

Vliv procesních parametrů vstřikování na délku toku a mikro-mechanické vlastnosti POM

Bc. Dušan Mackovík

Diplomová práce
2021

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Dušan Mackovík**
Osobní číslo: **T19505**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Vliv procesních parametrů vstřikování na délku toku a mikro-mechanické vlastnosti POM**

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles vstřikováním do spirálové formy.
3. Provedení měření délky zatečení a mikro-mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.
TIWARI, Atul, NATARAJAN, Sridhar. Applied Nanoindentation in Advanced Materials. Wiley, 2017, ISBN 978-1-119-08449-5.
NEMECEK, Jiri. Nanoindentation in Materials Science, 2012, ISBN 978-953-51-0802-3.

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

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem procesních parametrů vstřikování na délku toku a výsledné mikro-mechanické vlastnosti polymerního materiálu POM.

Teoretická část diplomové práce se zaměřuje hlavně na problematiku technologie vstřikování, popisuje polymerní materiály a obsahuje poznatky z reologického chování polymerů a z instrumentované zkoušky tvrdosti (DSI).

V praktické části je provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti polymerního materiálu POM a je zkoumán vliv různých procesních parametrů vstřikování na délku toku a mikro-mechanické vlastnosti.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací formy, polymerní materiály, mechanické vlastnosti, instrumentovaná zkouška tvrdosti (DIS)

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of injection molding process parameters on the flow length and the resulting micro-mechanical properties of the polymer material POM.

The theoretical part of the diploma thesis focuses mainly on the issue of injection molding technology, describes polymeric materials and contains knowledge from the rheological behavior of polymers and the instrumented hardness test (DSI).

In the practical part, an instrumented hardness test of the POM polymer material is performed and the influence of various injection molding process parameters on the flow length and micro-mechanical properties is investigated.

Keywords: injection molding, injection molds, polymeric materials, mechanical properties, instrumented hardness test (DIS)

Poděkování

Úvodem diplomové práce bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a čas, který mi poskytoval při vypracování této diplomové práce. Dále děkuji také svojí rodině a všem ostatním lidem, kteří mě během studia podporovali.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 POLYMERY	13
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.1.1 Plasty	14
1.1.2 Elastomery.....	15
1.2 STRUKTURA A VLASTNOSTI POLYMERŮ	15
1.2.1 Polymery nezesíťované	16
1.2.2 Polymery zesíťované.....	17
1.3 POLYOXYMETHYLEN – POM.....	18
2 REOLOGIE ROZTAVENÝCH POLYMERŮ	20
2.1 CHOVÁNÍ POLYMERNÍ TAVENINY	20
2.1.1 Tok polymerní taveniny ve vstřikovací formě	21
2.2 VIZKOZITA	22
2.3 NORMÁLOVÁ NAPĚTÍ.....	23
2.4 INDEX TOKU TAVENINY	25
2.5 MODUL PRUŽNOSTI	25
3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	27
3.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	28
3.1.1 Vstřikovací cyklus v diagramu $p_i - t$	29
3.1.2 Vstřikovací cyklus v diagramu $p - v - T$	30
3.2 POPIS A VLIV JEDNOTLIVÝCH FÁZÍ VSTŘIKOVACÍHO CYKLU	32
3.2.1 Strojní doby	32
3.2.2 Doba vstřikování	32
3.2.3 Doba dotlaku	33
3.2.4 Doba plastikace	34
3.2.5 Doba chlazení.....	35
3.3 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES VSTŘIKOVÁNÍ	35
3.3.1 Vstřikovací rychlost	35
3.3.2 Vstřikovací tlak	36
3.3.3 Dotlak.....	37
3.3.4 Doba dotlaku	37
3.3.5 Teplota taveniny.....	38
3.3.6 Teplota vstřikovací formy	39
4 VSTŘIKOVACÍ STROJ	40
4.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTA.....	41
4.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA.....	42

4.3	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	43
4.3.1	Testovací vstřikovací formy.....	45
5	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI	46
5.1	INDENTAČNÍ KŘIVKY	47
5.2	METODA OLIVERA A PHARRA – MULTIBODOVÁ	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
6	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	52
7	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	53
7.1	PODMÍNKY VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	53
7.2	VSTŘIKOVANÝ MATERIÁL	54
7.2.1	Sušení vstřikovacího materiálu	54
7.3	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	55
7.4	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	56
7.4.1	Zvolené technologické parametry vstřikování	56
7.5	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	57
7.5.1	Tvarová dutina vstřikovací formy	57
7.5.2	Zkušební desky vstřikovací formy	58
7.6	MĚŘENÍ DÉLKY TOKU	58
7.7	MĚŘENÍ MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	59
7.7.1	Postup měření mikro-mechanických vlastností	60
8	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	61
8.1	HODNOTY DÉLKY TOKU.....	61
8.2	HODNOTY MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	63
8.2.1	Vtisková tvrdost	63
8.2.2	Vtiskový modul pružnosti	67
8.2.3	Vtiskové tečení – creep	72
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ	78
9.1	DÉLKA TOKU	78
9.2	MIKRO-MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	79
9.2.1	Vtisková tvrdost H_{IT}	79
9.2.2	Vtiskový modul pružnosti E_{IT}	80
9.2.3	Vtiskové tečení – creep C_{IT}	81
	ZÁVĚR	83
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	85
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	89
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	94

SEZNAM PŘÍLOH.....	95
---------------------------	-----------

ÚVOD

V současné době polymerní materiály a jejich technologie zpracování prochází obrovským rozvojem a využívají se takřka ve všech průmyslových odvětvích. Polymerní materiály zahrnují širokou škálu chemického složení, vlastností a vnitřní stavby struktury. Polymery díky svým vynikajícím vlastnostem, zejména jednoduché zpracovatelnosti, nahrazují využití kovových a organických materiálů.

Existuje několik druhů technologií pro zpracování polymerních materiálů, z nichž nejdůležitější a nejrozšířenější je technologie vstřikování. Tato technologie se používá pro zpracování a výrobu plastových dílů a využívá se v oblasti průmyslových aplikací, a to od spotřebního průmyslu přes automobilový, letecký, medicínský, potravinářský až po vojenský průmysl. Výhodou technologie vstřikování je možnost výroby tvarově složitých výrobků a krátká doba přeměny materiálu do podoby finálního výrobku. Základ technologie vstřikování je založen na cyklickém opakování jednotlivých částí výrobního cyklu a vyznačuje se složitým fyzikálním procesem, ve kterém hraje důležitou roli polymerní materiál, vstřikovací stroj a vstřikovací forma. Hlavní součástí vstřikovací formy jsou tvarové desky, kde jejich dutina má tvar negativu vyráběného plastového výrobku. Kvalita a povrch dutiny formy je jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující výslednou kvalitu povrchu vstřikovaného dílu.

Při volbě vstřikovaného materiálu je důležité brát na vědomí reologické vlastnosti materiálu a molekulární strukturu, které mají vliv na budoucí vzhled, mechanické vlastnosti a také na kvalitu povrchu vstřikovaného výrobku. Další důležitou částí vstřikovací technologie je nastavení procesních parametrů např. doba chlazení, dotlaku a velikost vstřikovaného tlaku. Všechny procesní parametry mají rovněž vliv na výsledné mechanické vlastnosti a kvalitu vstřikovaného výrobku. V praxi se z uvedených důvodů hledají ideální kombinace procesních parametrů vstřikování pro zvolený polymerní materiál, které zaručí dosažení požadovaných výsledných mechanických vlastností a kvality.

K určování mikro-mechanických vlastností se využívá instrumentovaná zkouška tvrdosti neboli metoda DSI, která se stala jedním z nejmocnějších prostředků využívající vtiskový princip. Princip metody spočívá v záznamu okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na nárůstu nebo poklesu zatížení.

Praktická část práce je tak zaměřena na vyhodnocení mikro-mechanických vlastností a délku toku vstřikovaných vzorků z vybraného polymerního materiálu při změnách určitých

procesních parametrů vstřikování pomocí metody DIS. Z mikro-mechanických vlastností budou v této práci podrobněji zkoumány vtisková tvrdost, vtiskový modul pružnosti a vtiskové tečení neboli creep.

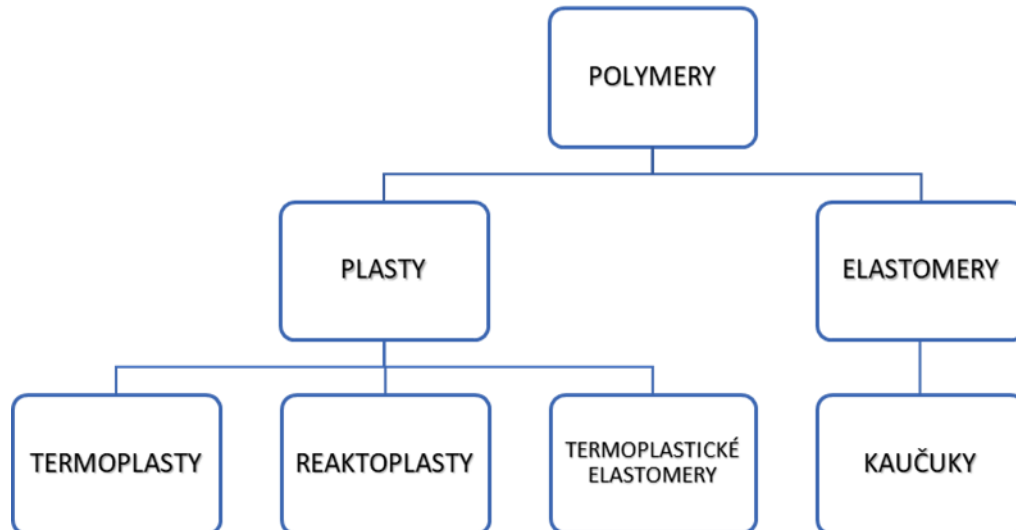
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

Slovo polymer pochází z řečtiny a doslovný překlad znamená mnoho částic (poly-mer). Polymery jsou chemické látky, které obsahují ve svých molekulách nejčastěji atomy uhlíku, kyslíku, vodíku, ale také i dusíku, chloru a dalších prvků. Čisté polymery většinou nemají nejvhodnější vlastnosti, a proto se kombinují s jinými materiály. Nejčastěji se kombinují pomocí mechanického míchání a směs je tvořena přidáváním vhodných typů přísad, plniv, výstužných materiálů nebo jiných polymerů. Důvodem vytváření směsí je zlepšení zpracovatelnosti a dosažení lepších vlastností výrobků. Vytvořené směsi jsou dodávány ve formě granulí, prášků, kapalin nebo past. [1, 2]

1.1 Základní rozdělení polymerů

Při běžných teplotách jsou polymery v tuhém stavu, ale za zvýšené teploty přechází do stavu kapalného (taveniny). Tento děj umožňuje polymerní tavenině poskytnout tvar budoucího výrobku. Z důvodu chování polymerů za zvýšené a normální teploty se dělí na plasty a elastomery viz. obrázek níže. [2]



Obr. 1 Základní rozdělení polymerů [3]

Polymery lze rozdělit i podle dalších kritérií např. původu, chemické reakce, složení, molekulární struktury nebo podle uspořádanosti makromolekul. Polymery se mohou dále dělit také dle polaritity na polární a nepolární. Další možností, jak rozdělit polymerní materiály je z hlediska postavení na trhu. Rozlišují se tři velké skupiny plastů: komoditní plasty (plasty pro široké použití), které představují největší objem výroby i spotřeby. Druhou skupinou polymerních materiálů jsou tzv. inženýrské plasty pro konstrukční aplikace, které

nabízejí lepší vlastnosti a také vyšší teplotní odolnost. Poslední skupinou jsou tzv. high-tech polymery (speciální polymery), které nabízejí unikátní vlastnosti a jsou především určeny pro speciální a náročné aplikace. [3]

1.1.1 Plasty

Plasty jako materiály jsou látky, kde je jejich struktura tvořena makromolekulárními řetězci. Oproti tomu u kovových materiálů je struktura tvořena krystalickými mřížkami. Plasty jsou za normálních podmínek většinou tvrdé, ale často bývají i křehké. Při působení vnějšího namáhání se způsobují deformace převážně nevratného (trvalého) charakteru. Podle chování při zvýšených teplotách plasty dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [3, 4]

Termoplasty jsou materiály, které při zahřátí na teplotu tání přechází do oblasti taveniny. Při přechodu do oblasti taveniny materiál měkne a taví se (přechází do plastického stavu). Po zpětném ochlazení pod teplotu tání termoplasty přechází opět do tuhého stavu. Během ohřívání neprobíhají žádné chemické reakce a při jejich zpracování se nemění chemická struktura. Materiál prochází změnami, které mají pouze fyzikální charakter a proces měknutí a tuhnutí je opakovatelný. Termoplasty se mohou dále dělit na amorfni i semikrystalické. Typickými představiteli jsou polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyoxymethylen (POM) a další. [3]

Reaktoplasty jsou materiály, které jsou při zahřátí tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu. Po dobu zahřívání dochází k chemické změně, kde původní molekuly zesítňují. Od toho okamžiku se reaktoplasty stávají netavitelné a nerozpustné. Vytvrzováním se nazývá vzniklá chemická reakce, která způsobuje vznik zesítňované struktury. Tento proces je nevratný a vytvrzený materiál nelze převést do taveniny ani nějak tvarovat. Reaktoplast je amorfním polymerem. Výrobky vyrobené z reaktoplastů se vyznačují vysokou tepelnou a chemickou odolností, ale také dobrou tvrdostí a tuhostí. [3]

Termoplastické elastomery jsou materiály, které jsou svými vlastnostmi velmi podobné pryžím. Struktura termoplastických elastomeru je tvořena tvrdými a měkkými segmenty. Měkké segmenty jsou tvořeny elastomery, tvrdé segmenty termoplasty, které utváří uzly sítě. Termoplastické elastomery mají zesítňovanou strukturu a při zvyšování teploty přechází do tekutého stavu a mohou se zpracovávat podobně jako termoplasty, a proto patří mezi skupinu platů. Hlavní rozdíl mezi termoplastickým elastomerem a pryží je dán rozdílem ve vlastnostech uzlů sítě. Pryže mají vlastnosti v uzlech chemického charakteru, zatímco u termoplastických elastomerů je charakter fyzikální. Největší výhodou termoplastických

elastomerů je možnost vstřikování na normálních strojích určené pro zpracování termoplastů a také jejich možnost opětovného zpracování (recyklace). [3]

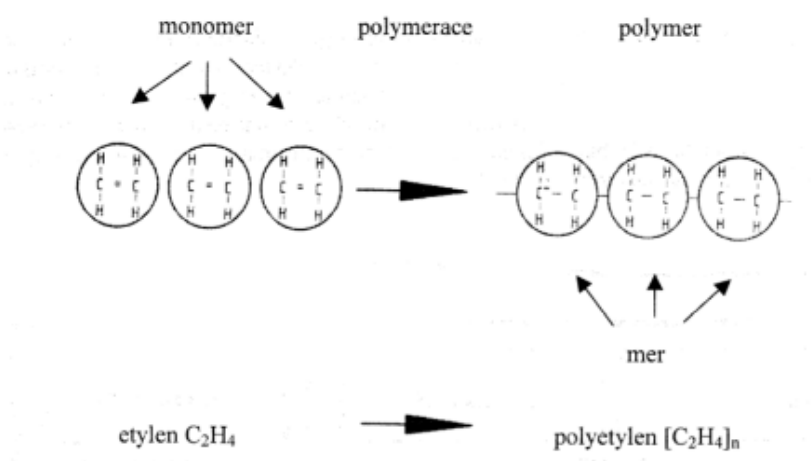
1.1.2 Elastomery

Elastomery jsou materiály, které se vyznačují nízkou tuhostí. Jak název už napovídá jedná se o vysoce pružný (elastický) materiál, který můžeme za normálních podmínek značně deformovat při působení malé síly. Vzniklá deformace je obvykle vratná a nezpůsobí žádné porušení. Typickým příkladem elastomerů jsou kaučuky. [3]

Kaučuky jsou materiály, z nichž se pomocí vulkanizace (řidkým zesítním, nejčastěji sírou) vyrábí pryž. Pryž je vysoce pružný materiál, odolný trvalé deformaci. Pryž je tedy vulkanizovaný elastomer, který se vyznačuje chemickými vazbami mezi makromolekulami, které tvoří uzly prostorové sítě. V důsledku zesítnění je kaučuk amorfním polymerem. [3]

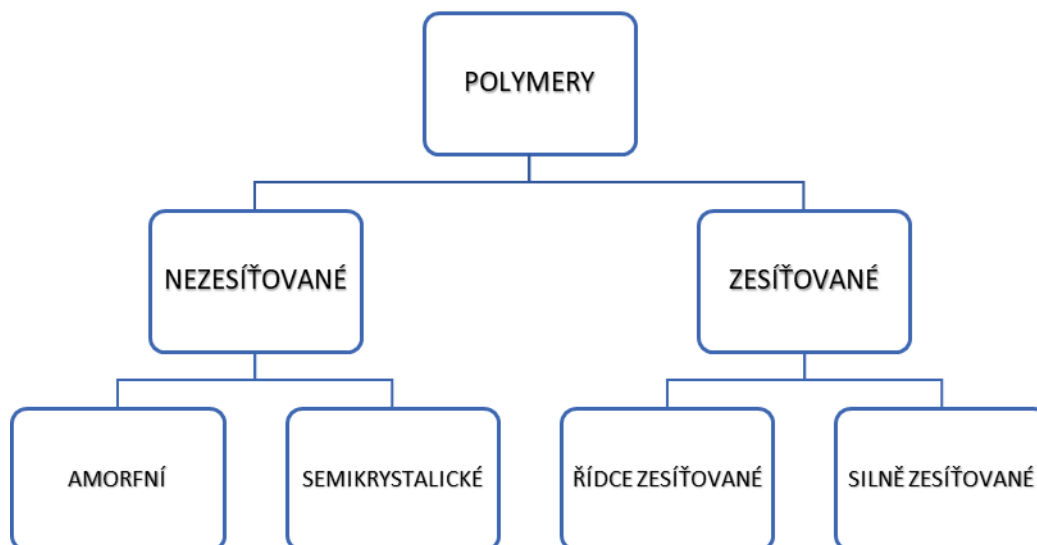
1.2 Struktura a vlastnosti polymerů

Polymerní materiály mají obrovské molekuly a jejich hodnota relativní molekulové hmotnosti se pohybuje v řádech od desíti tisíců až k milionu. Z toho vyplývá, že molekulová hmotnost polymerů je o mnoho řádů větší než u nízkomolekulárních látek. Základní stavební částice u polymerů jsou makromolekuly, které se vytváří pospojováním nízkomolekulárních látek tzv. monomerů. Syntetické polymery vznikají třemi základními metodami: polymerací, polyadící a polykondenzací. Zabudováním molekuly monomer do makromolekuly polymeru se stane základní stavební částice makromolekuly tzv. mer. Makromolekuly polymeru můžeme přirovnávat k řetězu a jeho článkem je mer. Někdy můžeme nazývat makromolekuly makromolekulárními řetězci, z nichž některé mohou být tvořeny mery jen jednoho druhu tzv. homopolymery a jiné mohou být tvořeny z různých druhů merů tzv. kopolymery. [2]



Obr. 2 Polyetylen jako příklad polymerní struktury [2]

Polymery jinak řečeno makromolekulární látky zahrnují velkou škálu nejrůznějších vlastností, a proto je velmi obtížné je rozdělit. Jedno rozdělení je uvedena na obr. 1 a další je patrné z Obr. 3. [2]

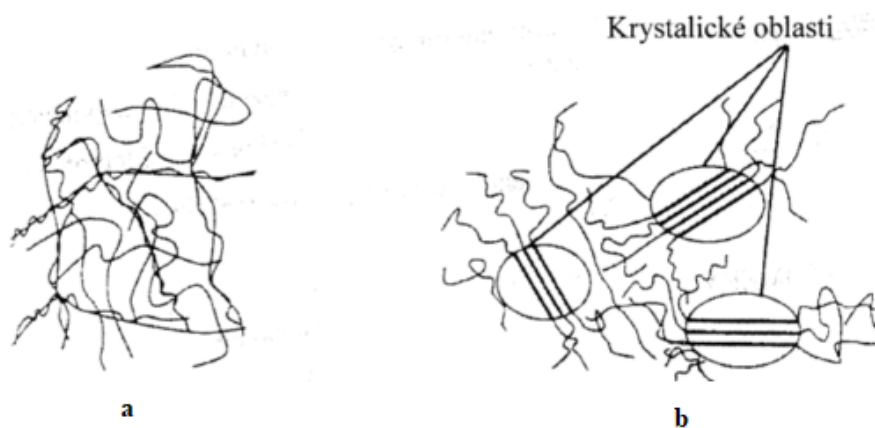


Obr. 3 Rozdělení polymerů [2]

1.2.1 Polymery nezesíťované

Polymery nezesíťované nemají žádnou chemickou vazbu mezi jednotlivými makromolekulami a z toho důvodu mohou být opakovaně zpracovávány. Amorfnní polymery mají makromolekuly uspořádané náhodně a bez přidání barviva se vyznačují jako transparentní. Semikrystalické polymery mají molekuly uspořádané v určitých oblastech pravidelně. Pravidelné uspořádání jednotek v prostoru se nazývá krystalizace polymerů.

Vlastnosti polymerních látek nedovolují úplnou krystalizaci a z toho důvodu se mezi oblastmi krystalickými objevují oblasti amorfní, a proto semikrystalické polymery. Podíl krystalické části bývá označován jako stupeň krystalinity. Stupeň krystalinity závisí na samotném materiálu, ale může být ovlivňován technologickými podmínkami během zpracování. Čím jednodušší je polymerní sktruktura řetězce tím je vyšší její stupeň krystalinity, a proto mají amorfní a semikrystalické polymery různé zpracovatelské a užité vlastnosti. Polymery se sklonem k samovolné krystalizaci jsou často termoplastické s velmi dobrou pevností a houževnatostí. Dále přechází velmi rychle z tuhé fáze do taveniny z toho důvodu se moc nehodí pro zpracování válcováním a vytlačováním, ale jsou vhodné pro zpracovatelské posty kde se vyžaduje rychle roztavení jako např. vstřikování. [2]



Obr. 4 Struktura polymerních materiálů [2]

a) amorfní, b) semikrystalické

1.2.2 Polymery zesíťované

Polymery zesíťované mají řetězce vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí trojrozměrovou síť. Zesíťované polymery vznikají buď zesíťováním lineárního nebo rozvětveného polymeru anebo vzájemnou reakcí dvou nebo více monomerů. Tento proces síťování polymerů umožňuje dosažení lepších vlastností polymerů, např. lepší tvarovou stálost za zvýšené teploty a zlepšení mechanických vlastností. Schématické znázornění charakteristických vlastností různých polymerů je uvedeno na Obr. 5. [2]

CHARAKTERISTIKA POLYMERU		VLASTNOSTI POLYMERU
TERMOPLASTY		
	lineární makromol. řetězce	tavitelný rozpustný v rozpouštědlech při pokojové teplotě houževnatý nebo křehký
	rozvětvené makromol. řetězce	
ELASTOMERY		
	řídce zesíťovaný	netavitelný botnající v rozpouštědlech nerozpustný v rozpouštědlech při pokojové teplotě elastický a měkký
TERMOSETY		
	hustě zesíťovaný	netavitelný nebotnající nerozpustný při pokojové teplotě tvrdý a křehký

Obr. 5 Charakteristické vlastnosti uvedených druhů polymerů [2]

1.3 Polyoxymethylen – POM

Termoplastické polymery na bázi formaldehydu se označují jako Polyoxymethylen, v technické praxi jako polyformaldehyd. Polyoxymethylen neboli POM je klasický konstrukční plast o vysoké hustotě vyráběný jako kopolymer, ale také jako homopolymer. Homopolymer je oproti kopolymeru tužší a má lepší chemickou odolnost. POM se vyznačuje vysokou tvrdostí, pevností a rázovou houževnatostí. Spolu s polyamidy mají ze všech jiných termoplastů nejvyšší odolnost proti oděru, ale také mají dobré elektroizolační vlastnosti. Materiál vyniká velkou odolností proti rozpouštědlům, olejům a plynům. Je to z toho důvodu, že si materiál zachovává krystalickou strukturu beze změny až do teploty tání. Přes skvělé mechanické vlastnosti je použití polyoxymethylenu omezeno. Je omezený na použití jen v uzavřených prostorech, kvůli relativně malé odolnosti vůči ultrafialovému záření a také podléhá degradaci účinkem ionizujícího záření, kde ztrácí své mechanické vlastnosti. Uvedený polymer lze trvale namáhat při teplotách 100 °C, krátkodobě při teplotách 150 °C a rozklad polyoxymethylenu nastává při 200 °C. POM se používá především jako konstrukční plast pro přesné výstřiky, které musí odolávat náhlým nárazům. Například klíny, západky u dveří automobilů, ozubených kol, ventilů, čerpadel, kloubových čepů a trubek a dalších. Uvedený polymer se z většiny případů zpracovává vstřikováním, ale také

vytlačováním a vyfukováním při teplotách 200–210 °C. Přídavkem nukleačních činidel lze zvýšit krystalizační rychlost při vstřikování, a tak zkrátit zpracovatelský cyklus. Přehled významných vlastností polyoxymethylenů jsou uvedeny v následující tabulce. [4, 5]

Tab. 1 Přehled významných vlastností u polymeru POM [5]

Vlastnost polymeru	Hustota	Pevnost v tahu	Tažnost	Modul pružnosti v tahu	Tvrdość kuličkou 10 s
Jednotka uvedené vlastnosti	[g·cm ³]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]
POM - Polyoxymethylen	1,41 - 1,42	62 - 70	10 - 25	2800 - 3500	150 - 170

Tab. 2 Přehled základních tepelných vlastností u polymeru POM [5]

Vlastnost polymeru	Maximální teplota použití	Minimální teplota použití	Tvarová stálost	Koeficient roztažnosti	Tepelná vodivost
Jednotka uvedené vlastnosti	[°C]	[°C]	[°C]	[K ⁻¹ ·10 ⁶]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
POM - Polyoxymethylen	90 - 140	-60	160	90 - 140	0,25 - 0,30

2 REOLOGIE ROZTAVENÝCH POLYMERŮ

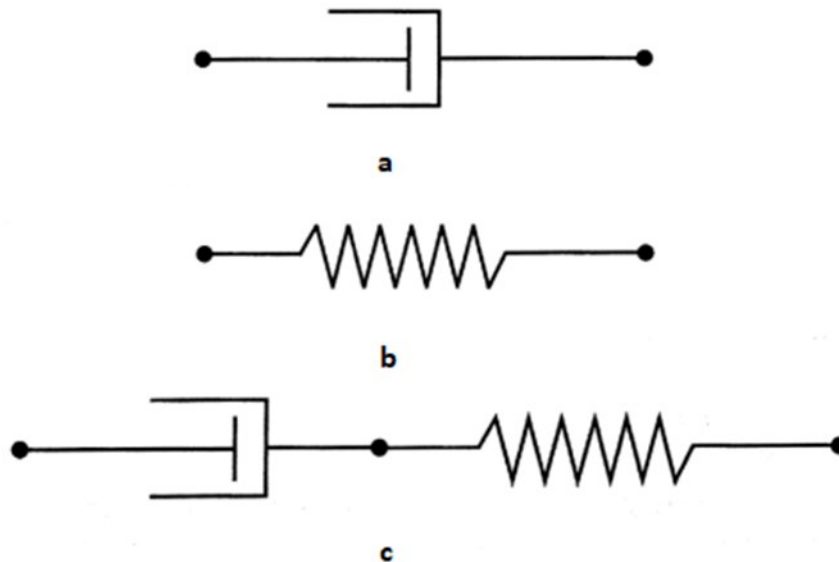
Termín reologie pochází z řečtiny, kde rheo znamená tok nebo proudění a byla definována jako vědní obor, který se zabývá deformací a tokem hmoty. Hlavním cílem reologie je měření, zkoumání a rozvoj vztahů mezi napětím a rychlostí deformace. Takové znalosti jsou pro problémy při zpracování polymerů nezbytné. Důležitým pojmem v reologii je působící síla, která má za následek deformace pevných látek nebo průtok kapalin. Tuhá tělesa za určitých okolností (čas) také tečou. Při působení napětí na polymerní taveniny mohou za určitých podmínek připomínat chování tuhých těles. U roztavených polymerů se nejprve pokusíme změřit průtokové vlastnosti a následně najít vztahy mezi tokovými vlastnostmi a molekulární strukturou. Při zkoumání se předpokládá, že jde o taveninu sousedící s pevným povrchem. Jinak řečeno, tavenina v bodě kontaktu s pevnou látkou nabírá rychlost. Tokové vlastnosti polymerů závisí na jejich molekulové hmotnosti a molekulární architektuře. Základní reologickou vlastností je viskozita, která charakterizuje tokové chování. Tahová (elongační) viskozita je druhou nejdůležitější reologickou vlastností. Skluz na stěně, modul pružnosti ve smyku a rozdíly normálových napětí jsou další důležité reologické vlastnosti. Měření reologických vlastností je nezbytné pro účely návrhu zařízení nebo procesů, ale také pro odstraňování problému a k optimalizaci výrobních procesů. K měření reologických vlastností se používají například kapilární viskozimetry a rotační reometry. [6, 8]

Každoročně je vyprodukováno více než 350 milionů tun polymerů, z toho většina představuje termoplasty. Termoplasty jsou taveny a následně je jim udáván tvar pomocí forem nebo také vytlačovacích hlav. K vytvoření finálních výrobků dochází po zatuhnutí taveniny. Z toho důvodu má velký význam zkoumání toku taveniny za specifických procesních podmínek. Je velmi důležité se zabírat tokovými vlastnostmi materiálů, které vedou k vhodnému zvolení nástrojů pro zpracování a taktéž k optimalizaci výrobních procesů. [7]

2.1 Chování polymerní taveniny

Polymerní taveniny jsou kapaliny, které tečou pod smykovým napětím a zároveň materiály, u kterých viskozita klesá se zvyšující se smykovou rychlostí. Polymerní taveniny se také vykazují elastickým chováním a často se označují jako viskoelastické materiály to znamená, že se tavenina chová viskózně jako kapalina, ale také elasticky jako tuhá látka. K popisu tohoto viskoelastického chování používáme Maxwellův model. Tento model tekutosti je vytvořen při sériové kombinaci elastického a viskózního prvku. Nejjednodušší viskózní

model kapaliny je Newtonský a nejjednodušší elastický model tuhé látky je Hookův. Všechny zmíněné modely jsou znázorněny na obr. 6. [2, 11]



Obr. 6 Modely charakterizující viskoelastické chování [2]

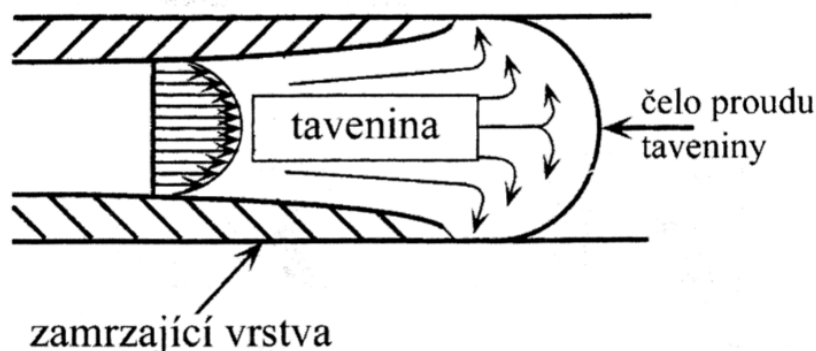
a) Newtonský model, b) Hookův model, c) Maxwellův model

U polymerních materiálů není dostačující charakterizovat polymery pouze jejich viskozitou, ale také pomocí jejich relaxační doby. Relaxační doba nám zjednodušeně charakterizuje čas pro rozložení (relaxace) napětí. U materiálu, který má dlouhé doby relaxace, je možné, že během zpracování ztuhne dříve, než je napětí úplně zrelaxovalo. Tato vzniklá napětí mohou být nakonec uvolněná a mohou vést k nežádoucím jevům např. smrštění, deformace anebo ke vzniku trhlin. Relaxační doby jsou ovlivněny pružností a velikostí daného polymeru. [2]

2.1.1 Tok polymerní taveniny ve vstřikovací formě

Z důvodu poměrně vysoké viskozity u polymerních materiálů lze očekávat, že jejich tok uvnitř kanálků vstřikovací formy bude skoro vždycky laminární. Při zaplňování dutiny vstřikovací formy nedochází ke skluzu taveniny po stěně, ale dochází k tzv. válení taveniny, často je tento jev také pojmenováván jako rozbalující se koberec. Polymerní tavenina je u stěny ochlazována a tím pádem roste odpor proti toku. Ovšem ve středu průřezu je teplota stále vysoká a okolní polymerní taveniny slouží jako izolant. Materiál tekoucí středem kanálku je neustále tlačěn k obvodu, kde tuhne a teče proti směru toku. Nový materiál tekoucí za ním protéká dál mezi ztuhlými vrstvami. Když se nový materiál dostane na špici toku je také stlačen ke stěně, kde ztuhne. Takový pohyb materiálu na špici toku je podobný

jako tryskání vody ven z fontány, a proto se tento tok nazývá fontánový. Rychlostní profil má zvonovitý charakter a největší rychlost toku je ve středu. [2, 10, 18]

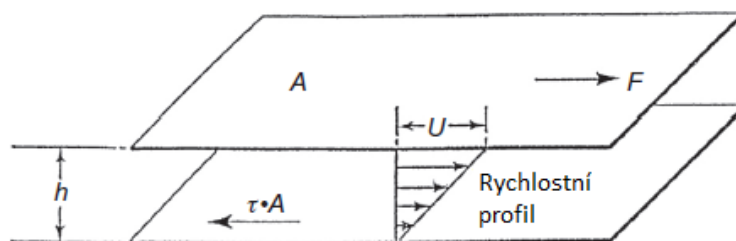


Obr. 7 Ukázka fontánového toku [2]

2.2 Viskozita

Reologické chování je označováno jako viskoelastické. To nám určuje, že tavenina se chová viskózně jako kapalina, ale také se chová elasticky jako pružná látka. Kapalinové viskózní vlastnosti mohou být charakterizovány viskozitou, která, jak už bylo uvedeno výše, nám udává míru vnitřního odporu při toku. Aby mohl být zajištěn tok je zapotřebí hnací síly, její velikost závisí na velikosti makromolekul, molekulové hmotnosti a na dalších parametrech. Toky vzniklé ve zpracovatelských strojích způsobují smykové namáhání taveniny. Zmíněné smykové namáhání se objevuje z důvodů adheze k přilehlým povrchům. Lepší definice viskozity by se dala nazvat jako odpor proti smykovému namáhání. Z následujícího obrázku můžeme také definovat viskozitu jako poměr působícího smykového napětí a smykové rychlosti neboli rychlosti smykové deformace. Smykové napětí je definováno jako síla F , která působí tangenciálně a je podělena plochou A . Rychlost smykové deformace lze definovat jako rychlost U podělená mezerou mezi deskami h . [2, 8]

$$\eta = \frac{\text{smykové napětí}}{\text{smyková rychlost}} = \frac{F/A}{U/h} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

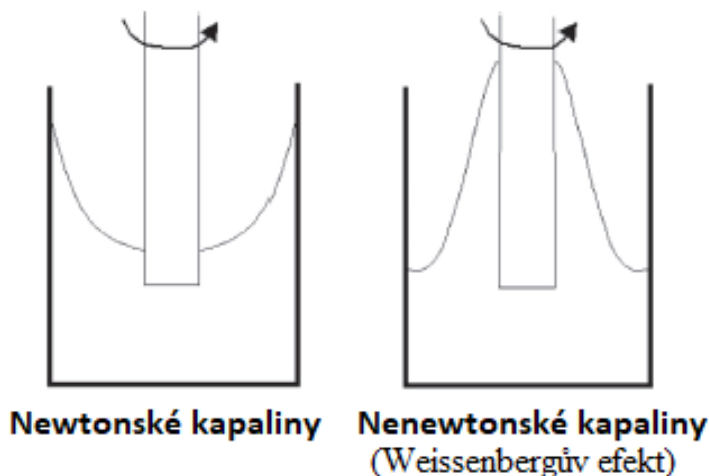


Obr. 8 Rychlostní profil smykového toku mezi nepohyblivou a pohybující deskou [8]

Uvedená rovnice (1) se nazývá Newtonův zákon viskozity a z toho vyplývá, pokud viskozita je nezávislá na smykové rychlosti tak tekutina se nazývá newtonská. Příkladem newtonských tekutin jsou voda, rtuť a další. Roztavené polymery, polymerní roztoky a další komplexnější kapaliny mají viskozitu závislou na smykové rychlosti a ty se nazývají neneutonské. Zajímavou vlastností polymerních kapalin je jejich chování při zmenšování smykového napětí, známe jako pseudoplastické chování. Pokud zvýšíme smykovou rychlost vytlačování (tzn. vytlačování bude probíhat rychleji), viskozita klesá. Tohle snížení viskozity je kvůli molekulárnímu zarovnání a rozpletení dlouhých polymerních řetězců. Čím vyšší je smyková rychlost, tím je jednodušší pohyb po kovovém povrchu pro daný polymer. Nízká smyková rychlost na stěně znamená pomalý pohyb polymerní taveniny po kovovém povrchu. Podle druhu zatížení potom rozlišujeme mezi smykovou a elongační (tahovou) viskozitou. A dále podle způsobu měření se rozlišuje mezi dynamickou a kinematickou viskozitou, které jsou vzájemně závislé. [6, 8]

2.3 Normálová napětí

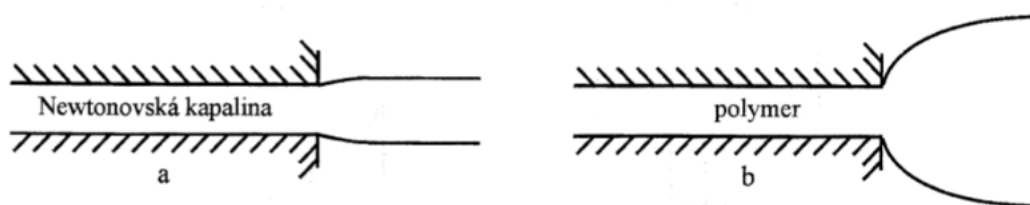
Mnoho tekutin, které jsou vystaveny jednoduchému smykovému toku, vyvíjí nejen smykové napětí, ale také normální napětí. Napětí je definováno jako síla dělená plochou, síla působící tangenciálně na povrch a odpovídá napětí, které se označuje jako smykové. Když síla působí kolmo na povrch, nazývá se normálovým napětím. Když tekutina protéká potrubím, působí na ni normálové (tlakové) síly, a na stěny potrubí smykové (napěťové) síly. Při protékání matricí je smykové napětí nulové ve středu potrubí a maximální u zdi. Tato napětí se také projevují v mnoha důležitých tocích. Například když se tyč otáčí kolem své osy kolmo na volný povrch newtonovské kapaliny, povrch kapaliny je stlačen v blízkosti tyče, z důvodu působení odstředivé síly, která doprovází indukovaný rotační tok. Bylo však pozorováno, že u neneutonské kapaliny (např. Polymerní tavenina) se u tyče vyvine opačný efekt. Tento efekt (šplhání po tyči) je možná nejznámějším fenoménem normálového napětí, který se nazývá Weissenbergův efekt zobrazený na obrázku níže. Weissenbergův efekt se děje z důvodů, že polymerní materiály mají dlouhé molekulové řetězce, kde vnikají anizotropní nebo nestejně vlastnosti při proudění. [8, 9]



Obr. 9 Chování kapalin v nádobě při rotaci [8]

Weissenbergov efekt neboli šplhání po tyči může být využit pro měření rozdílů normálových napětí. Pomocí zařízení kužel-deska se měří normálová síla N . Tato síla se vyvíjí ve šterbině mezi kuželem a deskou právě vlivem rozdílů napětí. Normálová napětí mohou být taky použita pro charakterizační účely. Normálová napětí jsou v závislosti na velikosti molekulové hmotnosti, a proto pro některé polymery je napětí velké a pro jiné malé. Polymery s velkou molekulovou hmotností se vykazují velkým rozdílem normálových napětí. [2]

Když jsou z otvoru nebo trubice vytlačovány polymerní taveniny, tak pozorujeme narůstání nebo bobtnání za hubicí. Při opouštění polymerní taveniny z hlavy nebo hubice je rozdíl normálového napětí příčinou zmíněného narůstání nebo bobtnání taveniny. Průchodem vytlačovací hlavy se polymerní řetězce natahují a vyvíjejí napětí. Bylo zjištěno, že narůstání může dosahovat až 400 %. [2, 8]

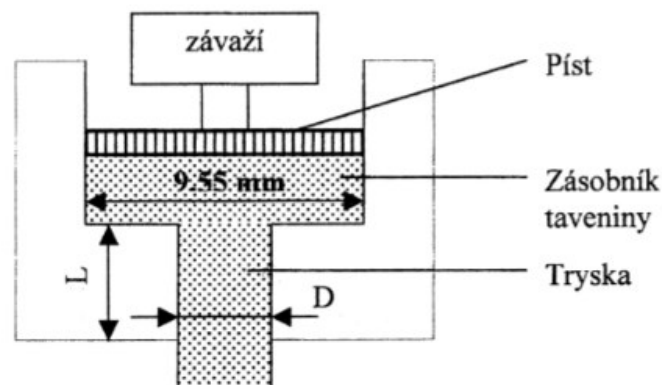


Obr. 10 Narůstání za hubicí [2]

a) Newtonovské kapaliny b) polymery

2.4 Index toku taveniny

Pomocí jednoduchého kapilárního viskozimetru viz. obr. 10 je možné měřit index toku taveniny, která má předem danou zátěž, jež je polymerní tavenina vytlačována tryskou o přesných předepsaných rozměrech, a to podle normy ASTM. Takže index toku taveniny (Melt Flow Index) zkratka MFI, představuje množství vytlačeného polymeru v gramech za 10 minut při přesně stanovených podmínkách. [2, 7, 8]



Obr. 11 Ukázka principu přístroje pro měření indexu toku taveniny [2]

Jednoduchá zkouška pro zjištění hodnoty indexu toku taveniny se používá pro účel kontroly kvality, a udává hrubý odhad viskozity a přibližně průměrnou hodnotu molekulové hmotnosti. Rozsah hodnot indexu toku taveniny se pohybuje v rozmezí od 1 do 25. Nízká hodnota indexu toku taveniny znamená vysokou viskozitu a také vysokou molekulovou hmotnost, zatímco vysoká hodnota indexu toku taveniny znamená opak. Index toku taveniny nám udává informace o molekulové hmotnosti a viskozitě polymer, ale není podstatnou vlastností. Je výhodná a používá se k rozlišení polymerů různých typů. V otázce zpracování může být, ale někdy klamná. Jsou skupiny polymerů, kde mohou mít stejnou hodnotu indexu toku taveniny, ale různé hodnoty viskozity, a i tak jsou polymerní materiály prodávány podle indexu toku taveniny. [2, 7]

2.5 Modul pružnosti

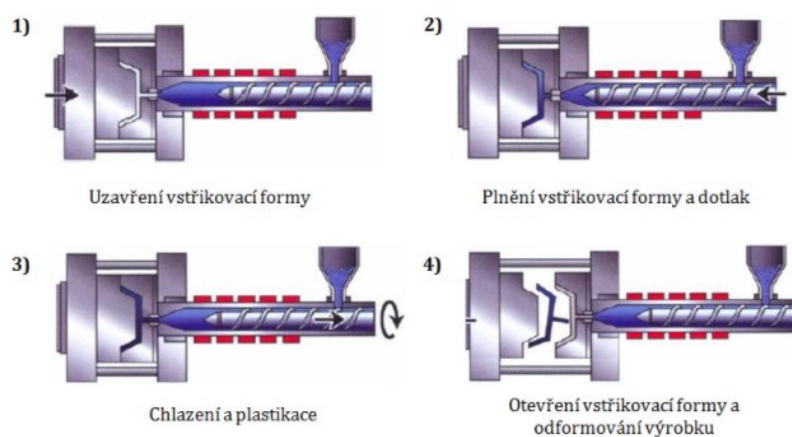
Měření modulu pružnosti je nejspolehlivější metodou pro stanovení pružnosti polymerní taveniny, která zase souvisí s několika dalšími zpracováními a vlastnostmi pro konečné použití. Vyšší modul pružnosti znamená vysokou molekulovou hmotnost v křivce distribuce molekulové hmotnosti. Během zpracování mají pružnější polymery tendenci vyvíjet větší normálové napětí, které má za následek větší bobtnání za hubicí. Po finálním ochlazení

výrobku jsou více namáhány a při opětovném ohřátí se může vyskytnout pokřivení. Odolnost proti praskání je obvykle vyšší u pružnějších polymerů. Rozdíly mezi polymery nelze detekovat pouze pomocí indexu toku taveniny, ale může se zobrazit křivka viskozity, kde je velmi jasné srovnání pomocí dat modulu pružnosti. [7]

3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

V dnešní době je technologie vstřikování jedna z nejdůležitějších a nejrozšířenějších technologií, která se používá pro zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, kompozitů, ale i reaktoplastů, kaučuků a pryží. Vstřikování plastů se využívá pro výrobu plastových dílů pro širokou oblast průmyslových aplikací, a to od spotřebního průmyslu přes automobilový, letecký, medicínský, potravinářský až po vojenský průmysl. Vyznačuje se poměrně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a forma. Technologie vstřikování plastů vychází svým principem z technologie tlakového lití, ale za výrazně jiných zpracovatelských teplot a tokových vlastností taveniny. Základ technologie vstřikování je založen na cyklickém opakování jednotlivých částí výrobního cyklu, jedná se tedy o diskontinuální neboli cyklický proces. Technologie vstřikování je takový způsob zpracování polymerů, při kterém je potřebná dávka taveniny vstříknuta do uzavřené dutiny vstřikovací formy. [4, 12, 13, 15, 17]

Princip technologie vstřikování je následující, polymerní materiál je nasypán do násypky, ze které je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje, a to pomocí šneku nebo pístu. Materiál se dopravuje do tavicí komory, kde za působení tření a ohřívání materiál taví a vzniká tavenina. Vzniknutá tavenina je následně vstříknuta do dutiny formy pomocí vstřikovacího tlaku. Forma je zcela zaplněná a tavenina získá její tvar a objem. Po zaplnění následuje dotlak, který zajistí snížení smrštění a rozměrových změn. Polymerní materiál ve formě předává teplo a postupným ochlazením ztuhne na finální výrobek. Následně se dutina vstřikovací formy otevírá a výrobek je vyhozen pomocí vyhazovacího systému a celý výrobní proces se opakuje. [4, 12, 13, 15, 17]

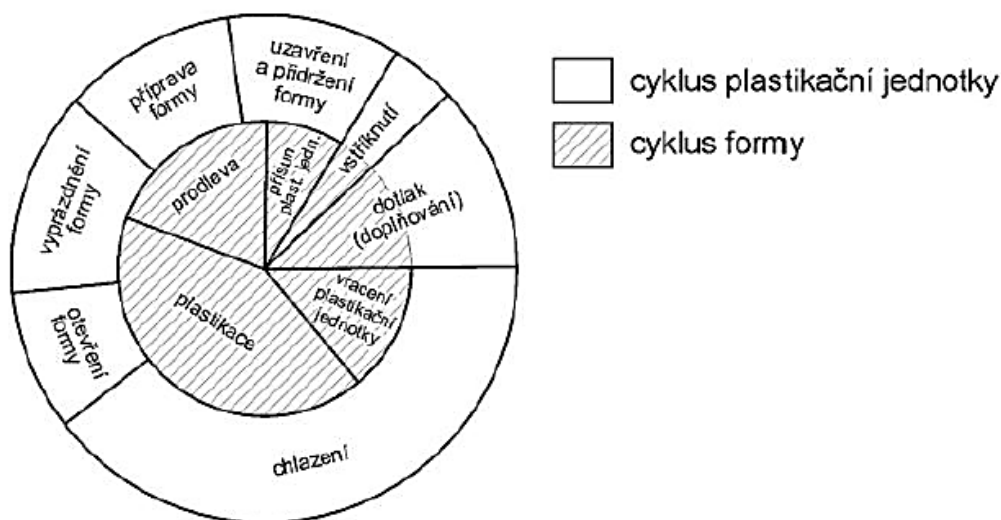


Obr. 12 Ukázka principu vstřikování [20]

Vstřikováním se vyrábějí výrobky, které mají buď charakter konečného výrobku anebo to jsou polotovary nebo díly pro další použití v kompletaci výrobního celku. Zhotovené výrobky se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností, ale také dobrými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi. Je nesporné, že kvalita použitého plastu bude vždy důležitá a volba správného typu bude mít podstatný vliv na konečnou aplikaci. Je třeba si také uvědomit, že nesprávným technologickým postupem může docházet k degradaci plastu a z toho důvodu je nezbytné mít znalosti a dokonale znát technologický postup a respektovat ho. [4, 12, 13, 15, 17]

3.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně definovaných postupných fází, které se svou činností podílí na výrobě finálního vstřikovaného výrobku. Je to také proces, během kterého plast prochází teplotním a tlakovým cyklem. Vstřikovací cyklus zahrnuje dvě oblasti, jedna se vztahuje k plastikační jednotce a druhá k formě. [2, 21]



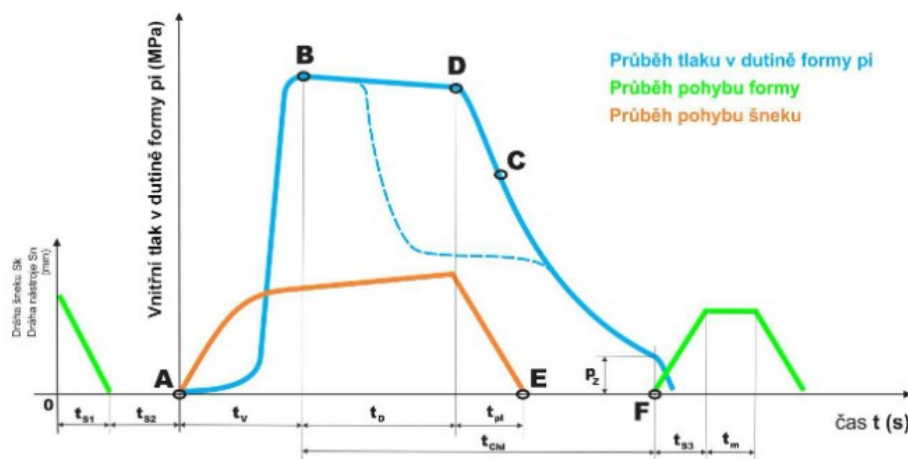
Obr. 13 Časový diagram vstřikovacího cyklu [21]

Celý vstřikovací cyklus začíná uzavřením formy a zároveň tím dochází k plastikaci ve vstřikovací jednotce. Poté je vstřikovací jednotka přisunuta k formě a po dosednutí nastává vstřikování plastikovaného materiálu do dutiny formy. Po zaplnění dutiny formy taveninou dochází k postupnému tuhnutí, které je provázáno objemovými změnami. Doba plnění nám udává dobu potřebnou k zaplnění formy. Po zaplnění dutiny vstřikovaným materiálem působí tlak, který nám zajišťuje dokonalý tvar a rozměry budoucího výrobku zvaný jako dotlak. Hodnota dotlaku bývá stejná nebo nižší než hodnota vstřikovacího tlaku. Doba, po kterou dotlak působí se nazývá doba doplňování. Dotlak má snižovat vliv smrštění

a zabránit unikání materiálů z dutiny formy. Doba doplňování je omezena zatuhnutím vtokového systému. Velikostí dotlaku se dá ovlivnit zbytkové pnutí ve vstřiku, kde jejím snížení nebo zkrácením doby doplňování lze snížit zbytkový tlak v dutině formy. Následně po doplňování dochází k ochlazení vstřiku, který probíhá uvnitř vstřikovací formy nebo mimo ni. Po zatuhnutí vtokového systému následuje odsun vstřikovací jednotky a po zatuhnutí taveniny se forma otevírá a výrobek je vyhozen. Ve vstřikovací jednotce mezitím probíhá příprava taveniny a celý cyklus se opakuje. Přesné dodržování jednotlivých sekvencí pracovního cyklu je nutným předpokladem dokonalého plastového výrobku. Celý vstřikovací cyklus je znázorněn na časovém diagramu (Obr. 16), kde jsou zobrazeny jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu, jak jdou za sebou. Vstřikovací cyklus můžeme dále popsat jak z hlediska časového průběhu vstřikovacího tlaku, tak i z hlediska p-v-T diagramu. [2, 13, 21]

3.1.1 Vstřikovací cyklus v diagramu $p_i - t$

Jako první je možné popsat vstřikovací cyklus jako časovou závislost vstřikovacího tlaku v dutině vstřikovací formy. [12]



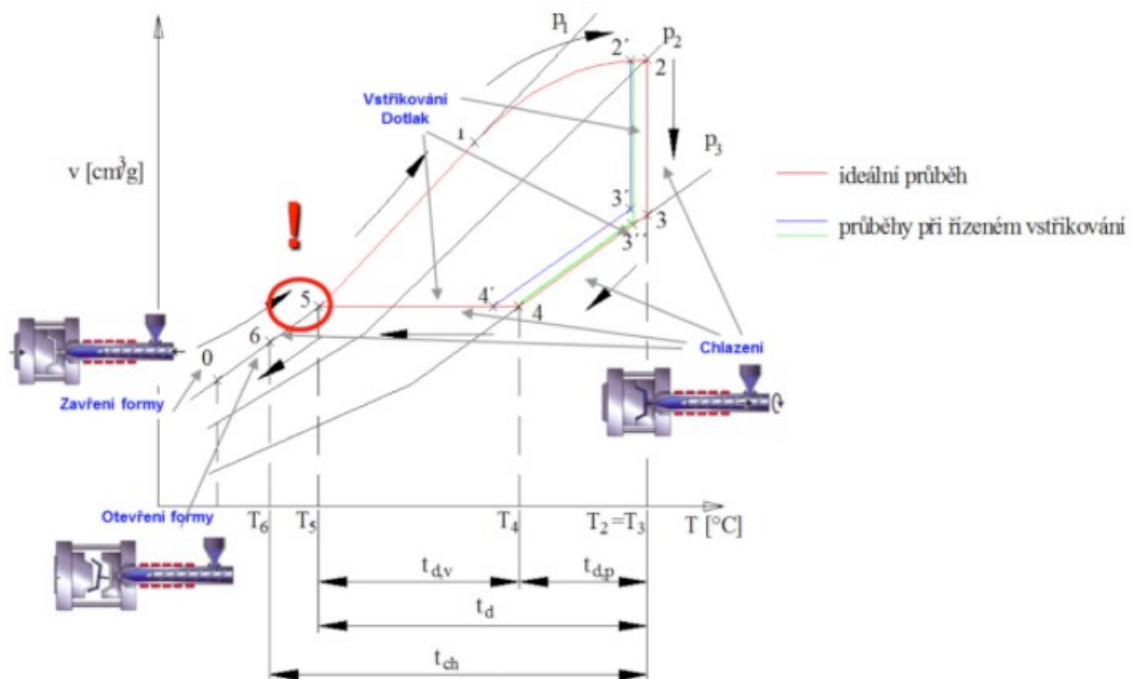
Obr. 14 Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [12]

Na začátku vstřikovacího cyklu (v nulovém čase) je dutina formy prázdná a forma je otevřená, následně stroj dostává impuls k zahájení vstřikovacího cyklu. V časovém úseku t_{s1} je forma uzavřena a časový úsek t_{s2} je vyhrazen pro přísun vstřikovacího stře k formě. Časové úseky t_{s1} a t_{s2} jsou označovány jako strojní časy. V bodě A se začíná pohybovat šnek v tavicí komoře plastikační jednotky a začíná vstřikování taveniny do dutiny vstřikovací formy. Časový úsek t_v se nazývá doba plnění a vstřikovací tlak dosahuje maximální hodnoty. Tento děj končí v bodě B, kde objem taveniny dosahuje až 97 % objemu dutiny formy. Hned

po vstříknutí taveniny do dutiny vstříkovací formy začne tavenina předávat teplo a začíná chladnout. Ochlazování přetrvává až do otevření formy a vyhození vstříku ze vstříkovací formy. Tenhle časový úsek se nazývá doba chlazení a je označován jako t_{ch} . V průběhu chlazení se plast smršťuje a zmenšuje svůj objem, aby se na vstříku neobjevily propadliny a další nežádoucí jevy, a tak je nutné kompenzovat zmenšování objemu dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Tento úsek cyklu se nazývá doba dotlaku a značí se t_d . Dotlak se rozděluje na izobarický za konstantního tlaku a izochorický za konstantního objemu. Doba dotlaku končí v bodě D a následně bod C nám označuje místo, kde dochází k zatuhnutí vtokového kanálku. Při dotlačování musí být před čelem šneku určitý objem materiálu tzv. polštář. Tento objem nemůže být moc velký, aby nedocházelo k degradaci hmoty. Ihned po dotlaku začíná plastikace nové dávky materiálu. Časový úsek se značí t_{p1} a končí v době E. Šnek se začíná otáčet a pod násypkou nabírá nový materiál. Dochází k plastikaci a materiál je vytlačován do prostoru před šnekem. Současně při tom se posouvá dozadu a musí překonávat zpětný tlak, který vzniká při plastikaci. Ohřev plastu při plastikaci se děje převodem tepla ze stěn válce, ale i teplem vzniknutém během tření materiálu o stěny komory a o povrch šneku a dále přeměnou práce šneku na teplo. Během fáze chlazení tlak ve vstříkovací formě stále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z . Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vysokého pnutí, které může způsobovat deformace vedoucí až k samovolnému prasknutí vstříku. V bodě F se vstříkovací forma otevře a výrobek je vyhozen ze vstříkovací formy. Je-li při vyhození výrobku nutný manipulátor je potřeba dalšího strojního času t_m . Tento čas je možné využít k dalším činnostem např. dávkování separačního prostředku, vkládání kovových zálisků nebo k očištění formy. [12, 24]

3.1.2 Vstříkovací cyklus v diagramu $p - v - T$

Vstříkovací cyklus v diagramu $p-v-T$ popisuje daný cyklus pomocí stavových termodynamických veličin, tj. tlaku p , měrného objemu v a teploty hmoty T . Průběh stavových veličin je v různých místech vstříku odlišný a je ovlivněn mnoha faktory: druhem zvoleného plastu, tvarem výrobku, tloušťkou stěn, vstříkovacím tlakem a rychlostí, dotlakem, teplotou taveniny a formy. Změny stavových veličin potom přímo určují vznik struktury a ovlivňují hmotnost a rozměry vstříku. Příklad zakresleného vstříkovacího cyklu v $p-v-T$ diagramu je ukázán na obr. 15. Řízení vstříkovacího cyklu pomocí diagramu $p-v-T$ patří k moderním metodám zpracování termoplastů a definuje průběh dotlaku s ohledem na požadovanou přesnost výrobku. [12, 17, 19]



Obr. 15 Vstřikovací cyklus v p - v - T diagramu [12]

Na začátku dochází opět k uzavření formy a začátek procesu vstřikování začíná v bodě 0, tedy při pokojové teplotě a barometrickém tlaku označeném jako p_1 . Následuje ohřev a plastikace plastu v plastikační komoře vstřikovacího stroje. V bodě číslo 1 dochází k tavení materiálu a k narůstání tlaku až na hodnotu p_2 . Vlivem topení a tření stále pokračuje narůstání i teploty vzniknuté taveniny. V bodě číslo 2 začíná fáze vstřikování, kde prudce začne narůstat tlak vyvolaný pohybem šneku. Tlak stoupá až na maximální hodnotu p_3 . Po dosažení hodnoty maximálního tlaku se vstřikovací tlak přepne na dotlak, který probíhá ve dvou fázích. První fáze probíhá mezi body 3 a 4 a jedná se o izobarický dotlak působící za konstantního tlaku. V bodě 4 se dotlak změní na izochorický, který působí za konstantního objemu. Tato fáze končí v bodě číslo 5, kde hodnota tlaku klesne na hodnotu p_1 a dotlak už nemůže ovlivňovat průběh tlaku v dutině nástroje. Poloha bodu 5 zásadně ovlivňuje kvalitu vstřiku a jeho vlastnosti jako jsou hmotnost, smrštění a rozměry vstřiku. Ochlazení vstřiku probíhá ve formě již za fáze vstřikování, ale i v průběhu fáze dotlaku. Fáze ochlazení probíhá za působení současného tlaku. Během zmíněného chladnutí však dochází k poklesu tlaku v dutině formy, a to až na hodnotu zbytkového tlaku. V posledním bodě číslo 6 dochází k otevření formy a výrobek je vyhozen ven. V oblasti mezi bodem 6 a 0 výrobek chladne mimo vstřikovací formu a postupně se dostane na hodnoty teploty okolí, tedy výchozího bodu 0. Z pohledu na kvalitu vstřikovaných dílů by bylo ideální, kdyby všechny vstřikované díly měly stavové veličiny (odpovídající bodu 5). Shodné stavové veličiny by vedly k tomu, že by výrobky dosahovaly stejné hmotnosti, rozměrů a kvality povrchů atd. [12, 18, 19]

3.2 Popis a vliv jednotlivých fází vstřikovacího cyklu

Jak bylo popsáno výše, vstřikovací cyklus je postupný sled operací vedoucí k výrobě plastového výstřiku. Jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu trvají různě dlouhou dobu a jsou ovlivněny např. materiálem, geometrií vstřiku a technologickými podmínkami vstřikování. [12]

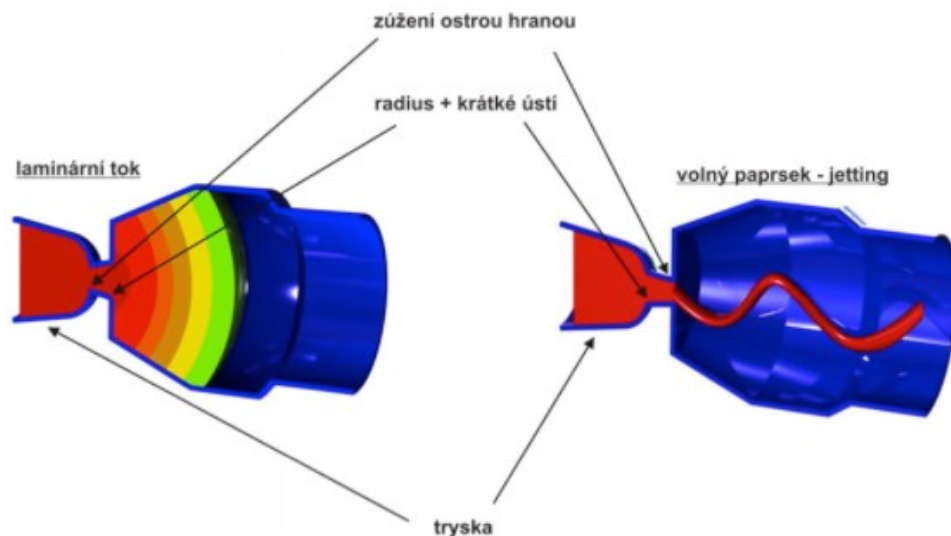
3.2.1 Strojní doby

Strojní doby na zavření vstřikovací formy t_{s1} a otevření formy t_{s3} a případně doby t_{s2} na přisunutí a odsunutí vstřikovací jednoty závisí na rychlosti a pohybu vstřikovacího stroje na dráze, kterou musí vstřikovací forma urazit. Dráha otevření a zavření vstřikovací formy je dána rozměrem vstřiku. Dotyčná dráha musí být tak velká, aby bylo možné výrobek z formy vyjmout, a aby bylo dost místa pro činnost manipulátoru ve formě. V dnešní době je snahou strojní časy zkrátit na minimum, kterého lze dosáhnout zvýšením rychlosti pohybující se formy. U novějších modernějších strojů není tato rychlost po celé dráze stejná. Při zavírání se forma ze začátku pohybuje velkou rychlostí, ale těsně před dosednutím formy se její rychlost sníží, tak aby se obě části formy nezničily nárazem a dosedly měkce a bez poškození. Téměř stejně je to i při otevírání formy, kde je její rychlost vysoká a před dojezdem formy na doraz se rychlost sníží, aby vyhození plastových výrobků mohlo probíhat pomalu. Celková doba uvedených strojních časů u strojů středních velikostí trvá pouze pár vteřin, tato doba je u vstřikovacího cyklu překryta dobou chlazení. [12, 13, 19]

3.2.2 Doba vstřikování

Proces plnění dutiny vstřikovací formy, od které se odvíjí vstřikovací čas t_v je jednou z nejdůležitějších fází během technologie vstřikování. Rozhoduje nejen o tom, jestli dojde k zaplnění dutiny, ale také o vlastnostech vstřikovaného výrobku. Celková doba plnění se pohybuje od zlomku sekundy až do několika sekund, záleží na velikosti vstřikovaného dílu. Jedná se tak o velmi krátký úsek, aby nedocházelo k zatuhnutí čela taveniny. Doba plnění má být co nejkratší, protože vstřikovaná tavenina se dotykem s chlazenou formou ochlazuje a ztrácí tekutost, takže při dlouhé době by nezaplnila celou dutinu vstřikovací formy a vznikl by nedostříknutý zmetek. Je nutné si i uvědomit, že k určité hodnotě vstřikovací rychlosti patří určitá hodnota vstřikovacího tlaku. Nelze nastavovat velkou vstřikovací rychlost při nízkém tlaku. Vysoká hodnota vstřikovací rychlosti má dobrý vliv na orientaci makromolekul, ale může docházet k zvýšenému nebezpečí přehřátí a k degradaci materiálu.

Proces plnění dutiny vstřikovací formy se musí řídit tak, aby tavenina vtékala do formy postupně, a ne volným tokem viz. Obr. 16. [12, 13, 19]



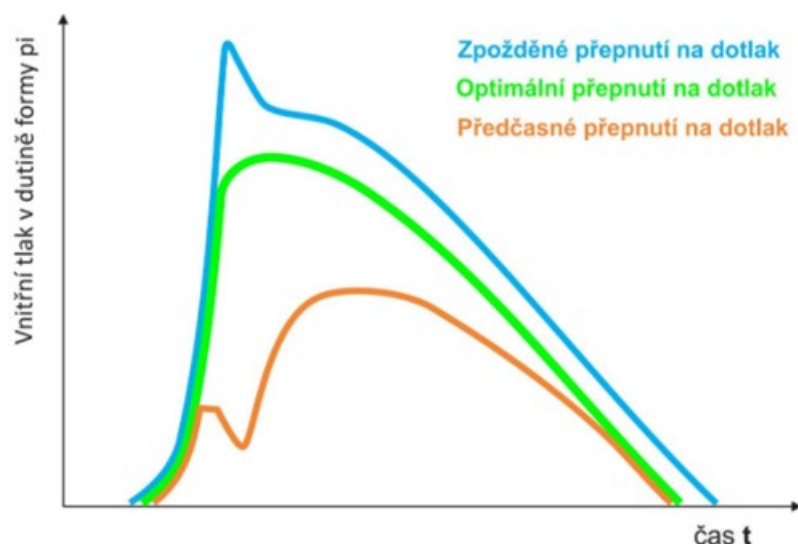
Obr. 16 Proces plnění pomocí laminárního a volného toku [12]

Při postupném plnění pomocí laminárního toku se jedná o složitý mechanismus tuhnutí vrstev taveniny, z důvodu že teplota vstřikovací formy je mnohem nižší než teplota vstřikované taveniny. Tavenina při dotyku se stěnou formy okamžitě ztuhne a vytváří nepohyblivé a izolační vrstvy. Následně uvnitř tloušťky stěny je plastické jádro s nízkou viskozitou, které umožňuje další průtok taveniny do dutiny formy. Tavenina se dále roztéká směrem ke stěnám až dojde k zaplnění tvarové dutiny. Z důvodu zvyšující se viskozity taveniny poblíž stěny formy dochází k rostoucí rychlosti v plastickém jádru. K plnění dutiny vstřikovací formy dochází pomocí pohybu šneku. Rychlost pohybu je závislá na technologických podmínkách, jako je teplota taveniny, vstřikovací tlak a teplota vstřikovací formy. Konec doby vstřikování nastává, když je dutina vstřikovací formy zcela zaplněna a vyznačuje se prudkým nárůstem tlaku ve formě. Tento prudký nárůst tlaku je následně kompenzován fází dotlaku. [12, 13, 19]

3.2.3 Doba dotlaku

Po naplnění tvarové dutiny vstřikovací formy následuje fáze dotlaku, která má vykompenzovat zmenšování objemu (smrštění) vyráběného výrobku během procesu chlazení. Fáze dotlaku je možné vykonávat pouze v době, kdy je možné taveninu stále dodávat do dutiny formy, tedy do doby, než dojde k zatuhnutí vtokového systému. Doba dotlaku t_d nám udává časovou fázi mezi koncem fáze plnění a začátkem fáze plastikace. Její trvání je závislé na průřezu vtokového ústí, ale také na teplotě taveniny a vstřikovací formy.

Dalším důležitým úkolem dotlaku ve vstřikovacím cyklu je zmenšení tlaku uvnitř dutiny vstřikovací formy, a to z toho důvodu, že po naplnění dutiny dochází ke stlačení hmoty a tlak prudce stoupne a rychlost klesne. Pokud by tlak zůstal na stejné hodnotě jako na začátku, tak by docházelo ke zvýšení hmotnosti, rozměrů výstřiku a k vysokému namáhání vstřikovací formy. Tohle namáhání může vést, až ke vzniku velkého pnutí ve výrobku, anebo k prohnutí vstřikovací formy, resp. ke krátkému otevření formy. Aby nedocházelo k těmto nepříjemným jevům je tedy nutné po určité době přejít na dotlak. Dojde-li k přepnutí na dotlak později, stoupne tlak příliš vysoko a dochází k nežádoucím jevům popsané výše. Naopak při předčasném přepnutí dochází k opačným jevům jako může být nedostříknutí vyráběného výrobku a další. Fáze dotlaku má tedy velký vliv na výsledné vlastnosti a kvalitu vstřiku a její správný průběh nám zaručuje dokonalé plnění dutiny vstřikovací formy. [12, 13, 19]



Obr. 17 Znárodný vliv doby přepnutí na tlak uvnitř dutiny vstřikovací formy [12]

3.2.4 Doba plastikace

Doba plastikace t_{pl} je čas, který je potřebný k tomu, aby došlo k plastikaci dávky polymerního materiálu a k jejímu rovnoměrnému zhomogenizování a umístění dávky před čelo šneku. V průběhu fáze plastikace je nutné dosáhnout požadované teploty taveniny T_{tav} , která ovlivňuje řadu dalších parametrů jako např. velikost a průběh tlaku, dobu vstřikování, dotlaku a chlazení. Velikost polymerní dávky musí naplnit dutinu vstřikovací formy, vtokové ústí, ale i kompenzovat změnu objemu vlivem smrštění. Teplo potřebné k dovedení dávky do plastického stavu je přibližně z jedné třetiny dodáváno elektrickým topením a zbytek tepla je dodáván třením hmoty při hnětení. Doba plastikace nemá na celkovou délku

vstřikovacího cyklu žádný vliv, a to z toho důvodu, že fáze plastikace probíhá během fáze chlazení. Zatímco vstříknutý díl se ochlazuje v dutině vstřikovací formy, tak u uvnitř plastikační jednotky vstřikovacího stoje se připravuje potřebné množství polymerní taveniny pro další vstřikovací cyklus. [12, 13, 19]

3.2.5 Doba chlazení

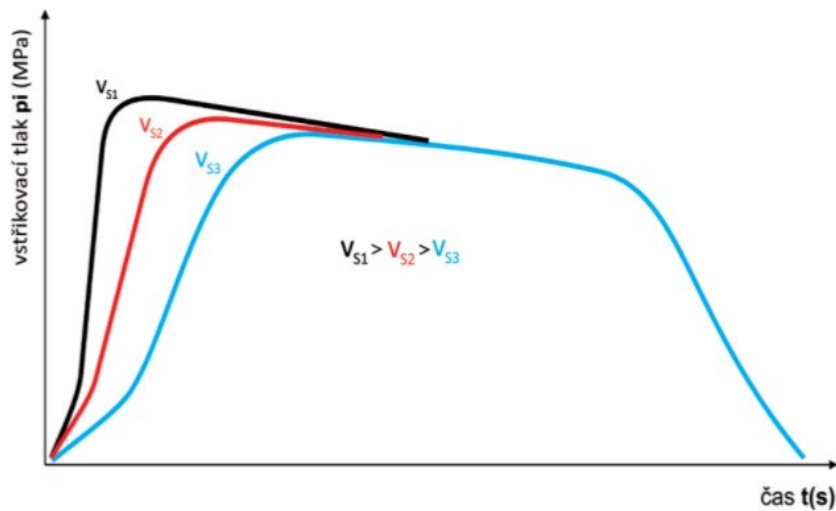
Fáze chlazení, ve které dochází k ochlazení taveniny plastu na vyhazovací teplotu, tak aby byl výrobek z formy v tuhém stavu a bez poškození vyhozen. Chlazení začíná hned při styku vstřikované taveniny se stěnou vstřikovací formy a dále pokračuje během fáze dotlaku. Po vyhození výrobku z dutiny formy chlazení pokračuje i dále mimo ni, protože výrobek má větší teplotu, než je teplota okolí. Doba chlazení představuje nejdelší část vstřikovacího cyklu a pohybuje se od několika sekund u tenkostěnných výrobků až do několika málo minut při tlustostěnných vstřikovaných dílů. Plastové vstřiky jsou špatným vodičem tepla tzv. jsou to tepelné izolanty. Doba chlazení závisí na určující tloušťce stěny vstřiku, na druhu plastu, teplotě taveniny, formy a vstřiku. Je velkou snahou z ekonomického hlediska zkrátit dobu chlazení na minimum. Fáze chladnutí ovšem neovlivňuje pouze strukturu, orientaci, krystalizaci a vnitřní pnutí, ale také kvalitu povrchu. [12, 13, 19]

3.3 Technologické parametry ovlivňující proces vstřikování

Ovlivňování vstřikovacího procesu je velmi důležité k udržení stability výrobního procesu, ale také z hlediska konečných vlastností vstřikovaných dílů. Mezi hlavní a nejvýznamnější parametry, které výrazným způsobem ovlivňují celkový proces vstřikování, patří vstřikovací rychlost v_{vst} , vstřikovací tlak p_v , tlak dotlaku p_d , doba dotlaku t_d , teplota taveniny T_{tav} a teplota formy T_f . Jednotlivé procesní parametry působí současně a navzájem se ovlivňují, tím pádem změnou jednoho parametru dochází k ovlivnění ostatních parametrů. [12]

3.3.1 Vstřikovací rychlost

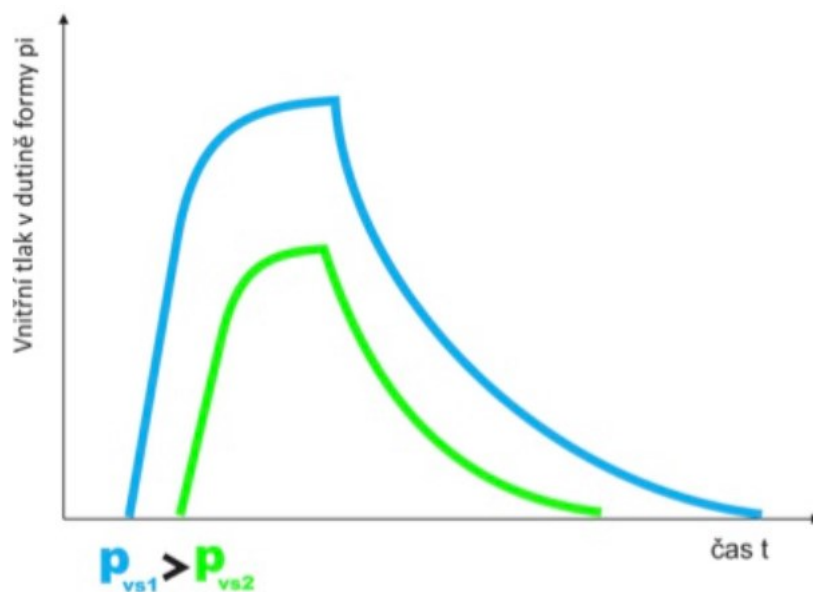
Pomocí nastavení hodnoty vstřikovací rychlosti ovlivňujeme dobu plnění dutiny vstřikovací formy. Čím vyšší bude vstřikovací rychlost, tím se bude i zvyšovat hodnota vnitřního tlaku. Zároveň díky zvýšené vstřikovací rychlosti stoupá hodnota smykového namáhání taveniny, dále roste teplota taveniny a tím pádem klesá její viskozita (zvětšuje se tekutost), a také dochází k nárůstu orientace. Změnou vstřikovací rychlosti se žádné změny neprojeví v dotlakové a chladicí fázi. [12, 24]



Obr. 18 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se vstřikovací rychlosti [12]

3.3.2 Vstřikovací tlak

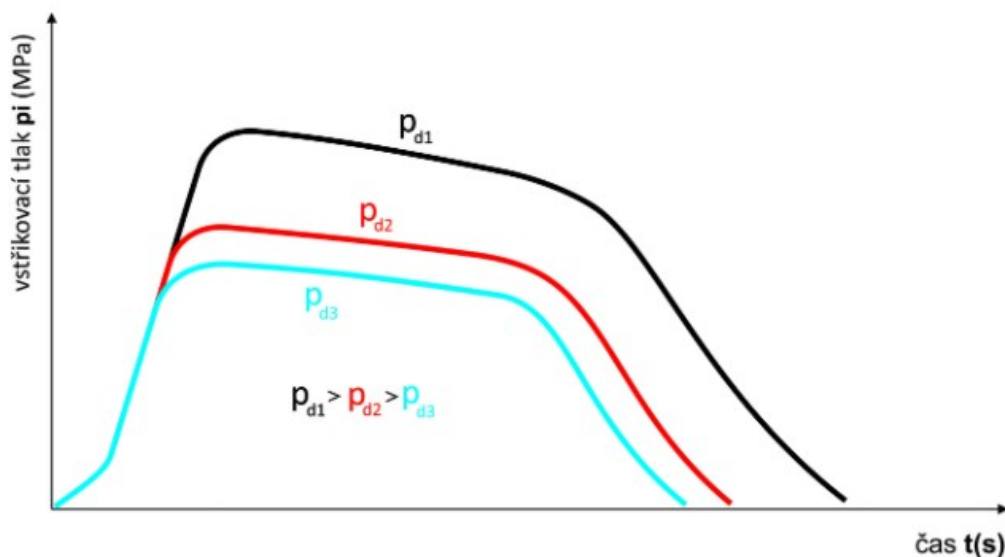
Změna vstřikovacího tlaku výrazně ovlivní velikost tlaku v dutině vstřikovací formy a čas jejího plnění. Čím větší bude vstřikovací tlak, tím se bude i zvětšovat tlak v dutině formy. Čím větší bude hodnota vstřikovacího tlaku, tím dříve nastane fáze plnění dutiny a při nárůstu smykového namáhání se snižuje viskozita taveniny a také s teplotou stoupá její tekutost. Zároveň dochází k prodloužení doby chlazení. Hodnota vstřikovacího tlaku také ovlivňuje výslednou kvalitu a hmotnost výrobku, pokles smrštění, dále dochází k nárůstu pnutí ve výrobku a ke zvýšení orientace. Změnou hodnoty vstřikovacího tlaku se většinou neprojeví žádné změny v dotlakové a chladicí fázi. [12, 25]



Obr. 19 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se vstřikovacího tlaku [12]

3.3.3 Dotlak

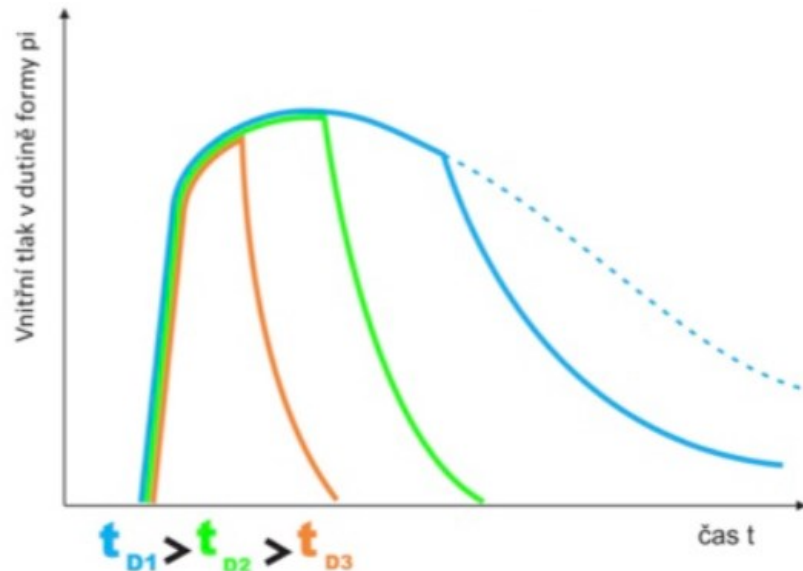
Velikost dotlaku má největší vliv na průběh tlaku uvnitř vstřikovací formy a nejméně výrazněji ovlivňuje výsledný povrch vyráběného dílu. Je to z toho důvodu, že při vyšší hodnotě dotlaku dochází k lepšímu otisku povrchu dutiny vstřikovací formy na povrch výrobku. Vyšší hodnota dotlaku způsobuje nárůst tlaku uvnitř formy, kde může docházet k výskytu velkého zbytkového tlaku, který zůstává uvnitř vstřikovací formy až do jejího otevření. Při nastavení vyšší hodnoty dotlaku dojde k nárůstu hmotnosti výrobku a ke zvýšení pnutí ve výrobku, ale také dochází k prodloužení doby chlazení i k poklesu hodnoty smrštění. Oproti tomu nastavení nízké hodnoty dotlaku vede ke vzniku propadlin, lunkrů a k nárůstu smrštění. [12, 25]



Obr. 20 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se velikosti dotlaku [12]

3.3.4 Doba dotlaku

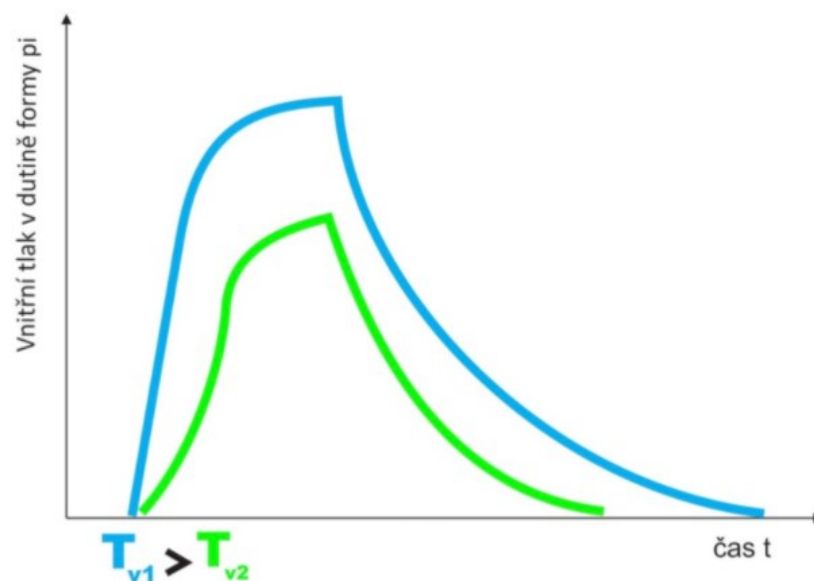
Doba dotlaku a jeho velikost se také podílí na výsledné kvalitě plastového výrobku, a to hlavně na hmotnosti, rozměrech, tvaru a kvalitě povrchu výrobku. Doba dotlaku je nutná pro zatuhnutí vtokového ústí. V případě nezatuhlého vtokového ústí dochází ke vzniku vzduchových bublin a kolísání hmotnosti výrobku. Jestliže je doba dotlaku příliš krátká, na vstřikovaném díle vznikají povrchové vady a propadliny a zároveň se zvětšuje hodnota smrštění. Doba dotlaku může působit pouze do doby, než dojde k zatuhnutí vtokového ústí. Po zatuhnutí již nelze plnit a dotlačovat taveninu do dutiny formy. Prodlužování doby dotlaku vede k prodloužení celkového času vstřikovacího cyklu. [12, 24]



Obr. 21 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se doby dotlaku [12]

3.3.5 Teplota taveniny

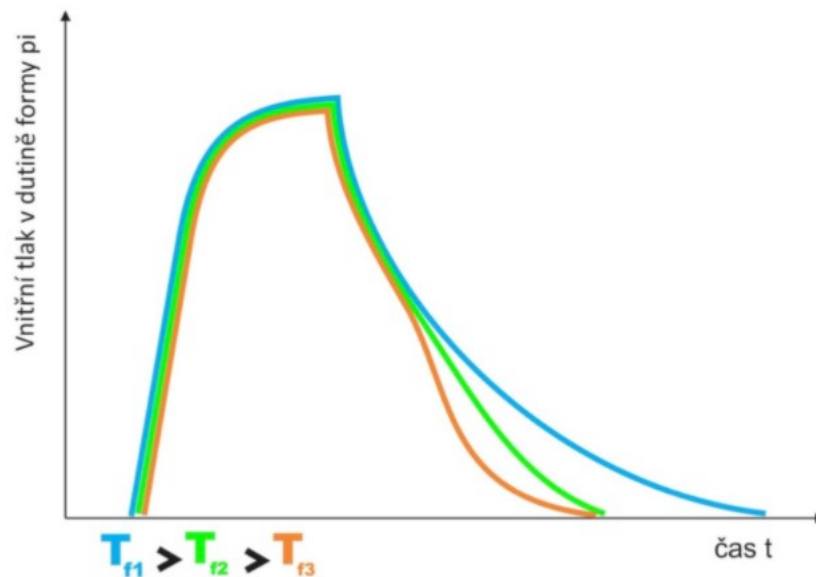
Hodnota teploty taveniny má výrazný vliv na tekutost plastu a dobu vstřikovacího cyklu. S vyšší teplotou taveniny roste i tekutost a zároveň dochází k prodloužení vstřikovacího cyklu, protože při zachování hodnoty vstřikovací rychlosti klesá potřeba hydrostatického tlaku, ale tím pádem dochází i ke zvýšení tlaku v dutině vstřikovací formy. To znamená, že se musí prodloužit doba chlazení i doba dotlaku, z toho důvodu se ve vstřikovací formě nachází taveniny s vyšší teplotou. Zároveň hrozí nebezpečí teplotní degradace plastu a vzniku spálené hmoty. Nebezpečí však vzniká i s nižší teplotou taveniny, kde hrozí větší výskyt studených spojů. [12, 24]



Obr. 22 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se teploty taveniny [12]

3.3.6 Teplota vstřikovací formy

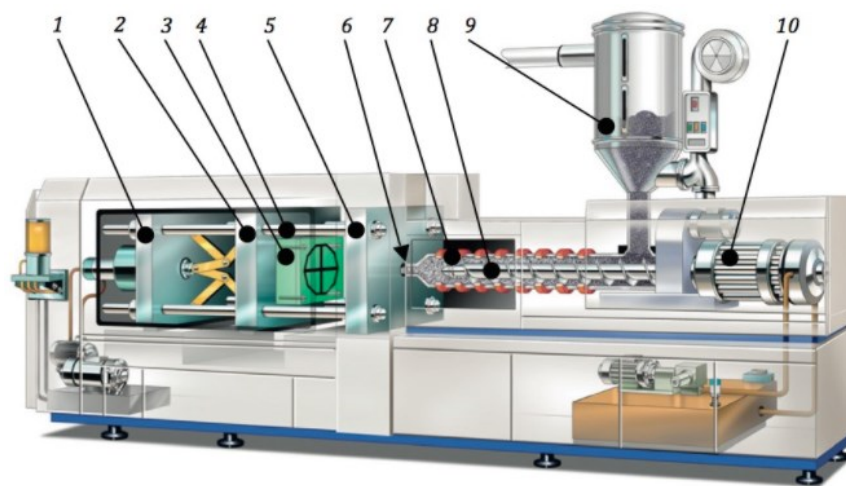
Teplota vstřikovací formy má obrovský vliv na délku vstřikovacího cyklu, ale také na kvalitu povrchu a vzhledu plastových dílů, rozměrovou přesnost a výsledné mechanické vlastnosti. Vyšší hodnota teploty formy vede k malému nárůstu v dutině vstřikovací formy, ale oproti tomu vede k velkému prodloužení doby potřebné k ochlazení. Současně s vyšší teplotou formy roste hodnota smrštění a stoupá riziko vzniku propadlin a lunkrů. U plastových dílů však dochází ke snížení pnutí, a to z toho důvodu, že relaxační procesy probíhají mnohem rychleji u teplejších plastových dílů. U zvýšené teploty vstřikovací formy dochází k odstranění studených spojů a zvlnění. [12, 25]



Obr. 23 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se teploty formy [12]

4 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Proces vstřikování probíhá na vstřikovacích strojích, které jsou většinou plně automatické. Pořizovací cena vstřikovacích strojů i vstřikovací formy je značně vysoká, takže technologie je spíše vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Ke vstřikování plastů se používají vstřikovací stroje, které se rozdělují podle typu pohonu na hydraulické, elektrické nebo hybridní. Základní části vstřikovacího stroje jsou vstřikovací jednotka, uzavírací jednotka a zařízení na řízení a regulaci. Nejběžnějším typem určeným pro zpracování termoplastů jsou vstřikovací jednotky se šnekem, který rotuje kolem své osy a axiálně se pohybuje dopředu a dozadu. [12, 13, 14, 15]



Obr. 24 Šnekový vstřikovací stroj [15]

- 1) uzavírací jednotka, 2) pohyblivá upínací deska, 3) pohyblivá část vstřikovací formy, 4) vodící sloupky, 5) pevná upínací deska, 6) čelo špičky vstřikovací trysky, 7) tavicí komora, 8) šnek, 9) násypka pro plastový polotovar, 10) pohonná jednotka šneku

Mezi základní parametry vstřikovacích strojů v souvislosti s technologií patří:

Vstřikovací kapacita

Vstřikovací kapacita představuje maximální objem taveniny, který je možné vstříknout z tavicí komory do volného prostoru během jednoho pracovního zdvihu šneku. Jedná se tedy o maximální objem tavicí komory ohraničené čelem šneku v jeho krajních polohách a je nejčastěji udávána v cm^3 . Vstřikovací kapacita poskytuje informaci o maximálním objemu výstřiku, který je možný na dané vstřikovací jednotce vyrobit. V objemu výlisku je připočítán i objem vtokového systému. [12, 14]

Plastikační kapacita

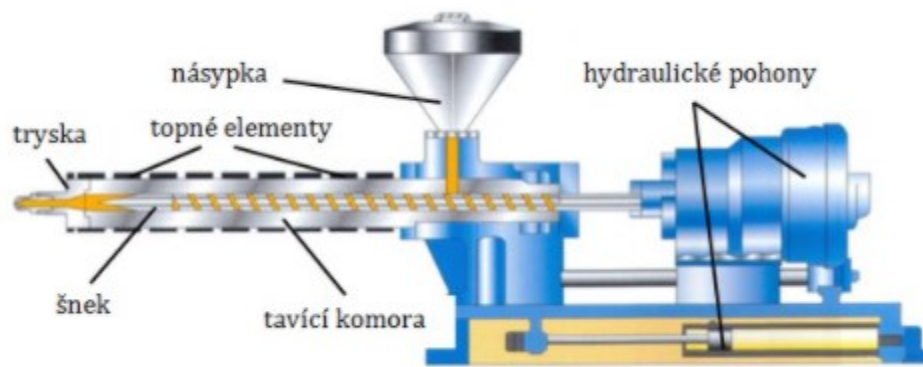
Plastikační jednotka informuje o maximálním množství taveniny, kterou je stroj schopen za jednotku času převést do plastikačního stavu. Nejčastěji je plastikační kapacita udávána v kilogramech za hodinu ($\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$), a jedná se o množství materiálu, které je při určitých otáčkách šneku vytlačen před čelo šneku. Plastikační kapacita nám udává spíše orientační hodnoty, které jsou potřebné pro zjištění doby potřebné k plastikaci určitého množství materiálu. Rychlost plastikace ovlivňují kromě otáček šneku a typu zpracovaného polymeru i další faktory, a to teplota ve vstřikovací jednotce a geometrie šneku. [12, 14]

Uzavírací síla

Uzavírací síla drží vstřikovací formu v zavřeném stavu během vstřikování a dotlaku. Většinou je uzavírací síla udávána kN. [12]

4.1 Vstřikovací jednotka

Úkolem vstřikovací jednotky, která je určena pro zpracování termoplastů je převedení tuhého polymeru do stavu vysoce viskózní taveniny a následný přesun taveniny do tvarové dutiny vstřikovací formy se zajištěním největší tvarové a rozměrové přesnosti. Základní funkcí je příprava a doprava požadovaného množství roztaveného polymeru do dutiny formy. Množství dopravené taveniny nesmí být větší, než je kapacita vstřikovací jednotky při jednom zdvihu, ale ani tak malé, protože v takovém případě vstřikovací množství setrvává ve vstřikovací jednotce a dochází k degradaci. Vstřikovací jednotka pracuje tak, že do tavného válce je dopravován zpracovaný plast z násypky pohybem šneku. Plast je posouván šnekem a postupně plastikuje, homogenizuje a hromadí se před šnekem. Tavná komora je ukončená vyhřívanou tryskou, kde dochází ke spojení vstřikovací jednotky a formy. Tryska je kulově zakončena, a to nám zajišťuje přesné dosednutí do sedla vtokové vložky formy. Jejich souosost je podmínkou pro správné fungování. Hlavní pohon vstřikovací jednotky musí zajistit rotaci šneku při plastikaci dávky taveniny a také přesun této dávky do tvarové dutiny formy dopředným pohybem šneku. Jak šnek působí jako píst, tak vytlačuje polymerní taveninu z tavicí komory vstřikovací jednotky. Stejným způsobem šnek působí na taveninu i během fáze dotlaku. [4, 14, 16]

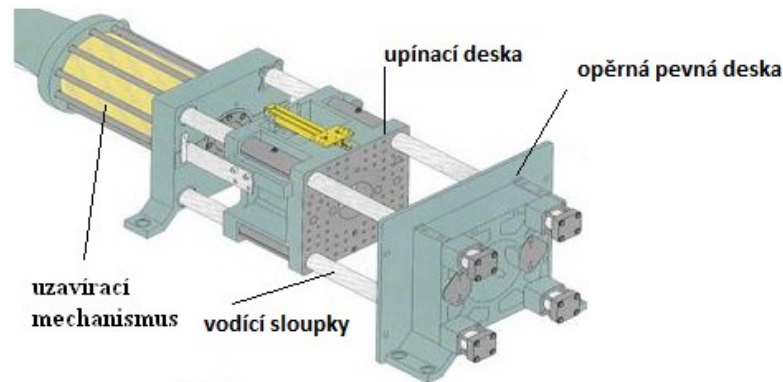


Obr. 25 Vstřikovací jednotka [14]

Vstřikovací jednotka je složena z mnoha částí, jak je vidět na obrázku výše. Násypka tvoří vstupní část, na kterou navazuje tavící (plastikační) komora, kterou obklopují topné pásy. Tavící komora je zakončena tryskou, která doléhá na vtokovou vložku vstřikovací formy. Skrze trysku taveniny plastu proudí dále až do vstřikovací formy. Uvnitř tavící komory je umístěn šnek přesných rozměrů a geometrií. Na plast působí teplo z topných pásů, ale hlavně je zahříván vlivem disipace (tření polymeru mezi stěnami tavící komory a šneku). Až 70 % tepelné energie je do plastů přeneseno třením. Konstrukční řešení vstřikovací jednotky a tavící komory vychází především z typu zpracovávaného materiálu. Výkonnost vstřikovací jednotky je určena především dvěma parametry, a to vstřikovací a plastikační kapacitou. [14, 16]

4.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje má na starosti ovládání formy a zajišťuje upnutí a plynulé pohyby vstřikovací formy. Podobně jako vstřikovací jednotka je i uzavírací tvořena několika samostatnými prvky a mechanismy. Hlavní části uzavírací jednotky jsou vodící sloupky, pevná a pohyblivá upínací deska a jako poslední uzavírací mechanismus. Uzavírací mechanismus je ukazatelem kvality uzavírací jednotky a je zdrojem síly potřebné pro otevírání a uzavírání formy. Vytváří uzamykací síly, které působí proti vstřikovacímu tlaku, a tak udrží formu uzavřenou. Uzamykací síla je buď mechanická, kde dochází k mechanickému zapříčení formy v potřebné poloze nebo hydraulická, kde je síla vyvozena hydraulickým pístem nebo kombinací obou zmíněných systémů. Hydraulicko-mechanická jednotka je často používána u strojů malých gramáží. Zaručuje vyšší rychlost uzavření s potřebným zpomalením před uzavřením vstřikovací formy. [4, 14, 16]

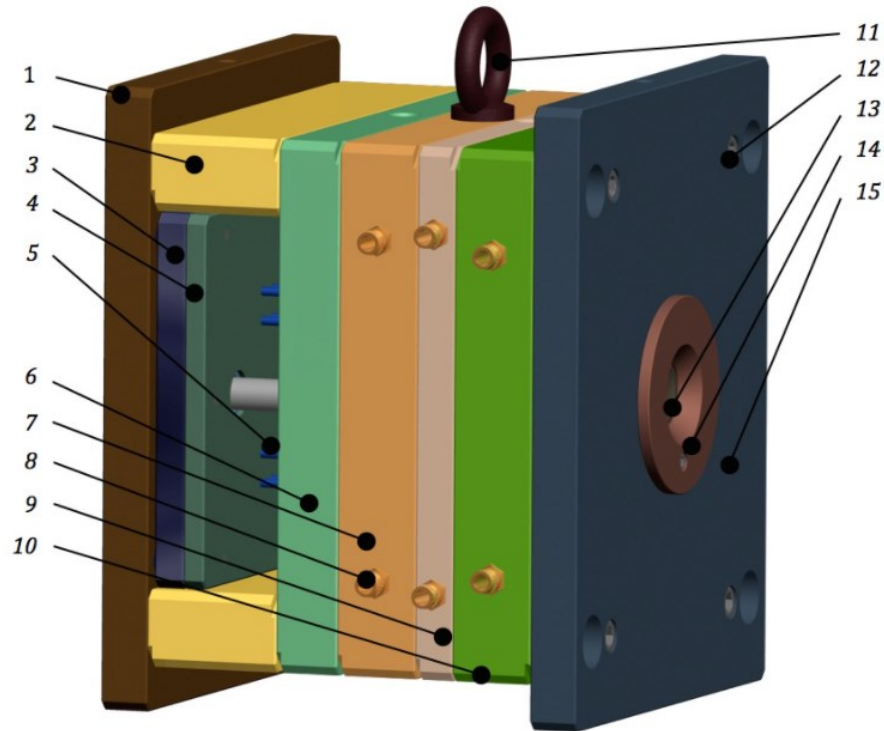


Obr. 26 Uzavírací jednotka [13]

4.3 Vstříkovací forma

Vstříkovací forma vytváří systém, který musí současně splňovat spoustu požadavků souvisejících se vstříkovacím procesem. Hlavní funkcí je doprava taveniny polymeru do dutiny vstříkovací formy, kde po ochlazení forma udává finální tvar a rozměr výrobku. Další funkcí vstříkovací formy je efektivní odvod tepla, které je přivedené taveninou roztaveného polymeru. Další funkcí, kterou forma zajišťuje je bezpečné a rychlé vyjmutí dílu z dutiny formy. Kvalitní vstříkovací forma musí plnit požadavky jak technické, tak ekonomické, ale i společenskoestetické. Technické požadavky zaručují správnou funkci formy např. kvalitu a přesnost vyráběného výrobku. Požadavky ekonomické, které se vyznačují například pořizovací cenou, snadnou a rychlou výrobou dílů při vysoké produktivitě práce. Na závěr požadavky společenskoestetické umožňují vytvářet vhodné prostředí pro bezpečnou práci a vyžadují dodržení všech bezpečnostních zásad při konstrukci. [4, 15]

Vstříkovací formy se skládají z několika desek, které jsou vzájemně spojeny pomocí šroubů. Upínací desky pevné a pohyblivé slouží k upnutí obou částí formy ke vstříkovacímu stroji. Desky A, B a C viz. Obr. 17 se využívají k vytvoření dutiny, která udává tvar a rozměr vstříkovanému dílu. Dutina vstříkovací formy může být vytvořena přímo v těchto deskách, anebo desky slouží k ukotvení tvarových vložek. Vložka obsahuje příslušnou dutinu pro požadovaný tvar výrobku. [15]



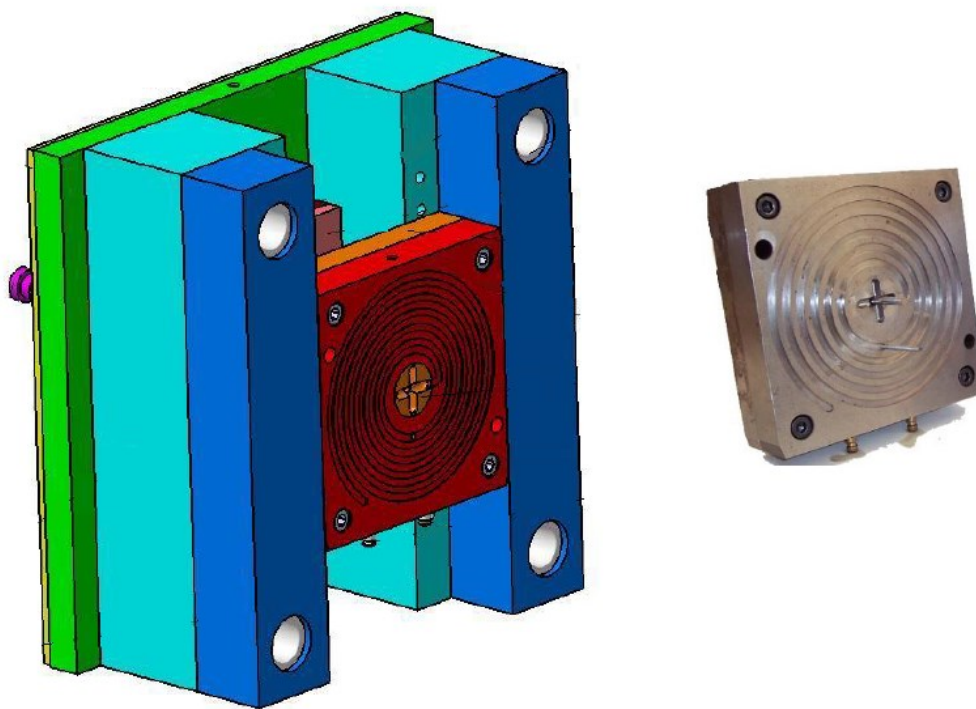
Obr. 27 Dvoudesková vstřikovací forma [15]

1) upínací deska pohyblivé části vstřikovací formy, 2) rozpěra, 3) hlavní vyhazovací deska, 4) přidržovací vyhazovací deska, 5) vyhazovač, 6) podpěrná deska, 7) deska B, 8) přípojka chlazení, 9) deska C, 10) deska A, 11) manipulační oko, 12) hlavní montážní šrouby, 13) vtoková vložka, 14) středící kroužek pevné části vstřikovací formy, 15) upínací deska pevné části vstřikovací formy

Uvedený typ vstřikovací formy na obrázku se nazývá dvoudeskový. Je to z toho důvodu, že dvě desky přicházejí do styku s polymerní taveninou. Vstřikovací formy mohou být řešeny v několika konstrukčních provedeních i za stejného vyráběného výrobku. Další nutnou součástí vstřikovací formy jsou středící kroužky, které zajišťují přesnou pozici vstřikovací formy na vstřikovacím stroji. Vstřikovací forma musí být nastavena tak, aby osa trysky vstřikovacího stroje byla ve stejné rovině s osou vtokové vložky vstřikovací formy. Přes vtokovou vložku proudí polymerní taveniny do vtokového systému a vstřikovací dutiny. Také z důvodu ovládní vyhazovacích desek je nutné, aby osa vstřikovacího stroje byla ve stejné rovině s osou vyhazovacího systému vstřikovací formy. V čase, kdy se pohyblivá deska vstřikovacího stroje dává do pohybu, tak se do pohybu dávají i všechny desky, které jsou s deskou spojeny a také všechny vnitřní díly. Hranice mezi pevnou a pohyblivou částí vstřikovací formy se nazývá dělicí rovina. Všechny díly vytvářející dělicí rovinu, musí být vyrobeny s dobrou přesností a z mechanicky odolných materiálů. Nesmí docházet k poškození dělicí roviny či netěsnostem mezi deskami dutiny vstřikovací formy. [12]

4.3.1 Testovací vstřikovací formy

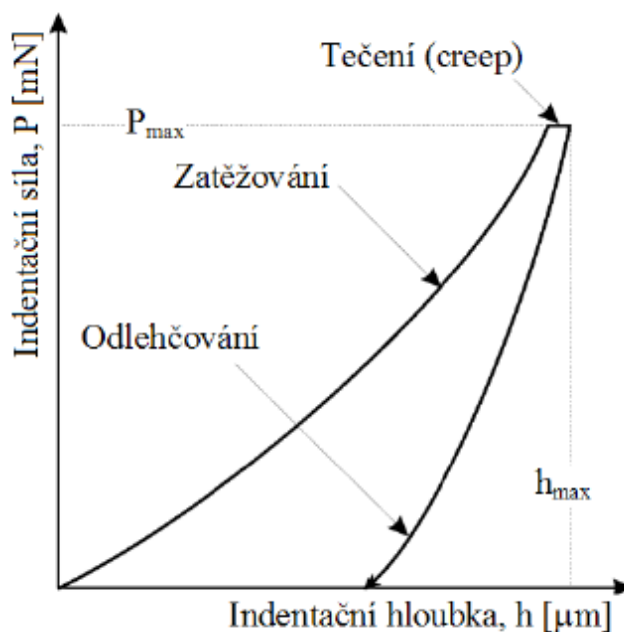
Vstřikovací formy se mohou také využívat při testování vlastností polymerních materiálů při vstřikování. Mezi nepoužívanější zkoušky patří spirálová, která svou jednoduchostí vyhodnocování výsledků měření se stala nejoblíbenější. Délka spirály je samotným výsledkem měření. Mezi další testovací formy patří např. čtvercová spirála, had, anebo forma zig zag. Princip zkoušky spočívá ve vstříknutí polymerní taveniny za předem stanovených technologických podmínek do dutiny testovací formy. Dutina formy při spirálové zkoušce má tvar Archimedovy spirály o teoreticky nekonečné délce, šířce 10 mm a výšky 4 nebo 2 mm. Při hodnocení vlastností polymerů se volí takové technologické podmínky, které jsou stejné s podmínkami během vstřikování. Zkouška nám umožňuje také ověřit vliv měnících se technologických parametrů (tlak, teplota), ale také vliv povrchu dutiny formy na délku toku daného polymeru. [11, 22, 23]



Obr. 28 Ukázka testovací formy spirála [22]

5 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI

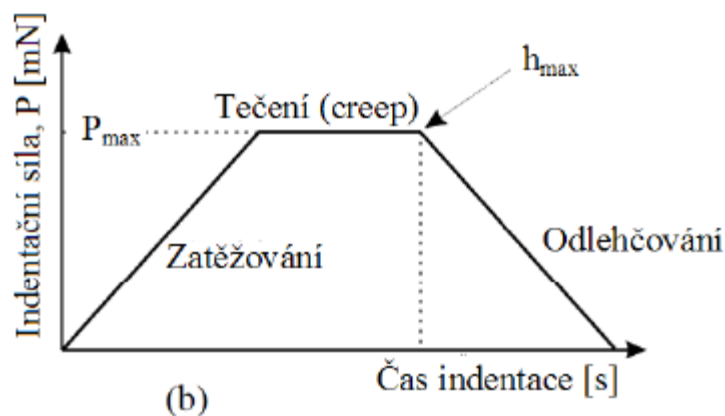
Instrumentovaná zkouška tvrdosti neboli DSI (Depth Sensing Indentation) je nová indentační technika pro zjišťování mechanických vlastností. Ke vzniku této nové zkoušky přispěla snaha o získání mechanických vlastností na tenkých vrstvách. Běžné zkoušky mikrotvrdomosti, resp. jejich přístroje nebyli schopné vytvořit tak malé zatížení, aniž by nebyl při vniku zkušebního tělesa ovlivněn i substrát na němž byla tenká vrstva nanášena. Hlavním nárokem bylo, aby celková hloubka vtisku byla rovna 10 % z celkové hloubky vrstvy. Pokud se podařilo vytvořit vtisk dle daného nároku, nebylo možné rozměry vtisku přesně změřit pomocí klasických (optických) mikroskopů, z toho důvodu se využívají elektronové mikroskopy. Bohužel využití elektronových mikroskopů práci prodlužovalo a znesnadňovalo. Zásadní vylepšení metody a analýzy se shromáždění dat provedli Oliver a Pharr. Principem instrumentované zkoušky tvrdosti je, že měřicí přístroj současně detekuje okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu a nárůstu/poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího procesu. Grafickým zpracováním získaných dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení-hloubka vtisku. Díky připojení měřicího přístroje k PC jsou průběhy zkoušek ihned zaznamenány a současně dochází k vyhodnocení některých mechanických vlastností. [26, 27]



Obr. 29 Schématické znázornění indentační křivky [28]

Prvním fází indentačního cyklu je řízené zatížení, které má definovanou rychlost a zatěžovací sílu. Druhá fáze cyklu se označuje jako odlehčování a dochází k postupnému snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Často se mezi zatěžování a odlehčování

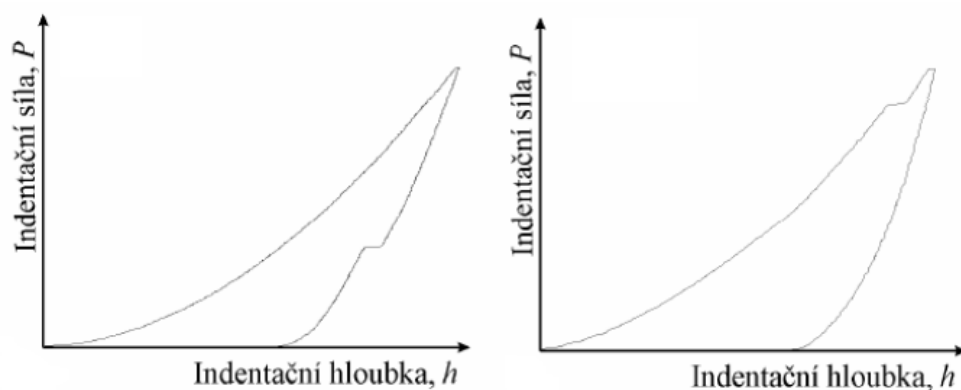
vkládá prodleva neboli výdrž na aplikovaném zatížení, během kterého je vzorek vystaven maximální zatěžující síle. [27, 28]



Obr. 30 Časový diagram indentační zkoušky [28]

5.1 Indentační křivky

Hlavním cílem indentační zkoušky je určení tvrdosti a současně elastického modulu zkoušeného vzorku, zaznamenávání průběhu hodnot působícího zatížení na indentor a hloubky průniku indentoru. Data pro indentační křivku se získávají tak, že působící zatížení narůstá ze své nulové hodnoty do maximální a pak z maximální hodnoty zpátky do nulové. Při zatěžování se zkoumaný vzorek plasticky deformuje, a tak na jeho povrchu vzniká trvalý vtisk. Ve fázi odlehčování dochází k tzv. zotavení vtisku, kdy materiál se snaží pomocí uvolňování elastických deformací dostat zpátky do svého původního tvaru. U kovových materiálů však k zotavení vtisku nedochází díky vzniklé plastické deformaci. Pomocí analýzy elastické relaxace v průběhu odlehčování je možné určit elastický modul testovaného materiálu. Instrumentovaná zkouška tvrdosti je v praxi využívána pro širokou škálu materiálů od měkkých polymerů až k uhlíkovým diamantům. Získaný tvar indentační křivky neslouží pouze k výpočtu tvrdosti a modulu pružnosti, ale je také zdrojem důležitých informací, které se projeví náhodným nespojitým průběhem. [26, 27]

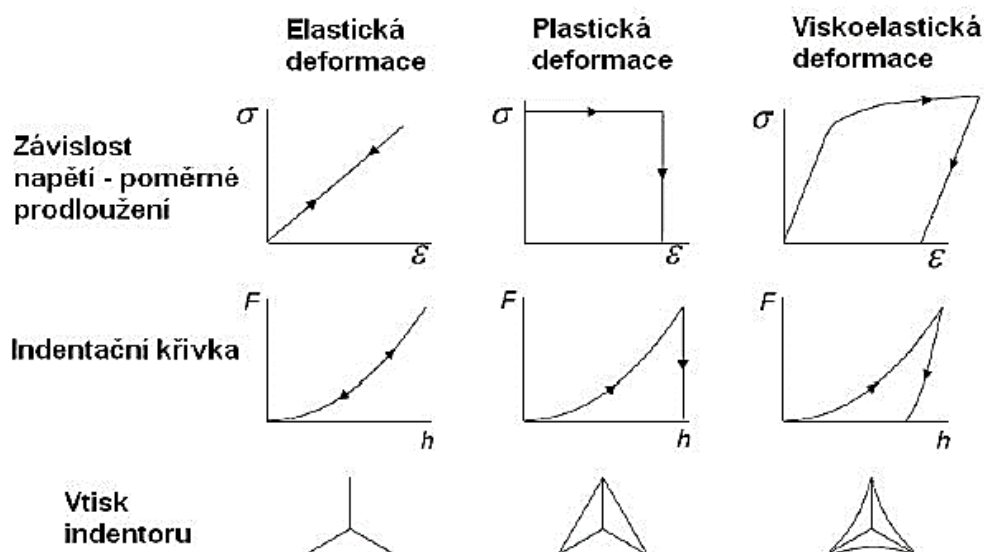


Obr. 31 Ukázka nespojitých průběhů indentačních křivek [27]

Je nutné si uvědomit, že odezva zkoumaných materiálů je hlavním činitelem, který ovlivňuje tvar indentační křivky. Materiály dělíme do tří skupin podle odezvy na 3 druhy:

- elastické,
- plastické,
- elasticko-plastické.

Pokud odezva materiálu má jenom charakter elastický, tak nedochází k žádné plastické deformaci a po odlehčení nevzniká žádný zřetelný vtisk. U materiálu s plastickou odezvou po odlehčení vzniká trvalý vtisk, kde jeho tvar a hloubka odpovídá indentoru. Popsané odezvy jsou znázorněny na obrázku níže. [27]

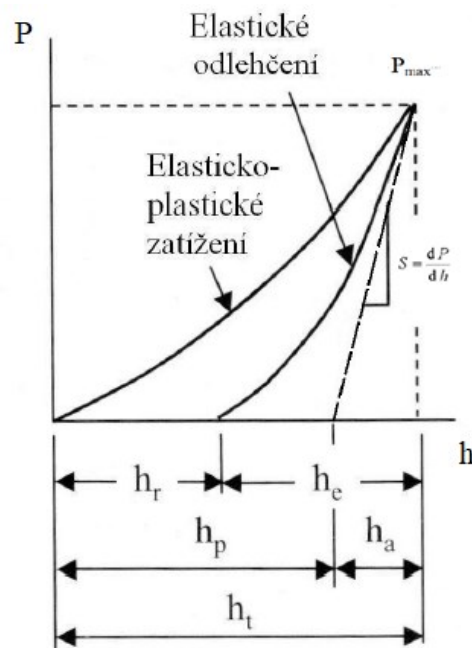


Obr. 32 Schematické znázornění chování materiálu [27]

Většina konstrukčních materiálů má však odezvu elasticko-plastickou a jejich zatěžovací křivka je určena jak elastickou, tak i plastickou deformací zkoušeného materiálu. [27]

5.2 Metoda Olivera a Pharra – multibodová

Metoda Olivera a Pharra multibodová je jedna z mála metod pro zpracování indentačních dat, která je založena na předpokladu elasticko-plastického zatěžování a elastického odlehčování. Hlavními měřenými veličinami v analýze jsou zatěžující síla P_{max} , maximální indentační hloubka h_{max} a kontaktní tuhost S . Kontaktní tuhost je definována jako směrnice tečny počáteční části odlehčovací křivky. Na obrázku níže je uvedené zatížení v závislosti na hloubce pro elasticko-plastické zatěžování a elastické odlehčení. [26, 29]



Obr. 33 Závislost zatížení na hloubce [26]

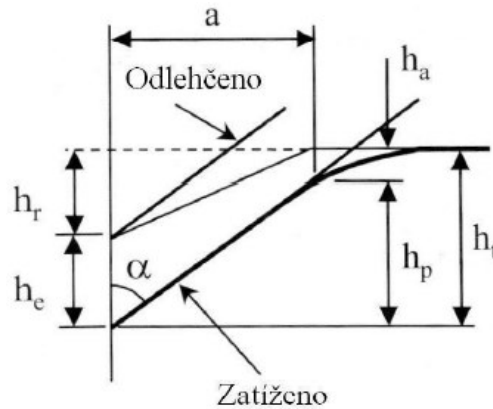
Princip spočívá ve stanovení sklonu tangenty vedené k začátku křivky odlehčení a zároveň průsečík tangenty určuje kontaktní hloubku h_p . Z indentační křivky lze také vyčíst základní veličiny, jako je maximální zatěžující síla F_{max} a maximální hloubka h_{max} . Derivací rovnice se dá určit sklon tangenty viz. Obr. 33.

$$\frac{dP}{dh} = 2 \cdot \frac{2 \cdot E^* \cdot tg\alpha'}{\pi} \cdot h_e \quad (2)$$

Za předpokladu, že při odlehčování probíhá čistě elastická deformace platí:

$$P_{max} = \frac{2}{\pi} \cdot E^* \cdot h_e^2 \cdot tg\alpha' \quad (3)$$

Na následujícím obrázku je schematické znázornění povrchu vzorku a kuželového indentoru při plném zatížení a odlehčení.



Obr. 34 Znárodnění povrchu vzorku při maximálním zatížení a odlehčení [26]

Vztah pro hloubku h_a lze vyjádřit pomocí rovnice rovnici:

$$h_a = \left[\frac{2 \cdot (\pi - 2)}{\pi} \right] \cdot \frac{P_{max}}{dP/dh_{max}} \quad (4)$$

nahradíme-li hranatou závorku symbolem ε , lze kontaktní hloubku h_c vyjádřit jako:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \cdot \frac{P_{max}}{dP/dh} = h_{max} - \varepsilon \cdot (h_{max} - h_f) \quad (5)$$

kde ε geometrická konstanta závislá na použitém indentoru. Hloubka h_r se určí jako

$$h_r = h_{max} \cdot \frac{P_{max}}{dP/dh} \quad (6)$$

Hloubka h_r je ve skutečnosti speciální případ h_p , protože pro válcový (plochý) indenter se $\varepsilon=1$. Pro Vickersův indenter a rotační paraboloid (včetně koule) je $\varepsilon=3/4$ a pro kuželový indenter je $\varepsilon=0,73$. Známe-li tvarovou funkci hrotu $A_p = f(h_c)$, pak lze stanovit tvrdost H pomocí rovnice:

$$H = \frac{P_{max}}{A_p \cdot (h_c)} \quad (7)$$

Výpočet komplexního elastického modulu: [27, 34]

$$E^* = \frac{dP}{dh} \cdot \frac{1}{2 \cdot a} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP}{dh} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \quad (8)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zkoumání a porovnání vlivu vybraných technologických podmínek a drsnosti povrchu na tok vybraného termoplastu při plnění dutiny testovací formy během vstřikování. Předmětem tedy je zkoumat a porovnat délku toku neboli zatékavost a mikro-mechanické vlastnosti materiálu POM při různých drsnostech povrchu dutiny formy s měnícím se vstřikovacím tlakem.

Část experimentu je změřena na výběr testovaných povrchů, polymerního materiálu a stanovení technologických podmínek pro vstřikování. Po vstřikování testovaných vzorků bude změřena hodnota zatečení ve spirálové dutině vstřikovací formy a mikro-mechanické vlastnosti zejména tvrdost, modul pružnosti, tečení (creep), které jsou měřeny pomocí přístroje mikro-tvrdoměru Micro-Combi Tester. Získaná data z měření budou dále statisticky zpracována a vyhodnocena.

Postup při vypracování diplomové práce:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles vstřikováním do spirálové formy.
3. Provedení měření délky zatečení a mikro-mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

7 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Příprava experimentu zahrnovala naplánování technologických podmínek a výrobu zkušebních vzorků. V následujících kapitolách jsou tedy popsány zvolené podmínky, použitá zařízení, výběr materiálu a celkový postup přípravy.

7.1 Podmínky vstřikování zkušebních vzorků

K experimentu je vybrán polymerní materiál polyoxymethylen (POM), který je následně vstřikován při čtyřech různých vstřikovacích tlacích. Zároveň je použito 5 zkušebních desek s různou drsností povrchu. Odlišná drsnost povrchu je způsobena rozdílnými výrobními technologiemi viz. kapitola 7.5.2. Možné vzniknuté kombinace jsou schematicky znázorněné na následujícím obrázku.



Obr. 35 Schematicky znázorněné možné přípravy zkušebních vzorků

Bylo vyrobeno 10 zkušebních vzorků ke každé možné kombinaci se vstřikovacím tlakem a povrchem zkušební desky. Celkem tedy máme 200 zkušebních vzorků. Vstřikovací tlak je uveden v barech z toho důvodu, že veškeré nastavení vstřikovacího stroje ohledně tlaků je právě v barech (1 bar = 0,1 MPa).



Obr. 36 Ukázka zkušebního vzorku

7.2 Vstřikovaný materiál

Jak již bylo řečeno, pro experiment byl vybrán polymerní materiál typu polyoxymethylen (POM), využívaný především k výrobě přesných dílů. Zvolený materiál je blíže popsán v kapitole 1.3. Přesný typ daného materiálu je Formocon FM090 s indexem toku taveniny $ITT = 9 \text{ g}/10 \text{ min}$. Specifické informace jsou uvedeny v materiálovém listě, který je součástí přílohy práce v elektronické podobě.



Obr. 37 Granulát – POM Formocon FM090

7.2.1 Sušení vstřikovacího materiálu

Zvolený materiál před samotným použitím vyžaduje sušení. K procesu sušení byla využita sušička THERMOLIFT 100-2 od firmy ARBURG. Materiál POM byl sušený po dobu 3 hodin při teplotě $100 \text{ }^\circ\text{C}$. K zásobování vstřikovacího stroje granulátem bylo využito pneumatického nasávání.



Obr. 38 Sušárna THERMOLIFT 100-2 od firmy ARBURG

7.3 Vstřikovací stroj

Pro vstřikování zkušebních těles byl využit vstřikovací stroj ALLROUNDER 470 E EDRIIVE od firmy ARBURG. Základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce níže pod obrázek a celý uvedený technický list je součástí přílohy v elektronické podobě.



Obr. 39 Vstřikovací stroj ALLROUNDER 470 E EDRIIVE

Tab. 3 Základní technické parametry vstřikovacího stroje

Parametr	Hodnota	Jednotka
Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	40	mm
Maximální dráha šneku	160	mm
Maximální hodinový výkon (PS)	29	kg/h
Maximální vstřikovací objem	201	cm ³
Maximální vstřikovací tlak	200	MPa
Uzavírací jednotka		
Rozměry upínacích desek	650 x 650	mm
Rozměry mezi vodícími sloupy	470 x 470	mm
Uzavírací síla	1500	kN

7.4 Vstřikování zkušebních vzorků

Materiál byl vkládán v podobě granulátu do násypky stroje, která je navedena přímo do vstřikovací jednotky, kde dochází k homogenizaci a plastikaci materiálu. S pomocí šneku a také pístu je roztavená tavenina vstříknuta do dutiny formy, kde vzorek dostane tvar spirály sloužící k určení délky toku. Po následném vyjmutí vzorku dochází k ochlazování.

7.4.1 Zvolené technologické parametry vstřikování

Hodnota dotlaku se odvíjela od velikosti vstřikované tlaku a činil 80 %. Nižší vstřikovací tlak než 200 bar nebylo možné použít, protože by nedocházelo k zatečení materiálu do měřicí oblasti spirály. Pokud by tlak byl vyšší než 800 bar, tak by nemohlo docházet k měření výsledků, protože by byl tlak příliš vysoký a uzavírací síla by nemohla zajistit správné uzavření vstřikovací formy a docházelo by k přetékání mezi závity spirály.

Tab. 4 Nastavené technologické parametry

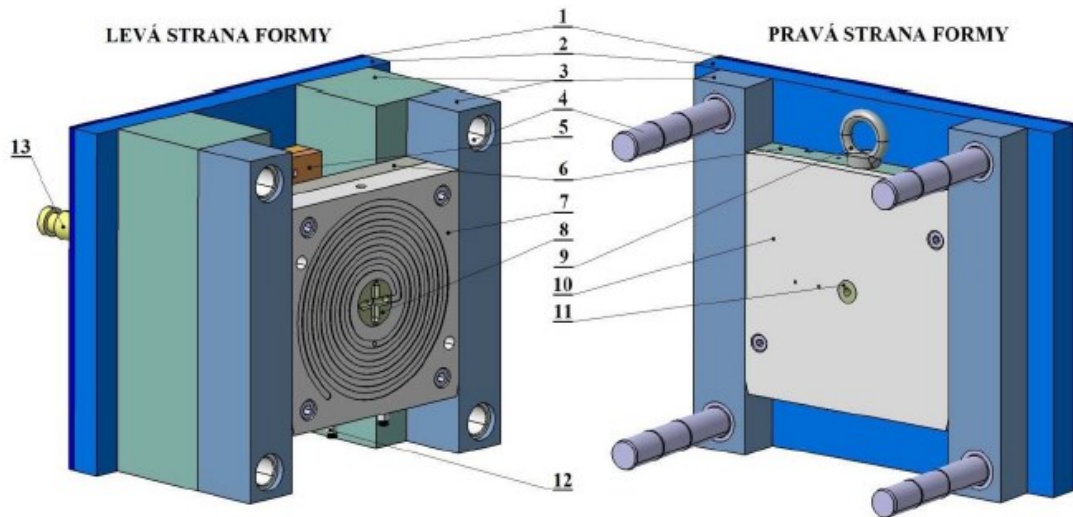
Technologické parametry	Hodnota	Jednotka
Dotlak	80	%
Doba dotlaku	1	s
Dráha dávkování	11	mm
Dráha přepnutí	7	mm
Doba chlazení	20	s
Rychlost dekomprese	2	mm/s
Dráha dekomprese	3	mm
Zpětný tlak	-1	bar
Uzavírací síla	1200	kN
Obvodová rychlost šneku	30	mm/s
Teplota formy	80	°C
Teplota taveniny	190	°C

Tab. 5 Nastavené topné pásy

Nastavení topných pásem	Hodnota	Jednotka
Pásmo č. 1	190	°C
Pásmo č. 2	190	°C
Pásmo č. 3	185	°C
Pásmo č. 4	180	°C
Pásmo č. 5	180	°C

7.5 Vstřikovací forma

Zkušební vstřikovací forma je konstruovaná tak, aby byla možná jednoduchá manipulace a výměna zkušebních desek. Jde o jednonásobnou formu, která je vložena do univerzálního rámu, který je možný využít i pro přípravu jiných zkušebních těles. Zkušební vstřikovací forma je znázorněna i s popisem na Obr. 40.

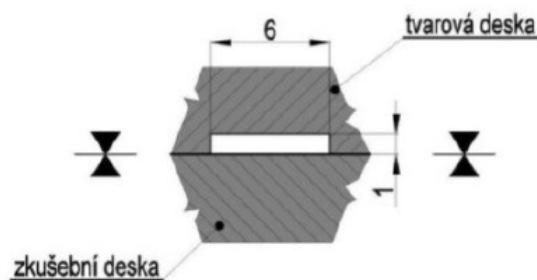


Obr. 40 3D model zkušební vstřikovací formy

- 1) izolační desky, 2) upínací desky, 3) rozpěrné desky, 4) vodící prvky, 5) vyhazovací systém, 6) opěrná deska, 7) tvarová deska, 8) přidržovač vtoku, 9) nosné oko C, 10) zkušební deska, 11) vtoková vložka, 12) přívod temperace, 13) táhlo vyhazovačů,

7.5.1 Tvarová dutina vstřikovací formy

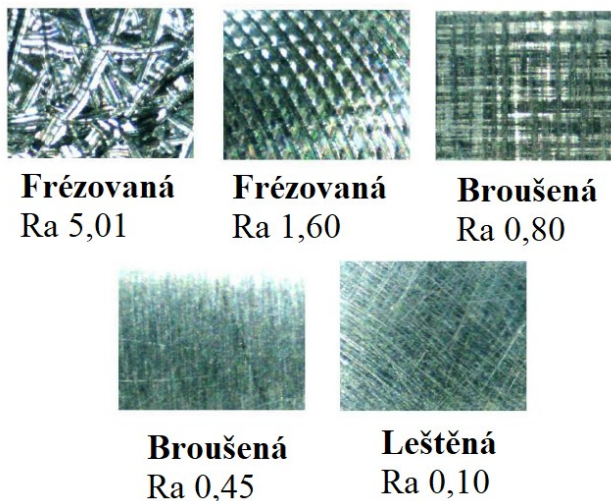
Tvarová dutina vstřikovací formy nám udává tvar spirály zkušebního vzorku, na kterém je měřena délka zatečení a výsledné mikro-mechanické vlastnosti. Dutina je tvořena tvarovou deskou a výměnnou zkušební deskou. Během experimentu se tvarová deska neměnila, ale docházelo pouze k výměně zkušebních desek s různou drsností povrchu. Na dalším obrázku je znázorněný řez dutinou formy.



Obr. 41 Řez dutinou vstřikovací formy

7.5.2 Zkušební desky vstřikovací formy

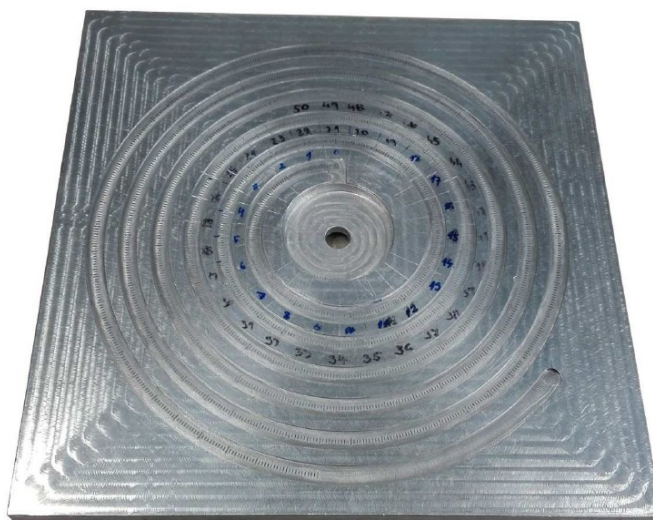
Při experimentu bylo využito 5 různých zkušebních desek vyrobené rozdílnými technologiemi. Pro obrobení desek bylo využito frézování, broušení a leštění. Na Obr. 42 lze vidět povrch desek a jejich drsnost povrchu, která vznikla po technologii výroby.



Obr. 42 Označení zkušebních desek s fotografií povrchu (zvětšeno 50x)

7.6 Měření délky toku

Dutina formy, a tedy i zkušební tělesa nejsou opatřena stupnicí pro určování délky. Z toho důvodu bylo pro měření délky toku využito přípravku s obsahující stupnicí. Položením zkušebního tělesa do drážky přípravku, lze hned zjistit do jaké vzdálenosti polymerní materiál zatekl. Celková dráha přípravku je do 2 m a jeden dílek stupnice je 1 mm. Každé měření bylo provedeno 10krát a výsledky byly staticky zpracovány.

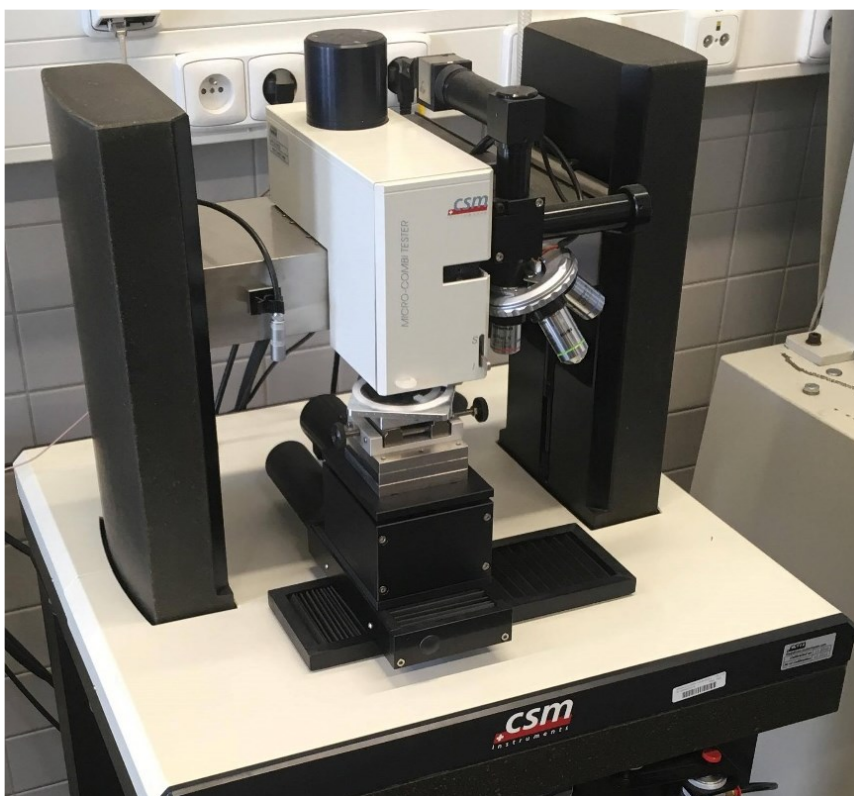


Obr. 43 Přípravek pro měření délky toku u zkušebních těles

7.7 Měření mikro-mechanických vlastností

Pro měření mikro-mechanických vlastností byla využita instrumentovaná zkouška tvrdosti, která byla provedena na přístroji MicroCombi Tester od firmy CSM Instruments, který je na obr. 44. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14577 a byli pro ni zvolené následující parametry:

- aplikované zatížení - 1 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 90 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 2 N/min,
- poissonovo číslo - 0,3.



Obr. 44 Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester

Jako vnikací těleso (indentor) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° tzv. Vickersův indentor. Měření instrumentované zkoušky DSI a vyhodnocení mikro-mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.

7.7.1 Postup měření mikro-mechanických vlastností

Měření probíhalo od počátku vstříku až po konec, a to v různých místech. Konkrétní vzdálenost byla 0, 25, 53, 67, 79 mm. U menších tlaků však nedocházelo k zatečení až do vzdálenosti 79 mm, takže jsou zaznamenány vlastnosti jen v určitých vzdálenostech. Během měření byl kladen důraz na správné umístění spirály, aby měřící jednotka přístroje dopadala tečně na vyhodnocovanou oblast zkoušeného vzorku spirály. Pro měření mikro-mechanických vlastností byla vybrána 3 zkušební tělesa od každého zkoumaného vstřikovacího tlaku. Na každém zkušebním tělese byla provedena 3 měření a následně ze získaných 9-ti hodnot byla určena průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Na každém zkušebním tělese byly naměřeny následující parametry:

- vtisková tvrdost (H_{IT}),
- Vickersova tvrdost (HV_{IT}),
- vtiskový modul pružnosti (E_{IT}),
- maximální hloubka vpichu (H_{max}),
- tečení neboli creep (C_{IT})
- elastická práce (W_{el}),
- plastická práce (W_{pl}),
- celková práce (W_{total}).

Z uvedených parametrů byly vybrány pouze tři nejdůležitější, které jsou blíže popsány v následující kapitole. Jedná se o parametr vtiskové tvrdosti, modulu pružnosti a tečení.

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V následující kapitole jsou uvedena naměřená data, která jsou zpracována formou grafů. K vyhodnocení dat byl využit program Microsoft Excel. V grafech jsou znázorněny nejen aritmetické průměry naměřených hodnot, ale také směrodatné odchylky. Získaná data jsou z důvodu velkého rozsahu uvedena v přílohách práce. Výsledky měření jsou rozděleny do dvou podkapitol. První podkapitola nám porovnává závislost délky zatečení na povrchu desky při různých vstřikovacích tlacích. Druhá kapitola nám uvádí závislost měřených mikro-mechanických vlastností na délce toku při různých vstřikovacích tlacích. Bylo provedeno celkem 10 měření a každý vzorek byl staticky vyhodnocen.

- Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

- Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (10)$$

8.1 Hodnoty délky toku

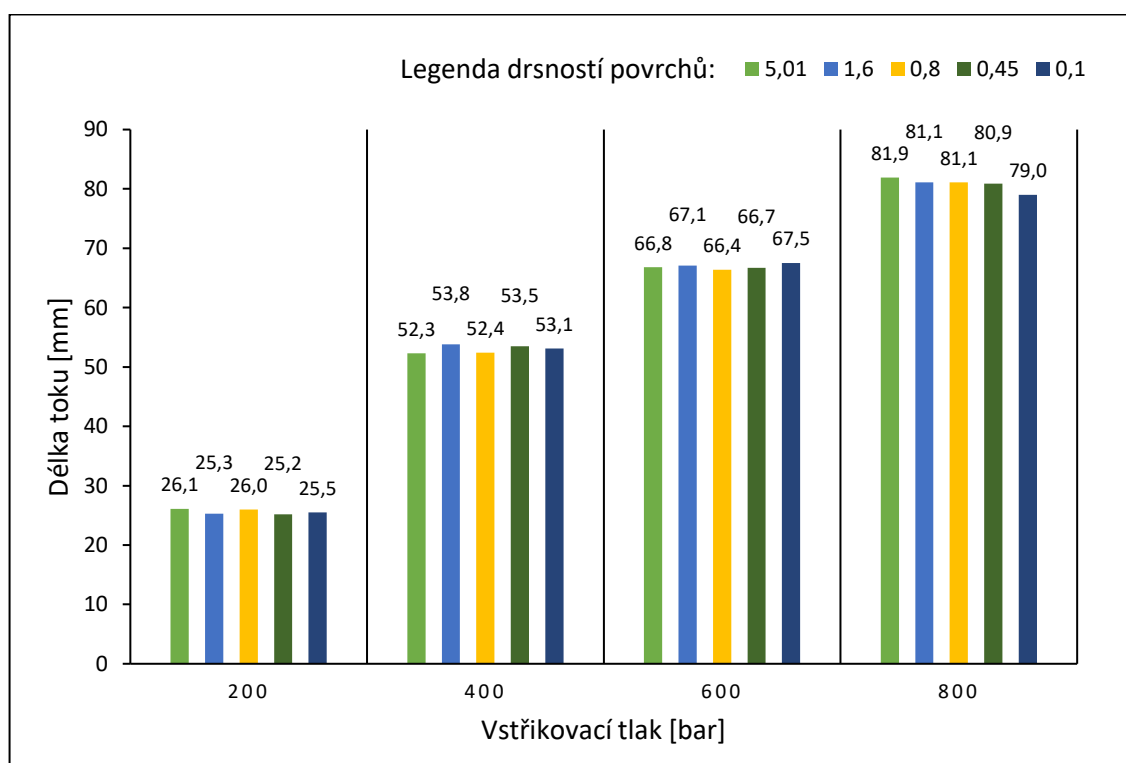
V první části vyhodnocování je řešena závislost délky toku na povrchu zkušební desky při různých vstřikovacích tlacích. V našem případě byla vyhodnocena délka zatečení pro testovaný materiál POM. Níže v kapitole jsou uvedeny tabulky, ve kterých se nachází průměrné hodnoty délky toku zatečení při zkušebních deskách a vstřikovacích tlacích. Dále je uvedený graf, kde je znázorněna závislost zatečení na drsnosti povrchu.

Tab. 6 Průměrné hodnoty délky toku při různých vstřikovacích tlacích

Drsnost zkušebních desek	Průměrná délka toku při vstřikovacích tlacích				Jednotka
	200	400	600	800	
Ra 5,01	26,1	52,3	66,8	81,9	[mm]
Ra 1,60	25,3	53,8	67,1	81,1	[mm]
Ra 0,80	26,0	52,4	66,4	81,1	[mm]
Ra 0,45	25,2	53,5	66,7	80,9	[mm]
Ra 0,10	25,5	53,1	67,5	79,0	[mm]

Tab. 7 Odchyłky hodnot délky toku při různých vstřikovacích tlacích

Drsnost zkušebních desek	Odchyłky délky toku při vstřikovacích tlacích				Jednotka
	200	400	600	800	
Ra 5,01	0,74	0,48	0,42	0,32	[mm]
Ra 1,60	1,16	0,79	0,32	0,32	[mm]
Ra 0,80	0,82	0,70	0,52	0,32	[mm]
Ra 0,45	1,48	0,71	0,67	0,32	[mm]
Ra 0,10	0,71	0,88	0,53	0,00	[mm]



Obr. 45 Graf závislosti délky toku na povrchu zkušebních desek a vstřikovacím tlaku

Z grafu na Obr. 45 lze hned na první pohled vidět, že vstřikovací tlak má značný vliv na délku toku polymeru. Určitý, ale malý vliv na délku toku polymerů v našem případě má i drsnost povrchu zkušební desky. Jako nejlepší povrch se jevil povrchu s drsností desky Ra 5,01, kde u vstřikovacího tlaku 800 bar dosáhl 81,9 mm délky.

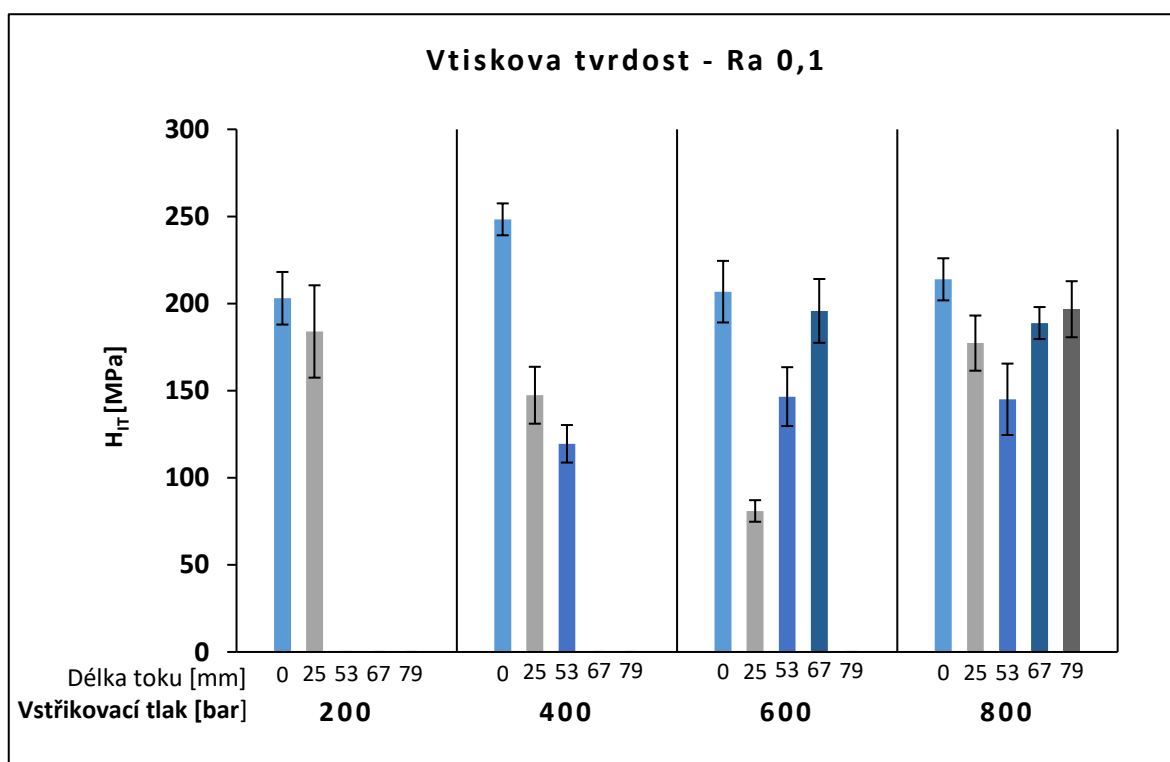
8.2 Hodnoty mikro-mechanických vlastností

V této podkapitole budou postupně uvedeny a popsány hodnoty vybraných měřených mikro-mechanické vlastnosti v závislosti na délce toku a vstřikovacího tlaku při různé drsnosti povrchu. Následně bude k příslušné zkušební desce uveden graf, který se bude lišit drsností povrchu. V grafu bude uvedena průměrná hodnota a směrodatná odchylka dané mikro-mechanické vlastnosti při různém tlaku a délce toku. Začínat se bude vždy zkušební deskou s nejmenší drsností povrchu.

8.2.1 Vtisková tvrdost

Vtisková tvrdost označována jako H_{IT} patří mezi základní veličiny, které jsou získány pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti. Jedná se o míru odporu k trvalé deformaci či poškození. Vtisková tvrdost lze vyjádřit jako maximální zatěžující síla, která je podělena průmětem kontaktní plochy a je možné jí vypočítat podle vzorce:

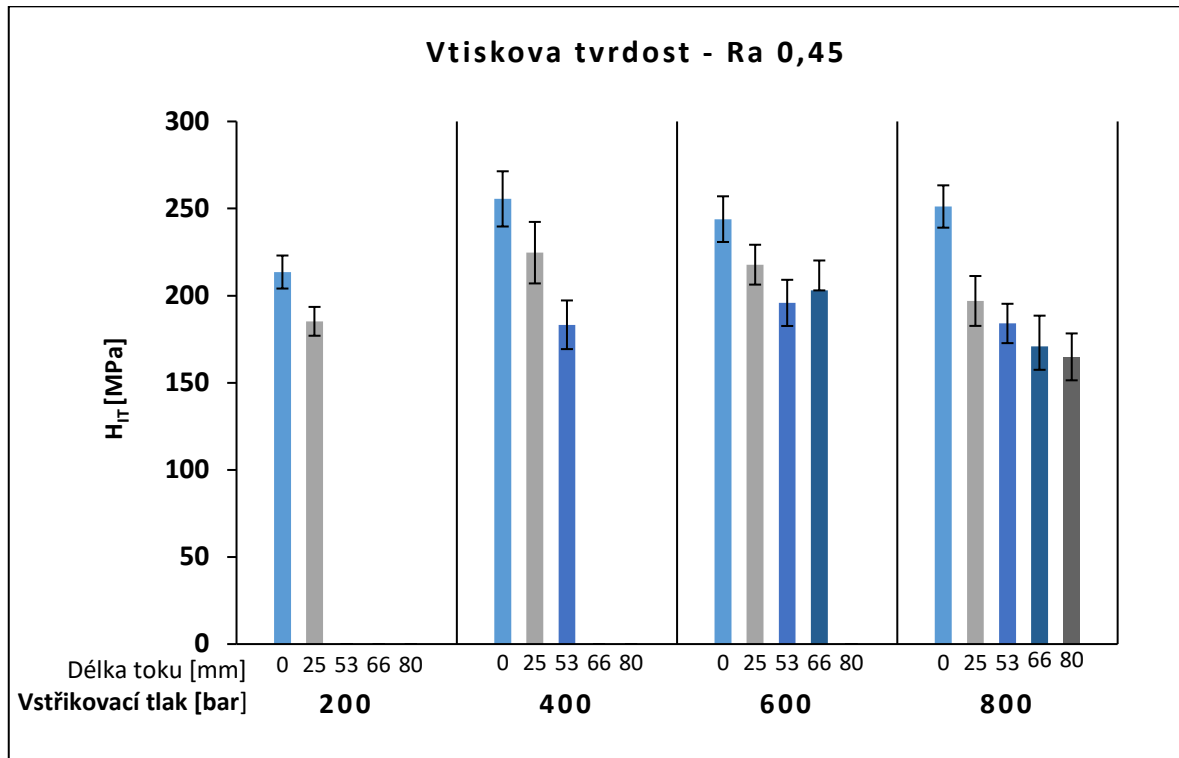
$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad [MPa] \quad (11)$$



Obr. 46 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,1

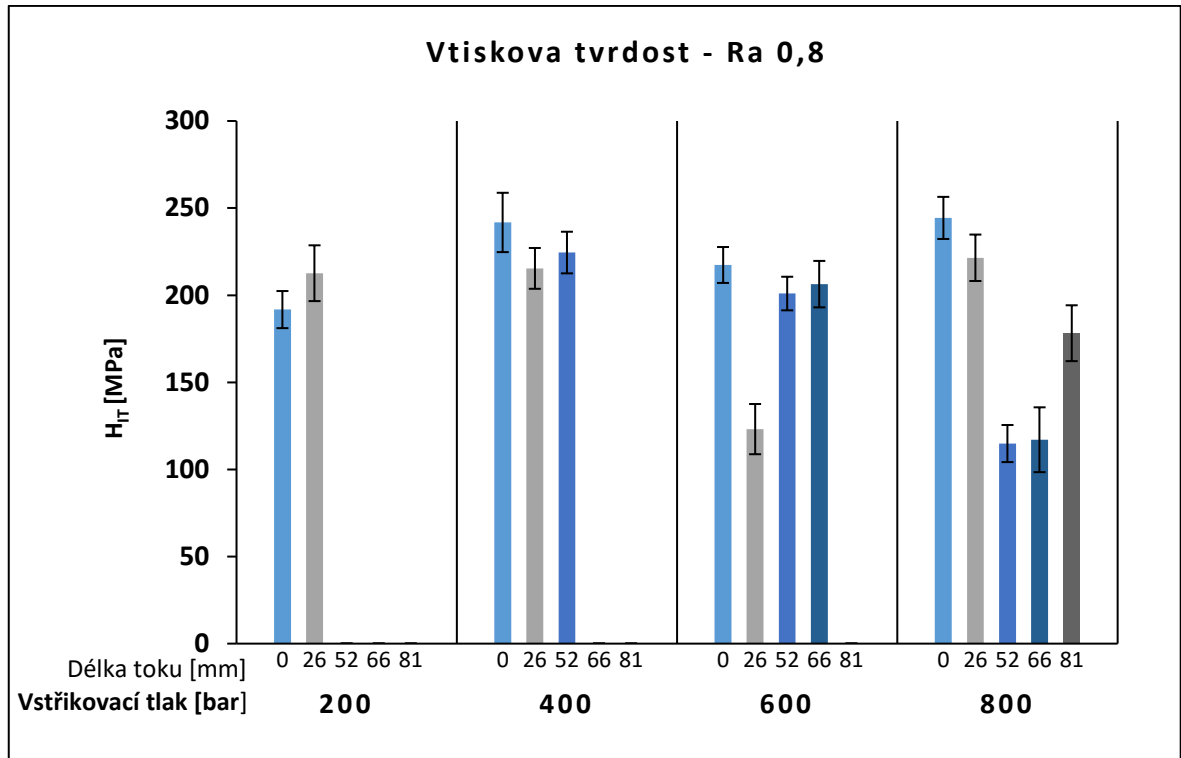
Při vstřikování vzorků na zkušební desce s drsností Ra 0,1 lze vidět, že největší tvrdost je naměřena vždy na začátku délky toku zkušebního tělesa. Největší hodnota vtiskové tvrdosti

byla naměřena pro tento povrch při vstřikovacím tlaku 400 bar, a to ve vzdálenosti 0 mm od vtoku, tedy hned na začátku spirály a hodnota dosáhla 248,3 MPa.



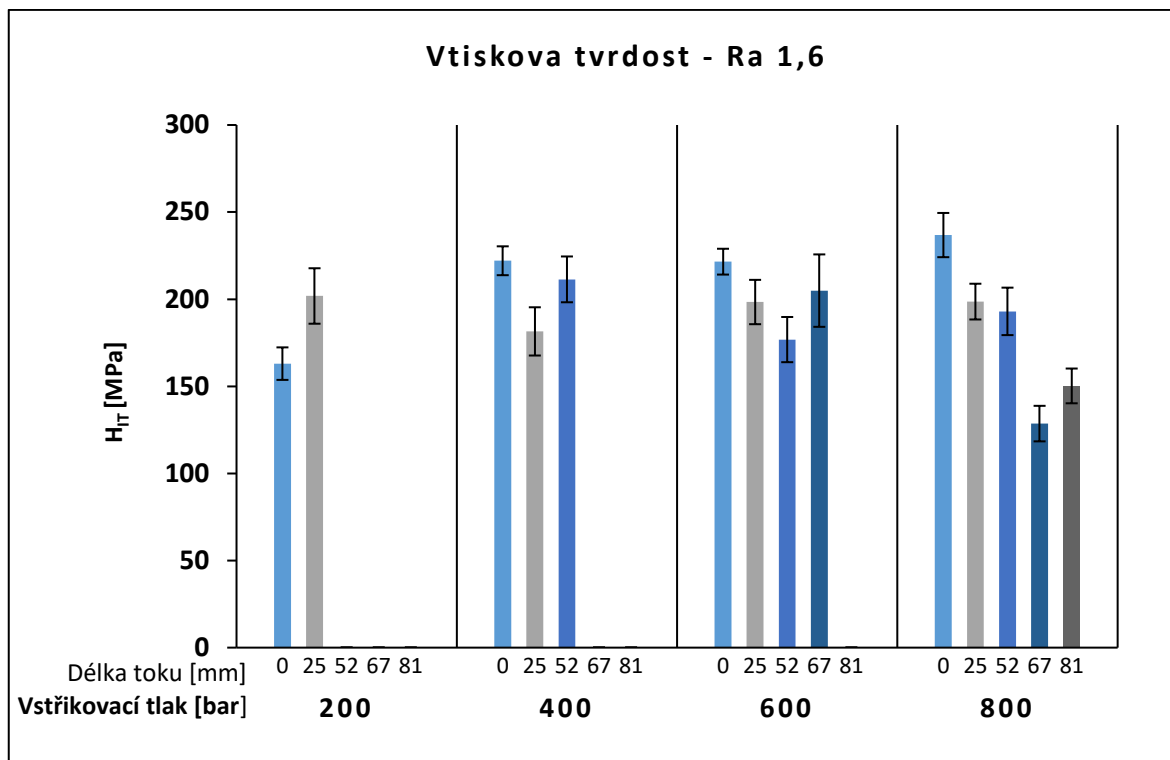
Obr. 47 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,45

Při měření povrchu s drsností Ra 0,45 došlo opět k naměření největší hodnoty vtiskové tvrdosti při vstřikovacím tlaku 400 bar a v 0 mm vzdálenosti od vtoku. Hodnota dosáhla 255,5 MPa a lze pozorovat, že s rostoucí vzdáleností od vtoku byl naměřen pokles hodnot vtiskové tvrdosti. Při vstřikovacích tlacích 200, 400 a 800 bar dochází k lineárnímu charakteru poklesu hodnot.



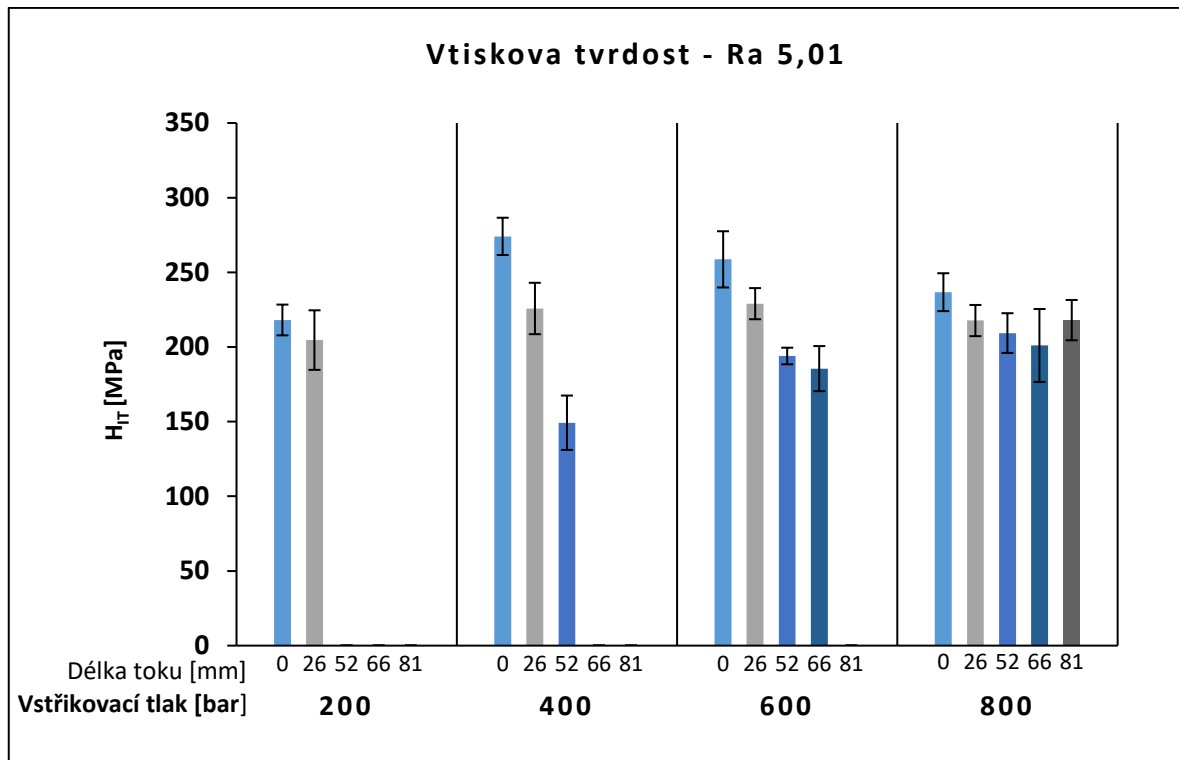
Obr. 48 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,8

Při použití desky s drsností povrchu Ra 0,8 lze vidět, že při vstřikovacích tlacích 400, 600 a 800 bar je naměřená největší vtisková tvrdost v 0 mm vzdálenosti od vtoku. Při vstřikovacím tlaku 200 bar lze vidět, že vstřikovací tlak vzrostl se vzdáleností od vtoku. Největší naměřená vtisková tvrdost byla při vstřikovacím tlaku 800 bar a to v 0 mm vzdálenosti od místa vtoku a to 244,3 MPa.



Obr. 49 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 1,6

Největší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena při vstřikovacím tlaku 800 bar jako při předešlé desce s drsností povrchu Ra 0,8. Hodnota dosáhla 236,8 MPa při zkušební desce s drsností Ra 1,6 a ve vzdálenosti 0 mm. Při vstřikovacím tlaku 200 bar byl naměřen nárůst vtiskové tvrdosti s rostoucí vzdáleností od vtoku, ale při ostatních vstřikovacích tlacích bylo zjištěno, že vtisková tvrdost naopak klesá se zvětšující se vzdáleností od místa vtoku. Lze si také všimnout, že při vstřikovacích tlacích 400, 600 a 800 bar nemá klesání vtiskové tvrdosti lineární charakter např. u tlaku 800 bar je hodnota vtiskové tvrdosti ve vzdálenosti 67 mm menší než hodnota ve vzdálenosti 81 mm od vtoku.



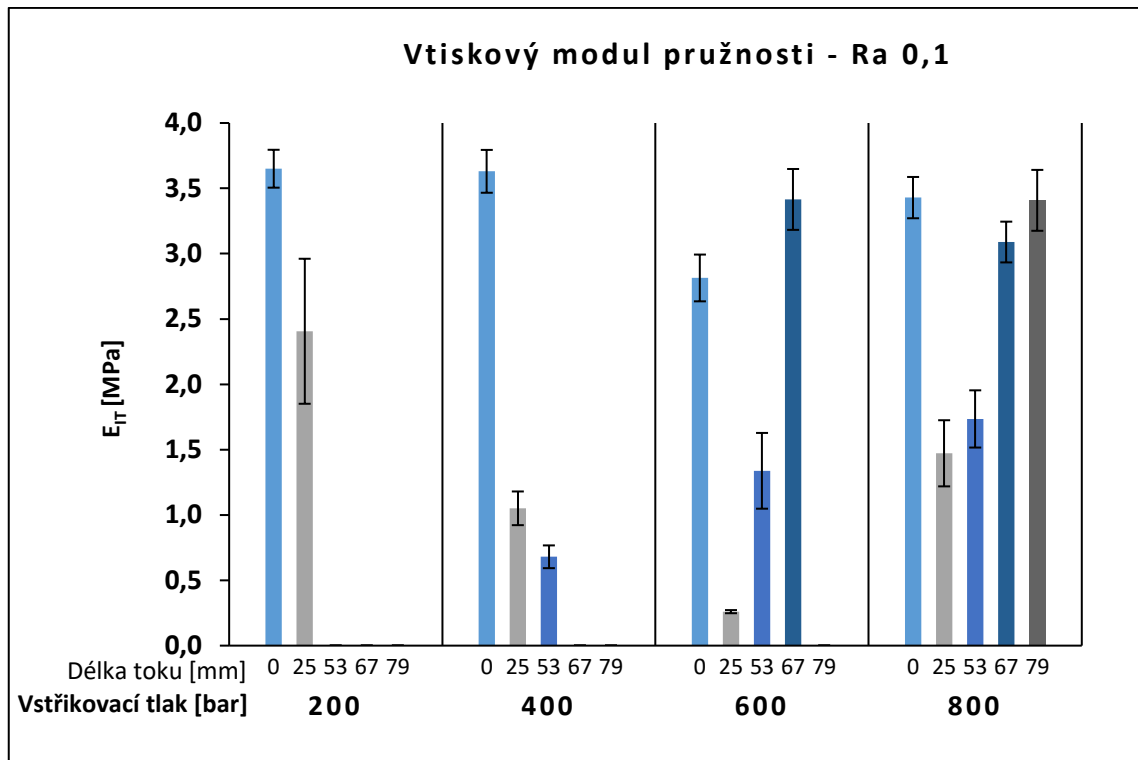
Obr. 50 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 5,01

Při použití poslední zkušební desky s drsností povrchu Ra 5,01 lze pozorovat u všech vstřikovacích tlaků, že největší hodnota vtiskové tvrdosti je vždy na začátku zkušebního tělesa, tedy ve vzdálenosti 0 mm. U vstřikovacích tlaků 200, 400 a 600 bar je pokles vtiskové tvrdosti lineární. Největší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena při vstřikovacím tlaku 400 bar, a to opět ve vzdálenosti 0 mm, tedy hned na začátku vstřikovacího tělesa a dosáhla hodnoty 274,1 MPa. Tato hodnota má největší naměřenou vtiskovou tvrdost ze všech zkušebních desek.

8.2.2 Vtiskový modul pružnosti

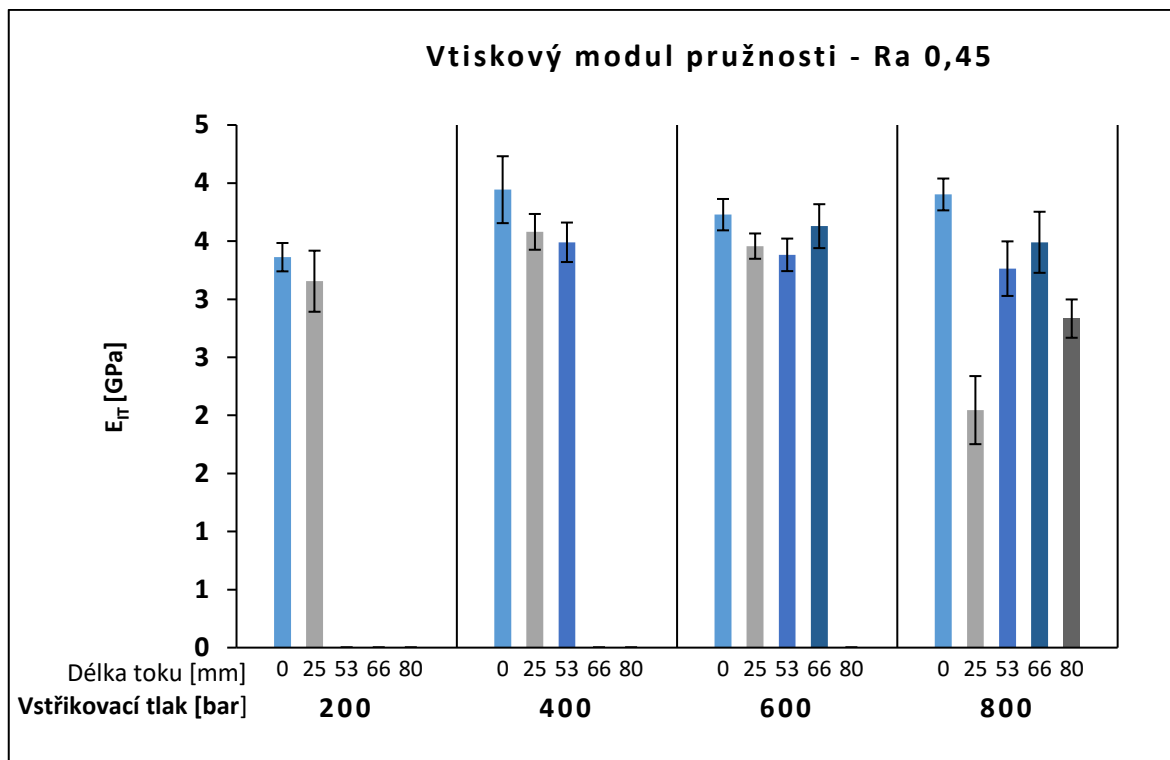
Vtiskový modul pružnosti označován jako E_{IT} patří mezi další velmi důležité veličiny, které lze získat z instrumentované zkoušky tvrdosti. Vtiskový modul pružnosti odpovídá Youngověmu modulu pružnosti a lze jej vypočítat pomocí vzorce:

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \text{ [Gpa]} \quad (12)$$



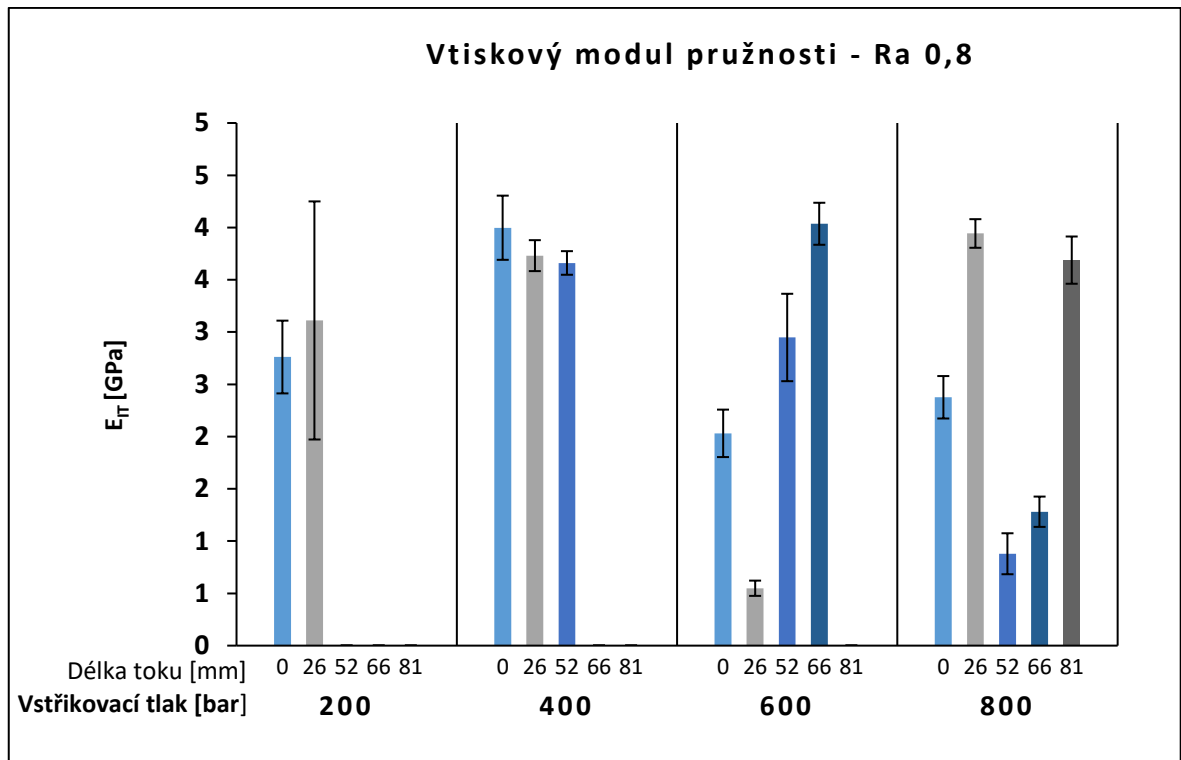
Obr. 51 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,1

Při použití desky s nejmenší drsností povrchu Ra 0,1 byl naměřen největší vtiskový modul pružnosti a to 3,65 GPa. Takle hodnota byla získána při vstřikovacím tlaku 200 bar a v 0 mm vzdálenosti od místa vtoku. Ve všech případech s narůstající vzdáleností od vtoku napřed dochází k výraznému poklesu vtiskového modulu pružnosti, a poté se tento jev převrátí a při vstřikovacím tlaku 600 a 800 bar od vzdálenosti 53 mm nám vtiskový modul pružnosti začíná stoupat. Nejvíce lze tento popsáný jev vidět při vstřikovacím tlaku 800 bar.



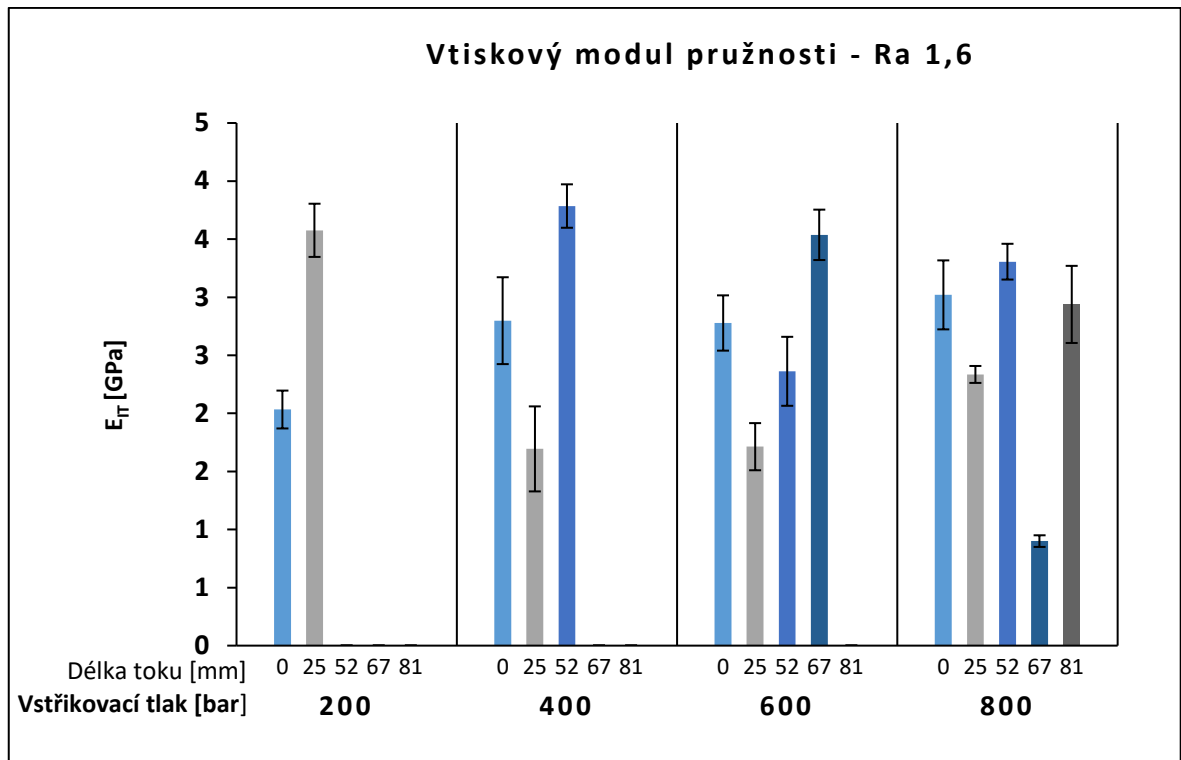
Obr. 52 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,45

Při měření vtiskového modulu pružnosti u zkušební desky s drsností povrchu Ra 0,45 byla naměřena největší hodnota při vstřikovacím tlaku 400 bar, a opět hned na začátku spirály. Hodnota v nulové vzdálenosti od místa vtoku dosáhla 3,94 GPa. Z grafu lze vyčíst, že při vstřikovacích tlacích 200, 400, a 600 bar hodnota vtiskového modulu pružnosti klesá s narůstající vzdáleností, a to do vzdálenosti 53 mm, u vstřikovacího tlaku došlo k zaznamenání hodnoty i ve vzdálenosti 66 mm, kde se hodnota zvýšila o 0,25 GPa. Výjimkou tvoří získané hodnoty při vstřikovacím tlaku 800 bar, kde dochází k výrazným výkyvům.



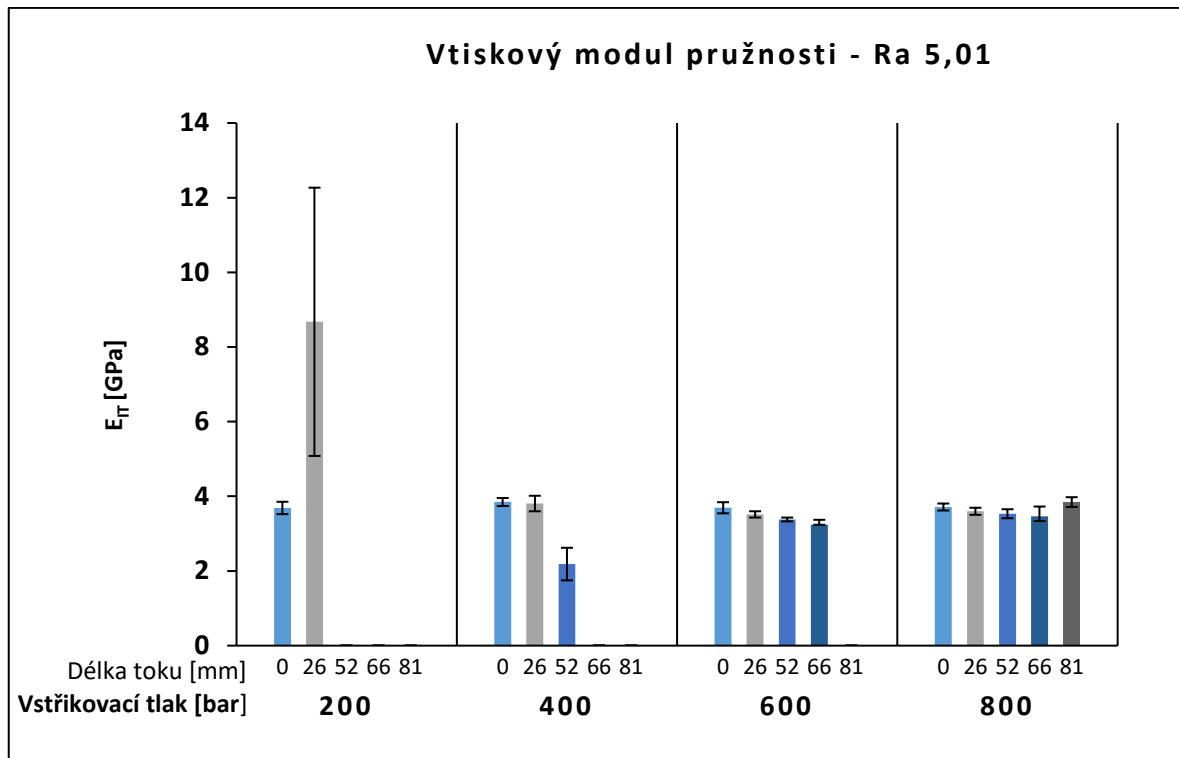
Obr. 53 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,8

Při měření hodnot vtiskového modulu pružnosti u zkušební desky s drsností povrchu Ra 0,8 byla zaznamenána nejvyšší hodnota 4,1 GPa. Hodnota byla získána při vstřikovacím tlaku 600 bar a ve vzdálenosti 66 mm od počátku měření. Při vstřikovacím tlaku 200 bar dochází k nárůstu hodnot, ale při vstřikovacím tlaku 400 bar zase k poklesu. U zbylých vstřikovacích tlaků dochází k výrazným výkyvům a nelze určit, zda s narůstající vzdáleností od vtoku nám bude vtiskový modul pružnosti klesat nebo stoupat.



Obr. 54 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 1,6

U zkušební desky s drsností povrchu Ra 1,6, která byla frézovaná, byl největší vtiskový modul pružnosti naměřen při vstřikovacím tlaku 400 bar a ve vzdálenosti 52 mm od vtoku a to 3,8 GPa. Získané výsledky tvoří velké výkyvy mezi hodnotami a nelze určit ani při jednom vstřikovacím tlaku, jestli bude vtiskový modul pružnosti lineárně stoupat nebo klesat s narůstající vzdáleností od počátku měření.



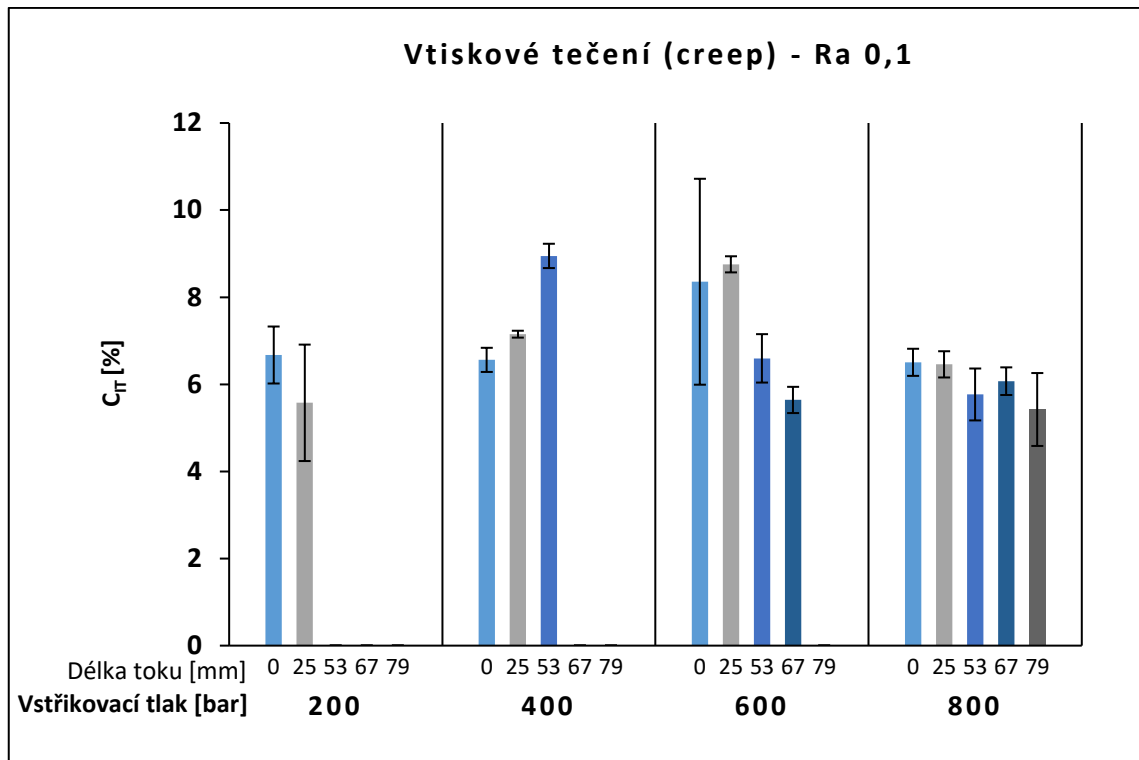
Obr. 55 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 5,01

Při měření vtiskového modulu pružnosti u desky s nejdrušnějším povrchem Ra 5,01 došlo k naměření největší hodnoty ze všech měřených desek. Hodnota dosáhla 8,7 GPa při vstřikovacím tlaku 200 bar a ve vzdálenosti 26 mm. U této hodnoty byla však zjištěna i velká chyba měření, která byla 3,5 GPa a tím pádem tahle hodnota může být zavádějící. U ostatních vstřikovacích tlacích došlo k vyrovnání naměřených hodnot a už nedocházelo k velkým výkyvům. Docházelo pouze k menšímu nárustu nebo poklesu vtiskového modulu pružnosti s rostoucí vzdáleností měření.

8.2.3 Vtiskové tečení – creep

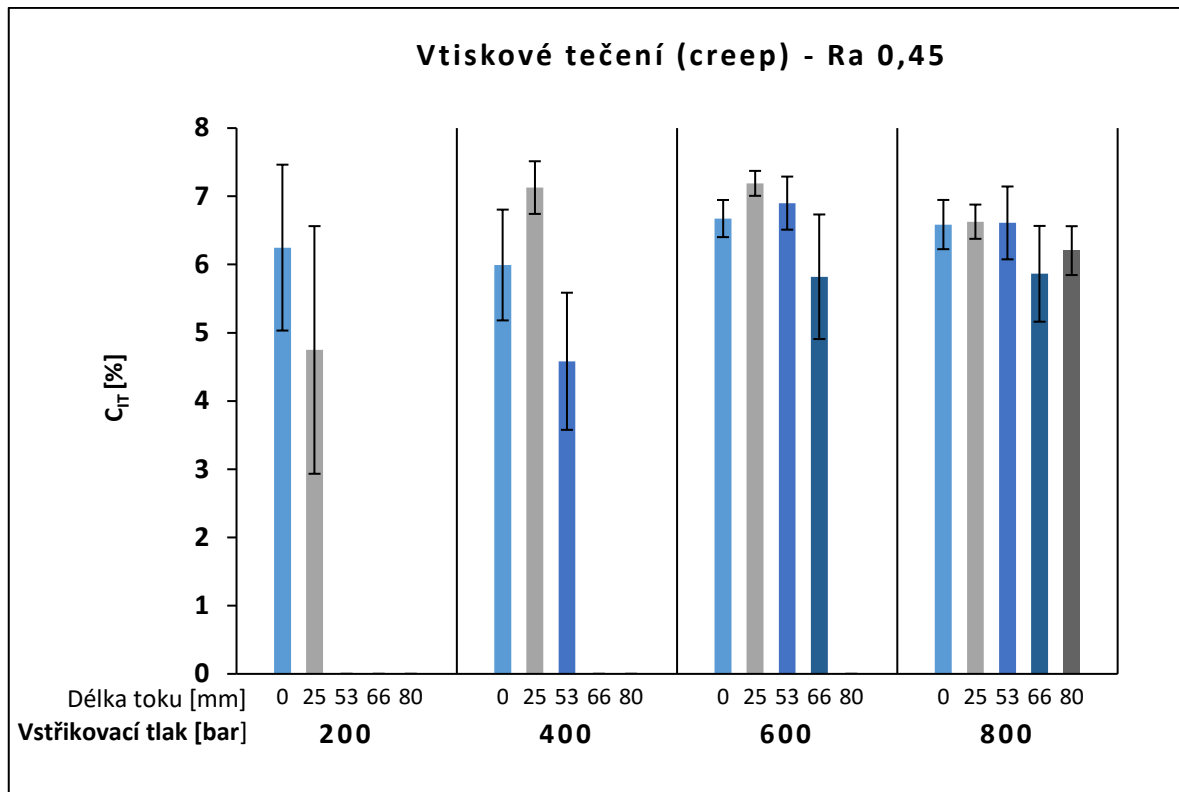
Vtiskové tečení neboli creep označováno jako C_{IT} je poslední zkoumanou veličinou pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti a patří mezi důležité měřené veličiny. Vtiskové tečení je charakterizováno jako závislost indentační hloubky na čase indentace. Po dosažení maximální zatěžující síly 1 N nastává výdrž po určitou dobu na zmíněné maximální síle. Během tohoto zatížení se projevuje vtiskové tečení, a to postupným propadáváním indentoru do zkoumaného materiálu. Vtiskové tečení lze určit pomocí vzorce:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$



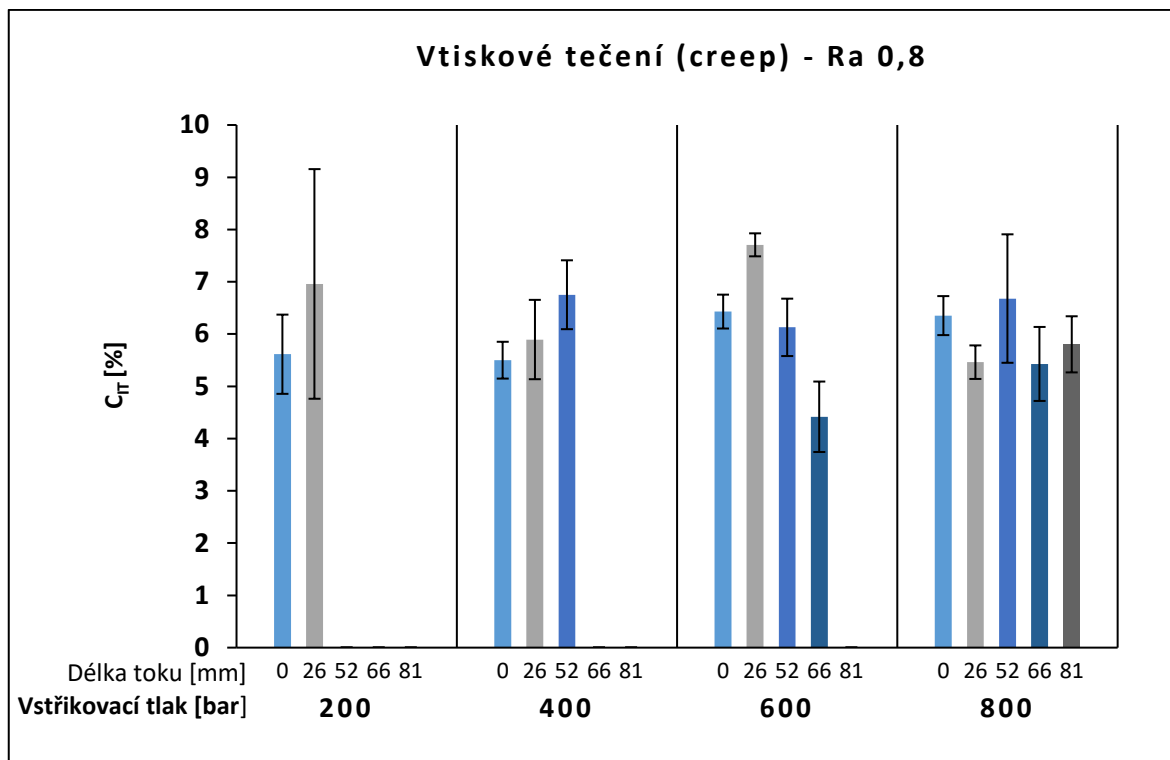
Obr. 56 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,1

U měření vtiskového tečení při použití zkušební desky s nejmenší drsností povrchu Ra 0,1 byla naměřena nejvyšší hodnota 8,9 % při tlaku 400 a v délce 53 mm od začátku měření. Ze získaných hodnot při použití této drsnosti nelze určit, zda s rostoucí vzdáleností hodnota vtiskového tečení klesá nebo roste. Například při vstřikovacím tlaku 800 bar dochází k mírnému poklesu vtiskového tečení, a naopak při vstřikovacím tlaku 400 bar dochází k nárůstu vtiskového tečení při narůstající se vzdálenosti.



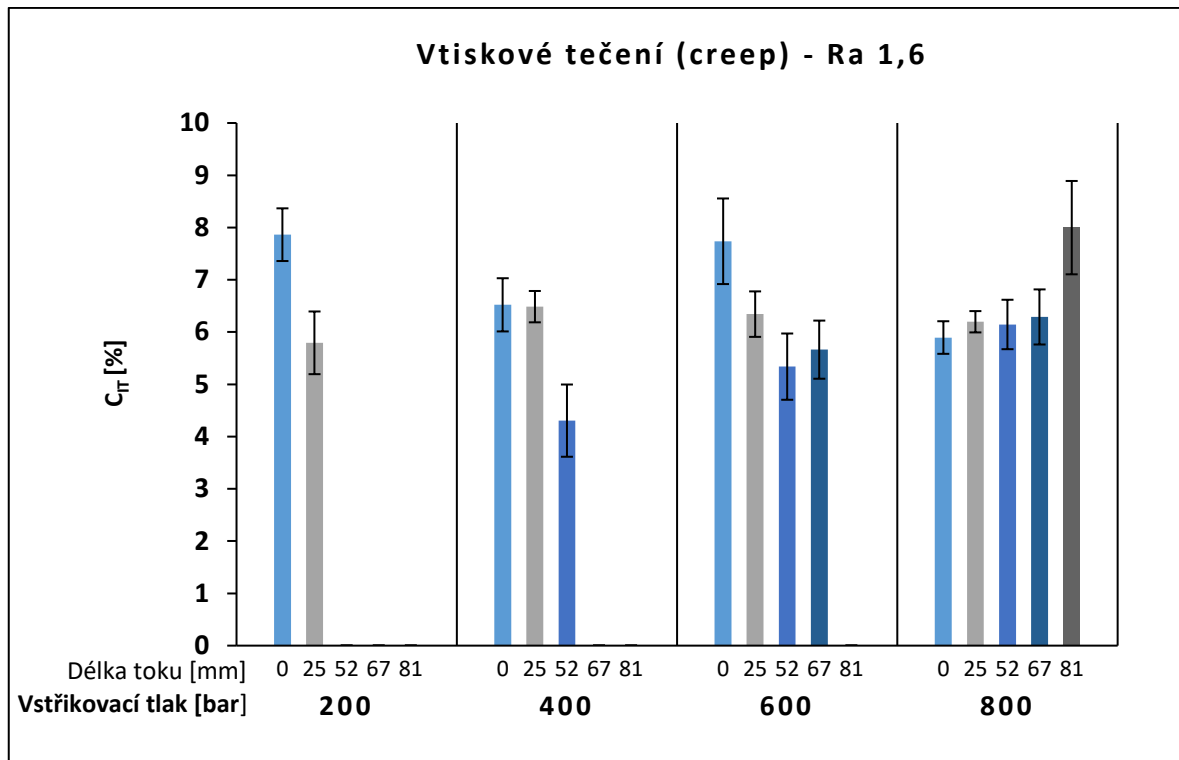
Obr. 57 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,45

Při použití druhé nejméně drsné zkušební desky s drsností povrchu Ra 0,45 byla naměřena největší hodnota vtiskového tečení při vstřikovacím tlaku 400 bar, a to ve vzdálenosti 25 mm od místa vtoku. Hodnota dosáhla 7,1 % vtiskového tečení. U vstřikovacího tlaku 800 bar došlo k naměření podobných výsledků, hodnota vtiskového tečení výrazně neklesala, ale ani nevzrostla. Při vstřikovacích tlacích 400 a 600 bar hodnota vtiskového tečení napřed rostla do vzdálenosti 25 mm a následně klesla.



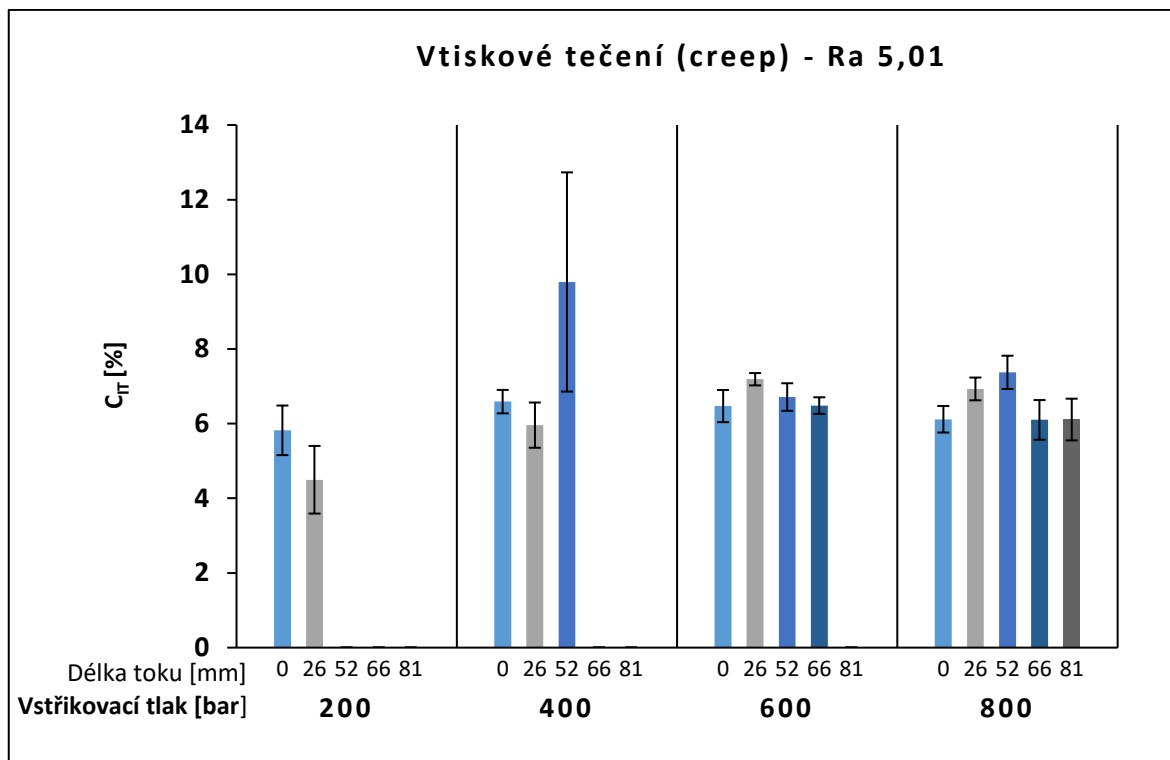
Obr. 58 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_T na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,8

Při měření vtiskového tečení s využitím zkušební desky s drsností povrchu Ra 0,8 byla naměřena nejvyšší hodnota 7,7 % při vstřikovacím tlaku 600 bar a ve vzdálenosti 52 mm od počátku spirály. Dále lze vyčíst, že při vstřikovacích tlacích 200 a 400 bar dochází k lineárnímu narůstání vtiskového tečení při zvětšující se vzdálenosti. U vstřikovacího tlaku 600 bar napřed dochází k nárůstu a následně k výraznému poklesu hodnoty vtiskového tečení. U největšího vstřikovacího tlaku 800 bar dochází ke kolísání hodnot.



Obr. 59 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_T na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 1,6

Nejvyšší hodnota vtiskového tečení u zkušební desky s drsností povrchu Ra 1,6 byla naměřena při vstřikovacím tlaku 800 bar, a to v maximální vzdálenosti tedy 81 mm od počátku spirály a hodnota dosáhla 8 %. Z grafu uvedeným výše také vyplývá, že ve většině případů hodnota vtiskového tečení napřed s rostoucí vzdáleností klesá, a při vstřikovacím tlaku 600 bar ve vzdálenosti 67 mm začíná stoupat. Při vstřikovacím tlaku 800 bar byly získány poměrně vyrovnané hodnoty vtiskového tečení kromě naměřené hodnoty ve vzdálenosti 81 mm od začátku spirály.



Obr. 60 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 5,01

Při měření vtiskového tečení se zkušební deskou s největší drsností Ra 5,01, která byla vytvořena pomocí frézování, byla naměřena nejvyšší hodnota a to 9,8 %. Nejvyšší hodnota byla získána při vstřikovacím tlaku 400 bar a ve vzdálenosti 52 mm, kde byla zároveň i vypočítána velká směrodatná odchylka. V grafu si lze všimnout, že hodnoty vtiskového tečení při vstřikovacím tlaku 600 a 800 bar jsou ve všech měřených vzdálenostech podobné. Při všech vstřikovacích tlacích nelze určit, zda hodnota vtiskového tečení roste nebo klesá s rostoucí vzdáleností od začátku spirály.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem diplomové práce bylo zjistit, do jaké míry ovlivňují procesní parametry a drsnost povrchu zkušebních desek délku toku a výsledné mikro-mechanické vlastnosti. Měření mikro-mechanických vlastností bylo provedeno pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti a délka toku pomocí přípravku. K výzkumu bylo využito 5 tvarových desek s drsností povrchu od Ra 0,1 až po Ra 5,01 a tvarem dutiny formy byla spirála s vtokovým ústím o šířce 6 mm. K výrobě zkušebních těles byl vybrán materiál POM Formocon FM090 s indexem toku taveniny $ITT = 9 \text{ g/10 min}$. Tento materiál byl vstříkován pro každou zkušební desku při 4 vstříkovacích tlacích a to 200, 400, 600, a 800 bar. Z výsledků, které nám poskytla instrumentovaná zkouška tvrdosti, byla vyhodnocena vtisková tvrdost H_{IT} , vtiskový modul E_{IT} a creep C_{IT} , které jsou považovány za nejdůležitější vlastnosti, jež byly měřeny a porovnány v závislosti na vzdálenosti od místa vtoku.

Následně budou porovnávány výsledky jednotlivých mikro-mechanických vlastností při jednom vstříkovacím tlaku a to 800 bar a budou srovnávány mezi jednotlivými typy použitých zkušebních desek.

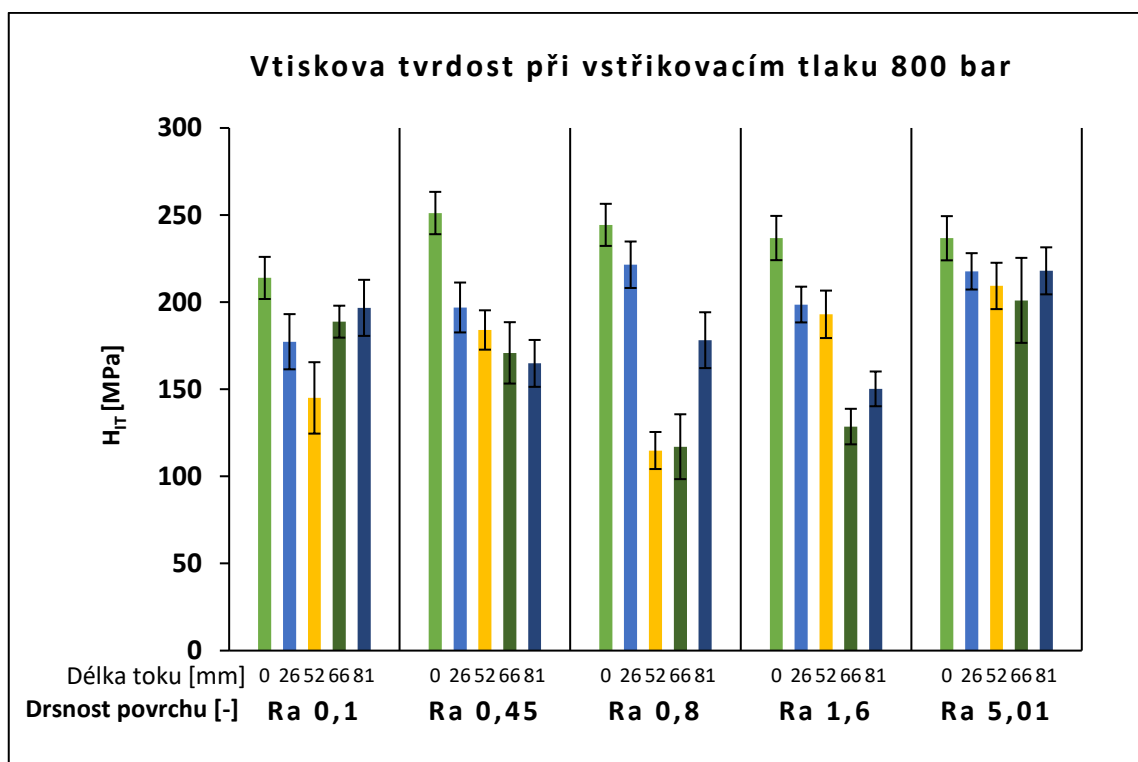
9.1 Délka toku

Vyhodnocení vlivu drsnosti povrchu zkušebních desek na délce toku testovaného polymerního materiálu při vstříkovacích tlacích je znázorněno na grafu Obr. 45. Z grafu vyplývá, že s rostoucím vstříkovacím tlakem dochází k lineárnímu růstu délky toku u každé ze zkušebních desek. Tímto vyhodnocením byl potvrzen předpoklad vlivu vstříkovacího tlaku na délky toku v dutině zkušební vstříkovací formy, kdy s rostoucím vstříkovacím tlakem roste i délka toku zatečení. Dále lze z grafu vyčíst, že při vstříkovacím tlaku 800 bar má drsnost povrchu dutiny vstříkovací formy vliv na délku toku. Rozdíl délky toku mezi nejdrsnější a nejhladší deskou tvoří 3 mm. Tento rozdíl není nijak velký, ale lze předpokládat, že s rostoucí drsností povrchu vstříkovací formy se bude zvyšovat i délka zatečení.

9.2 Mikro-mechanické vlastnosti

9.2.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

Vtisková tvrdost určuje míru odporu k poškození nebo trvalé deformaci a je charakterizována jako maximální zatěžující síla podělená průmětem kontaktní plochy. Srovnáním hodnot vtiskové tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od místa vtoku, při použití různých drsností povrchu vstřikovací formy s variací vstřikovacích tlaků nebyl pozorován jednoznačný jev, který by dokazoval závislost mezi vzdáleností od místa vtoku a vtiskové tvrdosti.



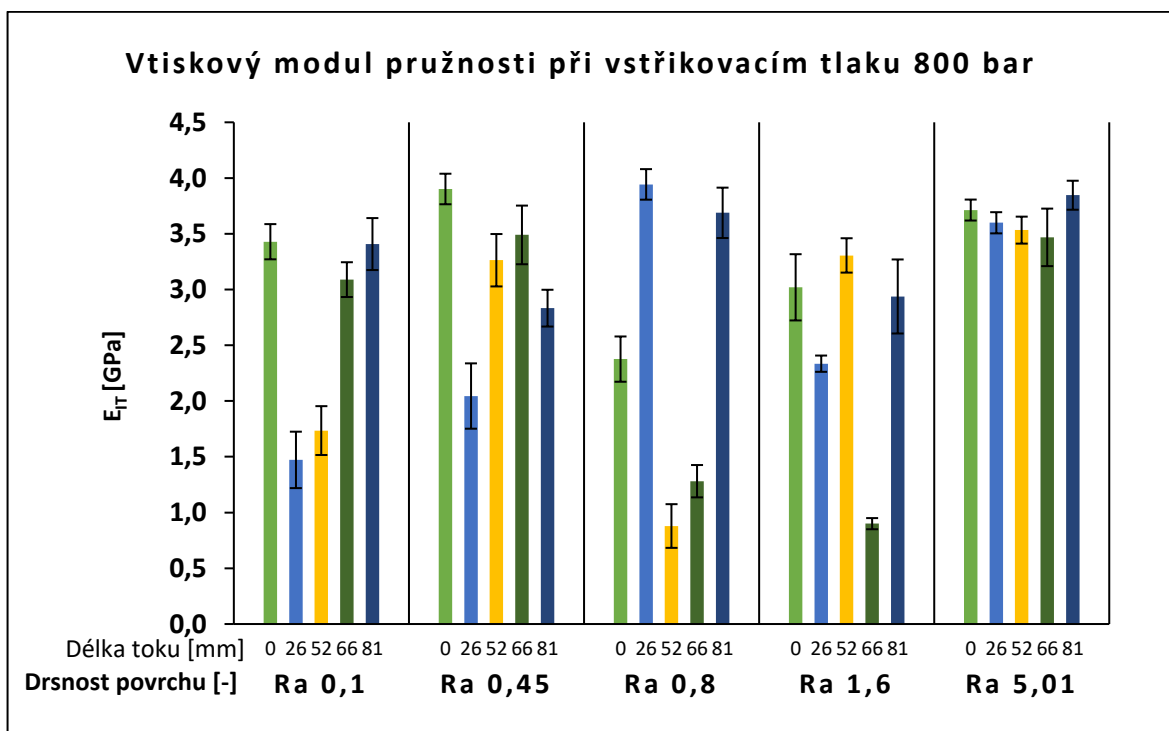
Obr. 61 Graf srovnání vtiskové tvrdosti v závislosti délky toku a drsnosti povrchu vstřikovací formy při vstřikovacím tlaku 800 bar

Na grafu uvedeném na Obr. 61 lze vidět porovnání získaných výsledků vtiskové tvrdosti H_{IT} pro vstřikovací tlak 800 bar. U všech drsností povrchu dosáhla vtisková tvrdost nejvyšší hodnoty vždy hned na začátku zkušební spirály, tedy v 0 mm vzdálenosti od místa vtoku. Lze si všimnout, že téměř u všech zkušebních desek hodnota vtiskové tvrdosti klesá s rostoucí vzdáleností do daného bodu, kde naopak začne hodnota stoupat. U povrchu s drsností Ra 0,45 lze však pozorovat lineární pokles, kde nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla 251,2 MPa a poté vtisková tvrdost klesala až po konec spirály v délce 81 mm, kde byla naměřena hodnota 164,9 MPa. Lze říci, že u téhle zkušební desky se zvětšující se délkou

toku klesá vtisková tvrdost. U desky s nejmenší drsností povrchu Ra 0,1 lze pozorovat, že hodnoty vtiskové tvrdosti lineárně klesají do vzdálenosti 53 mm a následně stoupají až ke konci spirály. Zde byla naměřená nejvyšší hodnota 213,9 MPa a nejmenší hodnota 145 MPa ve vzdálenosti 52 mm. Při použití zkušební desky s drsností povrchu Ra 0,8 lze pozorovat stejný vývoj jako při desce s drsností povrchu Ra 0,1. Nejvyšší hodnota byla naměřena hned na začátku a to 244,3 MPa a nejnižší opět ve vzdálenosti 52 mm od začátku spirály a to 114,9 MPa. U zkušebních desek s drsností povrchu Ra 1,6 a 5,01 lze pozorovat stejný vývoj získaných hodnot. Hodnota vtiskové tvrdosti napřed s rostoucí vzdáleností klesá a na konci spirály vzroste. U obou zkušebních desek nejvyšší hodnota byla naměřená na začátku spirály tedy v 0 vzdálenosti od místa vtoku a to 236,8 MPa. Také u obou případů byla naměřená nejmenší hodnota ve vzdálenosti 66 mm a to 128,5 MPa u drsnosti Ra 1,6 a hodnota 201 MPa při drsnosti Ra 5,01. Z grafu lze říci, že drsnost povrchu nijak neovlivňuje vtiskovou tvrdost u vstřikovaných dílů.

9.2.2 Vtiskový modul pružnosti E_{ir}

Vtiskový modul pružnosti odpovídá Youngovému modulu pružnosti a je určen ze směrnice tečny odlehčující křivky. Porovnáním získaných hodnot vtiskového modulu pružnosti nebyl pozorován žádný jednoznačný jev, který by dokazoval závislost délky toku a drsnosti povrchu na vtiskovém modulu pružnosti.

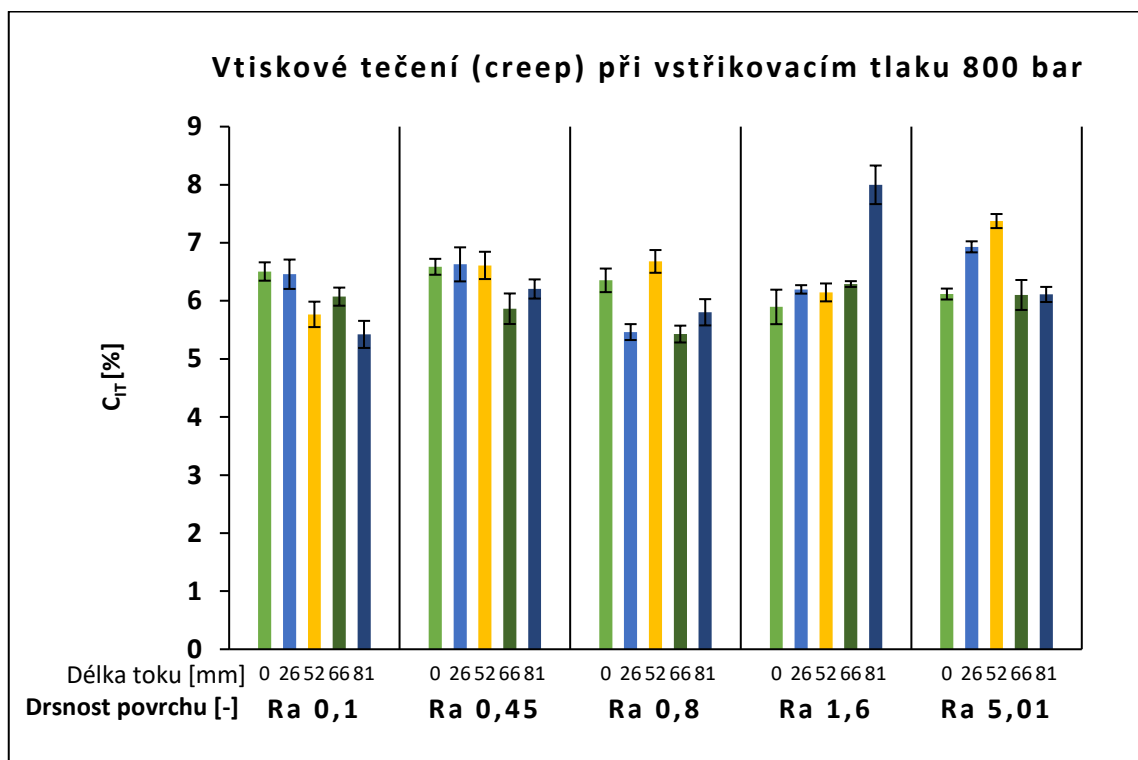


Obr. 62 Graf srovnání vtiskového modulu pružnosti v závislosti délky toku a drsnosti povrchu vstřikovací formy při vstřikovacím tlaku 800 bar

Při měření vtiskového modulu pružnosti si lze všimnout, že nejmenší hodnota byla získána při použití zkušební desky s drsností povrchu Ra 0,8, a to 0,8 GPa ve vzdálenosti 52 mm od počátku spirály. Naopak nejvyšší hodnota 3,9 GPa byla naměřena u zkušební desky s drsností Ra 0,45 na začátku spirály a u desky s drsností Ra 0,8 ve vzdálenosti 26 mm. Dále si lze povšimnout, že při nejdrsnější zkušební desce byly hodnoty vtiskového modulu pružnosti nejvíce vyrovnány a nedocházelo k výkyvům v závislosti na zvětšující se vzdálenosti. Naopak v ostatních případech docházelo ke kolísání hodnot vtiskového tečení.

9.2.3 Vtiskové tečení – creep C_{IT}

Vtiskové tečení neboli creep je charakterizováno jako závislost indentační hloubky na čase indentace. Aby došlo k projevení vtiskového tečení musí být dosaženo maximálního zatížení 1 N po celou dobu měření. Srovnáním naměřených hodnot vtiskového tečení nebyl prokázán jednoznačný vliv délky toku a drsnosti povrchu při vstřikovacím tlaku 800 bar.



Obr. 63 Graf srovnání vtiskového tečení (creep) v závislosti délky toku a drsnosti povrchu vstřikovací formy při vstřikovacím tlaku 800 bar

Z grafu uvedeným výše lze vyčíst, že u desek s menší drsností povrchu byly naměřeny nejmenší hodnoty vtiskového tečení. Nejnižší hodnota dosáhla 5,4 % a to hned při 3 získaných průměrných hodnotách. U drsnosti povrchu Ra 0,1 byla tato hodnota dosažena ve vzdálenosti 81 mm a u drsnosti Ra 0,8 ve vzdálenosti 26 mm a 66 mm od počátku spirály. Nejvyšší hodnota byla naměřena při použité zkušební desce s drsností povrchu 1,6 a ve

vzdálenosti 81 mm a to 8 %. Dále lze vyzorovat, že naměřené hodnoty při všech drsnostech povrchů vykazují podobné hodnoty a nedochází k tak výrazným výkyvům hodnot vtiskového tečení. U zkušební desky s největší drsností povrchu Ra 5,01 byly dokonce naměřeny 3 stejné hodnoty vtiskového tečení v různých vzdálenostech od místa vtoku. Z toho důvodu lze říct, že délka toku nemá žádný jednoznačný vliv na hodnotu vtiskového tečení.

ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce bylo zkoumání a porovnávání vlivu procesních parametrů vstřikování na délku toku a mikro-mechanické vlastnosti materiálu POM při různých drsnostech povrchu dutiny vstřikovací formy s měnícím se vstřikovacím tlakem. Testovaným polymerním materiálem byl polyoxymethylen (POM), který se řadí do skupiny nezesíťovaných termoplastů. Jedním z procesních parametrů vstřikování byl vstřikovací tlak s hodnotami od 200 bar po 800 bar. Dalším proměnným parametrem byla drsnost vstřikovací desky, která byla upravena leštěním, broušením nebo frézováním a drsnost povrchu dosahovala hodnot od Ra 0,1 až po Ra 5,01. Výsledným vstřikovacím dílem byla spirála, která udávala hodnotu délky toku a na ní v daných vzdálenostech od vtoku byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI), ze které byli získány mikro-mechanické vlastnosti.

Samotná teoretická část diplomové práce se zabývala popisem polymerních materiálů a jejich reologickým chováním v roztaveném stavu, problematikou vstřikování včetně technologických parametrů ovlivňujících jeho proces a instrumentovanou zkouškou tvrdosti.

V praktické části diplomové práce byl popsán samotný experiment, který zahrnoval přípravu materiálu, stanovení procesních podmínek vstřikování a popis tvarové dutiny vstřikovací formy včetně vstřikování zkušebních těles. Následně byla zkoumána problematika délky zatečení vstřikovacích těles a výsledné mikro-mechanické vlastnosti, kterými byli vtisková tvrdost, vtiskový modul pružnosti a vtiskové tečení.

Pomocí této studie byl potvrzen vliv vstřikovacího tlaku na délku toku, který je znázorněn na Obr. 45 a lze z něj vyčíst, že porovnáním různých vstřikovacích tlaků byly pozorovány rozdíly v nárůstu délky zatečení u všech zkušebních desek. Při nejmenším vstřikovacím tlaku 200 bar se hodnoty délky toku pohybovaly okolo 25,5 mm a u největšího vstřikovacího tlaku 800 bar se hodnota délky zatečení vyšplhala až na 81,9 mm. Dále lze z obrázku vyčíst, že drsnost povrchu má nepatrný vliv na délku toku. Ovšem můžeme si povšimnout, že při vstřikovacím tlaku 800 bar je mezi drsnostmi povrchu Ra 5,01 a Ra 0,1 rozdíl délky toku 3 mm. Z toho můžeme usoudit, že s rostoucí drsností povrchu může docházet k delšímu zatečení.

Z výsledků studie mikro-mechanických vlastností se ukázaly pouze obecné závěry. Během vyhodnocení naměřených hodnot bylo zjištěno, že procesní parametry i drsnosti povrchu dutiny vstřikovací formy nemají nejednoznačný vliv na mikro-mechanické vlastnosti.

Bohužel tak nebyl prokázán žádný konkrétní trend, podle kterého se hodnoty mikro-mechanických vlastností měnily napříč výměnných vstřikovacích desek s variací tlaků.

První zkoumanou mikro-mechanickou vlastností byla vtisková tvrdost, která nám ukazuje, že ve většině případů byla naměřená nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti v nulové vzdálenosti od místa toku, tedy hned na začátku spirály. Tento jev byl prokázán při všech drsnostech povrchu a při všech vstřikovacích tlacích kromě 200 bar. Dále si lze u vtiskové tvrdosti všimnout vyvíjejícího se trendu, kdy hodnoty nejdříve klesají s rostoucí vzdáleností od začátku spirály a následně rostou. Výjimku tvoří pouze zkušební deska s drsností povrchu Ra 0,45. Další pozorovanou vlastností byl vtiskový modul pružnosti, ve kterém docházelo k největším výkyvům hodnot, a tak nelze prokázat jednoznačný vliv drsnosti povrchu a vzdálenosti od místa vtoku na hodnotu vtiskového modulu pružnosti. Poslední mikro-mechanickou vlastností je vtiskové tečení neboli creep, u kterého opět nebyla prokázána závislost drsnosti povrchu ani vzdálenosti od místa vtoku na hodnotu vtiskového tečení. Pouze u vstřikovacího tlaku 800 bar viz Obr. 63 si lze všimnout, že hodnoty vtiskového tečení dosahují poměrně ustálených hodnot v průměru 6,3 %.

Získané poznatky je možné uplatit v praxi a to tak, že při vstřikování tohoto materiálu, dokážeme snížit výrobní náklady na vstřikovací formy. Bylo zjištěno, že není nutné používat nákladné dokončovací operace na všechny plochy vstřikovací formy, ale pouze na plochy funkční a pohledové tedy plochy budoucího vstřikovaného výrobku. Na ostatní plochy lze použít méně náročné způsoby obrábění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav, 2006. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK, 2001. *Aplikovaná reologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-731-8039-1.
- [3] BĚHÁLEK, Luboš, 2015. *Polymery* [online]. [cit. 2021-03-7]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [4] BOBČÍK, Ladislav, 1999. *Formy pro zpracování plastů*. 2. vydání. Brno: Uniplast Brno, I. díl, Vstřikování termoplastů, 133 s.
- [5] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK, 2000. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles. ISBN 8085920727.
- [6] *Reologie* [online]. Ústav fyziky a mat. inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [7] KONTOPOULOU, Marianna. *Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, 357 s. ©2012. ISBN 978-047-0416-709.
- [8] VLACHOPOULOS, John a David STRUTT, 2016. *Rheology of Molten Polymers*. Multilayer Flexible Packaging. Elsevier, 77-96. ISBN 9780323371001. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-37100-1.00006-5
- [9] CHEREMISINOFF, Nicholas P, 2018. *An introduction to polymer rheology and processing*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, online zdroj. CRC revivals. Dostupné z: doi:9781351082273
- [10] LARSON, Ronald G, 1999. *The structure and rheology of complex fluids*. New York: Oxford University Press. Topics in chemical engineering. ISBN 019512197X.
- [11] BĚHÁLEK, Luboš. *Reologie tavenin termoplastu v praxi* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/35064912-Reologie-tavenin-termoplastu-v-prumyslove-praxi.html>
- [12] LENDFELD, Petr., 2016. *Technologie vstřikování* [online]. [cit. 2021-03-30]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [13] LENDFELD, Petr, 2005. *Technologie II*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 80-737-2037-X.

- [14] SEIDL, Martin, 2016. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. [cit. 2021-03-30]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [15] BOBEK, Jiří, 2016. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. [cit. 2021-03-30]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [16] VALERO JOSÉ R, Lerma, 2020. *Plastics Injection Molding – Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices* [online]. Hanser Publishers [cit. 2021-03-30]. ISBN 978-1-5231-2723-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPIMSMRB7/plastics-injection-molding/plastics-injection-molding?kpromoter=federation>
- [17] KAUFFER, Phoebe H, 2011. *Injection molding: process, design and applications*. [online]. New York: Nova Science Publishers. [cit. 2021-03-30]. ISBN 9781617614200. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=362382&lang=cs&site=ehost-live&authtype=ip,shib&custid=s3936755>
- [18] BEAUMONT, J., R. SHERMAN a R NAGEL, 2002. *Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation*. Munich: Hanser Publishers. ISBN 3-446-19433-9.
- [19] ZEMAN, Lubomír, 2018. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-802-7106-141.
- [20] ZEMAN, Lubomír, 2009. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 80-730-0026-1.
- [21] GASTROW, Hans, P a E. LINDNER, 2002. *Injection molds: 130 proven designs*. 3rd ed. Munich: Hanser, 2002, ISBN 3446214488.
- [22] STANĚK, Michal, 2017. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů*. Zlín. Habilitační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [23] STANEK, Michal, Miroslav MANAS a David MANAS, 2009. *Mold Cavity Roughness vs. Flow of Polymer: Novel Trends in Rheology III: Proceedings of the International Conference*. American Institute of Physics. ISBN 978-0735406896.
- [24] PŮTA, Josef, 2008. *Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje*. Disertační práce, Liberec: Technická univerzita v Liberci.

- [25] ULÍK, J., 2005. *Monitorovanie priebehu tlaku v nástroji pri vstrekovani plastov*. Disertační práce, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě.
- [26] DUŠEK, J., 2008. *Tvrдост, mikrotvrдост, nanotvrдост-čisté kovy měřené metodou DSI*. Disertační práce, Brno: Masarykova univerzita v Brně.
- [27] OVŠÍK, Martin. 2013. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*. Disertační práce, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [28] ČTVRTLÍK, R., 2012. *Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev*. Disertační práce, Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.
- [29] BALTA CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV, 2000. *Microhardness of polymers*. Cambridge: Cambridge University Press, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.
- [30] TIWARI, Atul, NATARAJAN, Sridhar, 2017. *Applied Nanoindentation in Advanced Materials*. Wiley, ISBN 978-1-119-08449-5.
- [31] NEMECEK, Jiri, 2012. *Nanoindentation in Materials Science*, ISBN 978-953-51-0802-3.
- [32] YAN, J., A.M. KARLSSON a X. CHEN, 2007. *Determining plastic properties of a material with residual stress by using conical indentation*. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 44(11-12), 3720-3737 [cit. 2021-04-24]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.10.017. ISSN 00207683. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768306004239>
- [33] SONMEZ, Fazil O. a Ahmet DEMIR, 2007. *Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 186(1-3), 163-173 [cit. 2021-04-24]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.031. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360601171X>
- [34] CSN EN ISO 14577-1 *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda*, Říjen 2002.
- [35] CSN EN ISO 14577-4 *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 4: Zkušební metoda pro kovové a nekovové materiály*, Říjen 2007.

- [36] Arcopolimeri srl. *FORMOCON® FM090* [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.arcopolimeri.com/wp-content/uploads/2019/08/Formocon-FM-090-tech-EN-nor.-ISO.pdf>
- [37] ARBURG. *ALLROUNDER 470 E technical data* [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470A_TD_680078_en_GB.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	Zatěžující síla
F_{\max}	Maximální zatěžující síla
P_{\max}	Zatěžující síla
A_p	Hloubka vtisku
E	Youngův modul
E_{IT}	Vtiskový modul
E^*	Komplexní modul
E_r	Redukovaný modul
E_i	Modul vnikajícího tělesa
ν_i	Poissonův poměr vnikajícího tělesa
ν_s	Poissonův poměr zkoušeného tělesa
C_{IT}	Vtiskové tečení (creep)
H_{IT}	Vtisková tvrdost
H_{VIT}	Tvrdost dle Vickerse
W_e	Elastická deformační práce
W_p	Plastická deformační práce
W_t	Celková deformační práce
DSI	Instrumentovaná zkouška tvrdosti
ČSN	Označení českých norem
EN	Označení evropských technických norem
ISO	Zkratka mezinárodní organizace pro normalizaci
T_m	Teplota tání
T_g	Teplota skelného přechodu
P-v-T	Tlak, měrný objem, teplota
G	Elasticita

η	Viskozita
τ	Relaxační doba
ITT	Index toku taveniny
MFR	Melt Flow Rate
MVR	Melt Volume Rate
HM	Tvrdość dle Martense
Ra	Drsnost povrchu
Kg	Kilogram
MPa	Mega pascal
GPa	Giga pascal
N	Newton
mm	Milimetr
\bar{x}	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
x_i	I-tá hodnota měřené veličiny
n	Počet měření
Např.	Například
Tzv.	Tak zvaně
Atd.	A tak dále

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Základní rozdělení polymerů [3]	13
<i>Obr. 2</i> Polyetylen jako příklad polymerní struktury [2]	16
<i>Obr. 3</i> Rozdělení polymerů [2]	16
<i>Obr. 4</i> Struktura polymerních materiálů [2]	17
<i>Obr. 5</i> Charakteristické vlastnosti uvedených druhů polymerů [2]	18
<i>Obr. 6</i> Modely charakterizující viskoelastické chování [2]	21
<i>Obr. 7</i> Ukázka fontánového toku [2]	22
<i>Obr. 8</i> Rychlostní profil smykového toku mezi nepohyblivou a pohybující deskou [8]	22
<i>Obr. 9</i> Chování kapalin v nádobě při rotaci [8]	24
<i>Obr. 10</i> Narůstání za hubicí [2]	24
<i>Obr. 11</i> Ukázka principu přístroje pro měření indexu toku taveniny [2]	25
<i>Obr. 12</i> Ukázka principu vstřikování [20]	27
<i>Obr. 13</i> Časový diagram vstřikovacího cyklu [21]	28
<i>Obr. 14</i> Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování [12]	29
<i>Obr. 15</i> Vstřikovací cyklus v p - v - T diagramu [12]	31
<i>Obr. 16</i> Proces plnění pomocí laminárního a volného toku [12]	33
<i>Obr. 17</i> Znázorněný vliv doby přepnutí na tlaku uvnitř dutiny vstřikovací formy [12]	34
<i>Obr. 18</i> Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se vstřikovací rychlosti [12]	36
<i>Obr. 19</i> Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se vstřikovacího tlaku [12]	36
<i>Obr. 20</i> Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se velikosti dotlaku [12]	37
<i>Obr. 21</i> Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se doby dotlaku [12]	38
<i>Obr. 22</i> Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se teploty taveniny [12]	38
<i>Obr. 23</i> Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy za zvyšující se teploty formy [12]	39
<i>Obr. 24</i> Šnekový vstřikovací stroj [15]	40
<i>Obr. 25</i> Vstřikovací jednotka [14]	42
<i>Obr. 26</i> Uzavírací jednotka [13]	43
<i>Obr. 27</i> Dvoudesková vstřikovací forma [15]	44
<i>Obr. 28</i> Ukázka testovací formy spirála [22]	45
<i>Obr. 29</i> Schématické znázornění indentační křivky [28]	46
<i>Obr. 30</i> Časový diagram indentační zkoušky [28]	47
<i>Obr. 31</i> Ukázka nespojitých průběhů indentačních křivek [27]	48
<i>Obr. 32</i> Schématické znázornění chování materiálu [27]	48
<i>Obr. 33</i> Závislost zatížení na hloubce [26]	49
<i>Obr. 34</i> Znázornění povrchu vzorku při maximálním zatížení a odlehčení [26]	50

<i>Obr. 35 Schematicky znázorněné možné přípravy zkušebních vzorků.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 Ukázka zkušebního vzorku.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 37 Granulát – POM Formocon FM090</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 38 Sušárna THERMOLIFT 100-2 od firmy ARBURG</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 39 Vstřikovací stroj ALLROUNDER 470 E EDRIIVE</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 40 3D model zkušební vstřikovací formy.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41 Řez dutinou vstřikovací formy</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 42 Označení zkušebních desek s fotografií povrchu (zvětšeno 50x).....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 43 Přípravek pro měření délky toku u zkušebních těles</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 44 Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 45 Graf závislosti délky toku na povrchu zkušebních desek a vstřikovacím tlaku</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 46 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,1</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 47 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,45</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,8</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 49 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 1,6</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 50 Graf závislosti vtiskové tvrdosti H_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 5,01</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 51 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,1</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 52 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,45</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 53 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,8</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 54 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 1,6</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 55 Graf závislosti vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 5,01</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 56 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,1</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 57 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,45</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 58 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 0,8</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 59 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 1,6</i>	<i>76</i>

<i>Obr. 60 Graf závislosti vtiskového tečení (creep) C_{IT} na délce toku a vstřikovacím tlaku při drsnosti zkušební desky Ra 5,01</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 61 Graf srovnání vtiskové tvrdosti v závislosti délky toku a drsnosti povrchu vstřikovací formy při vstřikovacím tlaku 800 bar</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 62 Graf srovnání vtiskového modulu pružnosti v závislosti délky toku a drsnosti povrchu vstřikovací formy při vstřikovacím tlaku 800 bar</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 63 Graf srovnání vtiskového tečení (creep) v závislosti délky toku a drsnosti povrchu vstřikovací formy při vstřikovacím tlaku 800 bar</i>	<i>81</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Přehled významných vlastností u polymeru POM [5]</i>	19
<i>Tab. 2 Přehled základních tepelných vlastností u polymeru POM [5]</i>	19
<i>Tab. 3 Základní technické parametry vstřikovacího stroje</i>	55
<i>Tab. 4 Nastavené technologické parametry</i>	56
<i>Tab. 5 Nastavené topné pásy</i>	56
<i>Tab. 6 Průměrné hodnoty délky toku při různých vstřikovacích tlacích</i>	61
<i>Tab. 7 Odchytky hodnot délky toku při různých vstřikovacích tlacích</i>	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I CD obsahující:

- Diplomovou práci (.pdf)
- Naměřené hodnoty (.xlsx)
- Materiálový list POM FORMOCON FM090 [36]
- Technický list ARBURG ALLROUNDER 470 E [37]