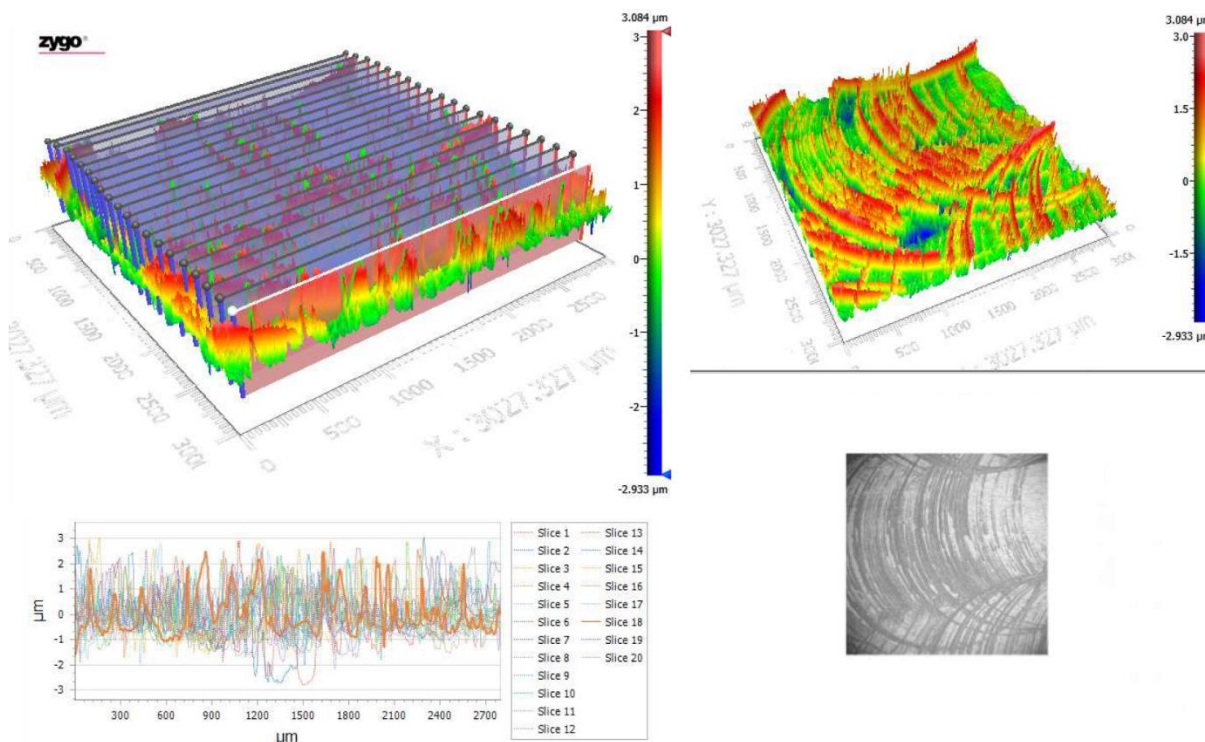
Obr. 35. Vyhodnocovaná oblast na zkušebních tělesech a desce formy

Měření drsnosti povrchu bylo realizováno na profiloměru NewView 8300 od výrobce Zygo (Obr. 36). Jedná se o moderní bezkontaktní zařízení vybavené technologií koherenční skenovací interferometrie (CSI), spadající do optických metod měření povrchu.



Obr. 36. Měření na profiloměru NewView 8300

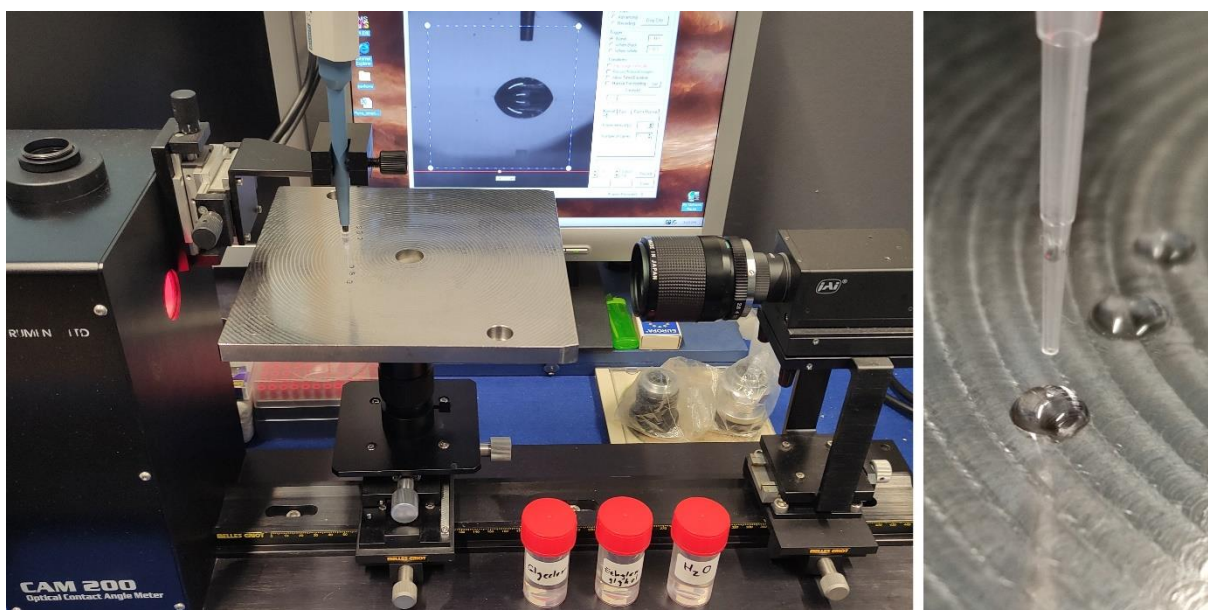
Povrchy zkušebních těles i desek byly nasnímány a následně zpracovány za účelem stanovení hodnot Ra a Rz . Nasnímaný povrch byl rozdělen pomocí 20 pomyslných rovnoběžných řezů (Obr. 37.), čímž vzniklo 20 různých profilů povrchu. Ze vzniklých profilů povrchu byla vyfiltrována vlnitost pomocí odpovídajícího filtru profilu a byly odečteny a statisticky zpracovány potřebné hodnoty.



Obr. 37. Převedení naskenovaného povrchu na profily povrchu

8.6 Měření úhlu smáčení testovacích povrchů

Povrchová energie by mohla dle studií [10-12] hrát určitou roli při zatékavosti polymeru do dutiny formy. Z tohoto důvodu byla měřena velikost úhlu smáčení jednotlivých testovaných desek. Úhel smáčení byl měřen při pokojové teplotě (21 °C) přímou metodou na tvárnících (Obr. 28, pozice 6), které díky jejich tvaru umožnily jeho snadné odečtení. Povrch desek byl čištěn technickým lihem, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Měření bylo realizováno na přístroji KSV CAM 200 (Obr. 38.). Jedná se o modulární počítačem řízený přístroj, který umožňuje záznam kapky testovací kapaliny na povrchu desky pomocí kamery a následné vyhodnocení obrazu kapky. K vyhodnocení byla použita Young-Laplaceova metoda, která je z dostupných metod teoreticky nejpřesnější.



Obr. 38. Měření úhlů smáčení frézované desky

Experiment byl proveden s použitím tří kapalin (destilovaná voda, glycerol a ethylenglykol), jejichž vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 3. Hodnota povrchové energie jednotlivých testovacích povrchů byla stanovena z naměřených úhlů smáčení a ze známých hodnot povrchového napětí testovacích kapalin a jejich disperzních a polárních složek. Vyhodnocení proběhlo pomocí metody Owens-Wendt-Rabel-Kaelble (OWRK).

Tab. 3. Kapaliny použité při měření úhlu smáčení [99]

Kapalina	Povrchové napětí γ_L [mJ·m ⁻²]	Disperzní složka γ_L^d [mJ·m ⁻²]	Polární složka γ_L^p [mJ·m ⁻²]
Destilovaná voda	72,8	21,8	51
Glycerol	63,4	37	26,4
Ethylen glykol	48,2	29	26,4

Metoda OWRK je nejčastěji používanou nepřímou metodou, která umožňuje stanovení povrchové energie pevného skupenství γ_s . Aby bylo metodu OWRK možné použít, je zapotřebí použití minimálně dvou testovacích kapalin. Použití více kapalin má za následek zpřesnění měření. Dle této metody je povrchová energie pevného i kapalného skupenství rozdělena na disperzní a polární složku:

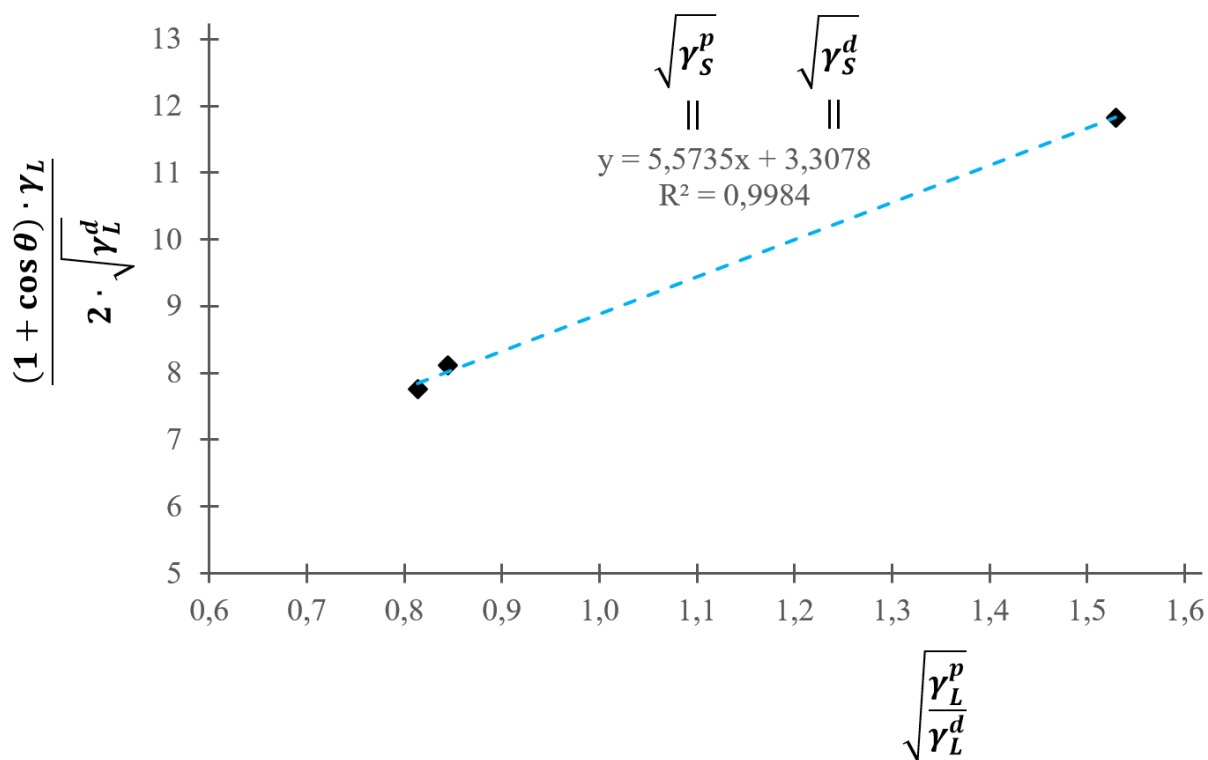
$$\gamma_L = \gamma_L^d + \gamma_L^p \quad (8.2)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (8.3)$$

Vztah pro určení disperzní a polární složky povrchové energie pevného skupenství vznikne implementací vztahů 8.2 a 8.3 do Fowkesovy rovnice a po úpravách má podobu: [100, 101]

$$\frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot \frac{\gamma_L}{\sqrt{\gamma_L^d}} = \sqrt{\gamma_S^d} + \sqrt{\gamma_S^p} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_L^p}{\gamma_L^d}} \quad (8.4)$$

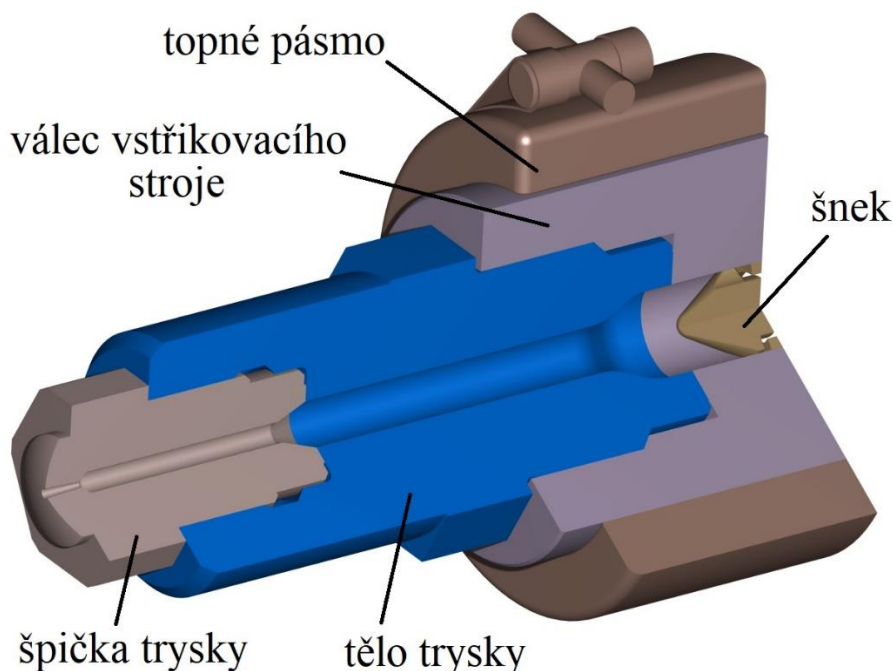
Po dosažení hodnot do vztahu 8.4 pro každou kapalinu byl sestaven graf a byla provedena lineární regrese získaných hodnot (Obr. 39.). Po vypočtení hodnot disperzní a polární složky povrchové energie desky (γ_S^d a γ_S^p) byla stanovena hodnota celkové povrchové energie testované desky γ_S dosazením do vztahu 8.3. Tento postup byl opakován pro všechny testovací povrchy dutiny formy.



Obr. 39. Stanovení složek povrchové energie lineární regresi (leštěná deska)

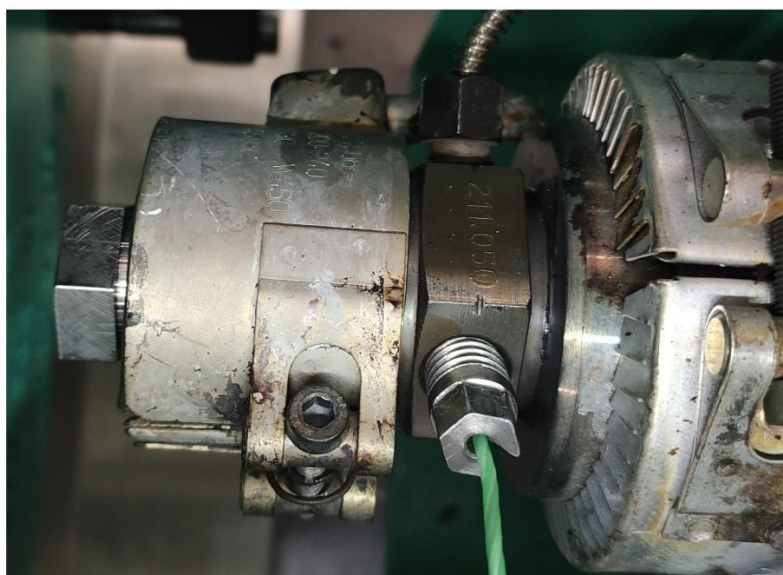
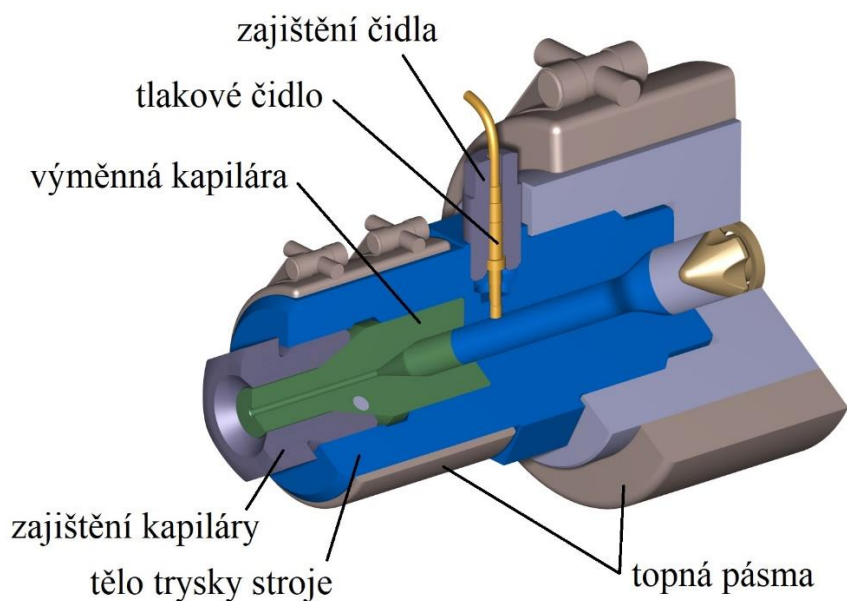
8.7 Konstrukční úprava trysky vstřikovacího stroje

Předmětem disertační práce bylo rovněž provedení konstrukčního návrhu úpravy trysky vstřikovacího stroje Allrounder 170 U 150-30 (Obr. 40.). Cílem úpravy bylo vytvoření možnosti měřit tokové charakteristiky materiálu při podmínkách vstřikování. Dalším cílem bylo ověření přítomnosti skluzu na stěně při použití různých vstřikovacích rychlostí.



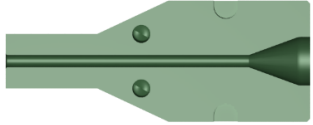
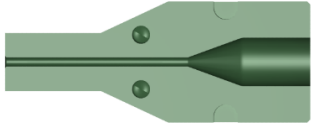
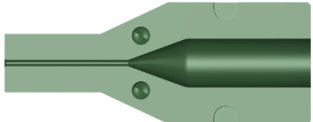
Obr. 40. 3D model sestavy standardní trysky stroje Allrounder 170 U 150-30

Postupně byly vytvářeny konstrukční návrhy v programu Catia V5R19, z nichž 4. návrh byl úspěšně realizován (Obr. 41.). Původní tělo trysky vstřikovacího stroje bylo modifikováno, aby bylo možné vkládat výměnné kapiláry. Kanály kapilár byly vyrobeny technologií frézování, přičemž všechny 3 byly obráběny za stejných rezných podmínek. Tyto kapiláry se liší průměrem i délkou (Tab. 4.), ovšem poměr jejich délky a průměru byl konstantní. Výměnné kapiláry a pojistné prvky byly vyrobeny z materiálu 1.1730. Návrh rovněž obsahuje topná pásma a teplotní čidlo, jež byly součástí původní trysky. Řešení bylo koncipováno tak, aby bylo možné kapiláry měnit bez kompletní demontáže trysky stroje. Při výměně kapiláry je nutné pouze odšroubování pojistné matice a vysunutí kapiláry z trysky stroje. Kapiláry byly navrženy ze dvou kusů, a to jak z technologického hlediska, tak pro usnadnění čištění. Obě poloviny kapiláry jsou vystředěny pomocí válcových kolíků a pozice kapiláry je ustavena pomocí šikmé dosedací plochy.

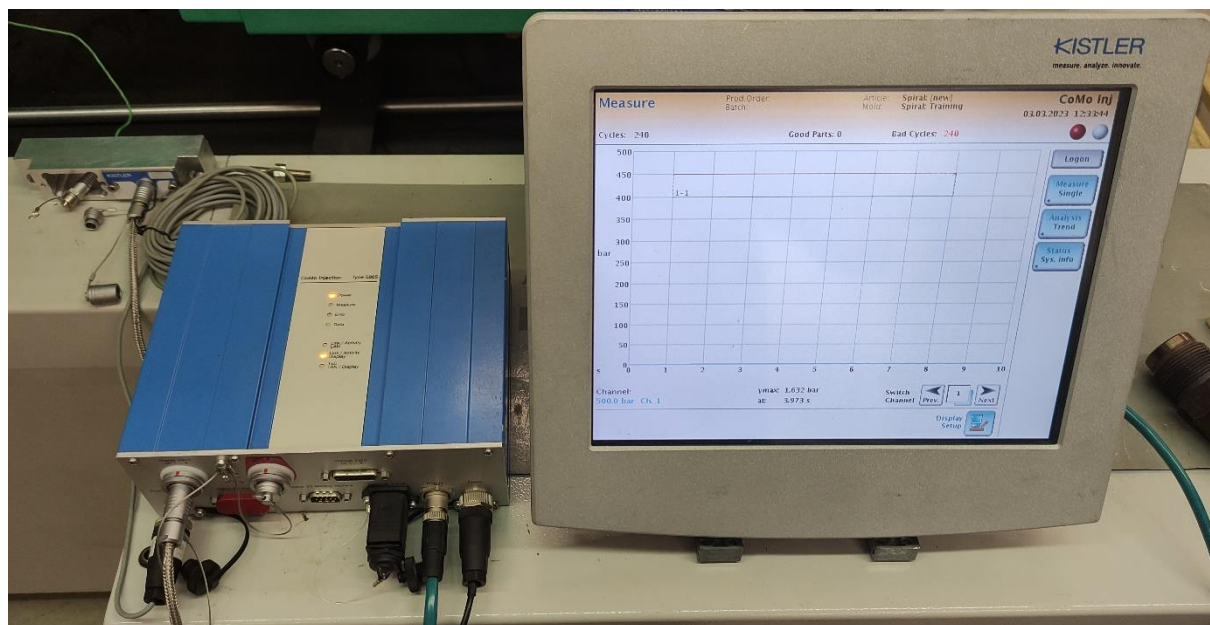


Obr. 41. 3D model sestavy finálního návrhu (nahore) a jeho realizace (dole)

Tab. 4. Rozměry a označení výměnných kapilár

Kapilára	Označení	L_K [mm]	D_K [mm]	Poměr L_K / D_K [1]
	K20	20	1	20
	K30	30	1,5	
	K40	40	2	

Měření hodnot tlaku nebylo možné provádět pouhým odečtením ze záznamů stroje, a proto bylo použito tlakové čidlo. Jednalo se o tlakové čidlo od firmy Kistler, typ 6189A o průměru 2,5 mm a rozsahu 0 – 2000 bar. Čidlo bylo připojeno k jednotce CoMo, typ 5865 od stejného výrobce (Obr. 42.). Technický list použitého čidla a monitorovací jednotky jsou součástí přílohy práce.



Obr. 42. Zapojení monitorovacího systému CoMo

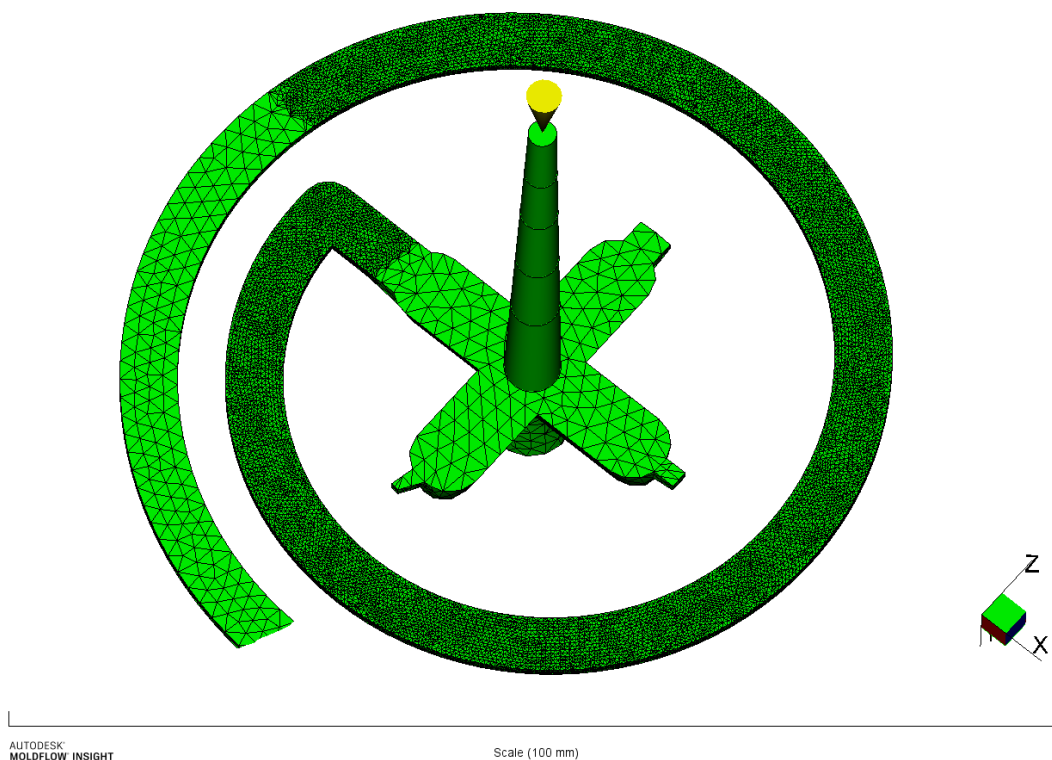
Experiment probíhal za použití vstřikovacích rychlostí 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 a 160 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato rychlost byla zároveň rychlostí pohybu pístu v , která byla použita pro výpočet objemového průtoku \dot{Q} . Dalším parametrem byl průměr pístu, který je roven průměru šneku D_s vstřikovacího stroje, tedy 15 mm. Objemový průtok lze vyjádřit následovně:

$$\dot{Q} = \frac{\pi D_s^2}{4} \cdot v \quad (8.5)$$

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí vztahů uvedených v kap. 6.1. Dále byla provedena korekce rychlostí smykové deformace a spočítány hodnoty smykové viskozity. Výsledkem jsou tokové křivky, které by se při nepřítomnosti skluzu na stěně měly prolínat.

8.8 Toková analýza

Pro ověření výsledků experimentální části byla provedena analýza plnění dutiny formy. K řešení analýzy byl použit software Autodesk Moldflow Insight 2023. Na základě 3D modelu negativu dutiny testovací vstřikovací formy byla vygenerována 3D síť o délce strany elementu 1,4 mm. Vzniklá síť byla dodatečně zpřesněna v oblasti předpokládaného toku polymeru, mimo vtokový systém (Obr. 43.).



Obr. 43. Vygenerovaná 3D síť v oblasti toku polymeru

Nastavené vstupní procesní parametry odpovídají parametrům při reálném experimentu. Teplota taveniny byla nastavena na 220 °C, teplota formy 40 °C, vstřikovací tlak 67 MPa (670 bar) a dotlak tvořil 80 % vstřikovacího tlaku po dobu 1 s. Analýza byla řešena pro plnění dutiny formy a dotlak, jelikož fáze chlazení výrobku ve formě je z hlediska zatékavosti polymeru zanedbatelná.

Použitý vstřikovací stroj Allrounder 470 E 1000-290 není součástí databáze programu a byl nahrazen strojem o stejných parametrech od stejné firmy a liší se pouze typ pohonu. Materiál TATREN 12 59 použitý při experimentu rovněž není součástí databáze programu. Z tohoto důvodu byl zvolen materiál s podobnými vlastnostmi a stejným ITT a následně byl modifikován dle známých hodnot pro materiál TATREN 12 59.

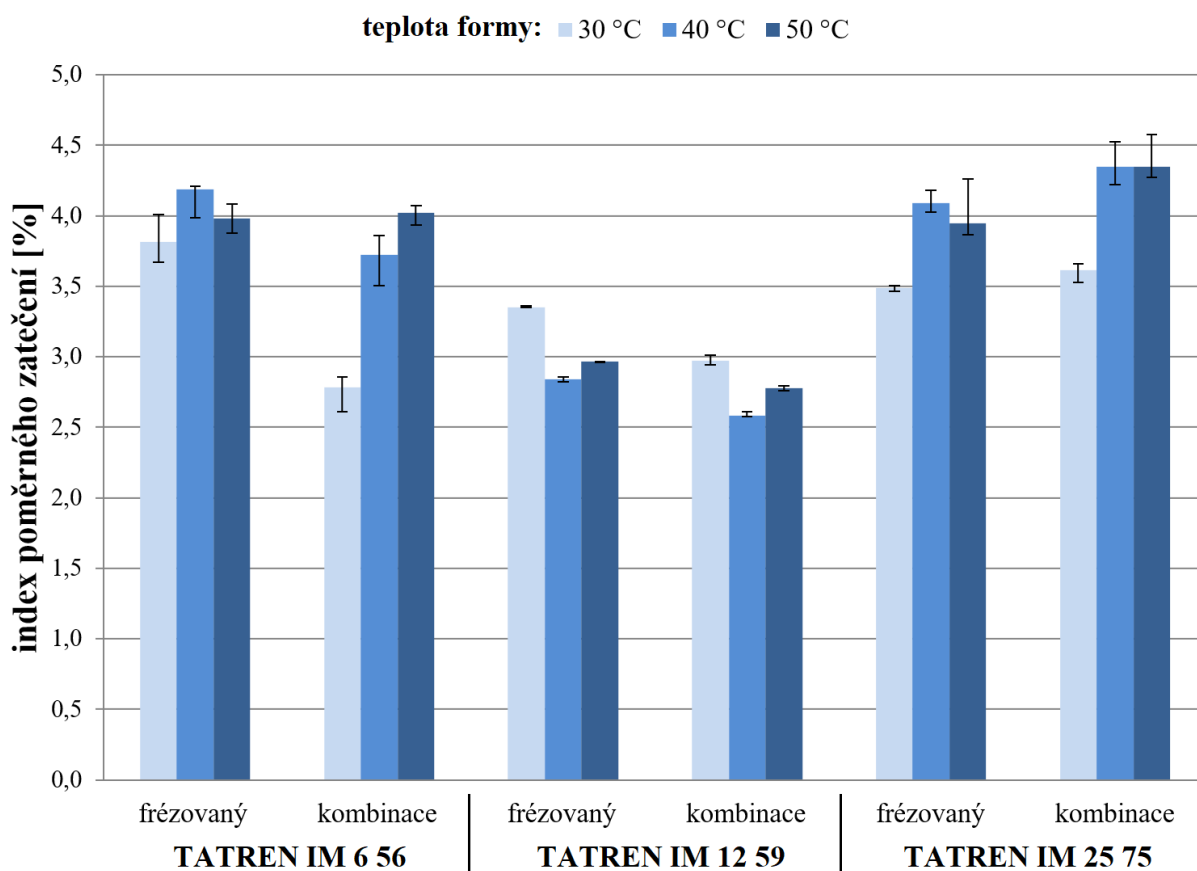
9. HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

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 práce.

9.1 Výsledky zatékavosti polymeru

Zatékavost polymeru byla vyhodnocována dle kap. 8.3. 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.

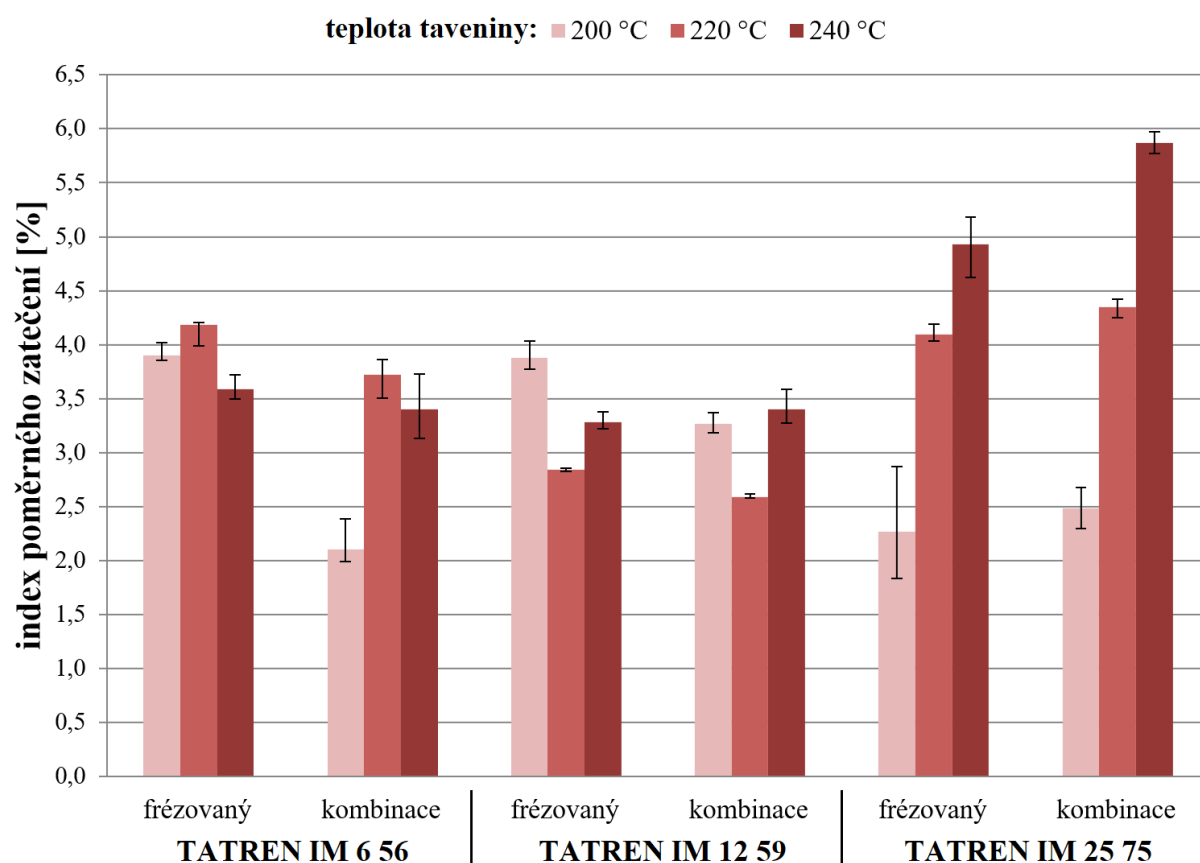
Prvním výsledkem (Obr. 44.) je vyhodnocení hodnot zatečení při použití frézovaného povrchu (R_a 0,59 μm) a kombinovaného povrchu (57 % frézovaný, 43 % leštěný povrch). Drsnost leštěného povrchu byla R_a 0,06 μm .



Obr. 44. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty formy, 3 testovací materiály, teplota taveniny 220 °C)

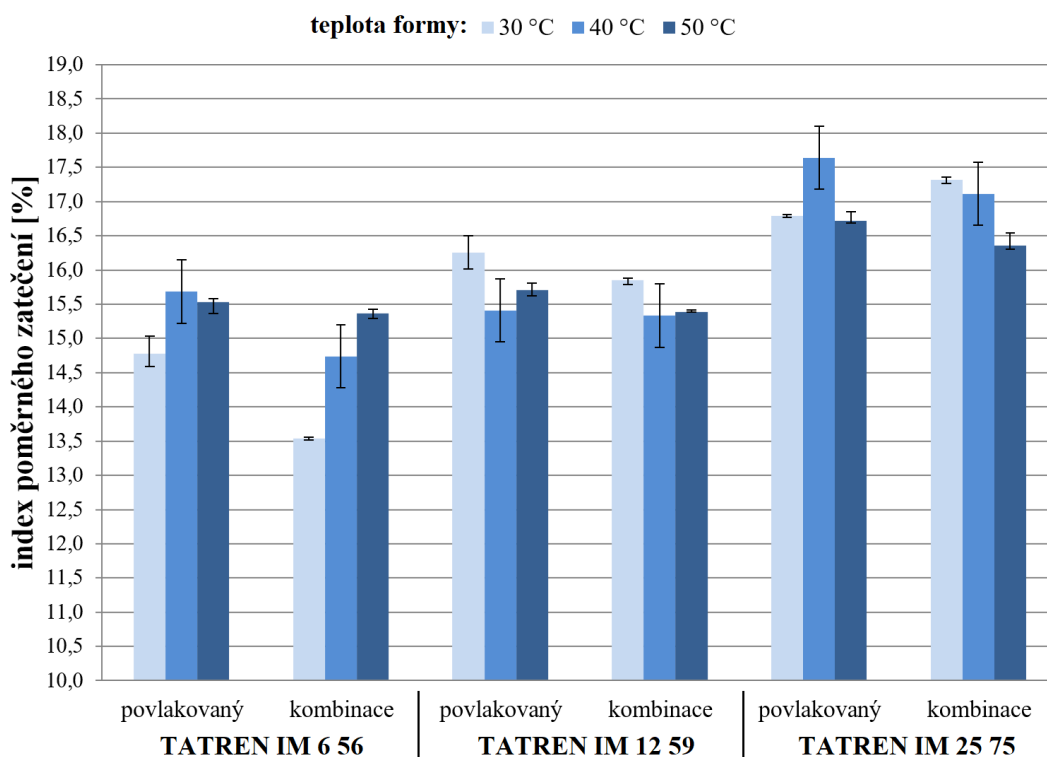
V grafu jsou vyneseny hodnoty IPZ materiálů TATREN IM 6 56, TATREN IM 12 59 a TATREN IM 25 75 pro teploty formy 30, 40 a 50 °C. Teplota taveniny byla ve všech případech 220 °C. Z výsledků je patrné, že ve všech případech došlo ke zvýšení hodnoty zatečení polymeru oproti leštěnému povrchu, a to bez ohledu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

Na Obr. 45. 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.

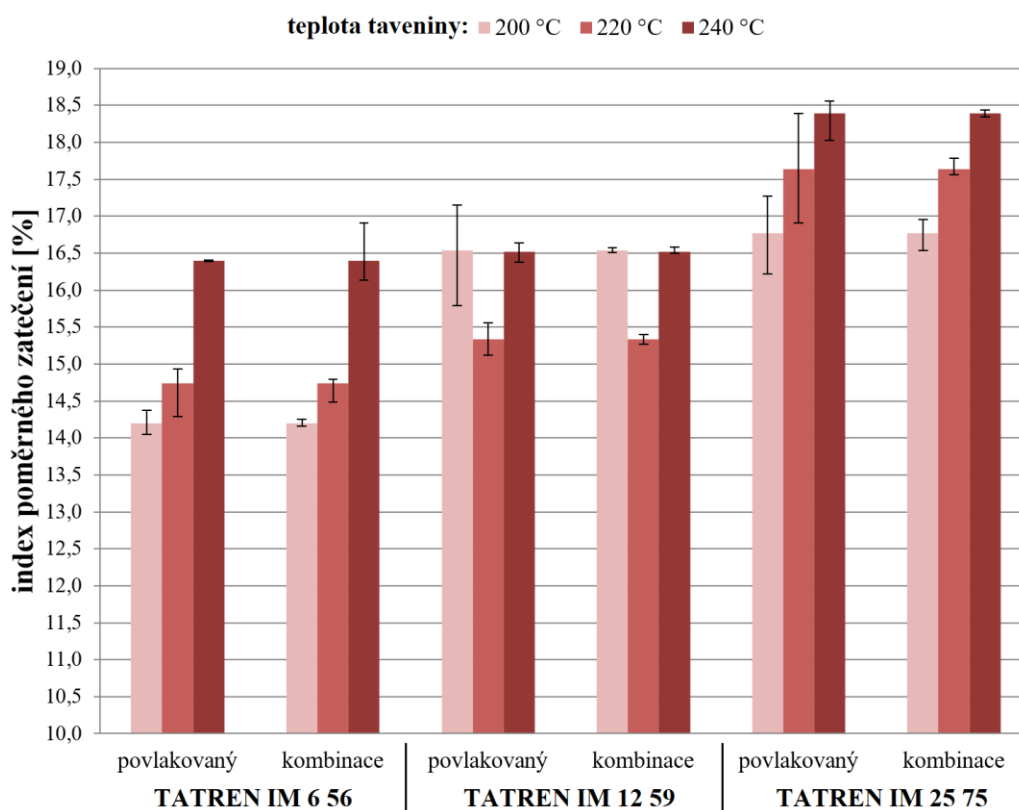


Obr. 45. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty taveniny, 3 testovací materiály, teplota formy 40 °C)

Hodnota IPZ byla vyhodnocena i pro povlakovanou dutinu formy. V následujících grafech je vyobrazeno porovnání délky zatečení při použití povlakovaného povrchu a kombinovaného povrchu (57 % povlak, 43 % leštěný povrch). V prvním grafu (Obr. 46.) je při konstantní teplotě taveniny (220 °C) měněna teplota formy (30, 40 a 50 °C), ve druhém grafu je konstantní teplota formy (40 °C) při změně teploty taveniny (200, 220 a 240 °C). V obou případech došlo k výraznému navýšení hodnoty zatečení s použitím povlaku.



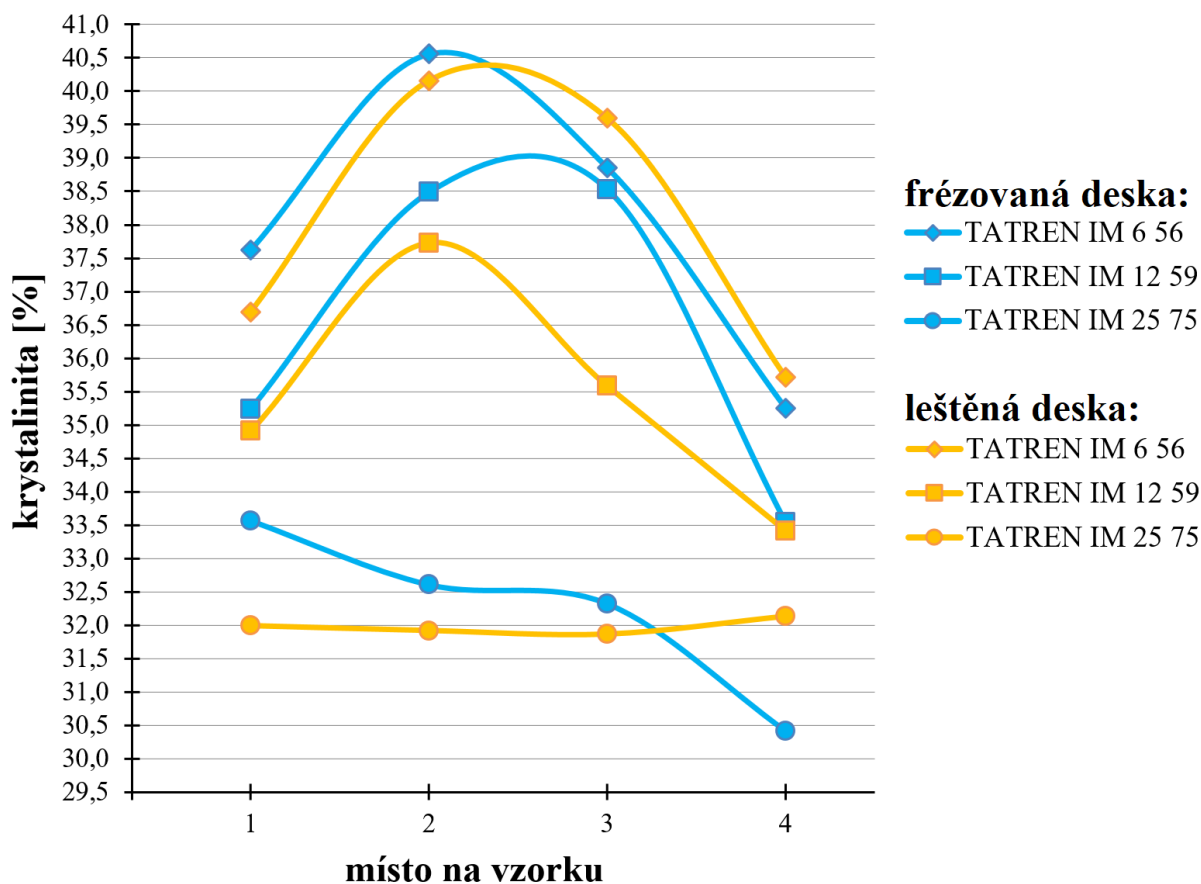
Obr. 46. Rozdíl v zatečení leštěný vs. povlakovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty formy, 3 testovací materiály, teplota taveniny 220 °C)



Obr. 47. Rozdíl v zatečení leštěný vs. povlakovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty taveniny, 3 testovací materiály, teplota formy 40 °C)

9.2 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. 48. 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.

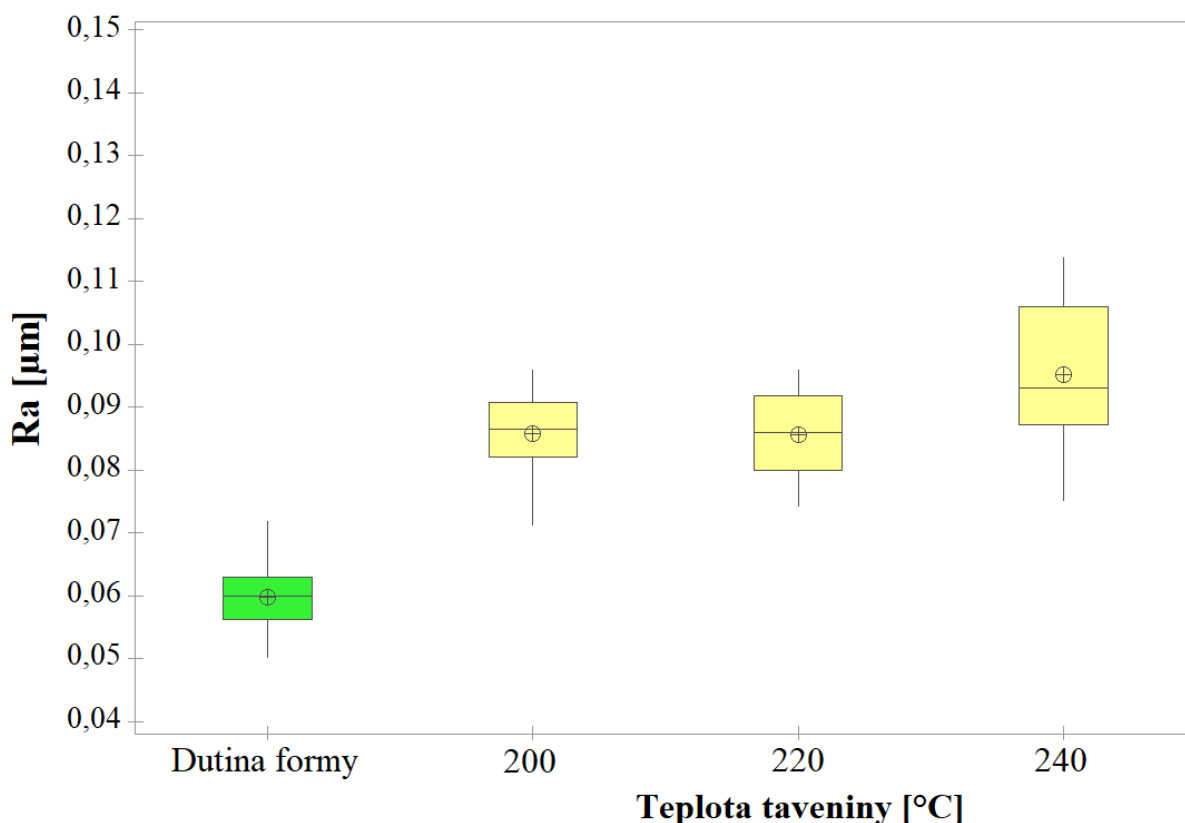


Obr. 48. Výsledky DSC při prvním tavení, frézovaná vs. leštěná deska

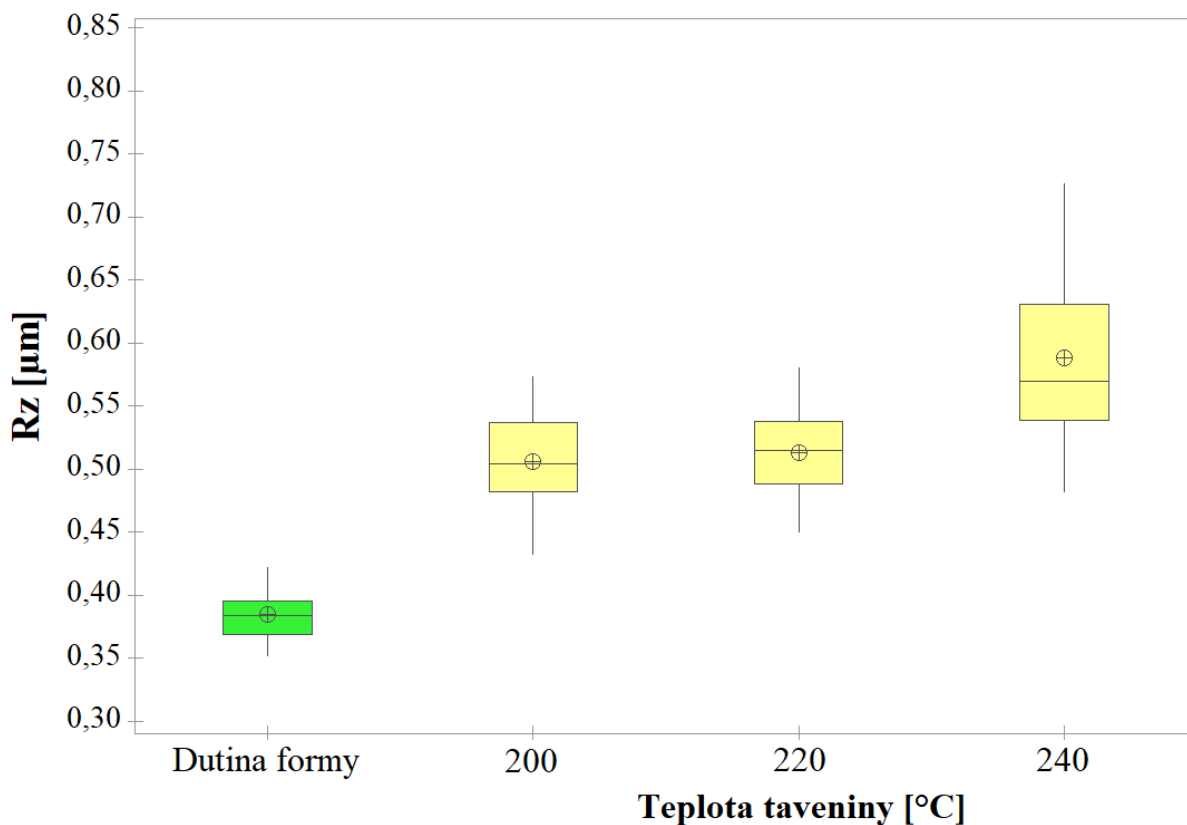
9.3 Výsledky replikace povrchu dutiny formy

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 (Ra a Rz) 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 materiálů TATREN IM 6 56 a TATREN IM 12 59.

Na Obr. 49. a Obr. 50 jsou uvedeny výsledky drsnosti povrchu Ra a Rz 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. 49. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)

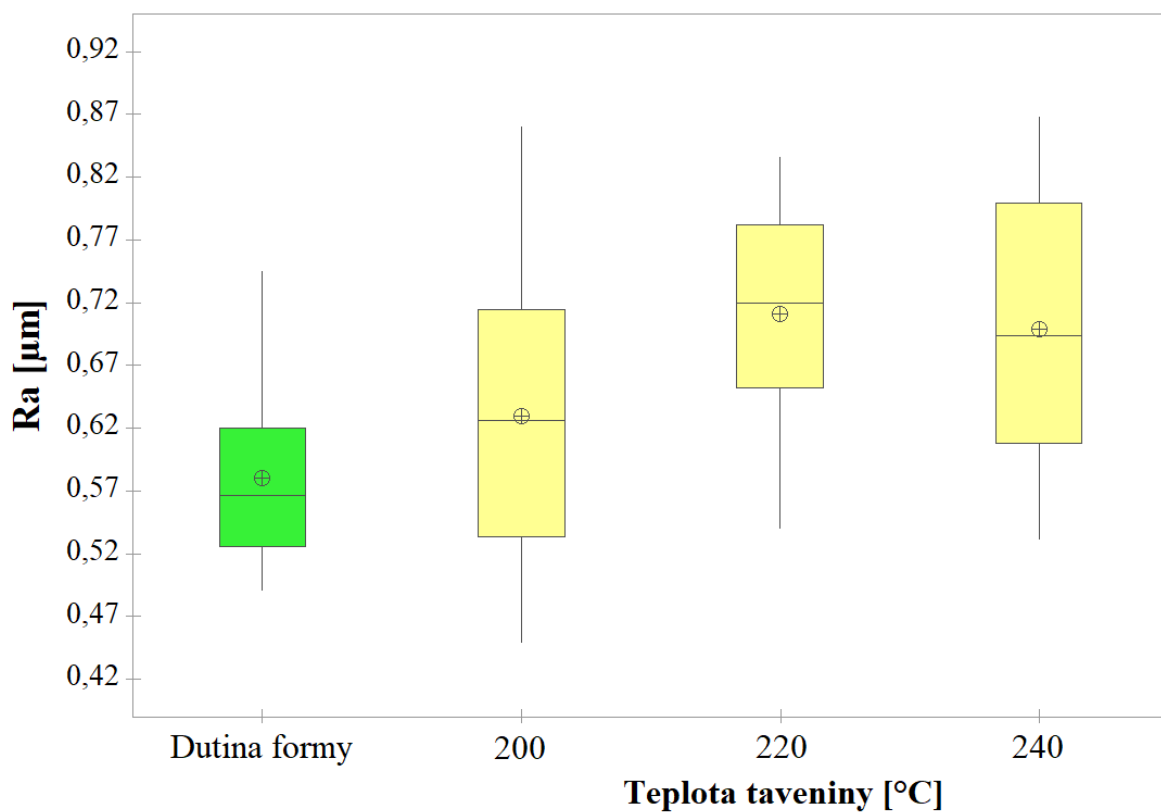


Obr. 50. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)

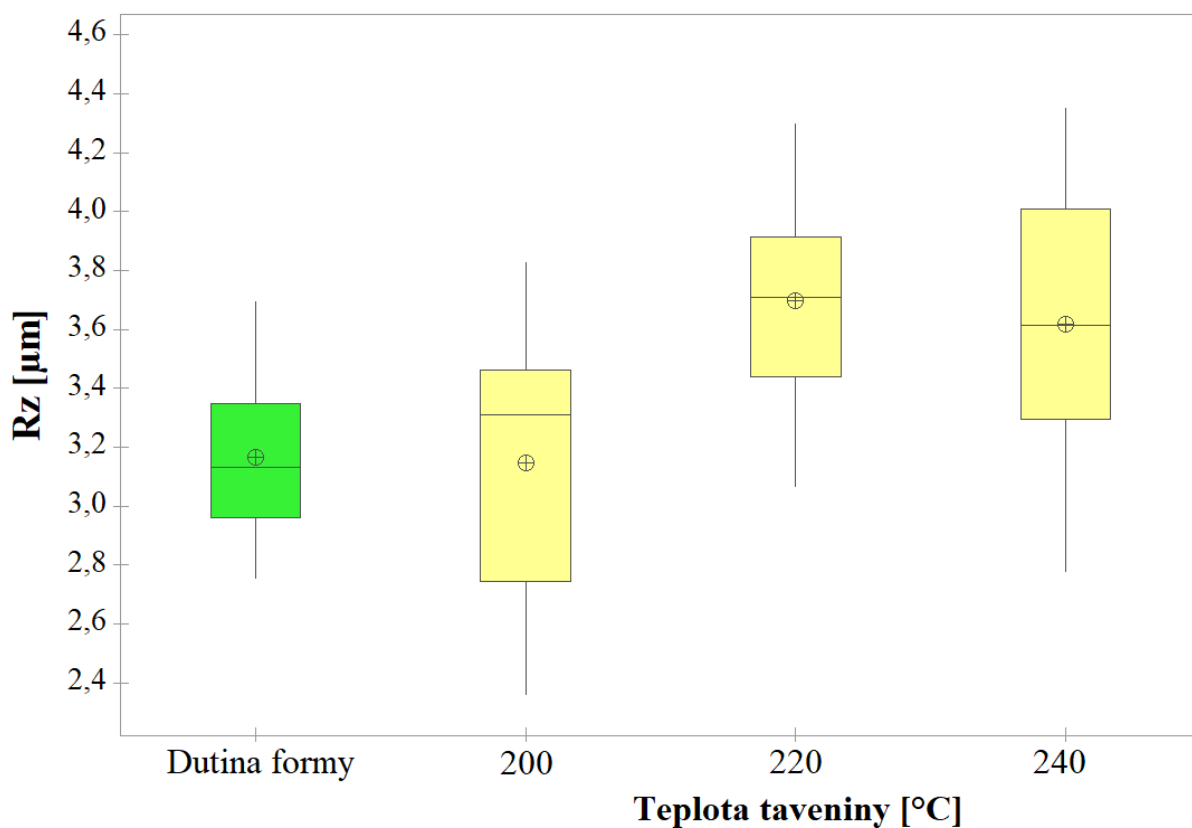
Na Obr. 51. a Obr. 52 jsou uvedeny výsledky drsnosti povrchu Ra a Rz frézovaného testovacího povrchu za použití stejného materiálu a vstupních podmínek jako v předchozím případě. Výsledky opět ukazují, že došlo k negativní replikaci povrchu jako v případě leštěného povrchu, ačkoli v případě frézovaného povrchu je rozdíl v drsnosti relativně velmi malý.

Výsledky měření drsnosti povrchu Ra a Rz pro materiál TATREN IM 12 59 jsou zobrazeny na Obr. 53. až Obr. 56. V případě leštěné i frézované desky je možné vidět obdobný trend jako v případě prvního materiálu.

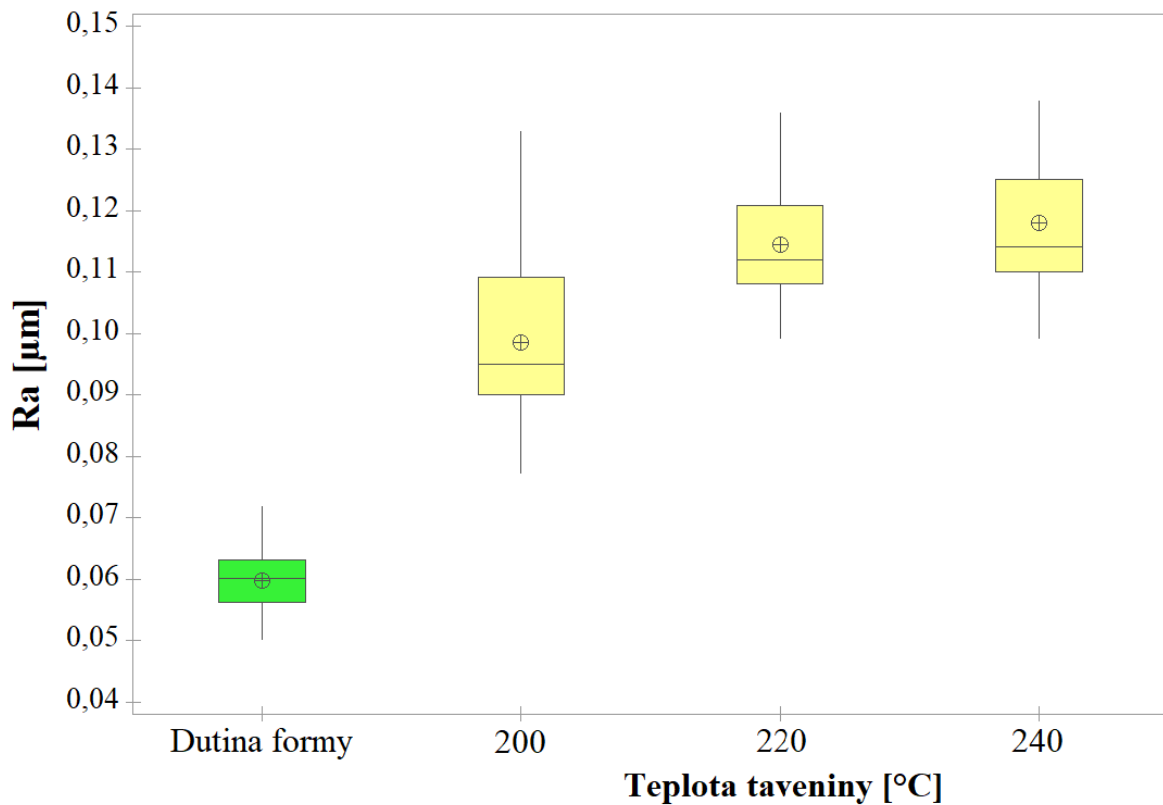
Vliv změny teploty formy (30, 40 a 50 °C) na drsnost povrchu zkušebních těles je uveden na Obr. 57. až Obr. 60. Jedná se o výsledky pro zkušební tělesa z materiálu TATREN IM 6 56 při teplotě taveniny 200 °C. Z grafů lze pozorovat negativní replikaci povrchu, avšak změna teploty povrchu formy neměla žádný vliv na drsnost povrchu zkušebních těles.



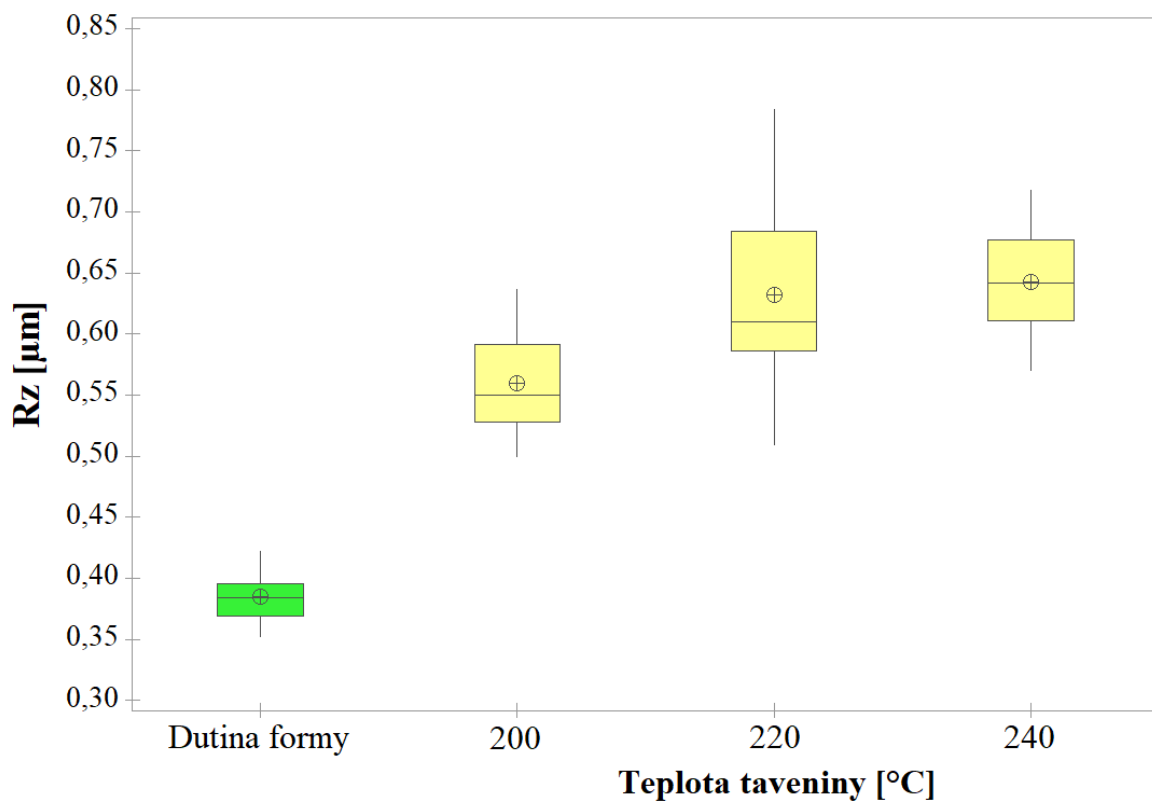
Obr. 51. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)



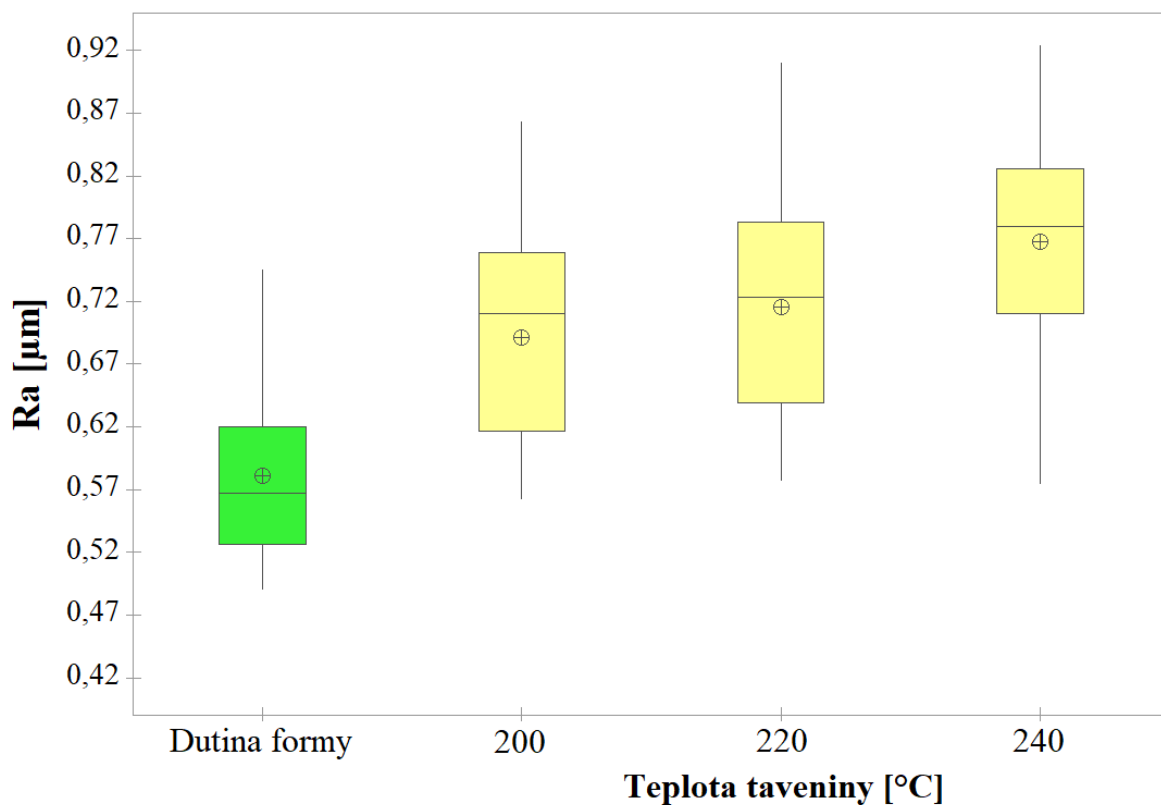
Obr. 52. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)



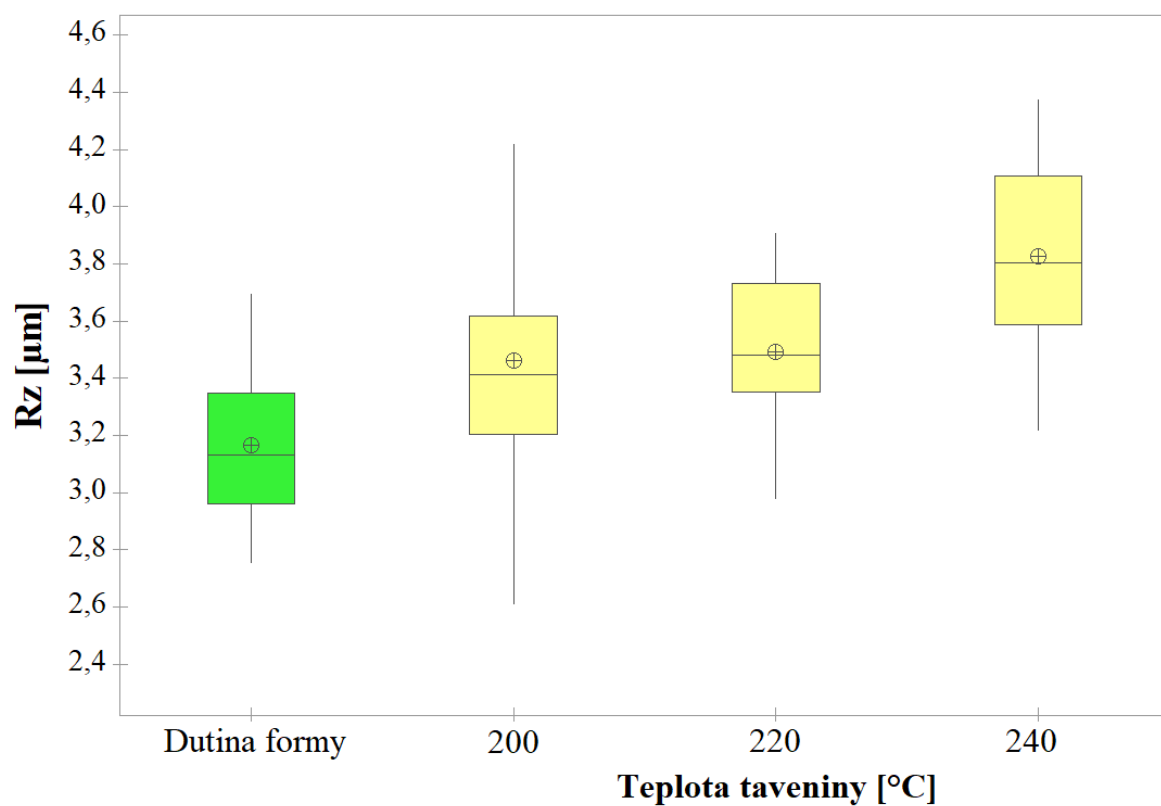
Obr. 53. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59)



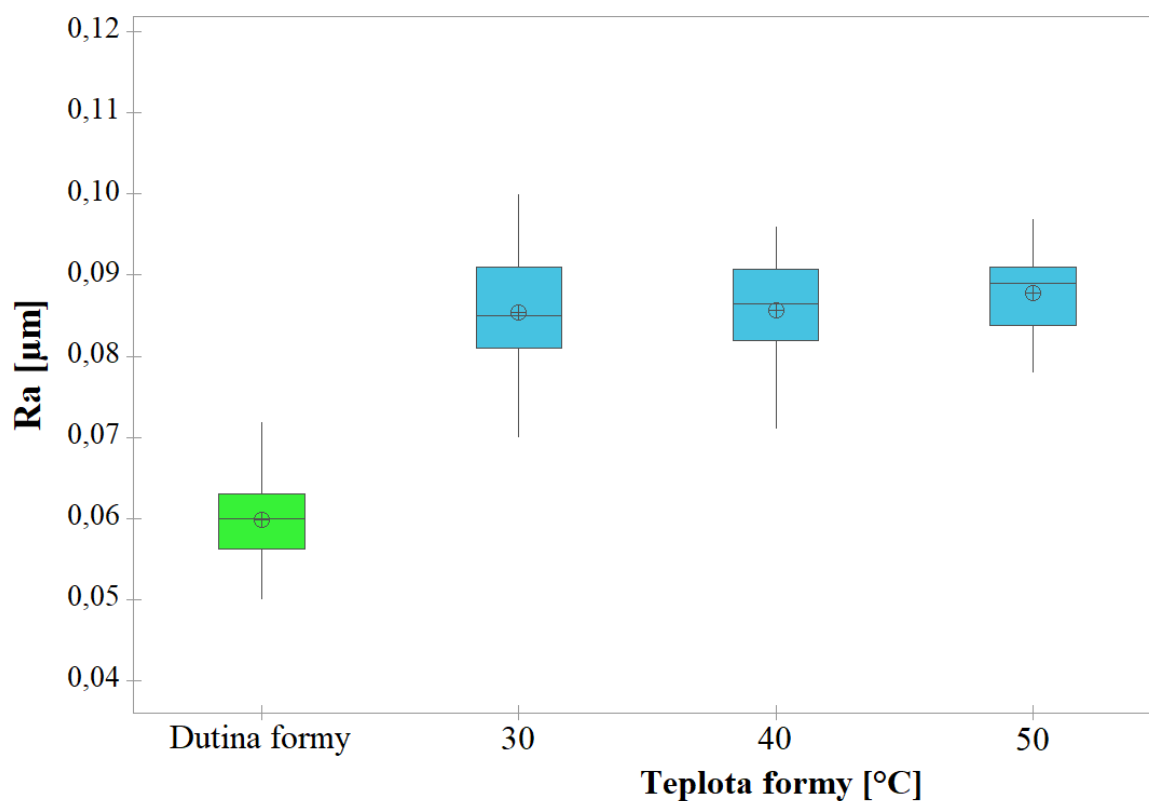
Obr. 54. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59)



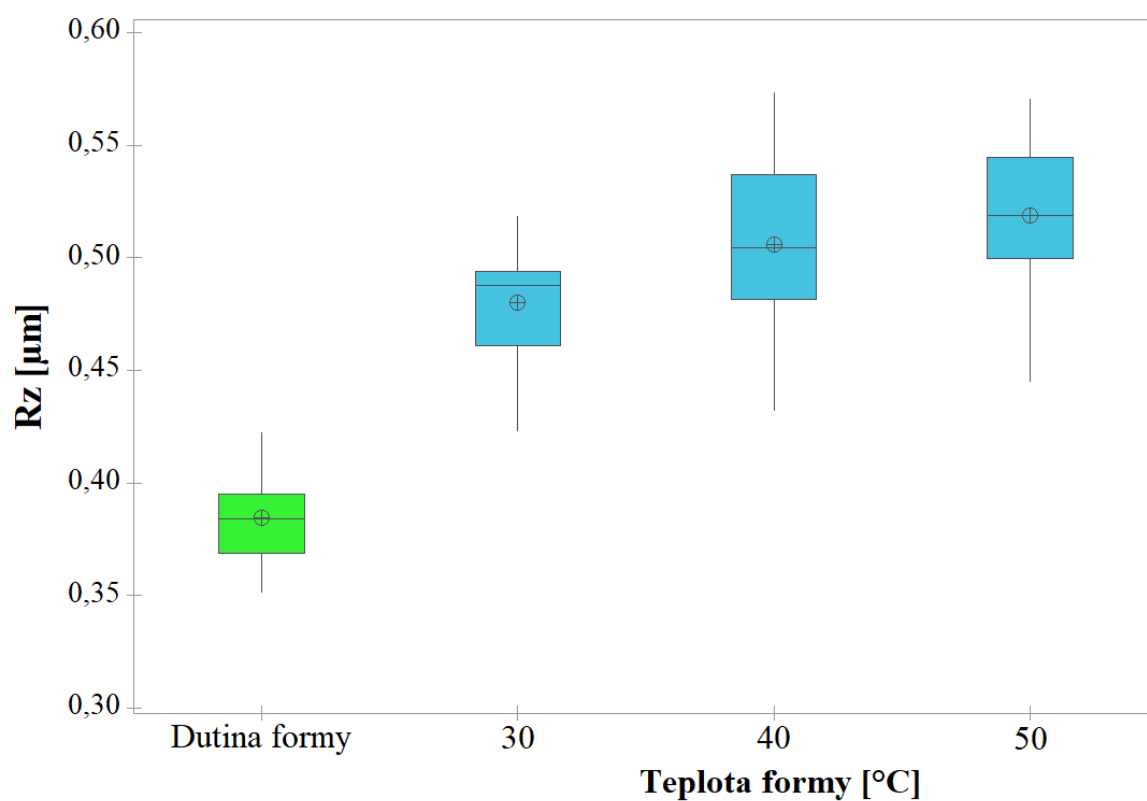
Obr. 55. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59)



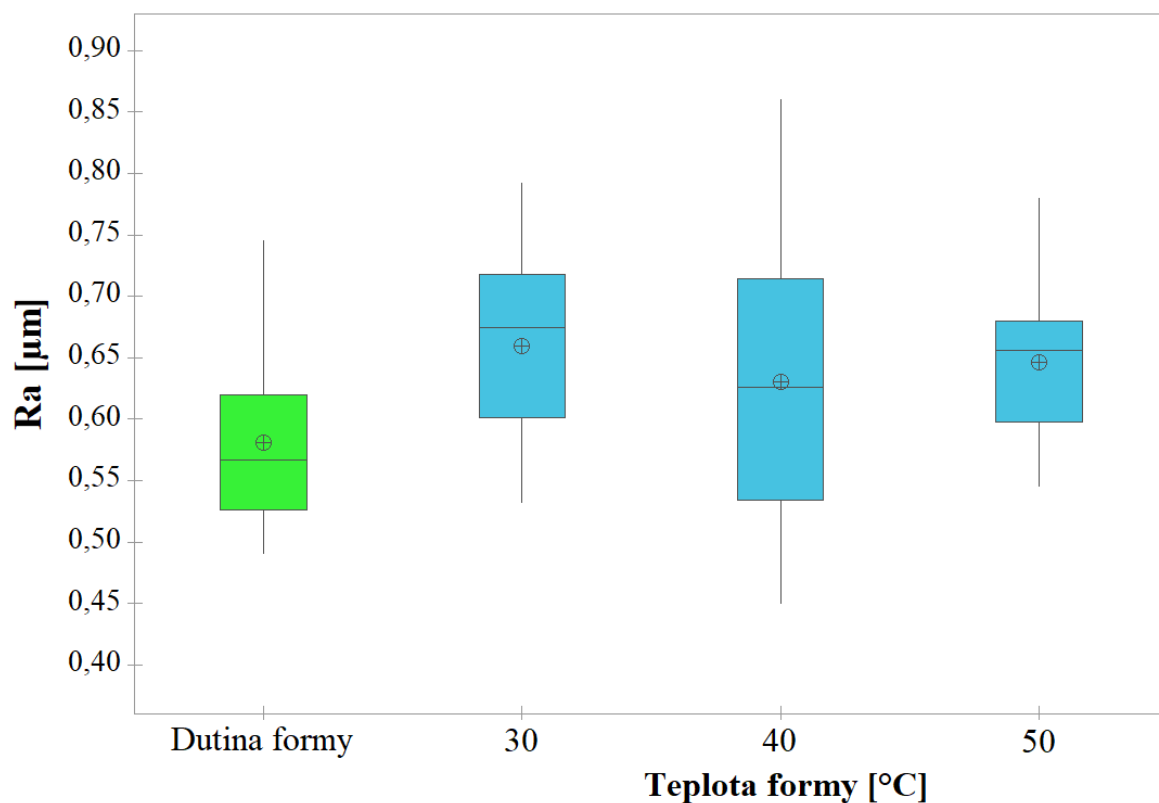
Obr. 56. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59)



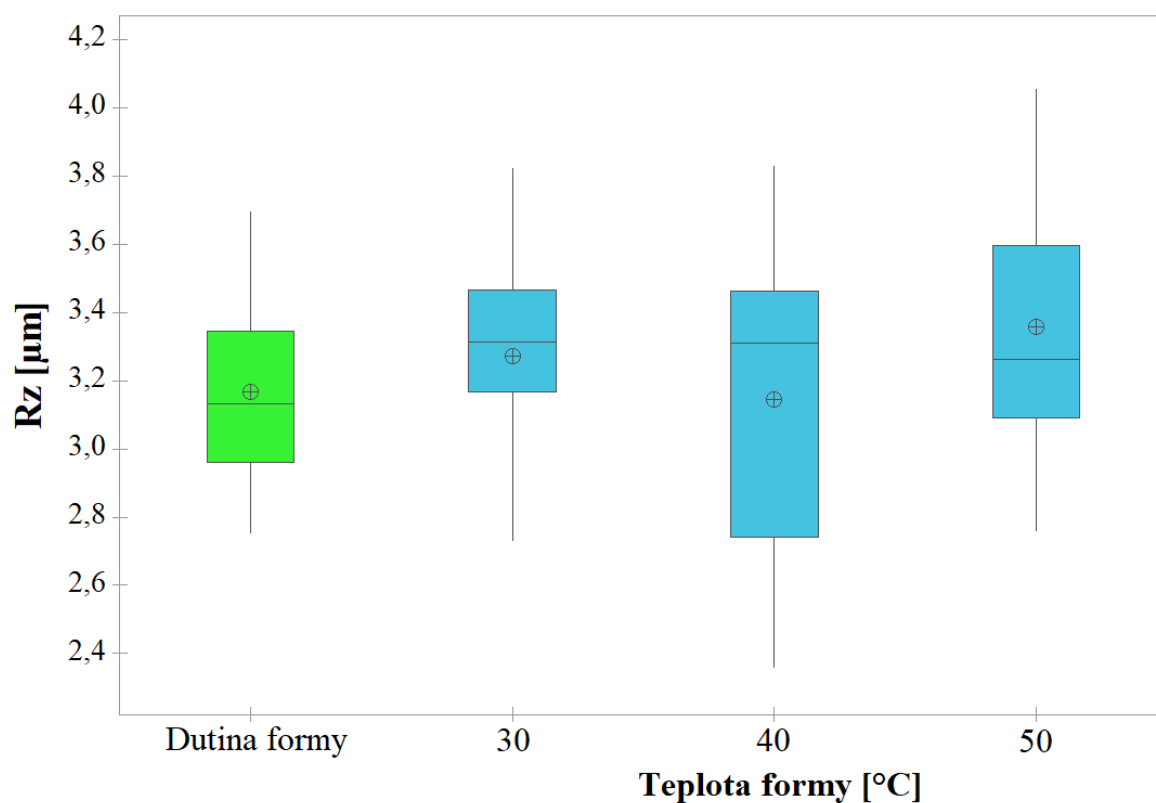
Obr. 57. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56)



Obr. 58. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56)



Obr. 59. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56)

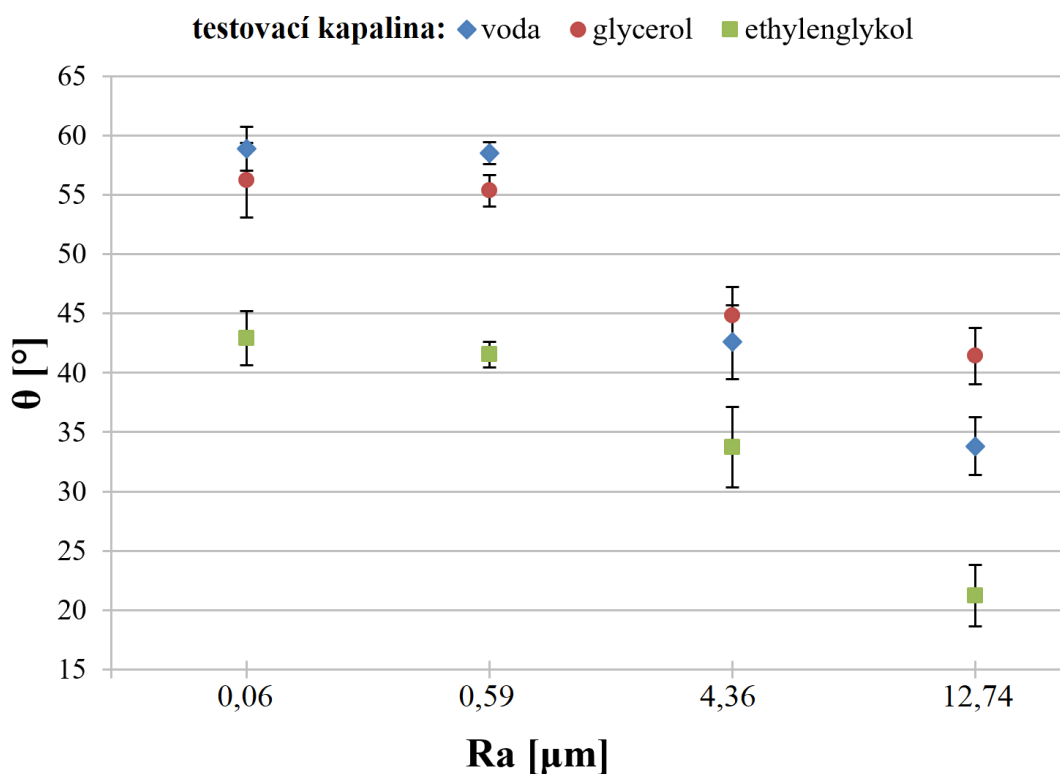


Obr. 60. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56)

9.4 Výsledky smáčivosti povrchu dutiny formy

V této kapitole jsou prezentovány výsledky úhlu smáčení, adhezní práce a povrchové energie testovacích povrchů. V grafech jsou zobrazeny naměřené a vypočtené hodnoty pro leštěný a frézovaný povrch, které byly použity v této práci, a zároveň i dva testovací povrchy s vyšší hodnotou drsnosti povrchu (jemný a hrubý dezén), které byly použity v dřívějších studiích [3, 4].

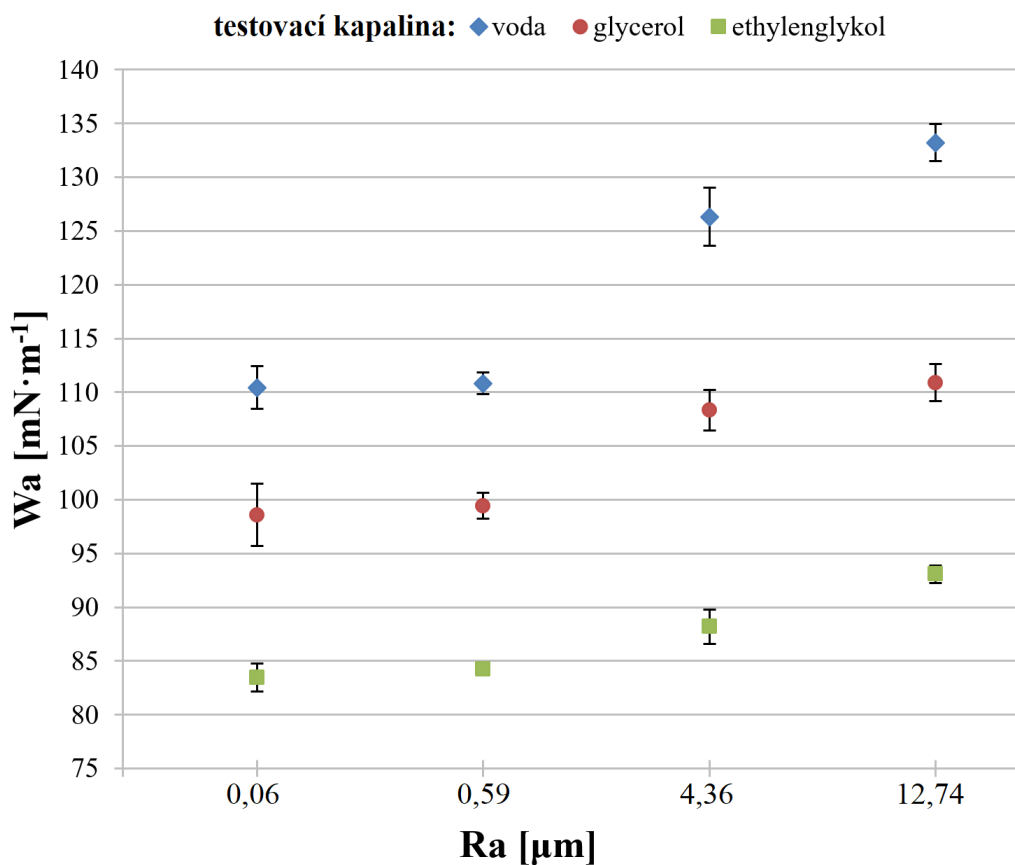
Prvním výsledkem (Obr. 61.) je hodnota úhlu smáčení, který byl přímo měřen z nasnímaných kapek testovacích kapalin (destilovaná voda, glycerol a ethylenglykol). Z grafu je patrné, že se zvyšující se hodnotou drsnosti povrchu R_a se snižuje úhel smáčení, tedy že povrch s vyšší drsností povrchu je lépe smáčen kapalinou.



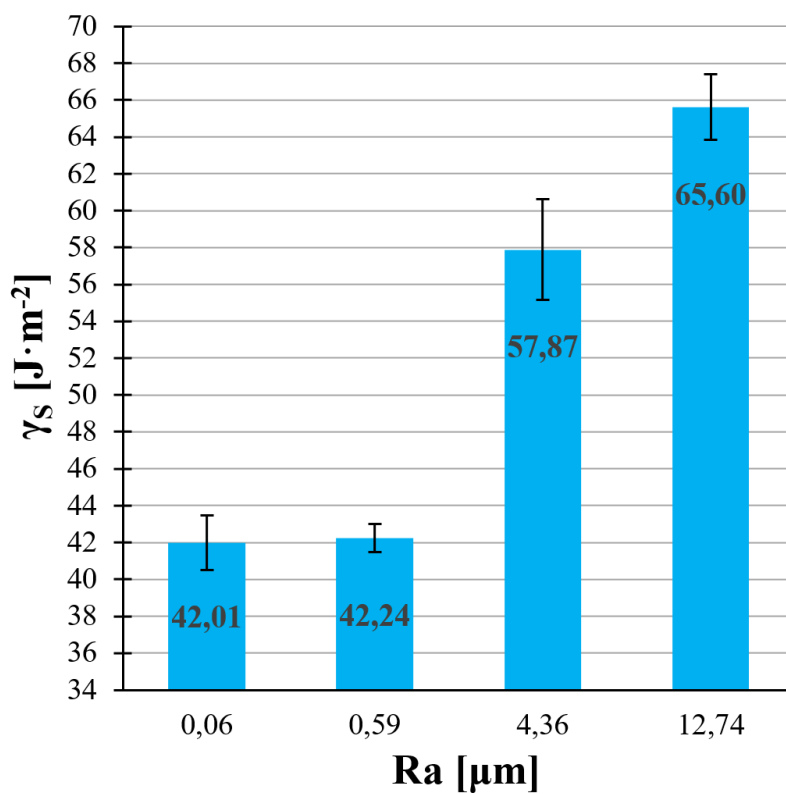
Obr. 61. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na úhel smáčení

Na Obr. 62. jsou vyneseny hodnoty adhezní práce W_a , která je zapotřebí k oddělení rozhraní kapalná a pevná fáze.

Naměřené hodnoty úhlu smáčení byly použity ke stanovení povrchové energie testovacích povrchů pomocí metody OWRK. Z výsledků (Obr. 63.) je zřejmé, že se zvyšující se drsností povrchu dochází ke zvýšení povrchové energie, což vede ke zlepšení přilnavosti kapalin k danému povrchu.



Obr. 62. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na velikost adhezni práce

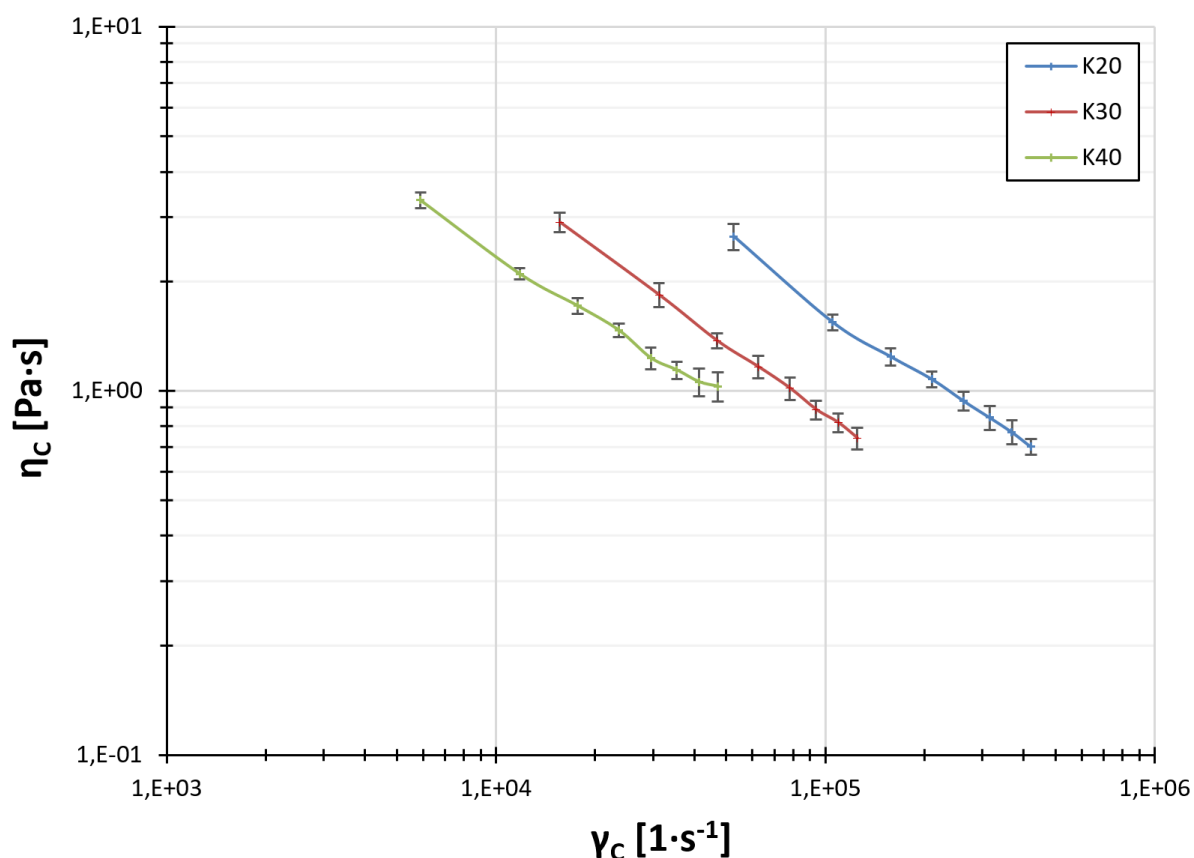


Obr. 63. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na velikost povrchové energie

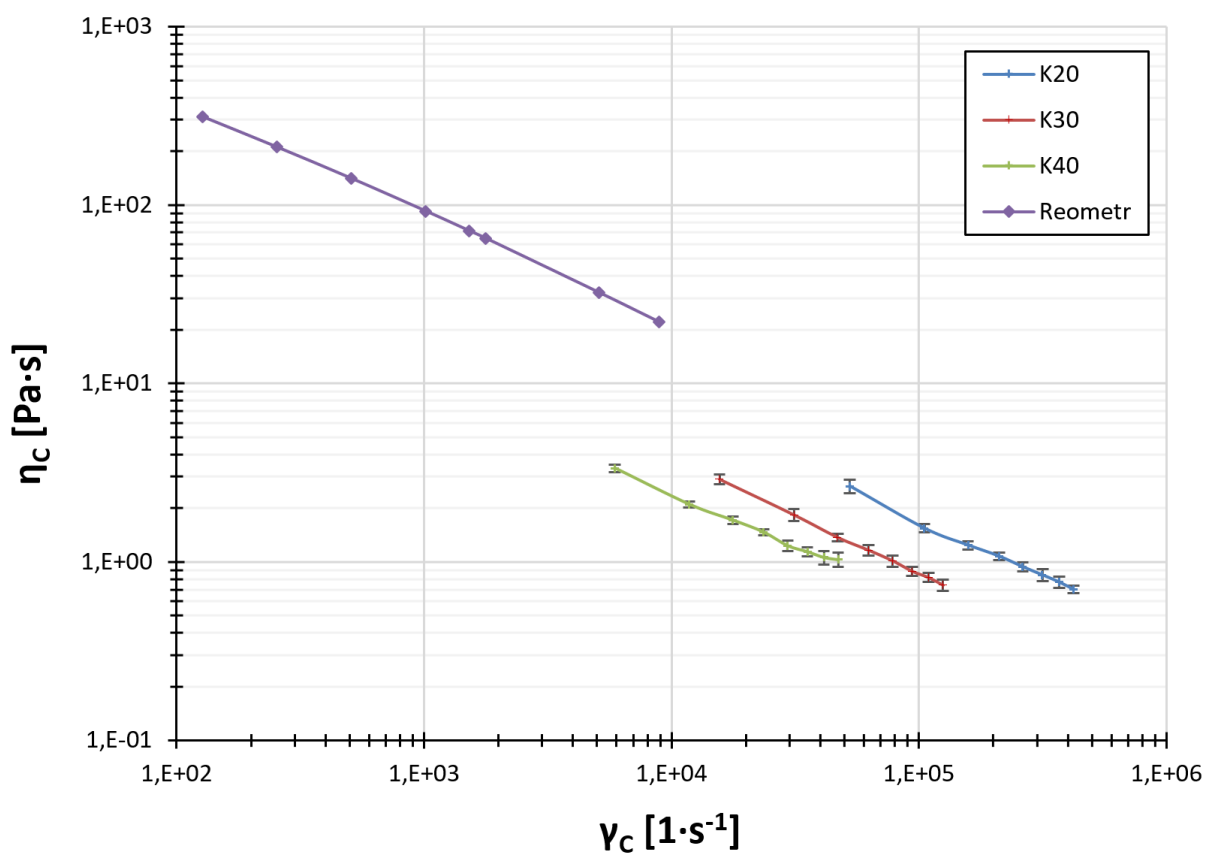
9.5 Výsledky měření tokových závislostí

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. 64. jsou vidět výsledné tokové křivky materiálu TATREN IM 12 59 při teplotě taveniny 200 °C. 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. Na Obr. 65. jsou pak vyobrazeny stejné tokové křivky v porovnání s naměřenou tokovou charakteristikou na výtlačném reometru, a to při stejném materiálu a teplotě.



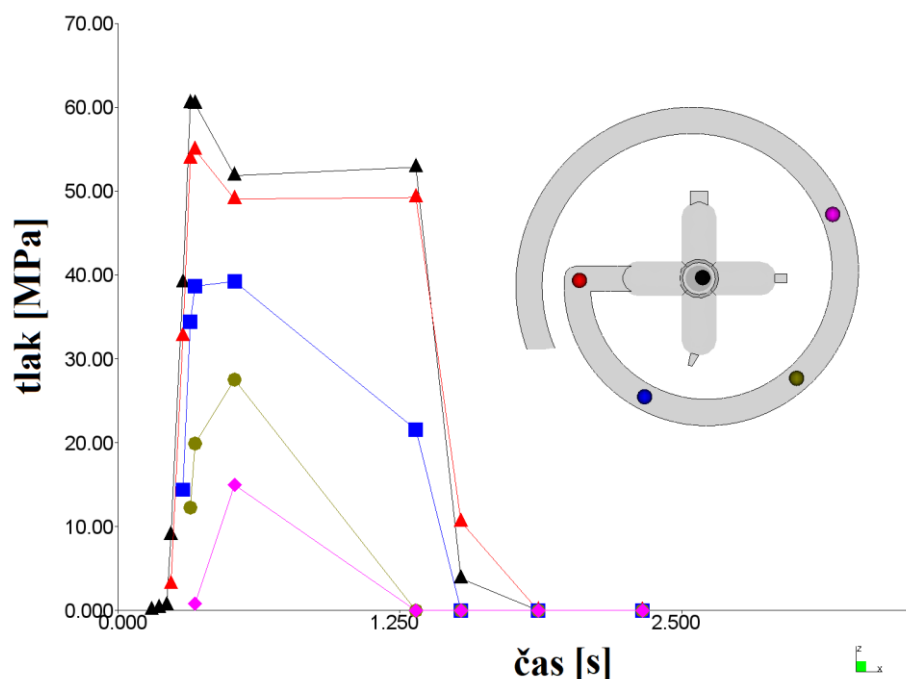
Obr. 64. Tokové křivky při použití 3 druhů kapilár (teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 12 59)



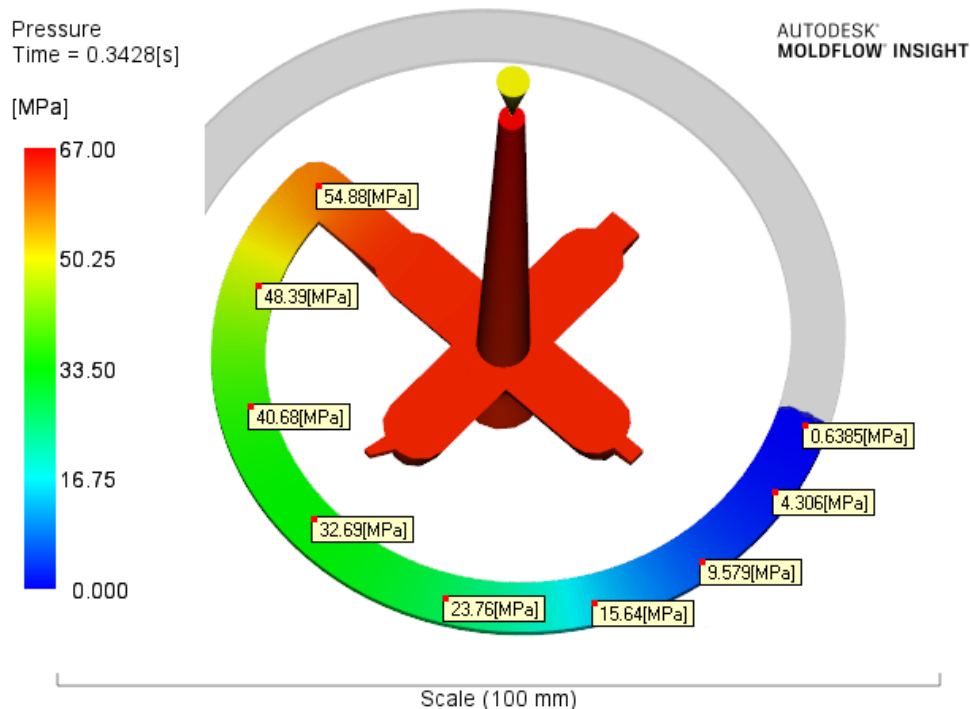
Obr. 65. Získané tokové křivky v porovnání s daty z výtlačného reometru (teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 12 59)

10. 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 [102], 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. 66.). 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. 67.).



Obr. 66. Průběh tlaku v dutině formy (toková simulace)

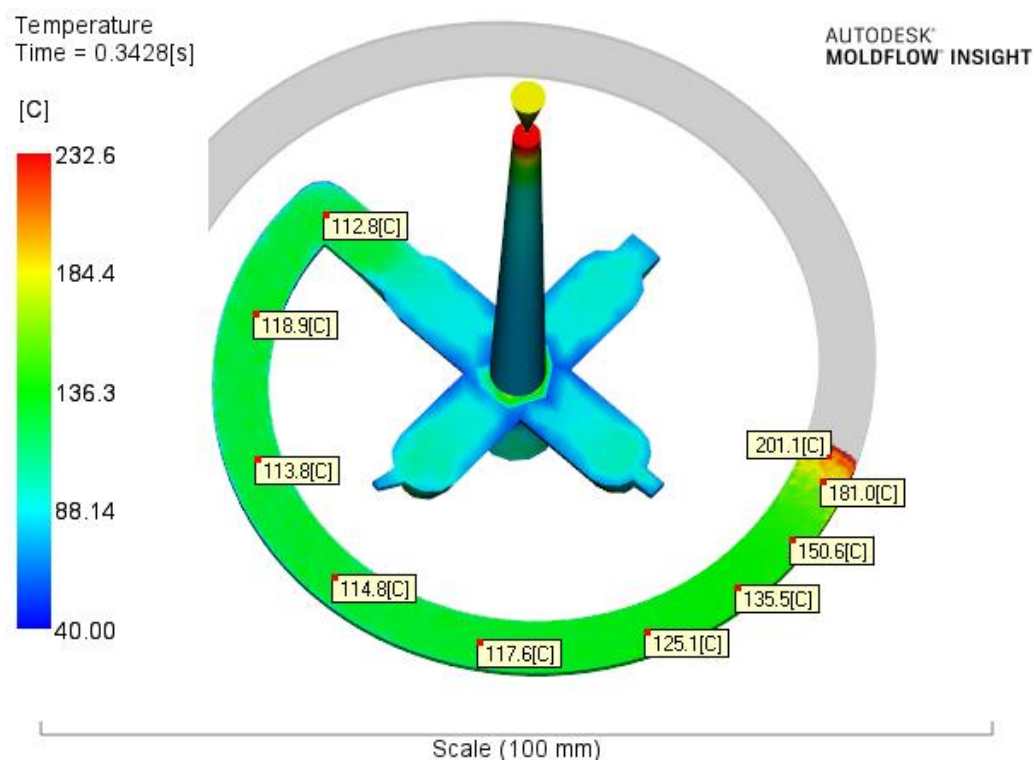


Obr. 67. Hodnoty tlaku fáze plnění v čase 0,34 s (toková simulace)

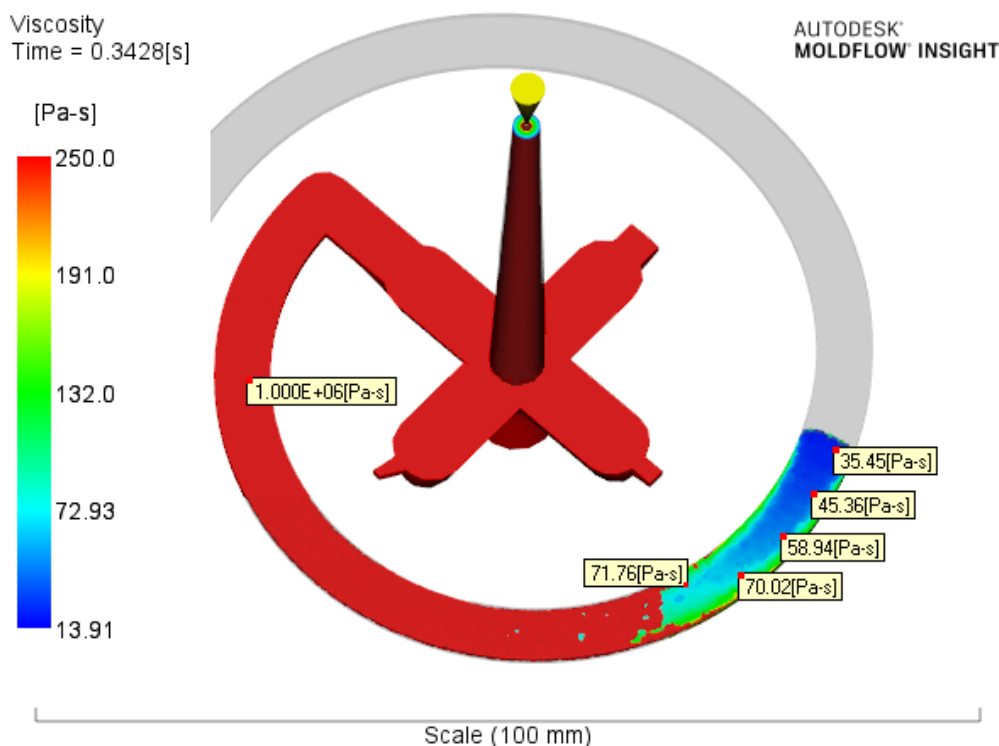
Výsledky měření krystalinity ukázaly rozdílné hodnoty krystalinity se vzdáleností od vtoku, přičemž nejvyšší stupeň krystalinity byl přibližně v polovině délky zkušebního tělesa. Ve většině případů byla hodnota krystalinity vyšší za použití frézovaného testovacího povrchu. Frézovaný povrch je z hlediska 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 [102].

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 v případě, že nedochází ke skluzu na stěně, prolínat (kap. 6.2). 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. 68. a 69.) 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. 68. Hodnoty povrchové teploty polymeru, fáze plnění, $t = 0,34$ s



Obr. 69. Hodnoty smykové viskozity povrchu polymeru, fáze plnění, $t = 0,34$ s

Zatékavost polymeru byla rovněž hodnocena i při použití povlakovaného povrchu. Povlak dutiny formy přináší významné zlepšení při výrobě vstřikovaných dílů a také z hlediska trvanlivosti a údržby formy. Z výsledků experimentu je patrné, že došlo ke zlepšení zatékavosti polymeru o více než 14 % oproti leštěnému povrchu dutiny formy, a to pro všechny testované materiály, teploty taveniny i teploty formy.

V případě frézovaného i povlakovaného povrchu bylo dosaženo dalších zajímavých výsledků. Konkrétně se jedná o výsledky kombinovaných povrchů, kdy testovaný povrch tvořil pouze 57 % celkového povrchu dutiny formy. Oproti původnímu předpokladu nedošlo ke snížení hodnot 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 [103-105] 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 obrobení 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. 2.4)

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 vyrobeny 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 vstřikovací 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 R_a testovaného povrchu byla $0,59 \mu\text{m}$) 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 $0,8 \mu\text{m}$ 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] CAMPO, E. A. *Industrial polymers*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2008, 180 s. ISBN 9783446411197.
- [39] JAROSCHEK, Ch. *Design of injection molded plastic parts*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2022. ISBN 9781569908945.
- [40] MALLOY, R. A. *Plastic part design for injection molding: an introduction*. 2nd ed. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2011, 549 s. ISBN 9781569904367.
- [41] LERMA VALERO, J. R. *Plastics injection molding: scientific molding, recommendations, and best practices*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2020, 400 s. ISBN 978-1-56990-689-7.

- [42] HAKOUME, D., L. A. DOMBROVSKY, D. DELAUNAY a B. ROUSSEAU. *Spectroscopic diagnostics of morphological changes arising in thermal processing of polypropylene*. Applied Optics [online]. 2014.. DOI: 10.1364/AO.53.002702. ISSN 1559-128X
- [43] KOHLGRÜBER, K., M. BIERDEL a H. RUST. *Plastics compounding and polymer processing: fundamentals, machines, equipment, application technology*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2022, 846 s. ISBN 978-1-56990-837-2.
- [44] BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. [online]. 2014. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [45] BRUDER, U. *User's guide to plastic: a handbook for everyone*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2015, 227 s. ISBN 9781569905722.
- [46] Spritzgießwerkzeug – Aufbau und Funktion. *Maschinenbau-Wissen.de*. [online]. 2009. Dostupné z: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/403-spritzgiesswerkzeug>
- [47] ŘEHULKA, Z. *Konstrukce vylisků z plastů a forem pro zpracování plastů: polymery*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 230 s. ISBN 9788072048335.
- [48] BEAUMONT, J. P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 3rd edition*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2019, 450 s. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [49] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 9788027106141.
- [50] KERKSTRA, R. a S. BRAMMER. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2018, 491 s. ISBN 9781569906453.
- [51] CATOEN, B. a H. REES. *Injection mold design handbook*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2021, 786 s. ISBN 978-1-56990-815-0.
- [52] CHEN, S., L. TURNG. a M. R. Kamal. *Advanced injection molding technologies*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2019, 426 s. Progress in polymer processing (PPP) series. ISBN 9781569906033.
- [53] DANIEL, R. a J. MUSIL. *Novel nanocomposite coatings: advances and industrial applications*. Singapur: Pan Stanford Publishing, 2015, 320 s. ISBN 9789814411172.

- [54] KAZMER, D. *Injection mold design engineering*. 2nd edition. Michov, Německo: Hanser Publications, 2016, 529 s. ISBN 978-1-56990-570-8.
- [55] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [56] STEPHENSON, D. A. a J. S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 947 s. ISBN 9781466587533.
- [57] GIRSANG, I. P. a J. S. DHUPIA. *Machine Tools for Machining. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology* [online]. Londýn, Velká Británie: Springer London, 2015, s. 811-865. DOI: 10.1007/978-1-4471-4670-4_4. ISBN 978-1-4471-4669-8.
- [58] HOFFMAN, P. J. a E. S. HOPEWELL. *Precision machining technology. Third edition*. Austrálie: Cengage, 2020, 810 s. ISBN 978-1-337-79530-2.
- [59] WALKER, J. R. a B. DIXON. *Machining fundamentals. 10th edition*. Tinley Park, Illinois: The Goodheart-Willcox Company, 2019, 650 s. ISBN 9781635632088.
- [60] GUPTA, K. a A. PRAMANIK. *Advanced machining and finishing*. [online] Amsterdam, Nizozemsko: Elsevier, 2021. Handbooks in Advanced Manufacturing. ISBN 9780128174531.
- [61] MAHTO, D. G. a N. SINGH. *Experimental Study of Process Parameters through Dissimilar Form of Electrodes in EDM Machining*. SSRN Electronic Journal [online]. 2016. DOI: 10.2139/ssrn.2947443. ISSN 1556-5068.
- [62] ŠEDO, V. Vliv nákupu brusného CNC centra na produktivitu výroby [online]. Brno, 2018. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83068>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Chladil.
- [63] MARINESCU, I. D., T. K. DOI a E. UHLMANN. *Handbook of ceramics grinding and polishing*. 2nd edition. Amsterdam, Nizozemsko: Elsevier, 2015. ISBN 978-145-5778-584.

- [64] PARFENOV, E.V., A. YEROKHIN, R.R. NEVYANTSEVA, M.V. GORBATKOV, C.-J. LIANG a A. MATTHEWS. *Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modelling*. Surface and Coatings Technology [online]. 2015, s. 2-22. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.02.019. ISSN 02578972.
- [65] SOMMER, C. a S. SOMMER. *Complete EDM Handbook*. 2nd edition. Advance Pub, 2017, 214 s. ISBN 9781575373034.
- [66] XIANG, Q., Y. HE a T. HOU. *An Exploration of Surface Integrity Remanufacturing for Aeroengine Components*. Frontiers of Engineering Management [online]. 2016. DOI: 10.15302/J-FEM-2016025. ISSN 2095-7513.
- [67] DAVIM, J. P. *Surface Integrity in Machining*. Londýn, Velká Británie: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978-1-84882-874
- [68] JAWAHIR, I. S., E. BRINKSMEIER, R. M'SAOUBI, D. K. ASPINWALL, J. C. OUTEIRO, D. MEYER, D. UMBRELLO a A. D. JAYAL. *Surface integrity in material removal processes: Recent advances*. CIRP Annals [online]. 2011, s. 603-626. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.002. ISSN 00078506.
- [69] ARIS, N. F. M. a K. CHENG. *Characterization of the surface functionality on precision machined engineering surfaces*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2008, s. 402-409. DOI: 10.1007/s00170-007-1340-1. ISSN 0268-3768.
- [70] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. [online] 2005. Dostupné z: <https://docplayer.cz/48015659-Integrita-povrchu-a-jeji-vyznam-pro-posouzeni-vhodnosti-dane-plochy-pro-jeji-funkci-prof-ing-bohumil-bumbalek-csc.html>
- [71] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s
- [72] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology. Second edition*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011, 975 s. ISBN 9781420082012.

- [73] RAJA, J., B. MURALIKRISHNAN a S. FU. *Recent advances in separation of roughness, waviness and form*. Precision Engineering [online]. 2002, s. 222-235. DOI: 10.1016/S0141-6359(02)00103-4. ISSN 01416359.
- [74] MAHR, spol. s.r.o. *MarSurf. Parametry drsnosti povrchu* [online]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910232/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [75] BHUSHAN B. *Modern Tribology Handbook. Volume 1 Principles of Tribology*. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2000. ISBN 9780849384035
- [76] KORZENIEWSKA, E., J. SEKULSKA-NALEWAJKO, J. GOCLAWSKI, R. ROSIK, A. SZCZĘSNY a Z. STAROWICZ. *Surface Morphology Analysis of Metallic Structures Formed on Flexible Textile Composite Substrates. Sensors* [online]. 2020. DOI:10.3390/s20072128. ISSN 1424-8220.
- [77] HALEVI, G. *Process and operation planning*. Boston, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 14-020-1653-0.
- [78] EBNESAJJAD, S., ed. *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. Amsterdam, Nizozemsko: Elsevier, 2011, 427 s. Plastics design Library. PDL handbook series. ISBN 9781437744613.
- [79] PETRIE, E. M. *Handbook of adhesives and sealants*. New York: McGraw-Hill, 2000, 880 s. ISBN 0070498881.
- [80] Process parameter surface tension. *SITA Process Solutions* [online]. Dostupné z: <https://www.sita-process.com/information-service/process-parameter-surface-tension/overview/>
- [81] VAN DER STRAETEN, K., J. SPARLA, A. OLOWINSKY a A. GILLNER. *Influence of self-organizing microstructures on the wettability of molten plastic on steel for hybrid plastic-metal joints*. Welding in the World [online]. 2019, s. 1431-1441. DOI: 10.1007/s40194-019-00765-6. ISSN 0043-2288.
- [82] SILVA, L. F. M. da, A. ÖCHSNER a R. D. ADAMS, ed. *Handbook of adhesion technology*. Berlín, Německo: Springer, 2011, 2 sv. 1543 s. Springer reference. ISBN 9783642011689.

- [83] HUHTAMÄKI, T., X. TIAN, J. T. KORHONEN a R. H. A. RAS. *Surface-wetting characterization using contact-angle measurements*. Nature Protocols [online]. 2018, s. 1521-1538. DOI: 10.1038/s41596-018-0003-z. ISSN 1754-2189.
- [84] BRACCO, G. a B. HOLST, ed. *Surface science techniques* [online]. Berlín, Německo: Springer, 2013. Springer series in surface sciences. ISBN 978-3-642-34242-4.
- [85] PARTRIDGE, M., F. DAVIS, S. JAMES, S. HIGSON a R. TATAM. *A solution to the slow stabilisation of surface pressure sensors based on the Wilhelmy method*. Matters [online]. 2017. DOI: 10.19185/matters.201611000016. ISSN 2297-8240.
- [86] DEALY, J. M. a J. WANG. *Melt rheology and its applications in the plastics industry. 2nd edition*. Dordrecht, Nizozemsko: Springer, 2013, 282 s. Engineering materials and processes. ISBN 9789400763944.
- [87] OSSWALD, T. a N. RUDOLPH. *Polymer Rheology: Fundamentals and Applications*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2015, 237 s. ISBN 978-1-56990-517-3.
- [88] KONTOPOULOU, M. a A. M. JAMIESON. *Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. ISBN 978-047-0416-709.
- [89] SHAW, M. T. a A. M. JAMIESON. *Introduction to polymer rheology: from sus-pensions to nanocomposites and beyond*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. ISBN 978-047-0388-440.
- [90] Flow Properties of Polymers. *CROW Polymer Properties Database*. [online]. 2015. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Viscosity2.html>
- [91] DEALY, J. M. a P. C. SAUCIER. *Rheology in plastics quality control*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2000, 140 s. ISBN 1-56990-286-0.
- [92] DEALY, J. M., D. J. READ a R. G. LARSON. *Structure and rheology of molten polymers: from structure to flow behavior and back again. 2nd edition*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2018, 592 s. ISBN 9781569906118.

- [93] WANG, S. *Nonlinear polymer rheology: macroscopic phenomenology and molecular foundation*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2018, 427 s. ISBN 9780470946985.
- [94] JONG, W., S. HWANG, Ch. KAO, Y. HUANG, Ch. WU a S. HONG. *Visualization of counter pressure mechanism in gas-assisted injection molding process*. Journal of the Chinese Institute of Engineers [online]. 2017, s. 459-470. DOI:10.1080/02533839.2017.1362356. ISSN 0253-3839.
- [95] RHEOGRAPH 20. GÖTTFERT [online]. Dostupné z: <https://www.goettfert.de/produkte/kapillarrheometer/rheograph-20>
- [96] CANEVAROLO, S. V. *Polymer science: a textbook for engineers and technologists*. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2020, 369 s. ISBN 978-1-56990-725-2.
- [97] GRELLMANN, W. a S. SEIDLER, ed. *Polymer testing*. 3rd edition. Mnichov, Německo: Hanser Publications, 2022, 714 s. ISBN 978-1-56990-806-8.
- [98] LANYI, F. J., N. WENZKE, J. KASCHTA a D. W. SCHUBERT. *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 [online]. 2020. DOI: 10.1002/adem.201900796. ISSN 1438-1656.
- [99] TURUNEN, M. P. K., T. LAURILA a J. K. KIVILAHTI. *Evaluation of the surface free energy of spin-coated photodefinable epoxy*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics [online]. 2002, 2137-2149. DOI:10.1002/polb.10274. ISSN 0887-6266.
- [100] BERGER, G. R., C. STEFFEL a W. FRIESENBIHLER. *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.
- [101] RUDAWSKA, A. a E. JACNIACKA. *Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method*. International Journal of Adhesion and Adhesives [online]. 2009. s. 451-457. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2008.09.008. ISSN 01437496.

- [102] OVSÍK, M. *Mechanické vlastnosti vstřikovaných dílů z polypropylenu: vliv nástroje a procesu*. Habilitační práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2022, 226 s.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] 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

A, b	parametry materiálu z hlediska skluzu na stěně [1]
AFM	Atomic Force Microscopy – mikroskop atomárních sil
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
A _n	rázová houževnatost Izod [kJ·m ²]
ATC	Automatic Tool Changer – systém automatické výměny nástrojů
CeO ₂	oxid ceričitý
CNC	Computerized Numerical Control - počítačem řízený obráběcí stroj
CSI	Coherence Scanning Interferometry – koherenční skenovací interferometrie
CVD	Chemical Vapour Deposition – chemická depozice par
D _K	průměr kapiláry [mm]
DSC	Differential Scanning Calorimetry - diferenciální skenovací kalorimetrie
D _š	průměr šneku vstříkovacího stroje [mm]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
EDM	Electrical Discharge Mechnining – elektroerozivní obrábění
Fe ₂ O ₃	oxid železitý
HSC	High Speed Cutting – vysokorychlostní obrábění
IPZ	index poměrného zatečení [%]
ISO	zkratka pro Mezinárodní organizaci pro normalizaci
ITT	index toku taveniny [g·10 min ⁻¹]
L	délka zatečení [mm]
L _K	délka kapiláry [mm]
N	index neneutonského chování [1]
OCT	Optical Coherent Tomography - optická koherenční tomografie
p	vstříkovací tlak [bar]
p _v	tlak vyvozený pístem reometru [Pa]
PACVD	Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition – chemická depozice par pomocí plazmatu
PP	polypropylen
PVD	Physical Vapour Deposition – fyzikální depozice par
Q̇	objemový průtok v kapiláře [mm ³ ·s ⁻¹]
R	poloměr kapiláry [mm]
R _a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
R _c	průměrná výška prvků povrchu [μm]
R _{ku}	špičatost posuzovaného povrchu [1]
R _p	největší výška výstupku profilu [μm]

Rq	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného povrchu [μm]
Rsk	šikmost posuzovaného povrchu [1]
Rt	celková výška profilu [μm]
Rv	největší hloubka prohlubně [μm]
Rz	největší výška profilu [μm]
SEM	Scanning Electron Microscope – skenovací elektronový mikroskop
STM	Scanning Tunneling Microscope – skenovací tunelový mikroskop
SiO ₂	oxid křemitý
t	čas [s]
T _{pr}	teplota procesu krystalizace [$^{\circ}\text{C}$]
TiB ₂	Diborid titanu
TPE	termoplastický elastomer
TPU	termoplastický polyuretan
UV	ultraviolet – ultrafialové záření
v	rychlost pohybu pístu [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
V	průměrná rychlost toku v kapiláře [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
V _s	skluzová rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
W _a	adhezní práce [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
W _c	kohezní práce [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
X _c	krystalinita [%]
γ_L	povrchová energie kapalného skupenství [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_{LV}	napětí na fázovém rozhraní kapalina-plyn [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_L^d	disperzní část povrchové energie [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_L^p	polární část povrchové energie [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_S	povrchová energie pevného skupenství [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_S^d	disperzní část povrchové energie pevného skupenství [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_S^p	polární část povrchové energie pevného skupenství [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_{SV}	napětí na fázovém rozhraní pevná látka-plyn [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
γ_{SL}	napětí na fázovém rozhraní pevná látka-kapalina [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$]
$\dot{\gamma}_A$	zdánlivá rychlost smykové deformace [s^{-1}]
$\dot{\gamma}_{As}$	zdánlivá rychlost smykové deformace při skluzu na stěně [s^{-1}]
$\dot{\gamma}_C$	korigovaná rychlost smykové deformace [s^{-1}]
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace [s^{-1}]
ΔH_m	entalpie tání měřeného polymeru [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$]
ΔH_m^{100}	entalpie tání 100 % krystalického polymeru [$\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$]
Δp_2	tlak uvnitř kapiláry [Pa]
η	smyková viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

η_A	zdánlivá smyková viskozita [Pa·s]
η_C	korigovaná smyková viskozita [Pa·s]
θ	úhel smáčení [°]
π_e	koeficient rozložení tlaku [1]
τ	smykové napětí [Pa]
τ_A	zdánlivé smykové napětí [Pa]
τ_C	korigované smykové napětí [Pa]
τ_w	smykové napětí na stěně kapiláry [Pa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma vstřikovacího stroje [35]</i>	12
<i>Obr. 2. Příklad vstřikovacího cyklu [32]</i>	13
<i>Obr. 3. Příklad růstu sférolitů u PP vzorku ($T_{pr} = 120\text{ °C}$) [42]</i>	15
<i>Obr. 4. Příklad univerzálního granulátoru pro termoplasty [43]</i>	17
<i>Obr. 5. Dvoudeskové řešení vstřikovací formy [46]</i>	18
<i>Obr. 6. Studený vtokový systém [45]</i>	19
<i>Obr. 7. Ukázka temperace dutiny formy [45]</i>	20
<i>Obr. 8. Příklad rozložení nákladů na jeden výrobek[54]</i>	24
<i>Obr. 9. Hlavní složky celkové ceny vstřikovací formy [39]</i>	25
<i>Obr. 10. Základní frézovací operace [57]</i>	26
<i>Obr. 11. Nesousledné (a) a sousledné (b) frézování [57]</i>	27
<i>Obr. 12. Princip vrtání [57]</i>	28
<i>Obr. 13. Princip soustružení [57]</i>	29
<i>Obr. 14. Princip EDM [61]</i>	30
<i>Obr. 15. Princip broušení [62]</i>	31
<i>Obr. 16. Klíčové faktory integrity povrchu [66]</i>	34
<i>Obr. 17. Profil povrchu a jeho struktura [73]</i>	35
<i>Obr. 18. Vyhodnocení parametrů R_a a R_q [74]</i>	36
<i>Obr. 19. Kontaktní měření drsnosti povrchu [76]</i>	37
<i>Obr. 20. Růst nákladů vynaložených na dosažení požadované hodnoty R_a [77]</i>	39
<i>Obr. 21. Silové poměry v povrchové vrstvě kapaliny [80]</i>	40
<i>Obr. 22. Smáčivost pevné látky kapalinou [81]</i>	41
<i>Obr. 23. Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce [83]</i>	43
<i>Obr. 24. Metoda vyvažování Willhelmyho destičky [85]</i>	44
<i>Obr. 25. Toková křivka různých typů kapalin [90]</i>	47
<i>Obr. 26. Schematické zobrazení kapilárního reometru [87]</i>	48
<i>Obr. 27. Fontánový tok v dutině vstřikovací formy [94]</i>	51
<i>Obr. 28. Zkušební vstřikovací forma</i>	55
<i>Obr. 29. Varianty provedení průřezu kanálu dutiny formy</i>	56
<i>Obr. 30. Frézované desky po obrábění</i>	56
<i>Obr. 31. Variace zvolených vstupních podmínek pro výrobu zkušebních těles</i> ..	57
<i>Obr. 32. Porovnání dat zatékavosti při různých podmínkách (příklad)</i>	58
<i>Obr. 33. Ukázka nádob se vzorky a přesun k provedení měření</i>	59
<i>Obr. 34. DSC charakteristika vzorků z různých vzdáleností od vtokového ústí</i> .	60
<i>Obr. 35. Vyhodnocovaná oblast na zkušebních tělesech a desce formy</i>	61
<i>Obr. 36. Měření na profiloměru NewView 8300</i>	61

<i>Obr. 37. Převedení naskenovaného povrchu na profily povrchu.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 38. Měření úhlů smáčení frézované desky</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 39. Stanovení složek povrchové energie lineární regresí (leštěná deska) ..</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 40. 3D model sestavy standardní trysky stroje Allrounder 170 U 150-30 .</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 41. 3D model sestavy finálního návrhu (nahore) a jeho realizace (dole) ..</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42. Zapojení monitorovacího systému CoMo</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 43. Vygenerovaná 3D síť v oblasti toku polymeru.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 44. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty formy, 3 testovací materiály, teplota taveniny 220 °C).....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 45. Rozdíl v zatečení leštěný vs. frézovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty taveniny, 3 testovací materiály, teplota formy 40 °C).....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 46. Rozdíl v zatečení leštěný vs. povlakovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty formy, 3 testovací materiály, teplota taveniny 220 °C).....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 47. Rozdíl v zatečení leštěný vs. povlakovaný povrch a jejich kombinace (3 rozdílné teploty taveniny, 3 testovací materiály, teplota formy 40 °C).....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 48. Výsledky DSC při prvním tavení, frézovaná vs. leštěná deska</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 49. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 50. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56)</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 51. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56) ...</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 52. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 6 56) ...</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 53. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59).....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 54. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59).....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 55. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59) .</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 56. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota formy 40 °C, materiál TATREN IM 12 59) .</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 57. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56) .</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 58. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (leštěná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56) .</i>	<i>78</i>

<i>Obr. 59. Hodnota drsnosti povrchu Ra zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56)</i>	79
<i>Obr. 60. Hodnota drsnosti povrchu Rz zkušebních těles při různých teplotách taveniny (frézovaná deska, teplota taveniny 200 °C, materiál TATREN IM 6 56)</i>	79
<i>Obr. 61. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na úhel smáčení</i>	80
<i>Obr. 62. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na velikost adhezní práce</i>	81
<i>Obr. 63. Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na velikost povrchové energie</i>	81
<i>Obr. 64. Tokové křivky při použití 3 druhů kapilár</i>	82
<i>Obr. 65. Získané tokové křivky v porovnání s daty z výtlačného reometru</i>	83
<i>Obr. 66. Průběh tlaku v dutině formy (toková simulace)</i>	84
<i>Obr. 67. Hodnoty tlaku fáze plnění v čase 0,34 s (toková simulace)</i>	85
<i>Obr. 68. Hodnoty povrchové teploty polymeru, fáze plnění, $t = 0,34$ s</i>	86
<i>Obr. 69. Hodnoty smykové viskozity povrchu polymeru, fáze plnění, $t = 0,34$ s</i>	87

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Drsnost povrchu po obrobení vybranými technologiemi [55, 67, 72]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2. Vybrané vlastnosti materiálů vybraných pro realizaci měření</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 3. Kapaliny použité při měření úhlu smáčení [99]</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 4. Rozměry a označení výměnných kapilár</i>	<i>66</i>

SEZNAM PŘÍLOH

- P1 CD obsahující:
- disertační práci (.pdf)
 - konstrukční návrh úpravy trysky stroje (Catia V5)
 - materiálové listy:
 - TATREN IM 6 56
 - TATREN IM 12 59
 - TATREN IM 25 75
 - TATREN IM 55 80
 - technické listy:
 - vstřikovací stroj Arburg Allrounder 170 S
 - vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 E (GE)
 - PACVD povlak NANOCOMP (VÚHŽ)
 - tlakové a teplotní čidlo Kistler, typ 6189A
 - CoMo jednotka Kistler, typ 2869B
 - soubory tokové analýzy (Autodesk Moldflow Insight 2023)
 - naměřená a vyhodnocená data:
 - DSC
 - kapilární reometr
 - replikace povrchu
 - úprava trysky vstřikovacího stroje
 - smáčivost povrchu desek
 - zatékavost polymeru

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. ŠENKERŮK, **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. ŠENKERŮK 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	Petr Fluxa, Ing.
Datum a místo narození	19. 4. 1994, Vsetín
Trvalé bydliště	Hovězí 677, Hovězí 756 01
Telefon	+420 724 597 471
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

Vliv povrchu nástroje na zatékavost polymeru

Influence of Tool Surface on Polymer Flow

Disertační práce

Rok vydání 2023