

# **Vliv délky toku a procesních parametrů vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti polykarbonátu**

Bc. Jan Brhel

---

Diplomová práce  
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Jan Brhel  
Osobní číslo: T18310  
Studijní program: N3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní inženýrství  
Forma studia: Prezenční  
Téma práce: Vliv délky toku a procesních parametrů vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti Polykarbonátu

### Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles pro experiment.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Forma zpracování diplomové práce: Tisková/elektronická

Seznam doporučené literatury:

- PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2.  
PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu II, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.  
BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.  
REES, Herbert. Mold engineering. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, c2002. ISBN 3-446-21659-6.

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. února 2020

## 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, považují 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 drsností povrchu tvarové dutiny formy a technologických parametrů vstřikování na výsledné mikro-mechanické vlastnosti vstřikovaného vzorku a zatékavost vstřikovaného materiálu při daných procesních parametrech.

Teoretická část diplomové práce obsahuje poznatky k polymerním materiálům a reologickým vlastnostem, problematiku vstřikování a popis vstřikovací formy a v poslední části popis instrumentované zkoušky tvrdosti DSI.

V praktické části je zkoumáno, jaký vliv má vstřikovací tlak a drsnost povrchu zkušebních desek na zatékavost polymerního materiálu. Dále jsou vyhodnoceny mikro-mechanické vlastnosti v závislosti na drsnosti povrchu a délce toku polymerního materiálu pomocí Instrumentované zkoušky DSI.

Klíčová slova: Instrumentovaná zkouška, DSI, polymerní materiál, vstřikování, mikrotvrdość, zatékavost polymeru.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the surface roughness of the mold cavity and the technological parameters of injection on the resulting micro-mechanical properties of the injection sample and the flowability of the injection material at given process parameters.

The theoretical part of the thesis contains knowledge of polymeric materials and rheological properties, the problematics of injection molding and a description of the injection mold and in the last part a description of the instrumented hardness test DSI.

The practical part examines the influence of injection pressure and surface roughness of the test plates on the flowability of polymeric material. Further, the micro-mechanical properties are evaluated in dependence on surface roughness and flow length of polymeric material using the DSI Instrumented Test.

Keywords: Instrumented Test, DSI, polymeric materials, injection molding, microhardness, polymer, polymer fluidity

## Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné rady a čas, který mi věnoval po dobu vypracování diplomové práce i v této nelehké době.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYMERY</b> .....	<b>11</b>
1.1 PLASTY .....	11
1.1.1 Termoplasty.....	11
1.1.2 Amorfnní plasty .....	12
1.2 POLYKARBONÁT.....	12
1.3 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	13
1.3.1 Viskozita taveniny.....	14
1.3.2 Tok taveniny.....	15
1.3.3 Spirálová zkouška zabíhavosti .....	16
<b>2 VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>17</b>
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS .....	17
2.1.1 Vstřikovací rychlost .....	18
2.1.2 Teplota formy.....	18
2.1.3 Doba chlazení.....	19
2.1.4 Dotlak.....	19
2.2 PRŮBĚH TLAKU (DOTLAKU) BĚHEM VSTŘIKOVÁNÍ .....	20
2.3 VLIV TEPLoty .....	21
2.4 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	22
2.4.1 Vstřikovací jednotka .....	23
2.4.2 Uzavírací jednotka .....	24
<b>3 VSTŘIKOVACÍ FORMA</b> .....	<b>26</b>
3.1 VTOKOVÝ SYSTÉM .....	27
3.1.1 Vtoková vložka .....	27
3.1.2 Rozvodné kanálky .....	28
3.1.3 Vtokové ústí .....	28
3.2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	28
3.3 VYHAZOvacÍ SYSTÉM.....	29
3.4 VÝROBA VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	29
3.4.1 Jakost povrchu forem .....	30
3.5 MATERIÁLY FOREM.....	31
<b>4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI - DSI</b> .....	<b>33</b>
4.1 PRINCIP METODY .....	33
4.2 INDENTAČNÍ KŘIVKA .....	34
4.3 METODA DOERNERA A NIXE .....	36

4.4	METODA OLIVERA A PHARR .....	37
4.5	URČENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY DSI .....	37
4.5.1	Tvrdość .....	38
4.5.2	Vtiskové tečení (creep) .....	38
4.5.3	Vtisková relaxace .....	39
4.5.4	Modul pružnosti .....	40
4.5.5	Deformační práce .....	41
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....</b>	<b>44</b>
6.1	PODMÍNKY PŘI EXPERIMENTU .....	44
6.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	44
6.3	VSTŘIKOVANÝ MATERIÁL .....	45
6.4	VSTŘIKOVÁNÍ VZORKŮ.....	45
6.4.1	Technologické parametry při vstřikování .....	46
6.4.2	Sušení materiálu .....	46
6.5	VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	47
6.5.1	Zkušební deska.....	47
6.5.2	Tvarová dutina .....	48
6.6	MĚŘENÍ DÉLKY ZATEČENÍ MATERIÁLU.....	49
6.7	MĚŘENÍ INSTRUMENTOVANOU ZKOUŠKOU TVRDOSTI DSI .....	50
6.7.1	Postup měření.....	51
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>53</b>
7.1	VTISKOVÁ TVRDOST $H_{IT}$ .....	53
7.2	VTISKOVÝ MODUL PRUŽNOSTI $E_{IT}$ .....	57
7.3	VTISKOVÉ TEČENÍ – CREEP $C_{IT}$ .....	60
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>65</b>
8.1	VTISKOVÁ TVRDOST $H_{IT}$ .....	65
8.2	VTISKOVÝ MODUL PRUŽNOSTI $E_{IT}$ .....	66
8.3	VTISKOVÉ TEČENÍ $C_{IT}$ .....	67
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>80</b>



## ÚVOD

V dnešní moderní době, kdy většina běžně používaných materiálů, jako je kov, dřevo či další organické materiály jsou nahrazovány levnější alternativou, jako jsou polymerní materiály. Z tohoto důvodu nacházejí polymerní materiály čím dál tím větší uplatnění. Polymerní materiály jsou uplatňovány v mnoha odvětví průmyslu. Hlavním důvodem, proč jsou polymerní materiály používány ve větší míře, je zejména jejich cena, vlastnosti, zpracovatelnost či chemická odolnost. S rostoucími požadavky a použitím polymerních materiálů, rostou i požadavky na jejich výzkum a vývoj zpracování.

Hlavním prvkem, který je velmi důležitý při zpracování polymerních materiálů, je především výrobní proces. Mezi nejčastěji používané technologie, kterými lze zpracovávat polymerní materiály patří vstřikování. Pomocí této technologie lze zpracovávat termoplasty, reaktoplasty i elastomery. Důvodů, proč je vstřikování tak používané je mnoho. Mezi ty hlavní patří především vysoká produktivita výroby možnost automatizovaného procesu, lze vyrábět složité díly při vysoké reprodukovatelnosti, ale taky díky své univerzálnosti, kdy lze vstřikovat více druhů polymerních materiálů. Nevýhodou vstřikování jsou však vysoké pořizovací náklady na vstřikovací stroj či vstřikovací formu. Z tohoto důvodu je spousta věcí, které patří ke konstrukčním prvkům vstřikovací formy normalizována. Optimalizovat výrobní proces je tedy velmi potřebné a důležité, jelikož při vysoké produktivitě, každá sekunda, která se ušetří, vede k ušetření i nákladů.

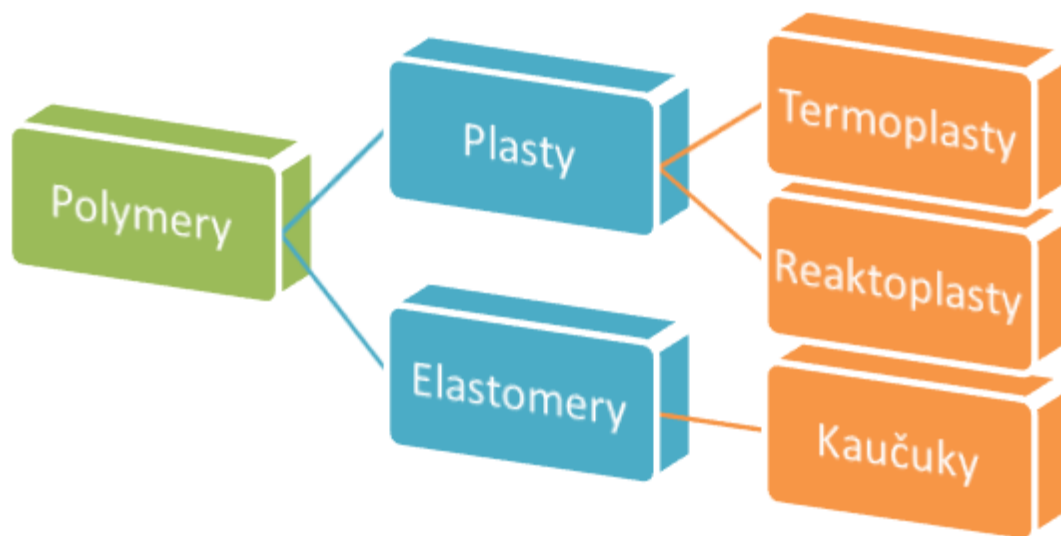
Optimalizací vstřikovacího procesu znamená nastavení procesních parametrů vstřikování, jako jsou např. tlak, dotlak či doba chlazení. Nejen, že tyto parametry se podílí na celkovém času vstřikování, ale také na výsledných mechanických vlastnostech. Hlavní parametry, které jsou pro proces vstřikování důležité, mohou být např. jakost povrchu, tvrdost, pružnost apod. Proto během vstřikovacího procesu musí být bráno v úvahu molekulární struktura a reologické vlastnosti daného materiálu.

Správnou kombinací a nastavení technologických parametrů pro daný materiál má vliv na jakost povrchu a mechanické vlastnosti. Z toho důvodu jsou dané experimenty pro praxi vyhledávané, aby došlo k vyrobení co nejkvalitnějšího dílu za co možná nejnižší náklady.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERY

Polymerní materiály mohou být přírodního či syntetického původu. Jedná se o makromolekulární látky, které jsou složeny z molekul jednoho či více druhů atomů, a to zejména vodíku, uhlíku, chlóru, ale často také obsahují prvky kyslíku nebo dusíku. Za běžných teplot se polymery nachází v tuhém stavu, ovšem za zvýšených teplot svůj stav mění na kapalný. Polymerní materiály jsou rozděleny do dvou základních skupin. [1] [2]



Obr. 1 Rozdělení polymerů

### 1.1 Plasty

První skupinou polymerů jsou plasty. Za běžných teplot jsou tvrdé, často i křehké. Pokud dojde ke zvýšení teploty, stávají se plastickými a lze je tvarovat. Plasty lze rozdělit do dvou skupin, a to na termoplasty a reaktoplasty. [1]

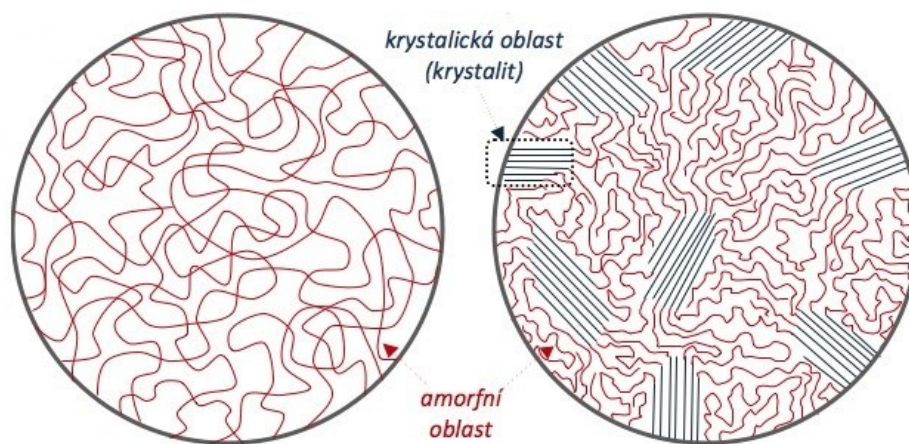
#### 1.1.1 Termoplasty

Jedná se o materiály, které jsou složeny z jednotlivých makromolekul. Makromolekuly jsou k sobě vázány pouze fyzikálními vazbami, což znamená, že jsou k sobě poutány mezimolekulárními silami. Při zvýšené teplotě měknou a přecházejí do stavu taveniny a po ochlazení opět tuhnou. Během procesu vstřikování dochází k uvolnění makromolekul, které se volně pohybují a mění svou pozici. Při ochlazení molekuly tuhnou na svých nových pozicích. Jelikož při tomto procesu dochází pouze k fyzikálním změnám, lze termoplasty

zpracovávat opakovaně. Značnou nevýhodou těchto materiálů je jejich nízká chemická odolnost. Lze je rozdělit do dvou skupin na amorfnní a semikrystalické. [11] [15]

### 1.1.2 Amorfnní plasty

Amorfnní termoplasty jsou skupinou materiálů, jejichž molekulární struktura je zcela nepravidelná, čímž se liší od semikrystalických materiálů, kde je část uspořádaná a část neuspořádaná. Jelikož neobsahují žádné části krystalů, které by zabraňovali průchodu světla, jsou zpravidla transparentní. Mezi charakteristické vlastnosti amorfnních materiálu patří především jejich tvrdost, houževnatost, vysoká pevnost a vysoký modul pružnosti. [5] [6]

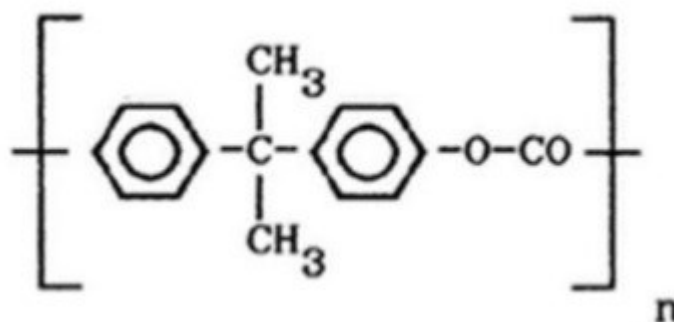


Obr. 2 Amorfnní a semikrystalické uspořádnání [5]

## 1.2 Polykarbonát

Polykarbonát patří do skupiny amorfnních termoplastů. Díky svým velmi dobrým vlastnostem se řadí do inženýrských plastů. Polykarbonát má velmi dobrou rázovou houževnatost, která je srovnatelná např. se slitinou zinku a hliníku. Mezi další vlastnosti, které jsou pro polykarbonát charakteristické je výborná pevnost, tuhost, rozměrová stálost, odolnost vůči tečení (creep), dobré dielektrické vlastnosti, odolnost vůči UV záření či oxidaci a v poslední řadě dobrá odolnost proti vysokým teplotám. Jelikož se jedná o amorfnní termoplast, je zcela transparentní a má dobré optické vlastnosti. Značnou nevýhodou polykarbonátu je nízká odolnost vůči rozpouštědlům.

Polykarbonát se hojně využívá na výrobku ochranných pomůcek, výrobě světlometů, světlovodivých a dalších optických dílů, stavebnictví apod. [8] [9] [15]



Obr. 3 Chemický vzorec polykarbonátu [15]

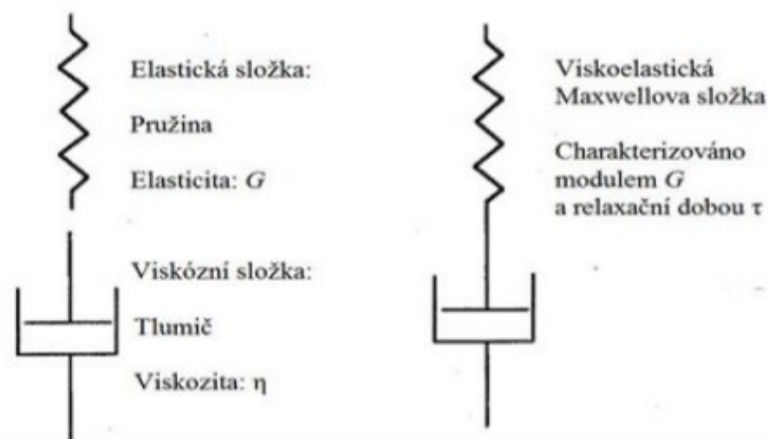
Často díky svým mechanickým vlastnostem je přidáván k ostatním polymerům, kde polykarbonát zvýší pevnost a tuhost směsi. Nejčastěji se setkáme se směsí PC a ABS. Tyto směsi se nejčastěji využívají pro tenkostěnné výrobky.

Mezi nejčastější metody zpracování polykarbonátu patří běžné plastikářské technologie, jako jsou vstřikování, vytlačování, vyfukování. Polykarbonát lze i lepit či svařovat, ale i obrábět pomocí konvenčních metod. [9] [15]

### 1.3 Reologické vlastnosti polymerů

Jedná se o vědní obor, který se zabývá tokem a deformací látek. Znalost reologických vlastností, a to, jak se tavenina chová během jejího tečení je nesmírně důležité pro zvolení vhodného materiálu. Také při volbě strojních součástí jako jsou např. vstřikovací trysky, formy. Polymerní tavenina se chová jako viskoelastická látka, což znamená, že z části se chová jako viskózně (kapalina), ale i elasticky (tuhá látka). Nicméně reologie se nezaměřuje pouze na tok kapalin, ale i na deformaci tuhých látek. Je zjištěno, že za určitých podmínek (zejména čas) mohou i tuhé látky téct.

Pro zjištění a popis viskoelastických vlastností byl vyvinut tzv. Maxwellův model. Jedná se o mechanický model, který popisuje určité viskoelastické vlastnosti polymeru. Tento model je sestaven ze sériového zapojení pružiny a pístu. V drtivém případě polymerních tavenin však převládají viskózní vlastnosti. [7] [11] [22]



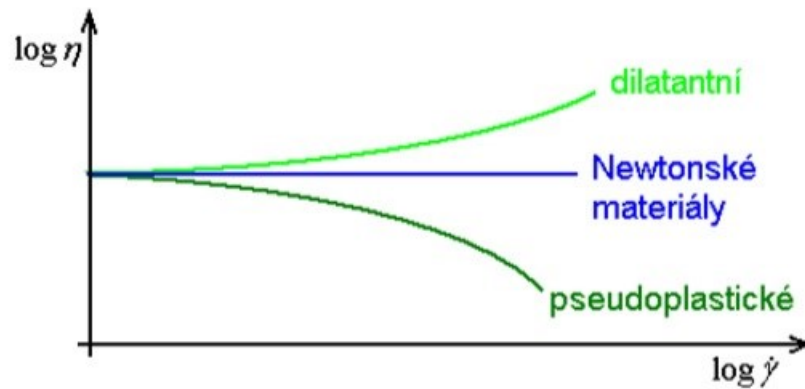
Obr. 4 Maxwellův model [40]

Daný model lze vidět na obr. 4, kdy je dána pružina, která představuje elastickou reakci na vloženou deformaci a je označena jako  $G$ . Tlumič poté znázorňuje viskózní reakci, která je popsána jako viskozita  $\eta$ . Celý model je tvořen sériovým zapojením tlumiče a pružiny a je charakterizován relaxační dobou  $\tau$ . [7] [11] [22]

### 1.3.1 Viskozita taveniny

Viskozita polymerů je definována jako odpor vůči toku polymeru. Lze jí stanovit jako smykové napětí vůči smykové rychlosti. Viskozita se mění s působením teploty, času či působením deformace. Čím menší viskozita je, tím menší je odpor vůči toku. Pokud nedojde ke změně viskozity za působení smykové rychlosti, nazývá se taková látka jako Newtonská. Toková křivka představuje závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace. Existují tři druhy stavů, ve kterých se mohou látky nacházet. [7] [11]

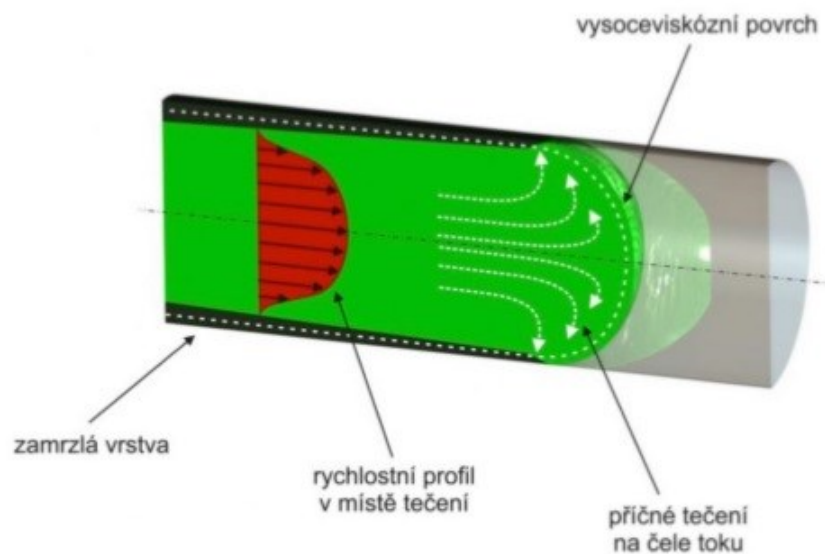
- dilatantní – s růstem smykové deformace roste i viskozita (vysoce plněné materiály),
- newtonské – viskozita zůstává konstantní v celém průběhu (voda),
- pseudoplastické – s rychlostí smykové deformace klesá (většina plastů). [7] [11]



Obr. 5 Toková křivka látek [11]

### 1.3.2 Tok taveniny

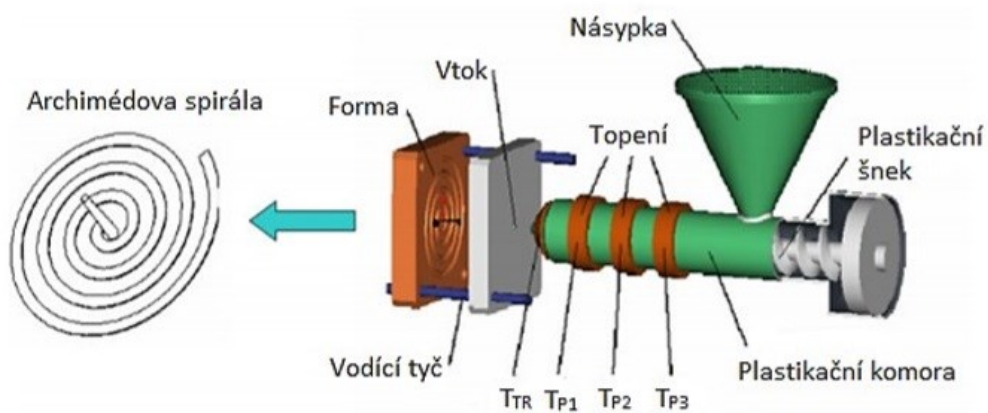
Pro získání dobrých vlastností výstřiku a kvalitního povrchu je zapotřebí, aby tavenina do formy vtékala postupně nikoli však volným paprskem. Postupné vtékání taveniny do formy je nazýváno jako laminární proudění. Během tohoto proudění vzniká tzv. plastické jádro. Plastické jádro umožňuje stlačit taveninu ve vstřikovací formě a následný dotlak. Ve většině případů vstřikovaných výrobků se volí konstantní vstřikovací rychlost. V průběhu, kdy je dutina formy zaplňována, nedochází ke skluzu taveniny po stěně, ale dochází k tzv. valení taveniny. Tavenina protéká středem kanálku, jakmile dosáhne čela taveniny je natlačena kolmo na stěnu kanálku, kde vzniká zamrzlá vrstva. Tomuto laminárnímu toku taveniny říkáme fontánový tok. [7] [11]



Obr. 6 Fontánový tok [11]

### 1.3.3 Spirálová zkouška zabíhavosti

Zkouška zabíhavosti polymeru probíhá za předem definovaných technologických podmínek. Principem je vstříknutí taveniny za pomoci vstřikovacího stroje do dutiny formy, která má tvar Archimédovy spirály. Spirála má definovaný průřez o výšce 2 nebo 4 mm, šířce 10 mm a teoreticky nekonečné délce. Během zkoušky volíme takové technologické podmínky, které budou zvoleny i během vstřikovacího procesu. Tato zkouška nám dává náhled na zabíhavost polymeru při definovaných parametrech a také vliv technologických podmínek (teplota, tlak) či vliv příměsí aditiv na změnu zabíhavosti polymerní taveniny. [7]



Obr. 7 Zkouška zabíhavosti [7]



## 2 VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování patří mezi nejrozšířenější a nejvýznamnější způsob zpracování polymerních materiálů. Tato technologie se v dnešní době uplatňuje v mnoha průmyslových odvětvích, jako je např. automobilový, letecký, zdravotnický, kosmický či sportovní průmysl. Vstřikování se vyznačuje značně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí vstřikovaný polymer vstřikovací stroj a forma. Mezi nejčastěji vstřikované materiály patří termoplasty, ale lze vstřikovat i některé reaktoplasty nebo kaučukové směsi. Principem této technologie je doprava a přeměna polymeru z tuhého stavu na taveninu pomocí šneku a následného vstříknutí do formy, kde dojde k jeho ochlazení a vyhození. [1] [12]

Výhody vstřikování:

- automatizovaný proces,
- vysoká reprodukovatelnost,
- nízké náklady na jeden kus během sériové výroby,
- lze vyrobit složité výrobky.

Nevýhody vstřikování:

- neekonomické při kusové výrobě,
- velké pořizovací náklady vstřikovacího stroje,
- cena a čas při konstrukci vstřikovací formy. [4]

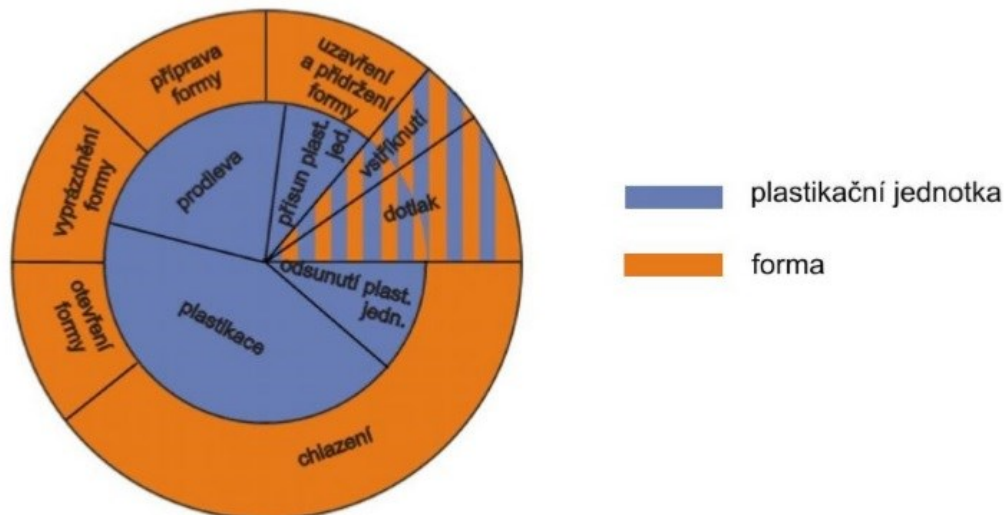
### 2.1 Vstřikovací cyklus

Princip vstřikovacího cyklu je založen na dopravě polymeru a jeho následného vstříknutí do vstřikovací formy, kde dojde k jeho ochlazení a vyhození z formy ven. Poté, co skončí poslední fáze, celý cyklus se opět opakuje.

Vstřikovací cyklus je rozdělen do dvou částí. Jednou částí je plastikační jednotka vstřikovacího stroje a druhou je pak vstřikovací forma.

Na začátku cyklu dojde k uzavření vstřikovací formy. Následuje plastikace polymerního materiálu ve vstřikovací jednotce. Vstřikovací jednotka poté přijíždí k formě a dosedá na vstřikovací trysku formy a vstříkne taveniny do dutiny formy. Jakmile je dutina formy naplněná, dochází k postupnému tuhnutí. Během tuhnutí dochází k rozměrovým změnám

výrobku (smrštění výrobku). K docílení správných rozměrů a funkčního výrobku je zapotřebí doplnit dutinu formy o další materiál, což se děje v části dotlaku. Ten zajistí další dopravu taveniny a tím pádem i správný objem výrobku. Následně dojde k zatuhnutí výrobku, odsunutí vstříkovací jednotky, a jakmile je výrobek dostatečně ochlazen, dochází k otevření vstříkovací formy a k vyhození výrobku. V plastikační jednotce dochází k plastikaci dalšího materiálu a celý proces se znovu opakuje. [11] [14] [15]



Obr. 8 Vstříkovací cyklus [11]

### 2.1.1 Vstříkovací rychlost

Se vzrůstající teplotou dochází ke změně viskozity taveniny. Jakmile dojde ke vstříknutí polymeru do dutiny formy, okamžitě chladne a jeho teplota klesá a tím se mění i jeho viskozita. Z toho důvodu musí mít čelo taveniny vyšší teplotu, aby jeho viskozita byla nižší a nedošlo tak k zatuhnutí toku taveniny. Z těchto důvodů musí být vstříkovací rychlost co nejrychlejší. [1] [17]

### 2.1.2 Teplota formy

Stejně tak jako za určitých teplot dojde k přeměně polymeru na taveniny, tak dochází i k tuhnutí za určitých teplot. U semikrystalických polymerů dochází k přeměně na taveninu za teploty  $T_m$  (teploty tání). Při teplotách nižších než teplota  $T_m$  dochází opět k tuhnutí a formování krystalů. Pokud je tavenina vstříknuta do příliš chladné formy, nedojde ke správnému zformování a vytvoření krystalů, což ovlivňuje vlastnosti výstřiku. Z těchto důvodů musí být zvolena optimální teplota vstříkovací formy, která je obvykle dána výrobcem materiálu. Amorfni materiály mají jiných rozsah teplot, a tak lze volit nižší teploty formy. [1] [16]

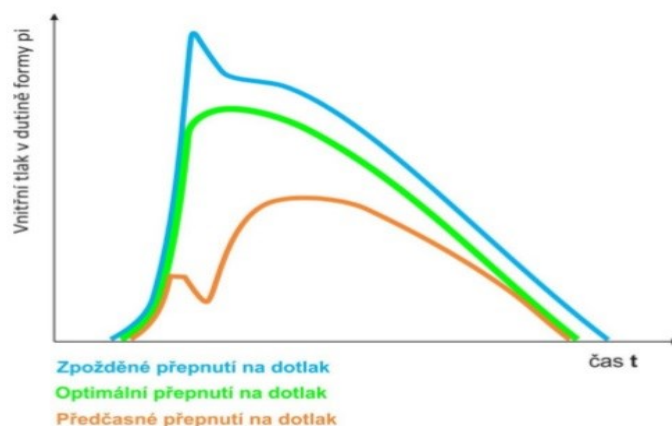
### 2.1.3 Doba chlazení

Jedná se o nejdelší čas z celkového vstřikovacího cyklu. Podle výstřiku se jedná od několika málo sekund až po pár minut u složitějších výrobků. Doba je dána zejména tloušťkou stěn, druhu plastu, teploty formy či taveniny. Z ekonomického hlediska je potřebné, aby čas chlazení byl co nejkratší. Chlazení ovlivňuje řadu parametrů, mezi které patří např. změna struktury, krystalizaci, vnitřní pnutí, a především leskl výrobku.

Při dosažení určitého stupně krystality u semikrystalických polymerů, získá výstřik potřebné pevnostní vlastnosti. Z tohoto důvodu stačí jen krátké ochlazení, aby došlo k vyhození výrobku. Z daných důvodů jsou kratší časy chlazení u semikrystalických materiálů než u amorfních. [1] [16]

### 2.1.4 Dotlak

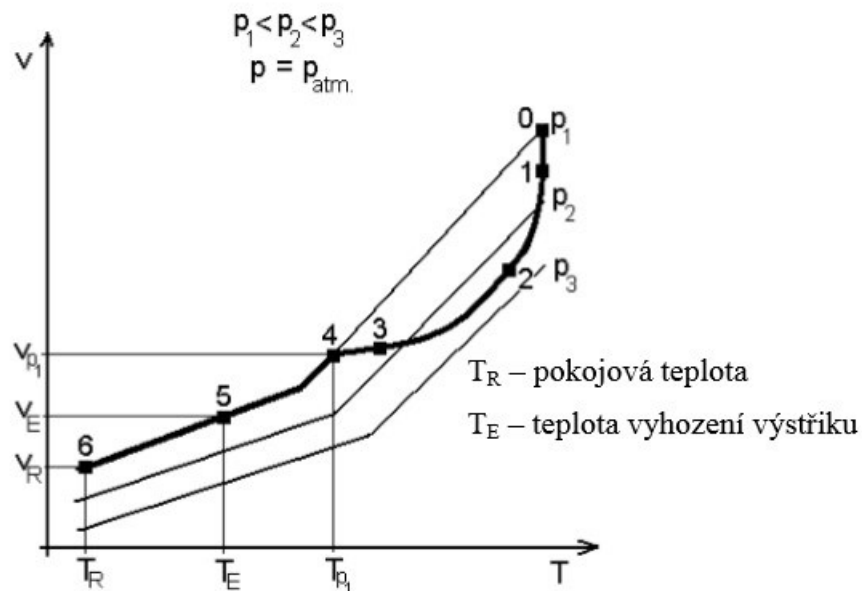
Jakmile dojde k první fázi vstříknutí polymeru do dutiny formy, následuje fáze dotlaku, která má za úkol doplnit dutinu formy, aby nedošlo k rozměrové nestálosti. K přepnutí procesu na dotlak musí být správně načasované, v situaci kdy, by došlo k přepnutí příliš brzy, výrobek by byl nedostříknut a neseděly by rozměry výrobku. Kdyby došlo k přepnutí příliš pozdě, mohlo by dojít k vzniku tzv. tlakové špičky a výrobek by mohl mít příliš velkou hmotnost, než byla požadována nebo by mohlo dojít k velkému namáhání vstřikovací formy. Ke správnému přepnutí slouží řada způsobů, mezi nejčastější patří: podle dráhy šneku, tlaku ve formě, tlaku v hydraulice či podle vstřikovacího tlaku. Celková doba dotlaku se pohybuje v řádech pár sekund. [1] [14] [17]



Obr. 9 Průběhy přepnutí na dotlak [14]

## 2.2 Průběh tlaku (dotlaku) během vstřikování

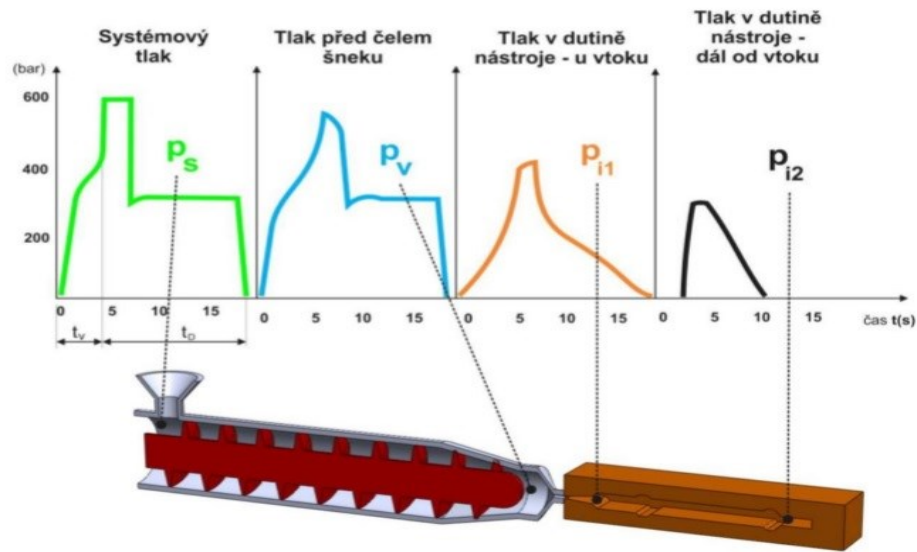
Velmi důležitou částí vstřikovacího cyklu je dotlak, ten má vliv na mnoho vlastností budoucího výrobku. Je důležité znát termodynamické charakteristiky polymeru, a to zejména měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, závislost objemu na teplotě při různých tlacích. Diagram  $p$ - $v$ - $T$  (tlak - měrný objem - teplota) ukazuje vzájemnou závislost tří hlavních stavových veličin u daného typu polymeru. Tento diagram se používá u moderních vstřikovacích strojů k řízení procesu a k definování průběhu dotlaku v závislosti na požadovanou přesnost vstřikovaného výrobku. V jednotlivých částech vstřikovací jednotky či dutiny formy se tlaky během vstřikování liší. [7] [11]



Obr. 10 Diagram  $p$ . $v$ . $T$  [11]

Fáze diagram  $p$ . $v$ . $T$

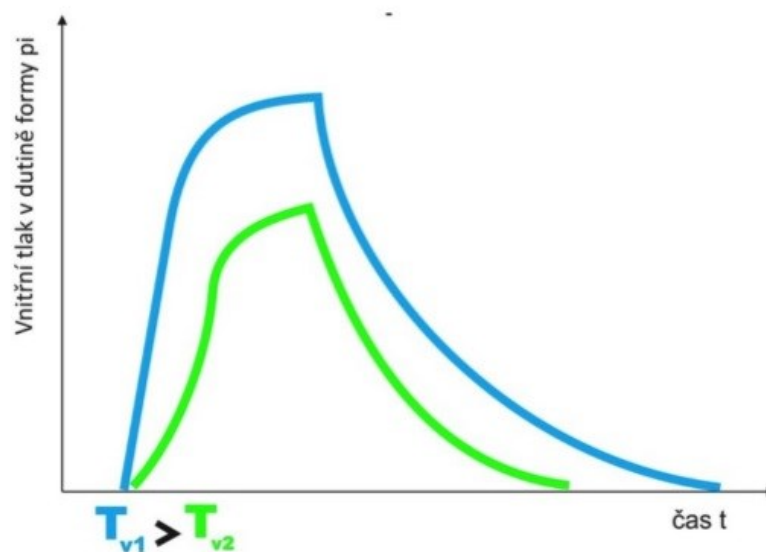
- 0 – 1 – objemové plnění,
- 1 – 2 – stlačování taveniny,
- 2 – 3 – izobarický dotlak,
- 3 – 4 – izochorický dotlak,
- 4 – 5 – ochlazování na vyhazovací teplotu,
- 5 – 6 – ochlazování na pokojovou teplotu. [7] [11]



Obr. 11 Tlaky při vstřikování [14]

### 2.3 Vliv teploty

Teplota taveniny značně ovlivňuje tekutost plastu a také dobu vstřikovacího cyklu. Pokud je teplota taveniny vyšší, poté dochází i k většímu nárůstu tekutosti a tím i prodloužení vstřikovacího cyklu. Pokud dojde k zachování vstřikované rychlosti, mohlo by dojít k nárůstu tlaku uvnitř dutiny vstřikovací formy. Uvedený problém může mít za následek přetoky či zástřiky. Dalším problémem by mohl být vznik spálené hmoty nebo teplotní degradace materiálu. Při volbě nižší teploty taveniny by mohlo dojít ke vzniku studených spojů. [14]



Obr. 12 Vliv teploty taveniny na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje [17]

## 2.4 Vstřikovací stroj

V dnešní době jsou kladeny vysoké podmínky, a to zejména na produktivitu práce a jakost povrchu, čehož lze docílit pomocí moderních vstřikovacích strojů. Existují různé konstrukce strojů, které se od sebe liší provedením, stupněm řízení, reprodukovatelností jednotlivých parametrů, snadnou obsluhou a dobou vstřikovacího cyklu. Značnou nevýhodou jsou však vysoké pořizovací náklady nejen strojů, ale i vstřikovacích forem.

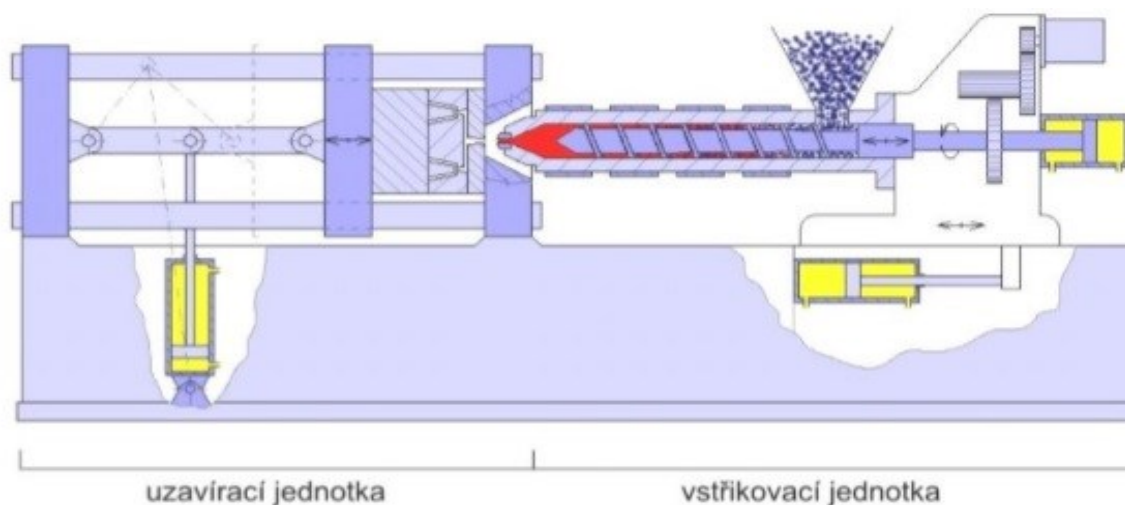
Prvním kritériem vstřikovacího stroje je kvalitní plastikační jednotka. V plastikační jednotce by mělo dojít k co nejdokonalejší plastikaci materiálu, pokud možno při velkém tavném výkonu a malém teplotním spádu. Vstřikovací síla by měla být regulovatelná v širokém rozsahu. Druhým kritériem je vysoká uzavírací síla, která působí na vstřikovací formu a umožňuje tak vstřikovat výrobky, které mají velkou plochu (velký objem). [1] [4] [11]

Aby byla zaručena kvalita a přesnost výstřiku, vyžaduje se od stroje:

- tuhost a pevnost během procesu,
- dosažení konstantního tlaku, správné rychlosti a teploty a jejich správné načasování,
- přesné opakování technologických parametrů.

Konstrukci vstřikovacího stroje lze rozdělit do následujících částí:

- vstřikovací jednotka,
- uzavírací jednotka,
- ovládání a řízení stroje. [4]



Obr. 13 Vstřikovací stroj [11]

### 2.4.1 Vstříkovací jednotka

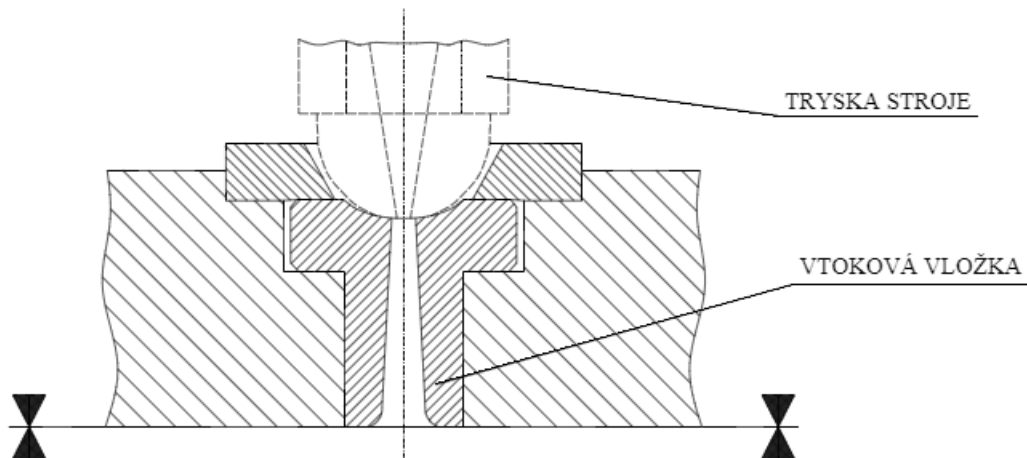
Mezi nejrozšířenější typy jsou šnekové vstříkovací jednotky, které nahrazují pístové.

Výhody šnekových jednotek:

- dobrá plastikace a homogenizace,
- vysoký plastikační výkon,
- přesné dávkování.

Hlavním úkolem vstříkovací jednotky je převést materiál z tuhého stavu do stavu taveniny a následně jej dopravit do dutiny formy, aby byly zajištěny maximální tvarové a rozměrové přesnosti.

Celý proces spočívá v tom, že z násypky je dopravován materiál k tavnému válci, kde pomocí topných těles a procesu disipace dochází k jeho tavení. Pomocí šneku nebo pístu je pak dopravován přes vstupní, přechodové, výstupní pásmo a dochází k jeho plastikaci a homogenizaci. Tavicí komora je zakončena tryskou, která má za úkol spojovat vstříkovací jednotku s vstříkovací formou. [4] [11] [17]

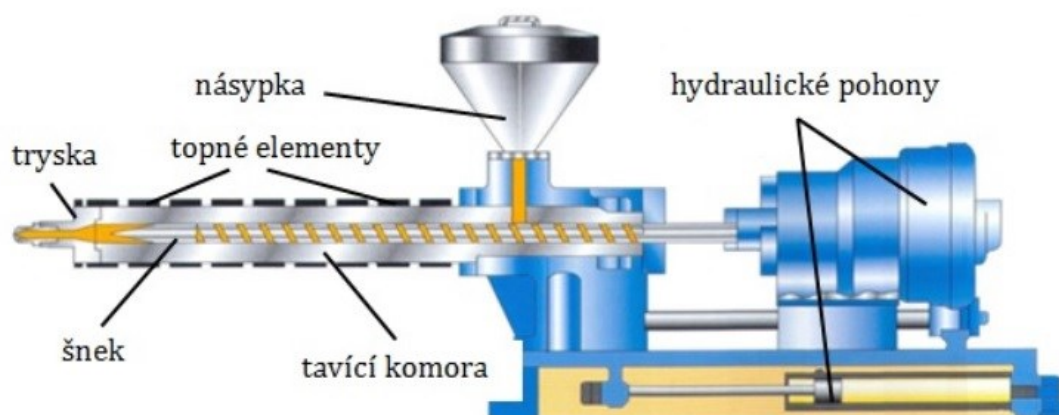


Obr. 14 Vstříkovací tryska [4]

Vstříkovací jednotky jsou charakterizovány zejména pomocí dvou parametrů:

- Vstříkovací kapacita: jedná se o maximální objem taveniny, který lze vstříknout z tavicí komory do volného prostoru (dutiny formy) během jednoho pracovního zdvihu šneku. Nejčastěji se udává v  $\text{cm}^3$ . Maximální množství, které je vstříkováno by nemělo překročit 90 % celkové kapacity vstříkovací jednotky, z důvodu následného dotlaku. Proto se jako optimální množství udává 80 % celkové kapacity vstříkovací jednotky. [4][19]

- **Plastikační kapacita:** informuje o maximálním množství taveniny, kterou lze na stroji převést do plastického stavu za jednotku času. Nejčastěji se setkáme s kilogramem za hodinu (kg/h). Plastikační kapacita je ovlivněna řadou faktorů, a to zejména otáčkami šneku, typem polymeru, teplotou a proto slouží tato hodnota spíše jako orientační. [4] [19]

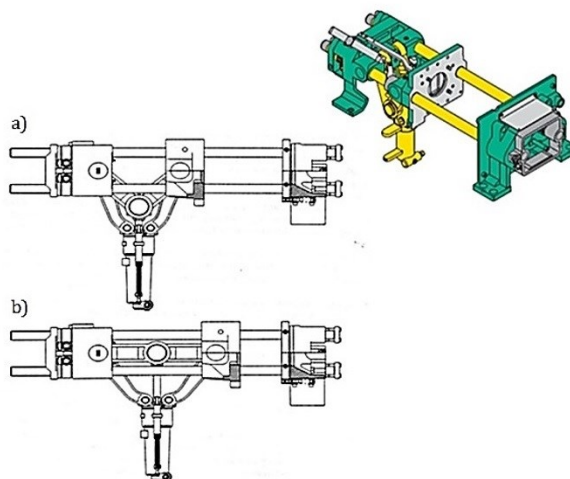


Obr. 15 Vstřikovací jednotka [19]

#### 2.4.2 Uzavírací jednotka

Hlavním úkolem uzavírací jednotky je správné otevření a uzavření formy během vstřikovacího procesu v některých případech i její vyprázdnění. Uzavírací jednotky se od sebe liší zejména typem uzavíracího mechanismu, který může mít několik podob.

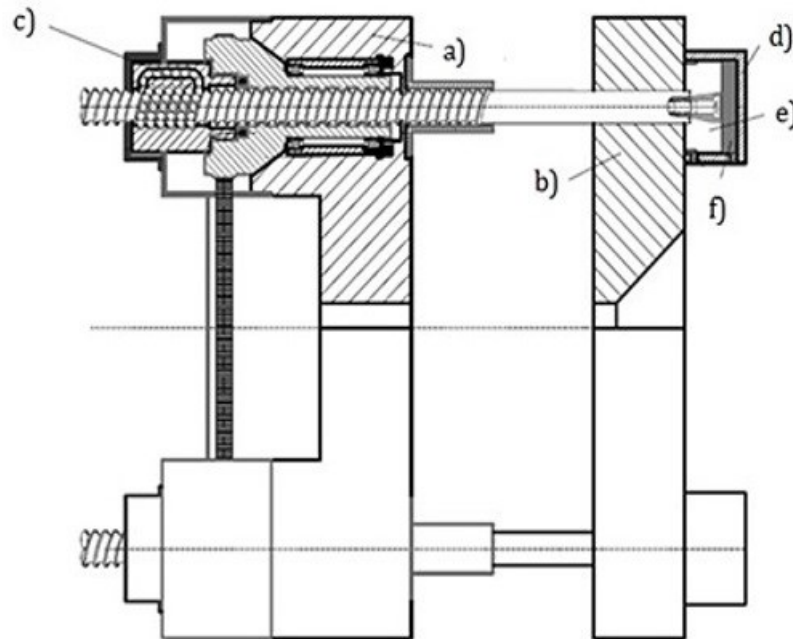
Prvním typem jsou hydraulické uzavírací jednotky. Hydraulické jednotky jsou poháněny hydraulickým pístem, který vyvolává potřebnou uzavírací sílu. Značnou výhodou hydraulických jednotek je nastavení libovolné hloubky otevření nástroje. [4] [19]



Obr. 16 Hydraulická jednotka, (a) otevřený, (b) uzavřený [19]



Druhým typem uzavíracích jednotek je kombinace hydraulicko-mechanické. Tento typ jednotek se používá zejména u menších či středně velkých strojů. Výhodou je vyšší uzavírací rychlost s dostatečnou tuhostí. Hydraulicko-mechanická jednotka se skládá z kloubových mechanismů s hydraulickým válcem. [19]



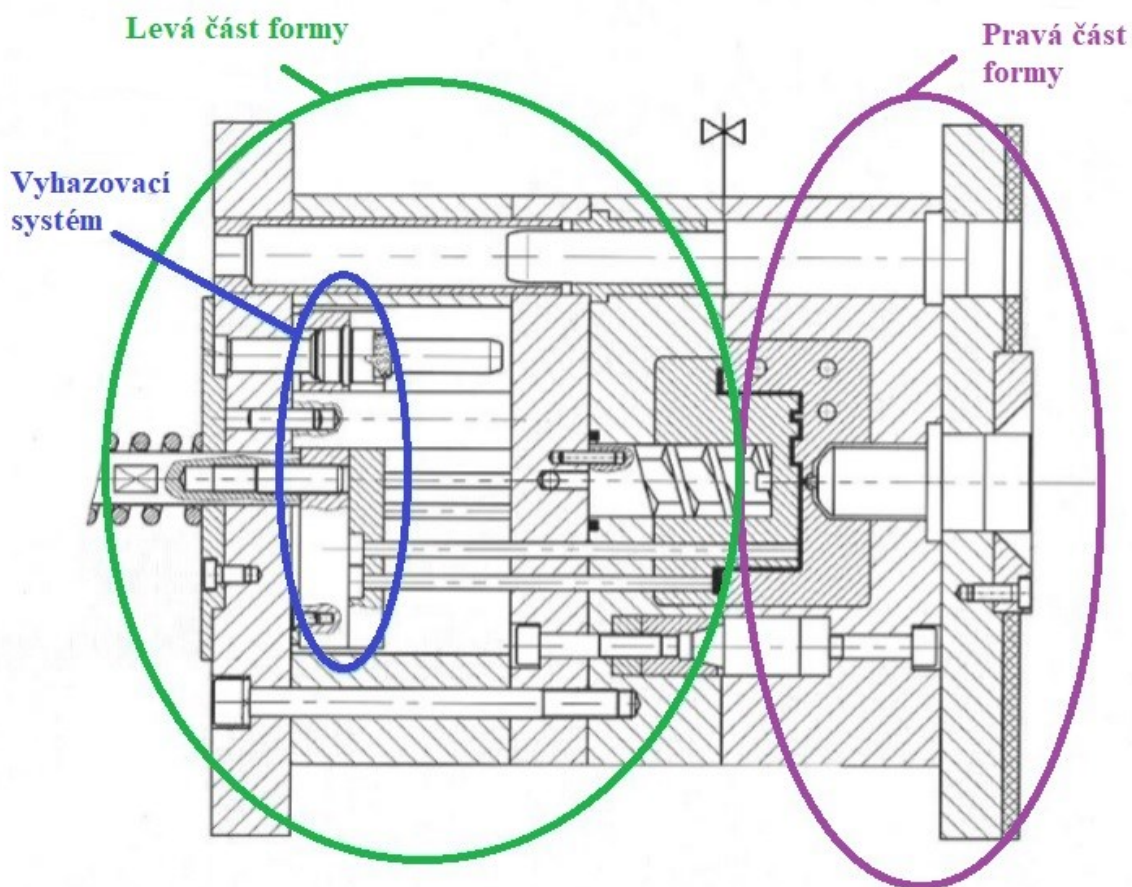
Obr. 17 Hydraulicko-mechanická jednotka,

(a) Pohyblivá část, (b) Pevná část, (c) Kuličkový šroub, (d) Hydraulický pohon, (e) Píst, (f) Hydraulická kapalina [19]

### 3 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je nástroj, který je vložen do vstřikovacího stroje a udává tvar budoucímu výrobku. Celková konstrukce vstřikovací formy je poměrně složitá a pracná. V dnešní době jsou na formu kladeny poměrně vysoké nároky, a to z hlediska spolehlivosti, produktivity a automatizace. Z konstrukčního hlediska bývá vstřikovací forma složena ze dvou částí, a to z pravé a levé. Řada prvků vstřikovací formy jsou normalizované. Většina těchto normálí jsou vodící sloupky, vodící pouzdra, různé šrouby či vyhazovače. Mezi nejznámější dodavatele těchto normálí jsou firmy HASCO, DME či MEUSBURGER.

Ve většině případů se vstřikovací forma skládá ze tří základních částí. Jednou z prvních částí je pevná část formy, kde se nachází vtokový systém, tato část se nachází na pravé straně vstřikovací formy. Druhou částí vstřikovací formy je levá část, která je pohyblivá. Levá strana umožňuje otevření a uzavření formy a nachází se v ní vyhazovací systém. Třetí částí vstřikovací formy je vyhazovací část, která slouží k vyhození výrobku a nachází se na levé straně vstřikovací formy. [11] [22]



Obr. 18 Řez vstřikovací formou [11]

Vstřikovací formy lze rozdělit podle určitých kritérií:

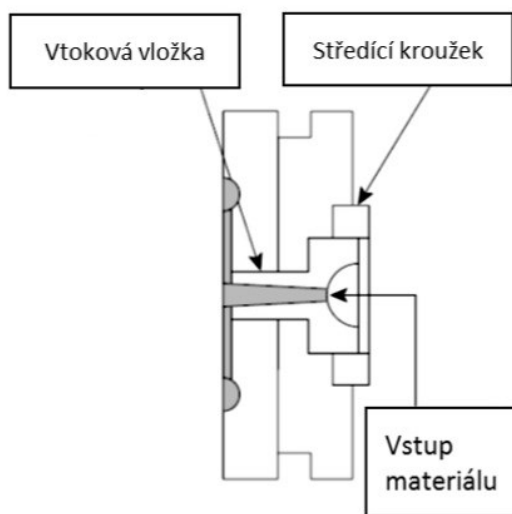
- podle násobnosti výrobku: jednonásobné, dvounásobné či vícenásobné,
- podle toho jakým způsobem je zaformování a konstrukční řešení: dvoudeskové, třídeskové, čelist'ové, vytáčekcí, etážové,
- podle způsobu vyhození výrobku: s mechanickým vyhazováním, pneumatickým vyhazováním, se stírací deskou či kombinace jednotlivých systémů,
- podle způsobu vtokového systému: studený vtokový systém (SVS), vyhřívaný vtokový systém (VVS). [4] [17]

### 3.1 Vtokový systém

Hlavním úkolem vtokového systému je rozvod taveniny od vstřikovacího stroje do dutiny formy. Existují dva hlavní typy vtokových systémů, a to studený vtokový systém a vyhřívaný vtokový systém, každý z nich má své plusy i minusy. Ve vstřikovacích formách lze použít jeden druhý či druhý, ale i kombinací těchto systémů. Každý vtokový systém je složen z vtokové vložky, rozvodných kanálků a vtokového ústí. [17] [21]

#### 3.1.1 Vtoková vložka

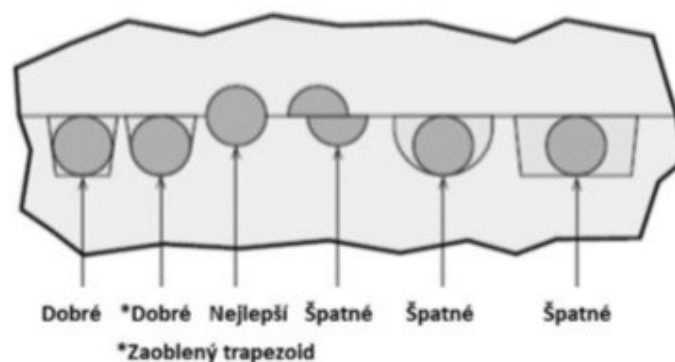
Vtoková vložka slouží ke spojení vstřikovacího stroje s formou. Tryska vstřikovacího stroje je napojena na vtokovou vložku. Napojením trysky a vložky umožňuje tok taveniny až do dutiny vstřikovací formy. Zpravidla se vtoková vložka nachází na pravé neboli pevné části vstřikovací formy. [17] [21]



Obr. 19 Vtoková vložka [17]

### 3.1.2 Rozvodné kanálky

Principem vtokových kanálků je doprava taveniny od vtokové vložky až k vtokovému ústí. U vyhřívaného vtokového systému je rozvodný kanálek součástí celého bloku. U studeného vtokového systému je potřeba vtokový kanálek vyfrézovat do desky formy. Průřez vtokových kanálků musí být natolik velký, aby během tuhnutí bylo jádro taveniny ještě v plastickém stavu. U více násobných forem by dráha kanálků měla být stejná, aby zaplnění dutin došlo ve stejném čase. [17] [21]



Obr. 20 Průřez kanálků [17]

### 3.1.3 Vtokové ústí

Vtokové ústí je zakončení rozvodného kanálku a přivádí taveniny přímo do dutiny formy. Bývá oproti rozváděcímu kanálku zúžené. Zúžením docílíme zvýšení teploty taveniny, před tím než vstoupí do tvarové dutiny. Konstruktivní řešení vtokového ústí je řešeno tak, aby průřez byl co nejmenší a došlo k naplnění dutiny požadovanou rychlostí. Celková délka ústí se zpravidla volí co nejmenší. V určitých případech lze naplnit dutinu formy pouze jedním vtokovým ústím, avšak většinou, aby došlo ke správnému naplnění, se používá dvou či více ústí. Nejčastěji se vtok umísťuje do nejtlustšího místa, do geometrického středu dutiny či tak, aby výrobek nebyl znehodnocen po estetické stránce. [17] [21]

## 3.2 Temperační systém

Celý systém je tvořen řadou vrtaných kanálků, kterými proudí temperační médium. Správné směr toku média udávají ucpávky, přepážky či další komponenty. Pokud se jedná o vícenásobnou vstřikovací formu, je důležité, aby chlazení všech výrobků bylo stejné. Účinnost odvodu tepla závisí především na průtoku média. Mezi nejčastěji používaná média patří voda či olej.

Hlavní úkolem temperačního systému je udržovat konstantní teplotu vstřikovací formy. Jakmile dojde ke vstříknutí polymerní taveniny do dutiny, začne se výrobek ochlazovat na vyhazovací teplotu, aby šlo snadno a bezpečně výrobek vyhodit. S ohledem na vstřikovací cyklus je patrné, že chlazení představuje nejdelší část celého procesu. Z toho důvodu je kladen důraz na to, aby temperace byla navržena co nejlépe. Dobře navržen a zkonstruován systém zajišťuje kratší časy cyklu a rovnoměrné chlazení. Avšak pokud by došlo k nevhodnému návržení temperačního systému, došlo by tak ke smrštění a rozdílnému chlazení výrobku, což by vedlo k deformacím. [17] [20] [21]

### 3.3 Vyhazovací systém

Během chladnutí vstříku v dutině formy dochází ke zmenšení objemu výrobku a smrštění, což má za následek přilnutí k tvárníku. Toto přilnutí je potřeba eliminovat a výrobek z tvarové dutiny vyhodit. K těmto účelům slouží vyhazovací systém. Daný systém se nachází nejčastěji v levé části vstřikovací formy, která je pohyblivá. Skládá se ze dvou desek, ve kterých se nachází různé druhy vyhazovačů. Vyhazovače vedou od vyhazovacího systému až k tvarové dutině. Nejčastěji se opírají o nepohledovou stránku výrobku, aby výrobek nebyl znehodnocen z estetického hlediska. K vyhazovacímu systému se řadí i přídržovač vtoku. Pomocí táhla dochází k pohybu vyhazovacích desek a tím i k vyhození výrobku. V dnešní době existuje mnoho druhů vyhazovačů, mezi nejpoužívanější patří kolíkový vyhazovač dále pak prizmatický, trubkový či stírací desky. [21] [22] [23]

### 3.4 Výroba vstřikovacích forem

Hlavní požadavek na vstřikovací formu je, aby vyžadovala určité požadavky, co se týče kvality, životnosti a hlavně co nejnižších pořizovacích nákladů. Výroba a její efektivnost je udávána především stupněm využití vysokoproduktivních strojů a zařízení. Co se týče časového hlediska výroby, je rozdělení následující:

- |                            |       |
|----------------------------|-------|
| - frézování                | 28 %, |
| - ruční práce              | 20 %, |
| - broušení                 | 18 %, |
| - elektroerozivní obrábění | 15 %, |
| - soustružení              | 11 %, |
| - ostatní práce            | 8 %.  |

Těmto nárokům musí odpovídat výrobní zařízení s danými stroji a příslušným nářadím. Pro dané technologie se nejčastěji využívají následující stroje.

Klasické konvenční obráběcí stroje (soustruhy, frézky, brusky) slouží především pro tzv. měkké operace. U starších strojů by mohl vzniknout problém, že by došlo k nepřesnostem při obrábění. Díky nepřesnostem by se pak díly musely posílat na další operace např.: broušení, což by vedlo k prodražení.

Výrobu tvarových dutin forem pomocí frézky lze využít v určitém rozsahu. Nahradit frézování lze pomocí elektroerozivním obráběním. Hlavní využití nástrojářských frézek je pro výrobu funkčních tvarů dutin či pro výrobku elektrod pro elektroerozivní obrábění. V pokročilé době je však žádáno strojů, které mají řízení v 5-ti osách. Hlavní výhodou a významnou funkcí je snímání výrobku pomocí čidla a přenesení jeho tvaru do počítače, kde s tímto modelem lze pracovat.

Pro větší produktivitu a lepší dokončení tvarových dutin a funkčních částí lze využít elektroerozivní obrábění. Tato technologie se řadí mezi nekonvenční metody obrábění. Hlavní využití této metody je při obrábění funkčních tvarů forem. Pomocí této metody se dokončují velmi náročné tvary, které bychom jinou metodou neudělali. V současné době lze elektroerozivní obrábění programovat v 5-ti osách. Značnou nevýhodou této metody je výroba přesných elektrod, ale také horší jakost povrchu. Plocha, která je opracovaná, se vyznačuje strukturální vrstvou, což se značně projeví při opotřebení během vstřikovacího procesu. [11] [24] [25]

### 3.4.1 Jakost povrchu forem

Pomocí jednotlivých výrobních způsobů lze dosáhnout jen určitých hodnot jakosti povrchu. Díly, které jsou vyráběny, mají definovanou jakost povrchu výrobním výkresem a technologickým postupem. Pokud máme výkres a výrobní postup definovaný lze pak určit metodu výroby a výrobní zařízení. Díly forem, které značně ovlivňují jakost a rozměry výstřiku, vyžadují větší pozornost. Jakost povrchu vtokových kanálků či dutiny forem by mohl ovlivňovat vtokové vlastnosti či povrch výstřiku. [11] [24]

Způsob výroby	Ra ( $\mu\text{m}$ )												
	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Hoblování													
Frézování													
Vrtání													
Zahlubování													
Vystružování													
Vyvtávání													
Soustružení													
Zaškrabování													
Elektrojiskrové obrábění													
Broušení čelní													
Broušení obvodové													
Honování													
Leštění													
Lapování													
Superfinišování													

	hodnoty dosažitelné jen za zvláštních podmínek
	běžné hodnoty
	méně běžné hodnoty

Obr. 21 Jakost povrchu [11]

### 3.5 Materiály forem

Vstřikovací forma se skládá z více součástí, které jsou vyrobeny z různých druhů materiálu. Podle toho na co je daný komponent použit tak se volí materiál, dle potřebných vlastností. Nejčastější parametr pro správnou volbu materiálu, je druh namáhání, jakým bude určitý komponent namáhán. Dalšími parametry, které jsou rozhodující je životnost a cena vstřikovací formy. Významné podmínky, které ovlivňují provozní podmínky:

- druh vstřikovaného plastu,
- jakost výstřiku a přesnost,
- procesní podmínky vstřikovacího cyklu,
- druhem vstřikovacího stroje. [11] [26]

Mezi materiály, které se nejčastěji používají pro výrobu forem, patří:

- oceli – nejčastěji volené materiály pro výrobu tvarových dutin a mechanicky namáhaných komponentů forem. Hlavní výhoda ocelí spočívá v jejich vlastnostech a v tom, že jsou těžce nahraditelné. Každá ocel použita musí splňovat dané

podmínky: dobrou obrobitelnost, vhodné fyzikální vlastnosti, dostatečnou tepelnou zpracovatelnost, odolnost proti otěru a korozi.

- neželezné kovy – mezi nejčastěji používané materiály se řadí slitiny mědi a to z důvodu dobrých vlastností: dobré vodivost, chemická odolnost či výborné kluzné vlastnosti. S použitím slitin mědi dosáhneme dvaceti v určitých případech i padesáti procent snížení času chlazení. Zkrácením času chlazení dojde i ke snížení času celkového cyklu což má kladný vliv na kvalitu výstřiku. Nevýhodou těchto materiálu je horší zpracování.
- ostatní materiály – další materiály při konstrukci vstřikovacích forem mohou být např. syntetické pryskyřice či sklotextil a to z důvodu tepelné izolace při použití izolačních desek. [11] [26]



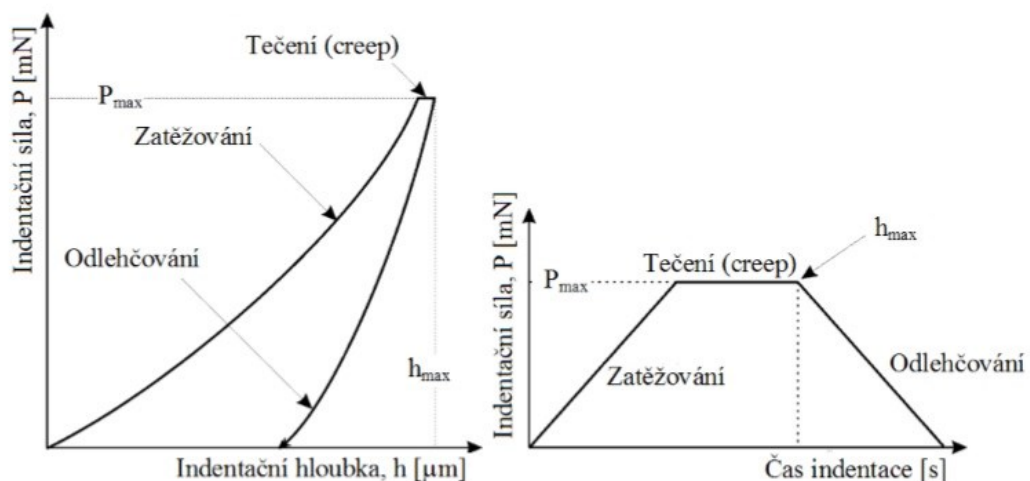
## 4 INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI - DSI

Mezi dřívější metodu pro měření tvrdosti patří tzv. zobrazovací metoda, která pracovala na principu zkoumání rozměrů reziduálního vtisku. Hlavní nevýhodou této zkoušky bylo měření mechanických vlastností velmi tenkých anebo velmi elastických vrstev. Dané nedostatky nastartovaly vznik nové metody zvané DSI (Depth Sensing Indentation), pro kterou byl dán český ekvivalent Instrumentovaná zkouška tvrdosti. Své počátky metoda DSI píše v 70. letech 20. století. Autory zkoušky DSI byli Bulichev a Alekin. Na počátku 80. let pánové Oliver a Pharr přispěli značným vylepšením této metody, a to v metodologii zkoušky, analýze a shromáždění dat. [28]

### 4.1 Princip metody

Metoda Instrumentované zkoušky tvrdosti pracuje na principu vzájemné detekce okamžité změny hloubky průniku indektoru do zkoumaného vzorku a nárůstu či poklesu zatížení během průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího cyklu. Naměřená data jsou zpracována graficky. Vzniká tzv. indentační křivka, která závisí na zatížení a hloubce vtisku. Připojení počítače s měřícím zařízením umožňuje zaznamenávání průběhu zkoušek a současně vyhodnocení měřených parametrů. Celý měřený cyklus je rozdělen do dvou fází.

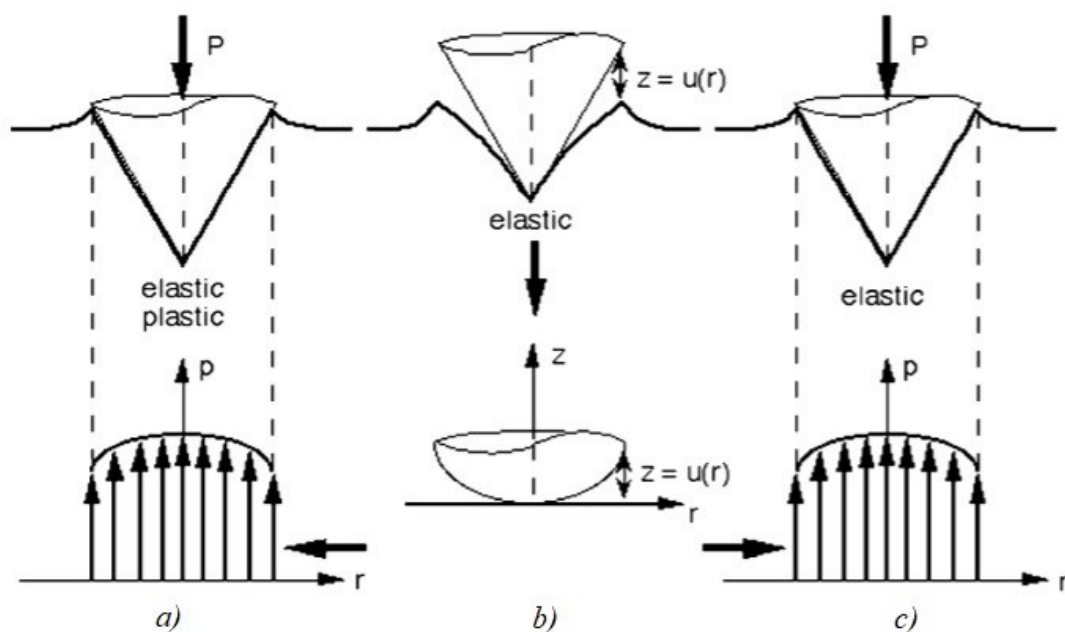
První fází indentačního cyklu je zatěžování. Během zatěžující části je na indentor aplikována zatěžující síla s definovanou rychlostí. Druhá fáze cyklu spočívá v odlehčování. Postupné odlehčování a snižování zatěžující síly a po nulovou hodnotu zatížení. Během procesu zatěžování a odlehčování se mezi ně vkládá pauza, a to z důvodu výdrže na maximální aplikované síle, což umožňuje zkoumat creep neboli tečení materiálu. [27] [30]



Obr. 22 Indentační křivka a časový diagram indentační křivky [27]

Při průběhu zatížení dochází k elasticko-plastické deformaci, kdy tvar vtisku je totožný s tvarem indektoru (obr. 24 a). V další fázi, kdy je indektor odlehčován dochází k elastickému zotavení materiálu, čímž dojde ke změně tvaru v tisku a tvar již neodpovídá tvaru indektoru (obr. 24 b). Při opětovném zatížení dochází k postupnému zvyšování kontaktní plochy až do maximálního zatížení. Během fáze opětovného zatížení a odlehčení se při obou procesech objevuje elastická deformace. (obr. 24 c) [27]

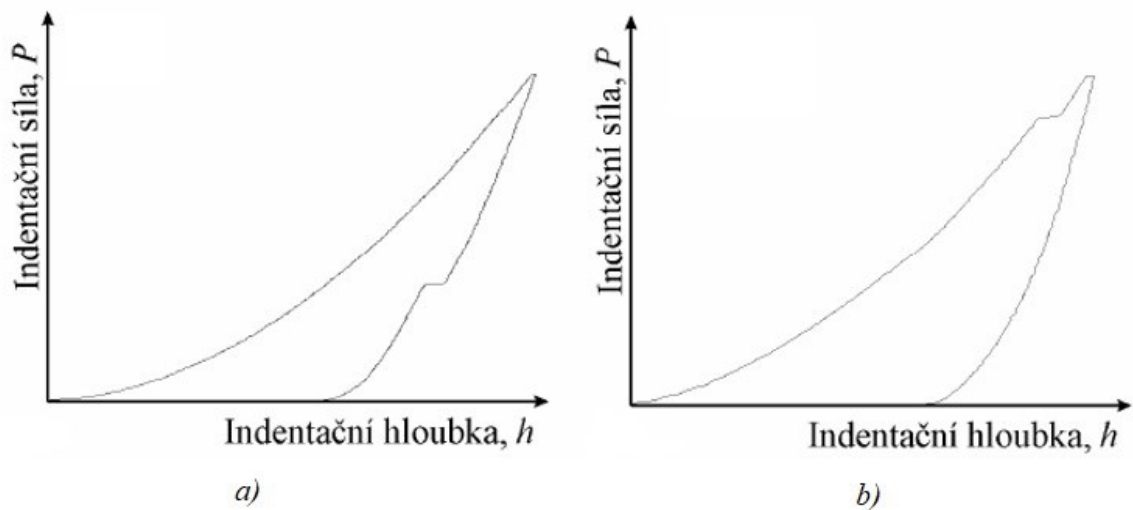
Za pomoci Instrumentované zkoušky tvrdosti lze zjistit a vyhodnotit tečení materiálu (creep), elastický modul, lomovou houževnatost, fázové transformace či práci, která byla vynaložena na vtisk. [27]



Obr. 23 Průběh zatížení a odlehčení indektoru: a) zatížení, b) odlehčení, c) opětovné zatížení [27]

## 4.2 Indentační křivka

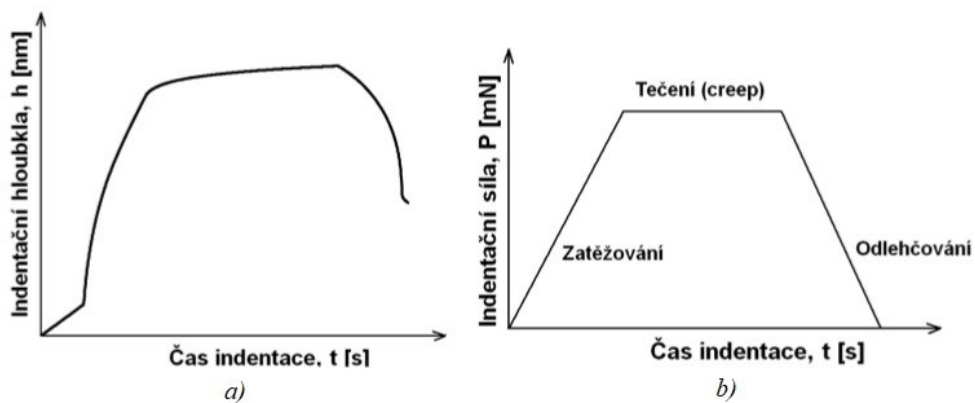
V praxi se Instrumentovaná zkouška tvrdosti využívá v širokém spektru materiálu počínaje měkkými polymery až po tvrdé uhlíkové diamantu podobné vrstvy. Hlavní podstatou zkoušky mikrotvrdosti je průběh zatěžující síly a okamžité polohy indektoru. Výsledkem tohoto průběhu je graf, který se nazývá indentační křivka. [27] [30]



Obr. 24 Nespojité průběh indentačních křivek [30]

Křivka může být ovlivněna více činiteli, avšak hlavním činitelem je odezva měřeného materiálu na indentaci. Z průběhu zatížení, odlehčení a tvaru křivky lze vypočítat tvrdost, modul pružnosti, ale lze zjistit i další velmi důležité informace jako např. fázovou transformaci, trhliny v materiálu nebo delaminaci jednotlivých vrstev, z těchto důvodů se na křivce objeví nespojitý průběh (obr. 25). [30]

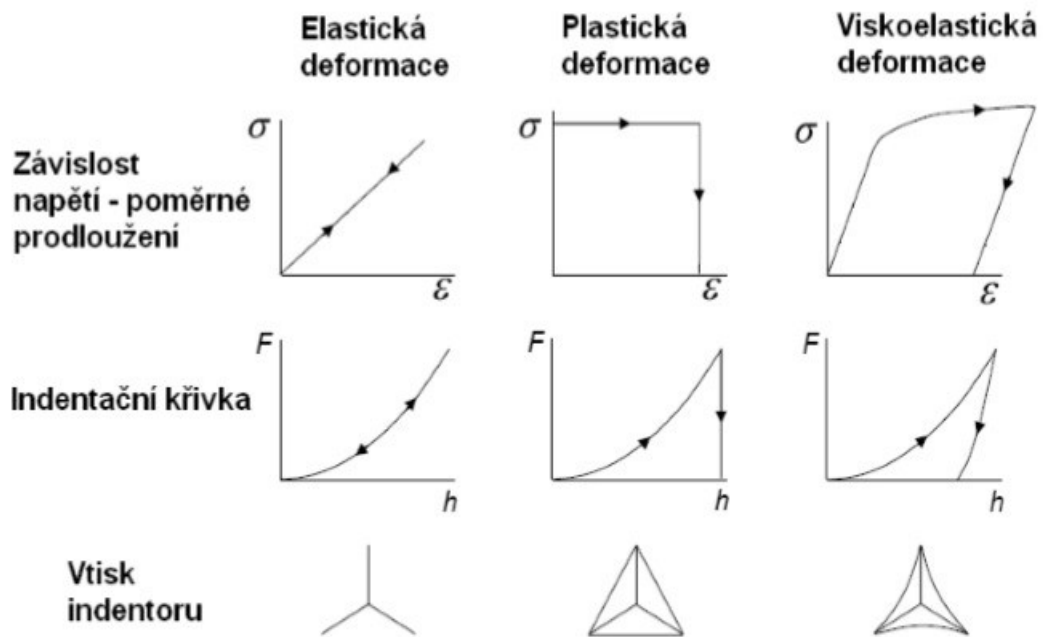
Mezi další informace, které lze získat vypovídají z odezvy materiálu na plynulém zatížení či odlehčení. Pro tento případ lze využít grafickou závislost zatížení – čas anebo hloubka průniku – čas. [27] [30]



Obr. 25 Závislost zatížení – čas (a), hloubka průniku – čas (b) [27]

Podle působící reakce na vnější silové působení, lze materiály obecně rozdělit do tří skupin.

- elastické,
- plastické,
- elasticko-plastické (viskoelastické). [27]



Obr. 26 Tvary indentačních křivek [27]

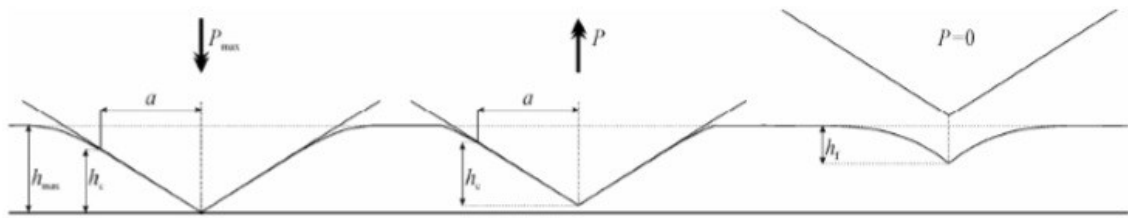
V prvním případě, kdy nastává pouze elastická deformace a nedochází k žádné plastické deformaci, není na vzorku žádný viditelný zbytkový vtisk, vyvinuté napětí indentoru je indukováno ve vzorku jako elastická deformační energie, která se v části odlehčování uvolní.

V dalším případě, kdy nastává pouze plastická deformace, hloubka vtisku odpovídá hloubce při maximálním zatížení indentoru. Nenastane tak žádná elastická deformace.

V posledním případě, kdy nastává elasticko-plastická deformace. U většiny konstrukčních materiálů tato deformace nastává. Indentační křivka elasticko-plastického materiálu, je tvořena z části elastickou a z části plastickou deformací. [27] [34]

### 4.3 Metoda Doernera a Nixe

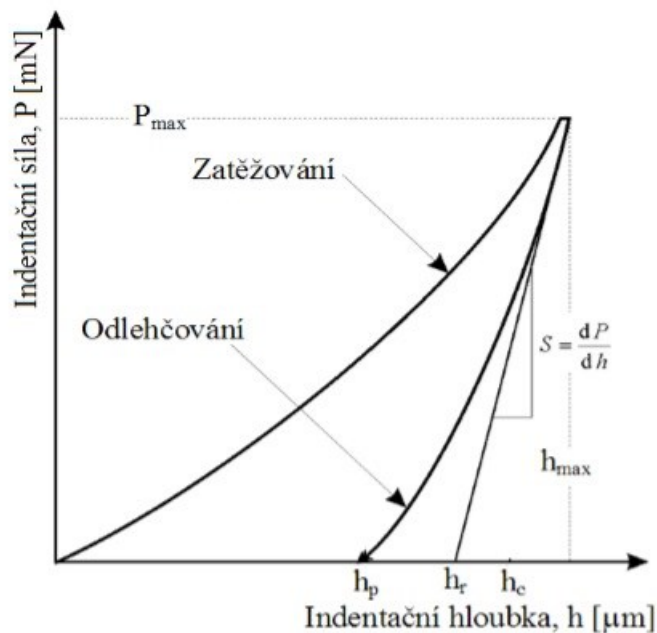
Doernera a Nix, jenž jsou autoři této metody, při indentačních experimentech používali Berkovičův indenter a pozorovali lineární část v počátečních fázích odlehčování. Tyto experimenty prováděli na širokém spektru materiálů. Při svém experimentu nahradili Berkovičův indenter za konický a vyšli z výpočtů pro plochý razník. Jejich metoda se opírá o předpoklad, že v začátcích odlehčování je poloměr kontaktního kruhu konstantní. Během snižování indentační hloubky dochází k elastické regeneraci povrchu a z toho důvodu je hrot indentoru stále v kontaktu s deformovaným povrchem. Z toho vyplývá, že počáteční fáze odlehčování je lineární. [27] [35]



Obr. 27 Schématické znázornění hloubky vtisku [27]

#### 4.4 Metoda Olivera a Pharr

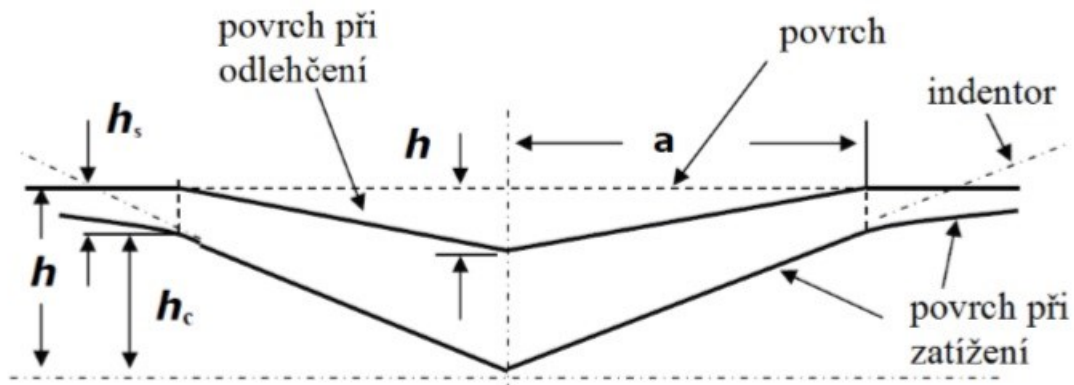
Nejčastěji se metoda Olivera a Pharrta využívá k výpočtům tvrdosti a elastického modulu. Princip metody je založen na předpokladu, že zatěžování bude elasticko-plastické a elastické odlehčování. Důležité informace během analýzy jsou maximální zatěžující síla  $P_{\max}$ , maximální indentační hloubka  $h_{\max}$  a kontaktní tuhost  $S$ . Kontaktní tuhost je definovaná jako směrnice tečny počáteční části odlehčovací křivky. [27] [36]



Obr. 28 Indentační křivka [27]

#### 4.5 Určení výsledků zkoušky DSI

Hodnoty, které jsou získány z Instrumentované zkoušky, jsou okamžité hodnoty zatěžující síly  $P$  a hloubky vtisku  $h$ . Právě metoda Oliver a Pharr je využívána k výpočtům dalších parametrů, jako jsou: tvrdost, elastický modul. [36]



Obr. 29 Schéma zatěžování a odlehčování [27]

#### 4.5.1 Tvrдост

Obecně lze vtiskovou tvrđost  $H_{IT}$  definovat jako míru odporu vůči trvalé deformaci či poškození. Vtisková tvrđost  $H_{IT}$  je dána jako maximální zatížení  $P_{max}$  podělená plochou vnikajícího tělesa, která je v kontaktu se zkušebním tělískem  $A_p$ . [27] [38]

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (1)$$

Další tvrđosti, kterou lze určit je Martenzova tvrđost HM. Určení tvrđosti vyplývá z křivky zatížení a hloubce vtisku v oblasti rostoucího zkušebního zatížení. Značnou výhodou této tvrđosti je, že zahrnuje plastickou i pružnou deformaci a tak jí lze využít pro většinu materiálu. Martenzova tvrđost je definována jako zatěžující síla  $P$ , která je podělena plochou povrchu vnikajícího tělesa  $A_s(h)$ , které se nachází ve vzdálenosti  $h$  od hrotu. [27] [38]

$$HM = \frac{P}{A_s(h)} \quad (2)$$

Poslední tvrđosti, kterou lze určit je tvrđost podle Vickerse HV a je definována jako: [27]

$$HV = \frac{P_{max}}{9,81 \times A_c \times (h_c)} \quad (3)$$

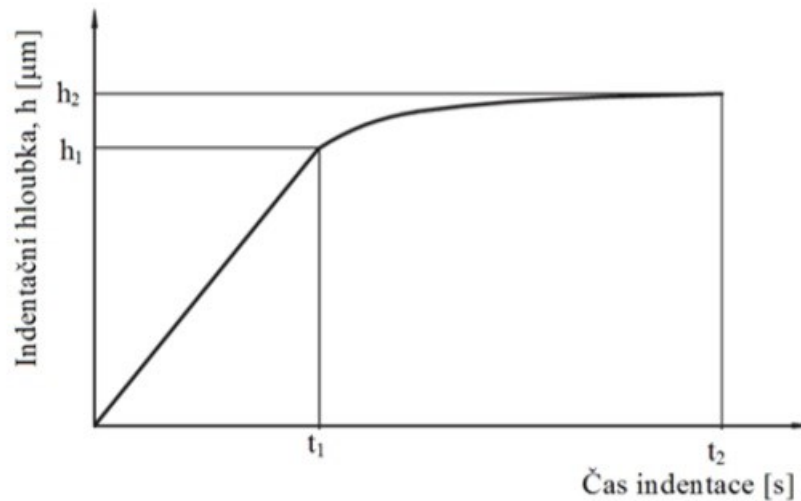
#### 4.5.2 Vtiskové tečení (creep)

Tečení materiálu neboli creep lze určit, pokud lze při konstantním zatížení změřit změnu hloubky vtisku, poté se může vypočítat relativní hloubka vtisku (hodnota tečení). [27] [41]

Vtiskové tečení  $C_{IT}$  je dáno vztahem:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 \quad (4)$$

Ve vztahu  $h_1$  vyjadřuje hloubku vtisku naměřené v čase  $t_1$ , kdy je dosaženo zkušebního zatížení a hodnotou  $h_2$  je dána hodnota hloubky vtisku v čase  $t_2$  a při výdrži na maximálním zatížení. [27] [41]



Obr. 30 Vtiskové tečení [27]

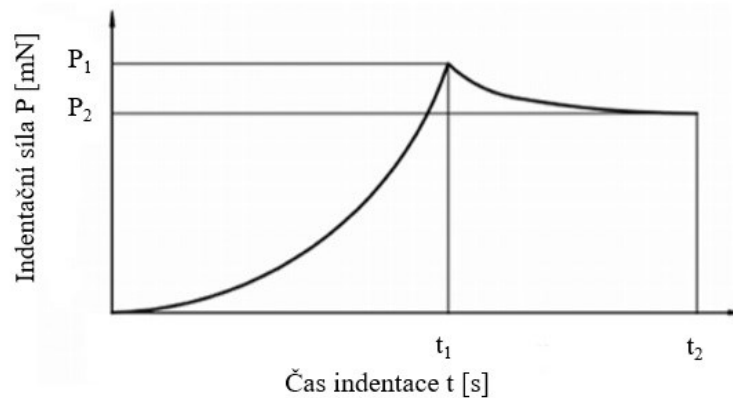
### 4.5.3 Vtisková relaxace

Pokud se v konstantní hloubce vtisku měří změna zkušebního zatížení, lze pak vypočítat relativní změnu zkušebního zatížení, což udává hodnotu vtiskové relaxace. [27] [41]

Vtisková relaxace je dána vztahem:

$$R_{IT} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (5)$$

Ve vztahu  $P_1$  vyjadřuje hodnotu zatížení po dosažení hloubky vtisku. Hloubka vtisku je udržována v konstantní úrovni. Hodnota zatížení  $P_2$  je již po čase, kdy byla hloubka vtisku v konstantní úrovni. [27] [41]



Obr. 31 Vtisková relaxace [27]

#### 4.5.4 Modul pružnosti

Mezi další hodnotu, kterou lze pomocí zkoušky DSI získat je vtiskový modul neboli indentační modul  $E_{IT}$ , dále pak redukovaný modul  $E_r$  a komplexní modul  $E^*$ . Vtiskový modul lze určit ze směrnice tečny, která slouží k výpočtu vtiskové tvrdosti. [27] [41]

Vtiskový modul je dán vztahem:

$$E_{IT} = E^* \times (1 - \nu_s^2) \quad (6)$$

Hodnota  $E^*$  vyjadřuje komplexní modul a  $\nu_s$  je Poissonův poměr zkušební tělesa, který se obecně volí pro kovové materiály od 0,2 až 0,4 a pro polymerní materiály od 0,3 až 0,4. [27] [41]

Redukovaný modul je dán vztahem:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \times C \times \sqrt{A_p}} \quad (7)$$

Kdy  $A_p$  vyjadřuje průmět kontaktní plochy a hodnota  $C$  je kontaktní poddajnost. [27] [41]

Komplexní modul je dán vztahem:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (8)$$

Kdy hodnota  $E_i$  je modul vnikajícího tělesa, hodnota  $E_r$  je redukovaný modul a hodnota  $\nu_i$  je Poissonův poměr vnikajícího tělesa. [27] [38]



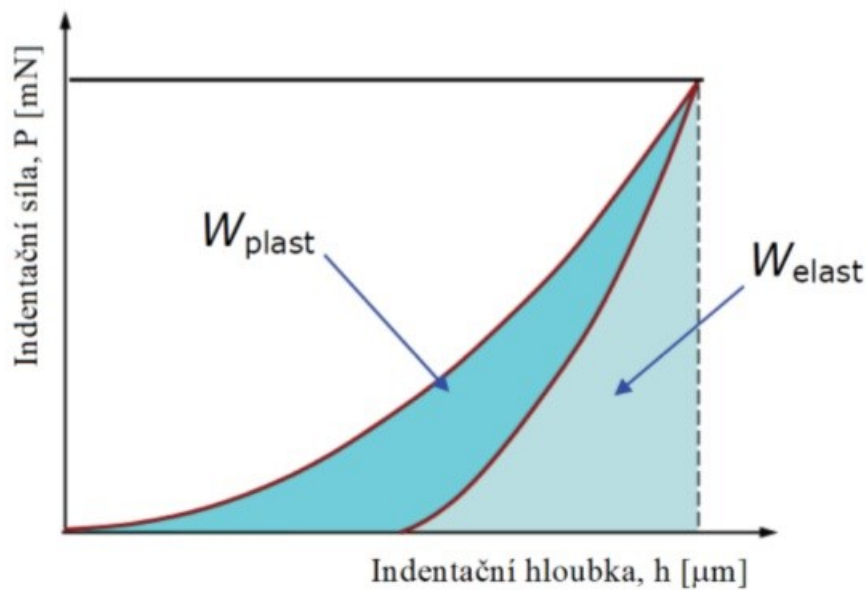
#### 4.5.5 Deformační práce

Celková práce, která je vynaložena v průběhu celého indentačního cyklu je rovna celkové ploše pod zatěžující křivkou a je označována jako  $W_{total}$ . Plocha, která se nachází pod odlehčovací křivkou, udává vratnou elastickou práci a je značena  $W_{elast}$ . Část plochy mezi zatěžující a odlehčující křivkou znázorňuje nevratnou plastickou práci a je značena  $W_{plast}$ . [27] [38]

$$W_{total} = W_{plast.} + W_{elast.} \quad (9)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast.}}{W_{total}} \times 100 \quad (10)$$

Hodnota  $\eta_{IT}$  značí koeficient zpětné relaxace a je určen podílem elastické práce a celkové práce. [27] [38]



Obr. 32 Deformační práce [27]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je zkoumání porovnávání vlivu procesních podmínek vstřikování na výslednou jakost povrchu zkušebního vzorku. Při procesu vstřikování budou použity různé tvarové desky s odlišnou jakostí povrchu, dále se budou měnit technologické parametry, zejména vstřikovací tlak.

Pro zkoumání praktické části byl zvolen materiál PC (polykarbonát) a byl vstřikován do spirálovité dutiny formy, kdy se vyhodnocovala i jeho zatékavost. Pomocí přístroje Micro-Combi Tester se měřily mikro-mechanické vlastnosti v různých vzdálenostech od vtoku.

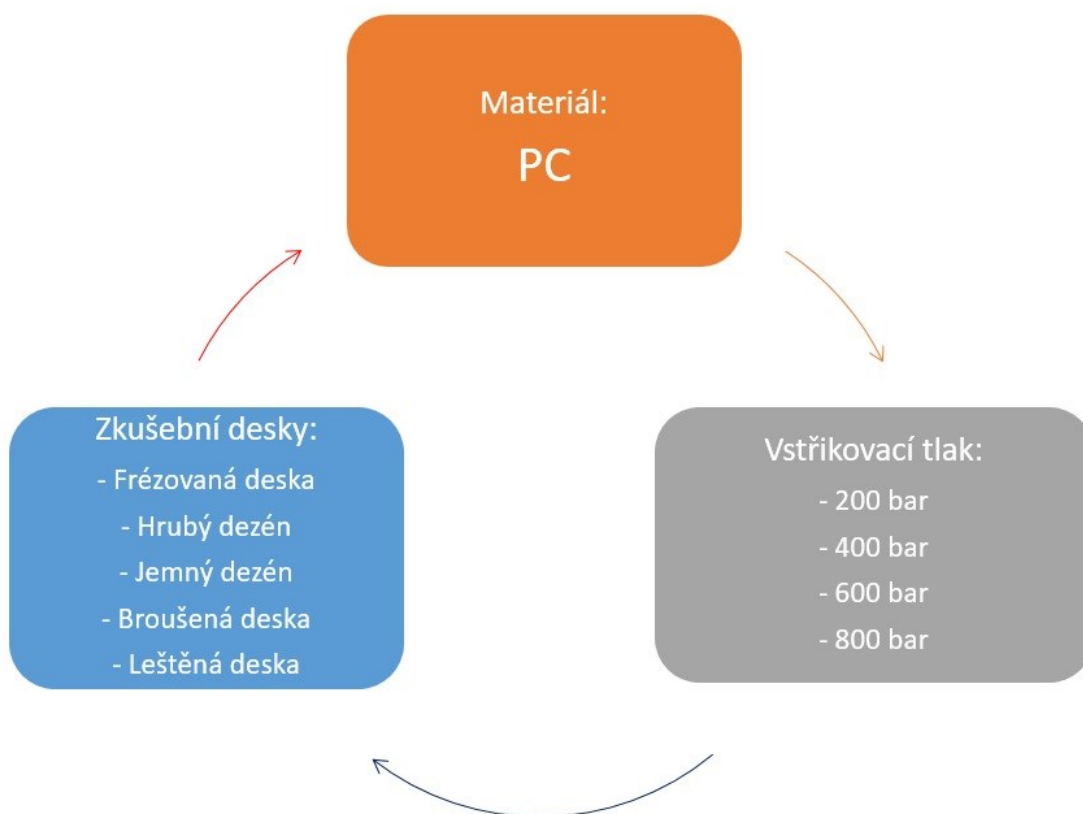
Postup při vypracování diplomové práce:

- Vypracování literární studie na dané téma.
- Příprava zkušebních těles pro experiment.
- Provedení experimentu.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

## 6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

### 6.1 Podmínky při experimentu

Pro experiment byl zvolen materiál polykarbonát. Dále byly zvoleny 4 vstřikovací tlaky a 5 různých druhů vstřikovacích desek, jenž se liší výrobou a drsností povrchu. Pro každou kombinaci desky a vstřikovacího tlaku bylo vytvořeno 10 vzorků, které byly měřeny.



Obr. 33 Kombinace výroby zkušebních těles

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).

### 6.2 Vstřikovací stroj

Realizace vstřikovací části experimentu byla provedena na vstřikovacím stroji od firmy ARBURG přesněji typ stroje Allrounder 470 C Golden Edition. Technické parametry jsou uvedeny v příloze práce.



Obr. 34 Vstřikovací stroj Allrounder 470 C Golden Edition

### 6.3 Vstřikovaný materiál

Jak již bylo zmíněno, pro daný experiment byl vybrán materiál typu polykarbonát. Tento materiál řadíme mezi amorfní termoplasty. Polykarbonát se hojně využívá v mnoha odvětvích, zejména v automobilovém průmyslu na výrobu světlometů, či výrobě ochranných brýlí nebo při výrobě CD, DVD disku.



Obr. 35 Vstřikovaný materiál

Tabulka 1 Základní parametry materiálu

Materiál	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Teplota tání [°C]	Teplota skelného přechodu [°C]	Hodnota ITT [g/10 min]
PC	1,2	267	150	22

### 6.4 Vstřikování vzorků

Materiál byl vkládán do násypky stroje v podobě granul a prošel vstřikovací jednotkou, kde došlo k jeho homogenizaci a plastikaci. Následně byla tavenina vstříknuta do formy, jejichž tvarová dutina má tvar spirály a slouží pro určení zatékavosti polymeru.

### 6.4.1 Technologické parametry při vstřikování

Vstřikovací tlak byl volen 200, 400, 600 a 800 bar. Při nižším tlaku než je 200 baru by nedošlo ke správnému zatečení polymeru, z toho důvodu nebyl menší tlak testován. Pokud by byl tlak vyšší než 800 baru, nebylo by možné dojít ke správným výsledkům, protože by byl tlak příliš vysoký a uzavírací síla by nezajistila správné uzavření vstřikovací formy, a tak by mohlo dojít k pootevření vstřikovací formy během procesu. Dotlak byl volen jako 80 % vstřikovacího tlaku.

Tabulka 2 Technologické parametry

Technologické parametry	PC
Dotlak	80 % vstřikovacího tlaku
Doba dotlaku [s]	1
Zpětný tlak [bar]	-1
Dráha dávkování [mm]	11
Dráha přepnutí [mm]	7
Doba chlazení [s]	22
Rychlost dekomprese [mm/s]	2
Dráha dekomprese [mm]	3
Uzavírací síla [kN]	1200
Obvodová rychlost šneku [mm/s]	30
Teplota formy [°C]	80
Teplota taveniny [°C]	260
<b>Nastavení topných pásem</b>	<b>PC</b>
Pásmo č.1 [°C]	260
Pásmo č.2 [°C]	260
Pásmo č.3 [°C]	255
Pásmo č.4 [°C]	250
Pásmo č.5 [°C]	235

### 6.4.2 Sušení materiálu

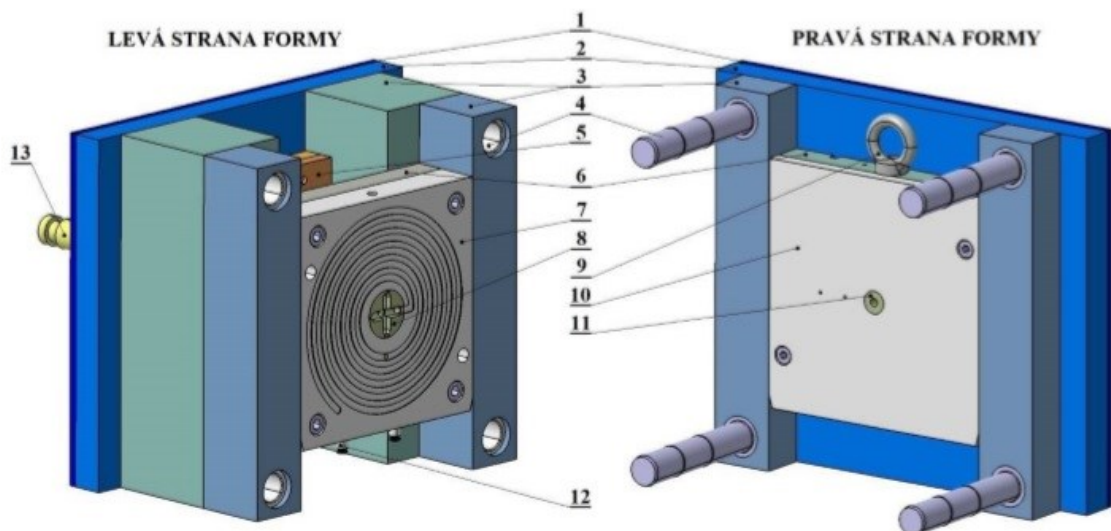
Pro materiál polykarbonát, který je navlhavý, bylo nutné, aby před vstřikování proběhu sušení. Vlhkost v granulích by vedlo k povrchovým vadám, které by ovlivnily mechanické vlastnosti. Sušení proběhlo v sušárně THERMOLIFT 100-2 od firmy ARBURG. Celková doba sušení byla 4 hodiny při teplotě 120 °C.

Tabulka 3 Podmínky sušení

Parametry	PC
Teplota sušení [°C]	120
Doba sušení [h]	4

## 6.5 Vstřikovací forma

Zkušební forma je jednoduchá konstrukce, která umožňuje jednoduchou manipulaci a snadnou výměnu tvarových desek. Forma je navržena jako jednonásobná. Jelikož je zkušebních desek více, každá vyrobena jinou metodou s jinou drsností, je vložena do univerzálního rámu.



Obr. 36 3D model vstřikovací formy

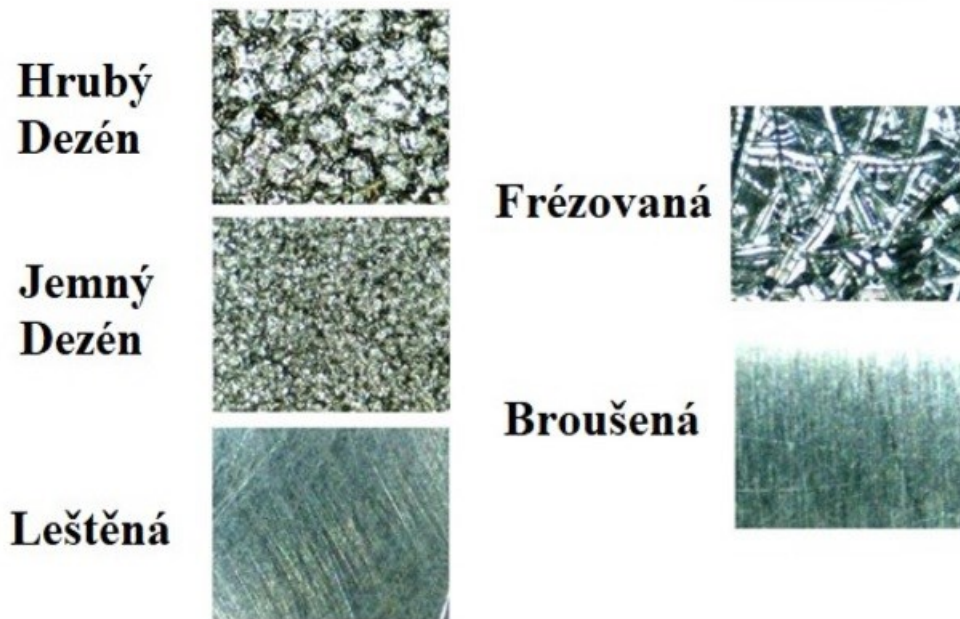
1 – izolační deska, 2 – upínací deska, 3 – rozpěrná deska, 4 – vodící prvky, 5 – vyhazovací systém, 6 – opěrná deska, 7 – tvarová deska, 8 – přídržovač vtoku, 9 – nosné očko, 10 – tvarová deska (výměnná), 11 – vtoková vložka, 12 – temperace, 13 – táhlo pro vyhazovací systém

### 6.5.1 Zkušební deska

Během měření bylo použito celkem 5 desek vyrobené různým způsobem. Na obr. 37 lze vidět povrch desek a jejich značení. Obrobení povrchu bylo zhotoveno pomocí frézování, elektroerozivním obráběním (hrubý a jemný dezén) broušením, leštěním. Jakost povrchu a typ výroby je zobrazen v tabulce č. 4.

Tabulka 4 Jakost výměnných desek

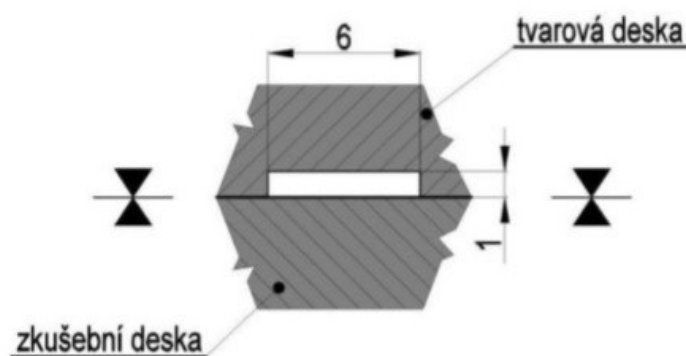
Značení desek	Způsob výroby	Jakost Ra
Frézovaná	frézování	5,01 $\mu\text{m}$
Hrubý dezén	elektroerozivní obrábění	12,74 $\mu\text{m}$
Jemný dezén	elektroerozivní obrábění	4,36 $\mu\text{m}$
Broušena	broušení	0,45 $\mu\text{m}$
Leštěna	leštění	0,42 $\mu\text{m}$



Obr. 37 Označení desek a jejich povrch

### 6.5.2 Tvarová dutina

Tvarová dutina, která udává tvar spirály je tvořena pomocí tvarové desky a výměnné desky. U vstříknuté spirály se poté posuzuje délka zatečení polymeru. Během celého procesu vstříkování se tvarová deska nemění, ale pouze výměnná deska s různou jakostí povrchu. Na obr. 38 je znázorněn řez dutinou formy, kdy šířka kanálku je 6 mm a hloubka 1 mm.

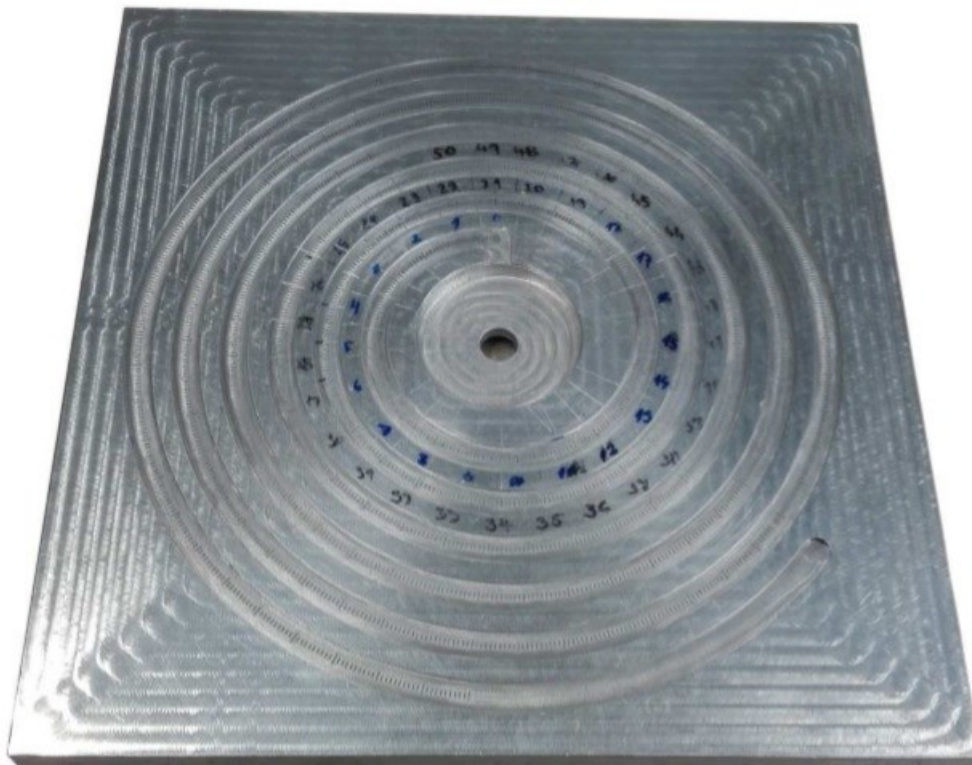


Obr. 38 Řez dutinou formy



## 6.6 Měření délky zatečení materiálu

Pro snadnější určení délky zatečení polymeru je dutina formy opatřena stupnicí (obr. 39). Pomocí stupnice pak lze snadno určit, do jaké míry tavenina zatekla. Celková dráha přípravku je až 2 m, do takové délky však nebylo dosaženo. Délka zatečení všech zkušebních těles byla měřena s přesností na 1 mm, což je také hodnota jednoho dílku na stupnici.



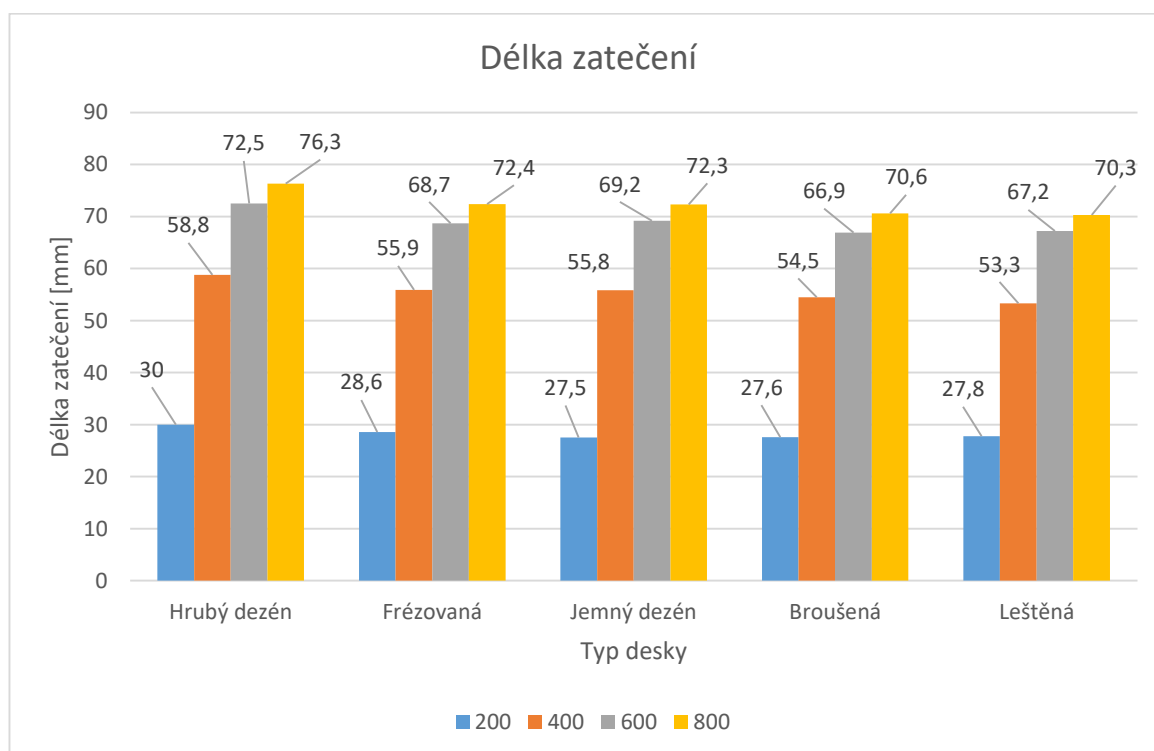
Obr. 39. Přípravek pro měření délky

Tabulka 5 Hodnoty délek zatečení při různých tlacích a typu desek

Typ desky	Průměrná délka zatečení [mm] při různých tlacích [bar]			
	200	400	600	800
Hrubý dezén	30	58,8	72,5	76,3
Frézovaná	28,6	55,9	68,7	72,4
Jemný dezén	27,5	55,8	69,2	72,3
Broušená	27,6	54,5	66,9	70,6
Leštěná	27,8	53,3	67,2	70,3

Tabulka 6 Odchylka délek zatečení při různých tlacích a typu desek

Typ desky	Odchylka délky při zatečení [mm] při různých tlacích [bar]			
	200	400	600	800
Hrubý dezén	1,05	0,79	0,85	0,95
Frézovaná	1,51	1,10	0,95	0,97
Jemný dezén	0,85	1,03	1,03	0,67
Broušená	1,17	0,53	0,88	0,84
Leštěná	0,79	0,82	0,79	1,34



Obr. 40 Délka zatečení při různém typu desky a vstřikovacího tlaku

Jak lze na první pohled vidět z obr. 40, vstřikovací tlak má značný vliv na délku toku polymeru. Určitý vliv na zatečení polymeru měl i typ povrchu desky. Jako nejlepší povrch se jevil hrubý dezén, kdy při všech tlacích zatekl polymer nejdál. Naopak jako nejhorší povrch se jevil leštěný. U leštěného povrchu došlo ve 3 případech ze 4 k naměření nejmenší délky zatečení.

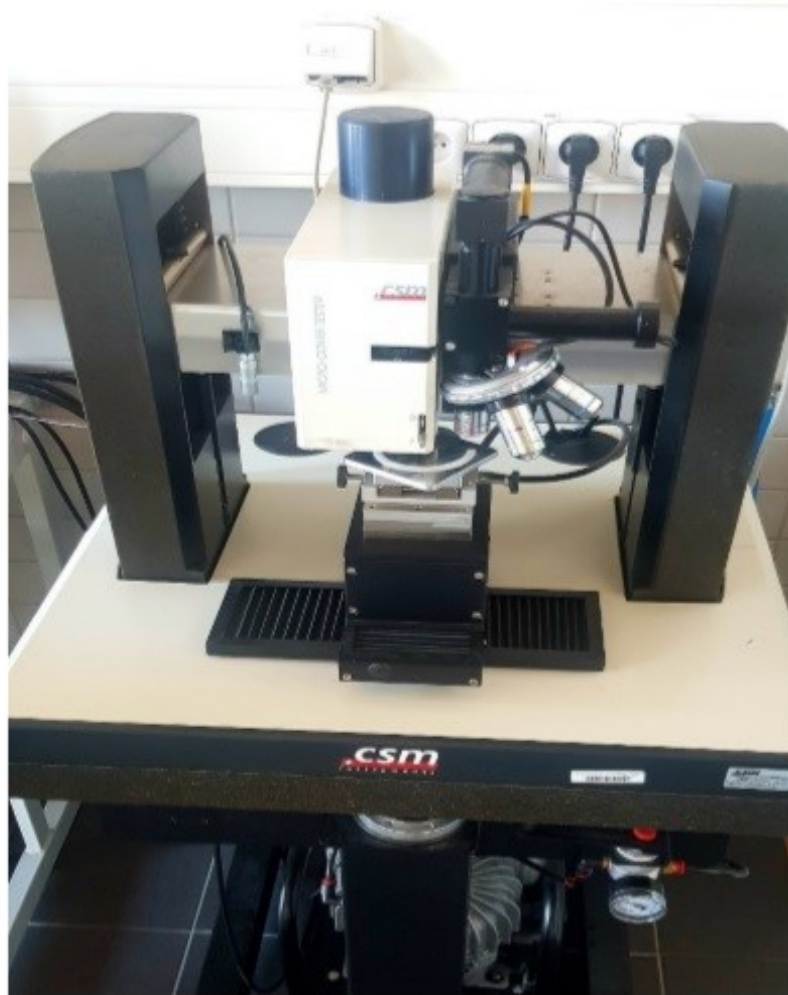
## 6.7 Měření instrumentovanou zkouškou tvrdosti DSI

Měření, které proběhlo pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti, bylo dle normy ČSN EN ISO 14577 pomocí přístroje MICRO-COMBI-TESTER od firmy CSM Instruments. Vnikacím tělesem neboli indentor, byl použit čtyřboký diamantový jehlan, který má

vrcholový uhel  $136^\circ$  (Vickersův jehlan). Měření bylo zhotoveno pomocí metody DSI a následné vyhodnocení dat pomocí metody Oliver & Pharr.

#### Parametry stroje při zkoušce:

- zatížení – 1 N,
- výdrž na maximálním zatížení – 90 s,
- rychlost při zatížení a odtížení – 2 N/mm,
- poissnovo číslo – 0,3.



*Obr. 41 Micro Combi Tester*

#### 6.7.1 Postup měření

Měření proběhlo v různých vzdálenostech od počátku vstříku až po konec. Jednalo se konkrétně o vzdálenosti 0, 27, 54, 66 a 70 mm. U menších tlaků však nedošlo k zatečení až

ke vzdálenosti 70 mm. Při měření dat byl kladen důraz na správné umístění spirály, aby měřící jednotka dopadala tečně na měřenou oblast zkušebního vzorku spirály.

## 7 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V této kapitole jsou vyhodnoceny a zpracovány data, která byla naměřena pomocí grafů. K vyhodnocení dat byly použity programy Minitab 16 a Microsoft Excel. V grafech jsou znázorněny průměrné hodnoty z naměřených dat a směrodatné odchylky. Dále jsou znázorněny závislosti měřené vlastnosti na délce toku při použitém vstřikovacím tlaku.

V praktické části byla vyhodnocena vtisková tvrdost, vickersova tvrdost, vtiskový modul, vtiskové tečení (creep), vtisková práce.

Použité veličiny:

- Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

- Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

kde:

$\bar{x}$  - aritmetický průměr,

s – směrodatná odchylka,

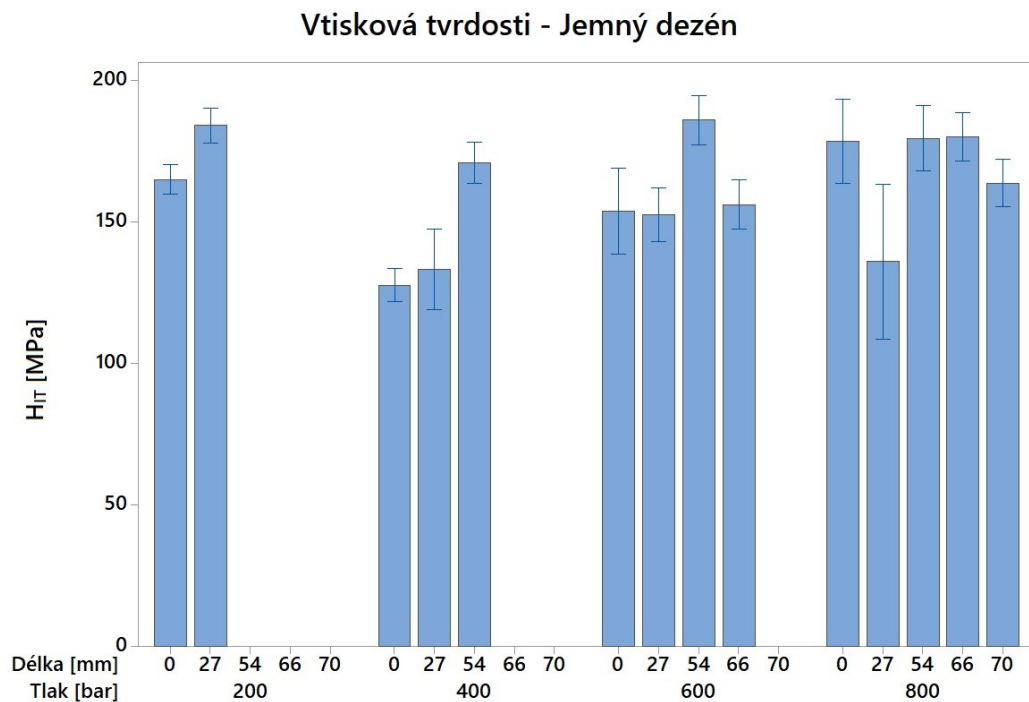
$x_i$  – i-tá hodnota měřené veličiny,

n – počet měření.

### 7.1 Vtisková tvrdost $H_{IT}$

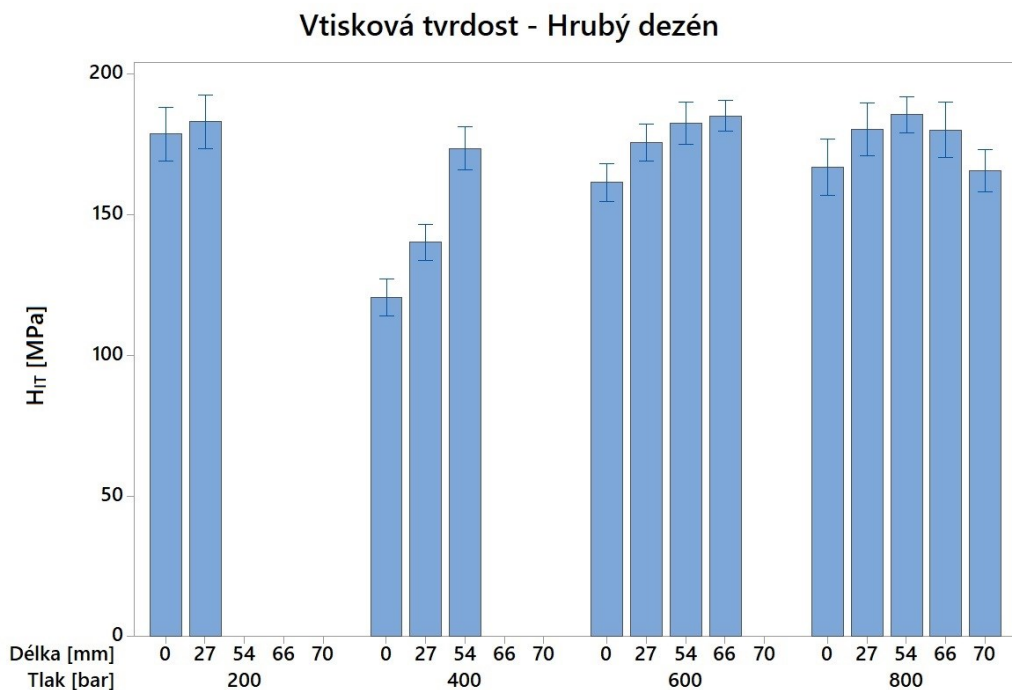
Vtisková tvrdost patří mezi základní veličiny, které lze získat z Instrumentované zkoušky tvrdosti. Jedná se o míru rezistence k trvalé deformaci či poškození. Určit vtiskovou tvrdost lze jako maximální zatěžující sílu, která je podělena průmětem kontaktní plochy. Lze jej vypočítat dle vzorce:

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad [MPa] \quad (13)$$



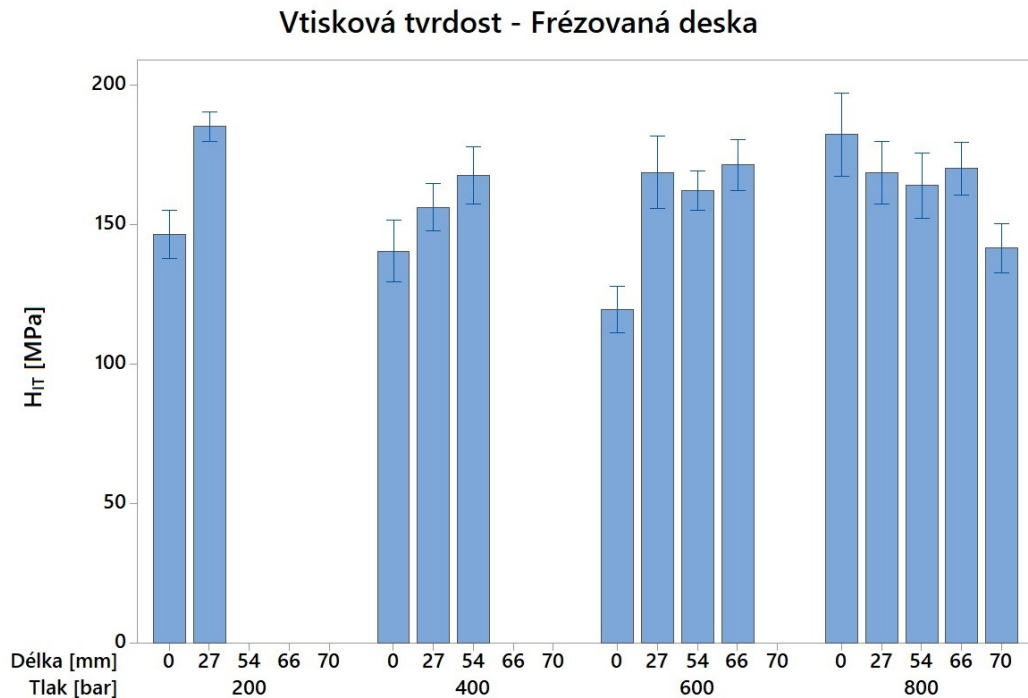
Obr. 42. Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – jemný dezén

Při použití desky s jemným dezénem lze vidět, že při tlacích 200 a 400 bar docházelo k lineárnímu růstu vtiskové tvrdosti. Ovšem při tlacích 600 a 800 bar došlo ke kolísání vtiskové tvrdosti. Nejvyšší vtisková tvrdost, která byla naměřena pro tento povrch je 185,950 MPa, a to při tlaku 600 bar a v délce zatečení 54 mm.



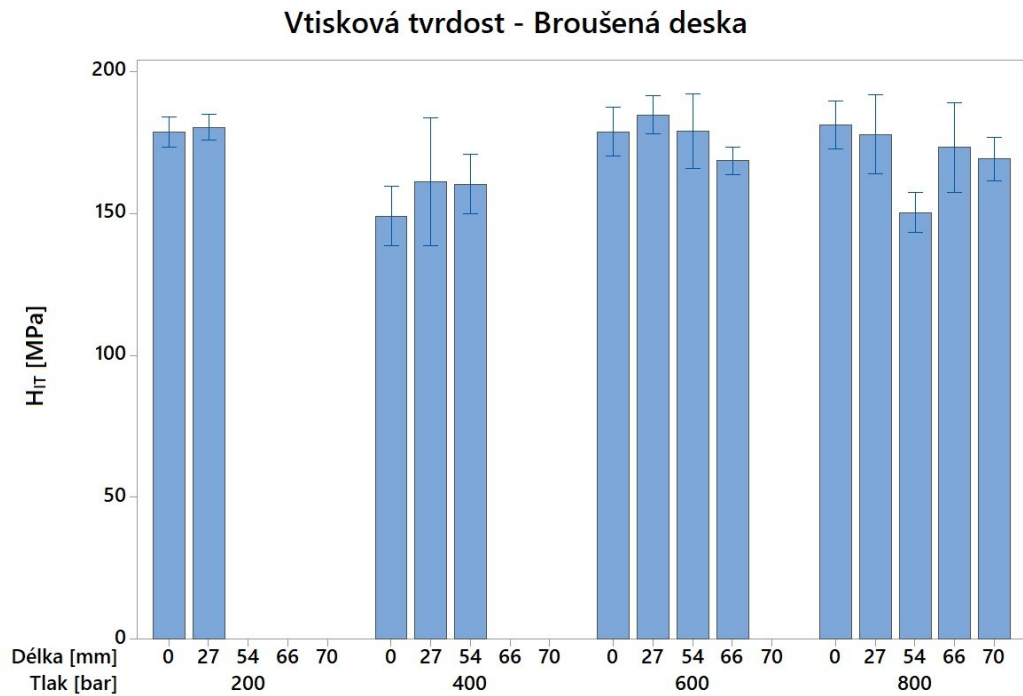
Obr. 43 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – hrubý dezén

Při měření povrchu s hrubým dezénem došlo k naměření nejvyšší hodnoty 185,541 MPa při tlaku 800 bar a v délce zatečení 54 mm. U tlaku 200, 400 a 600 bar dochází k lineárnímu růstu hodnot. U tlaku 800 bar, byla nejmenší hodnota na začátku vtoku, poté hodnoty rostou až do délky 54 mm, kde dochází k přelomu a hodnoty klesají.



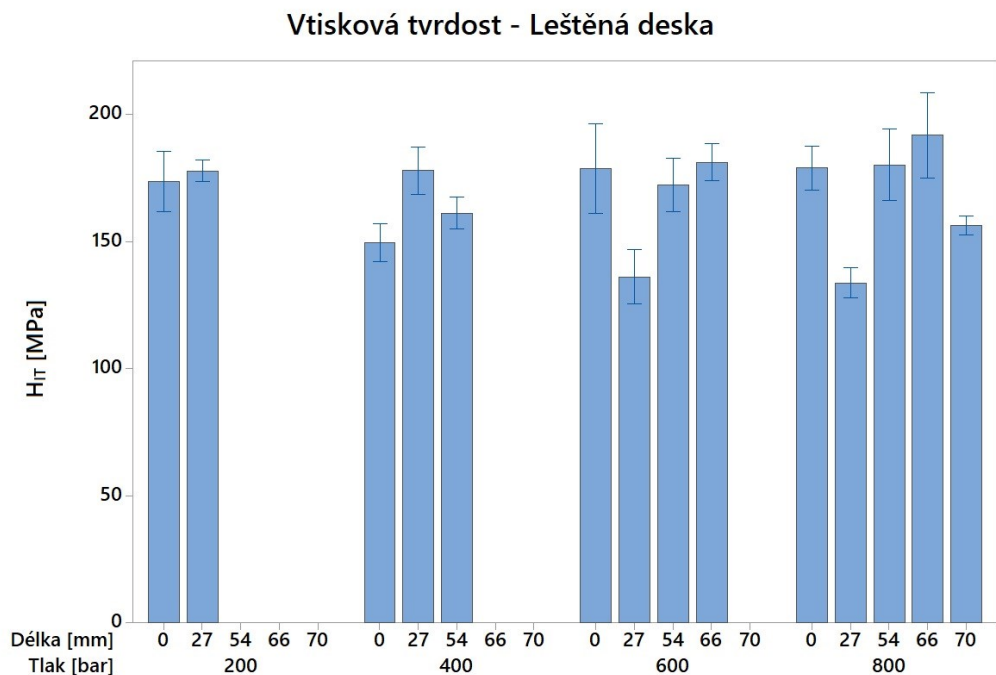
*Obr. 44 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – frézovaná deska*

Při použití frézované desky lze vidět, že při tlacích 200 a 400 bar dochází k lineárnímu růstu vtiskové tvrdosti. U tlaku 600 bar dochází k mírnému nárůstu v délce 27 mm a k vychýlení tak lineární části. Při tlaku 800 bar dochází k poklesu vtiskové tvrdosti, kdy při 0 mm byla naměřena nejvyšší tvrdost a postupně klesá, ale v délce dochází k mírnému nárůstu a poté opět vtisková tvrdost klesá. Nejvyšší naměřená vtisková tvrdost byla při tlaku 200 bar v délce 27 mm, kdy její hodnota byla 185,003 MPa.



Obr. 45 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – broušená deska

Nejvyšší vtisková tvrdost u broušené desky 184,574 MP byla naměřena při tlaku 600 bar v délce 27 mm. U tlaku 200 bar je v délce 0 a 27 mm vtisková tvrdost poměrně vyrovnaná. U tlaku 400 a 600 bar dochází ze začátku k růstu vtiskové tvrdosti, avšak v délce 27 mm se láme a začíná postupně klesat. Při tlaku 800 bar byla největší vtisková tvrdost naměřena na začátku vtoku, poté však dochází k postupnému klesání.



Obr. 46 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – leštěná deska

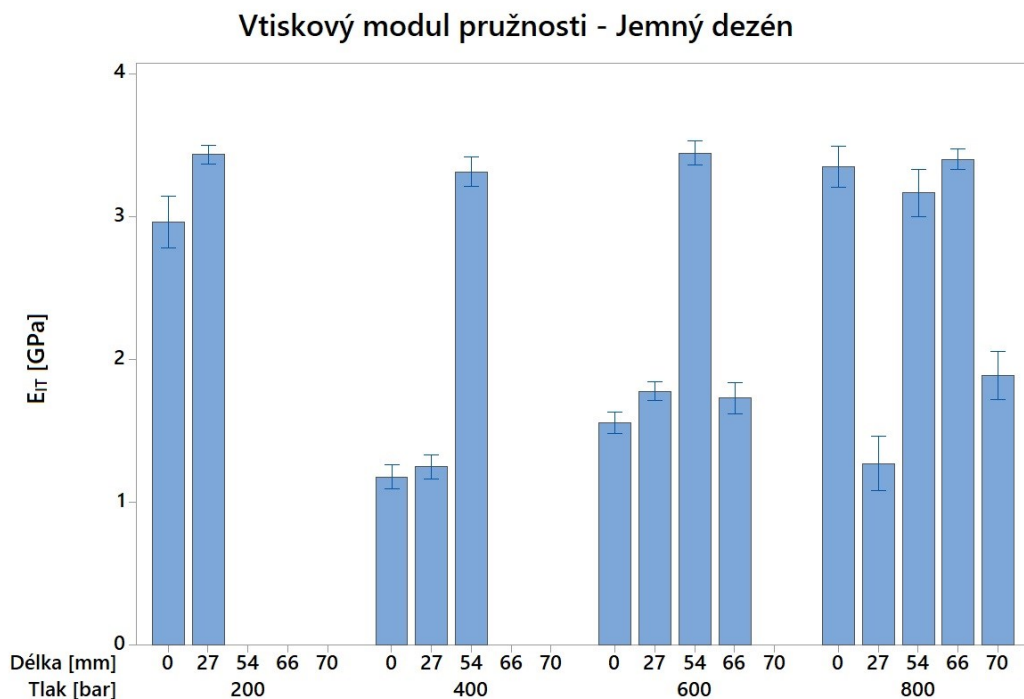


Při použití leštěné desky byla největší vtisková tvrdost naměřena u tlaku 800 bar a v délce toku 66 mm a to 191,776 MPa. U tlaku 200 bar byly hodnoty poměrně vyrovnané, avšak se zvětšující se délkou toku rostla i hodnota vtiskové tvrdosti. Při tlaku 400 bar byla největší vtisková tvrdost naměřena v délce 27 mm a poté došlo ke klesání tvrdosti. Během tlaku 600 a 800 bar došlo k výraznému kolísání hodnot, jak lze vidět na obr. 46.

## 7.2 Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$

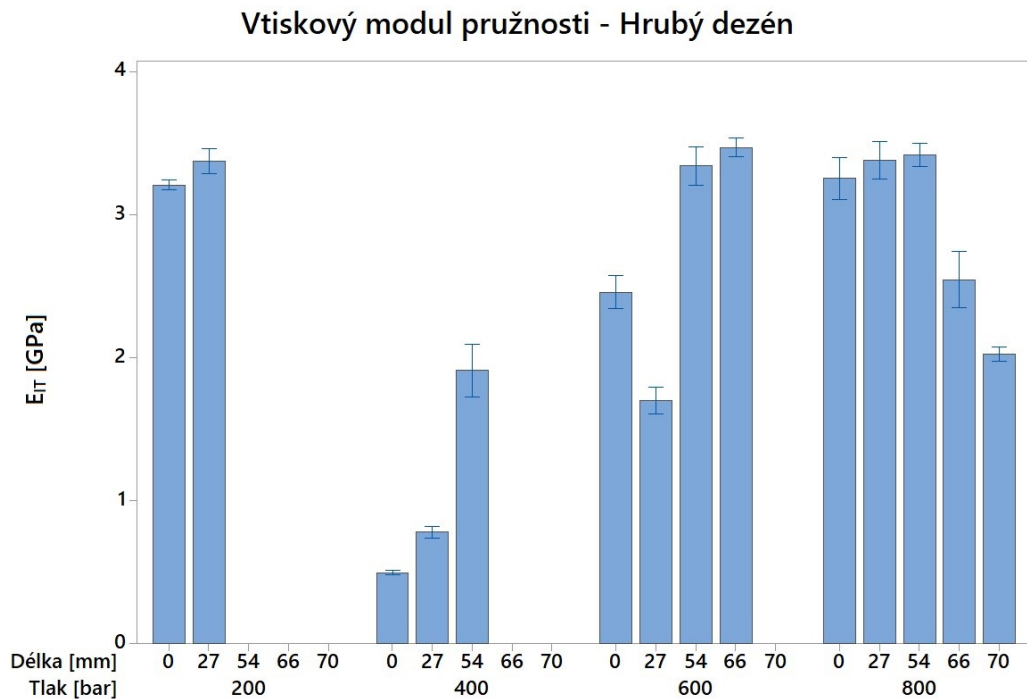
Mezi další velmi důležité veličiny, které lze získat pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti patří vtiskový modul pružnosti. Vtiskový modul je určen jako směrnice tečny odtěžující tečny a odpovídá Youngověmu modulu pružnosti. Lze jej vypočítat pomocí vzorce:

$$E_{IT} = E^* \times (1 - \nu_s^2) \text{ [GPa]} \quad (14)$$



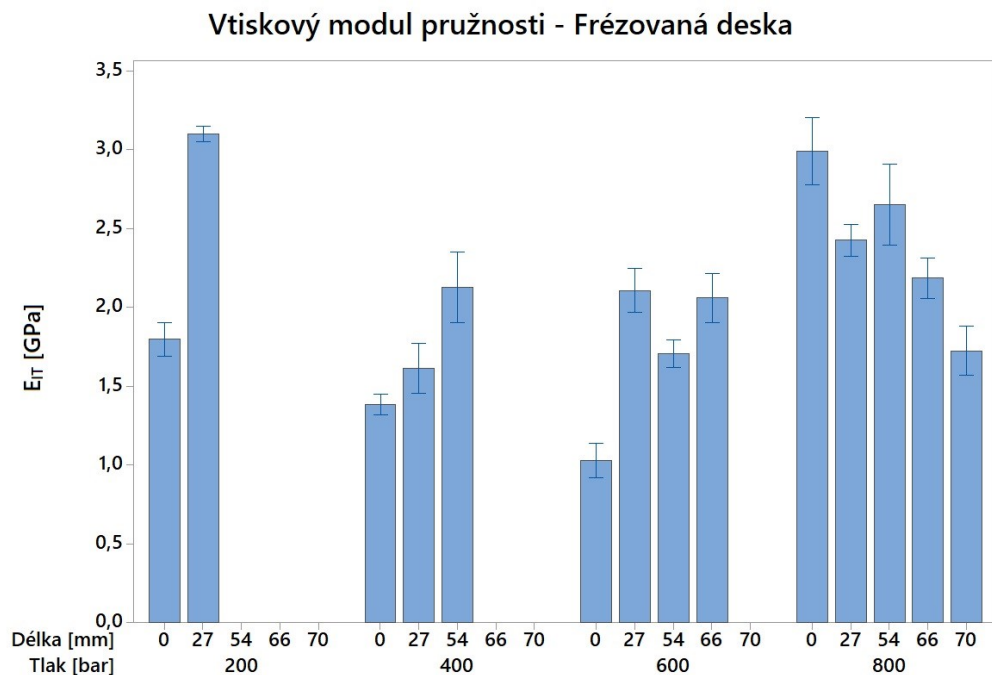
Obr. 47 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – jemný dezén

Při použití desky s jemným dezénem byl nejvyšší vtiskový modul naměřen 3,443 GPa, a to u tlaku 600 bar a v délce 54 mm. V prvních dvou případech 200 a 400 bar dochází k růstu vtiskového modulu. U tlaku 600 bar dochází k růstu vtiskového modulu, ale v délce 66 mm dochází k poklesu. Při tlaku 800 bar dochází k výrazným výkyvům.



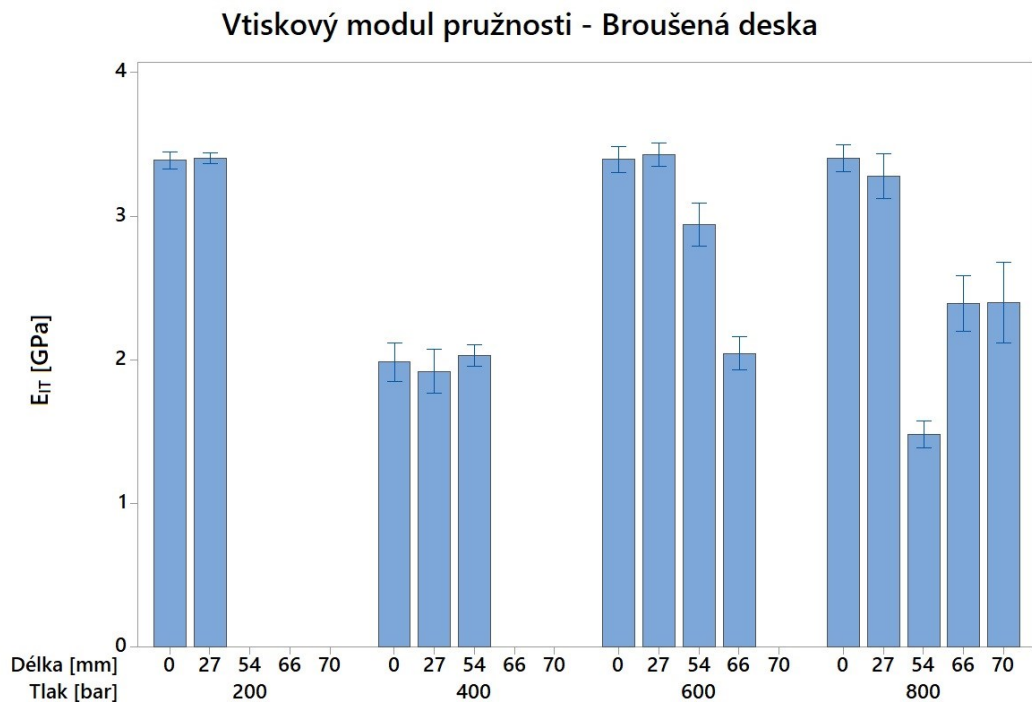
Obr. 48 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – hrubý dezén

Při měření vtiskového modulu u desky s hrubým dezénem byla hodnota 3,468 naměřena jako nejvyšší u tlaku 600 bar na konci v 66 mm. U dalších tlaků 200 a 400 bar byl růst hodnot lineární. U tlaku 600 bar lze vidět růst hodnot, ovšem v délce 27 mm byl zaznamenán menší pokles, poté však hodnoty výrazněji vzrostly. U tlaku 800 bar hodnoty po délku 54 mm lineárně rostou poté, však hodnoty začaly klesat.



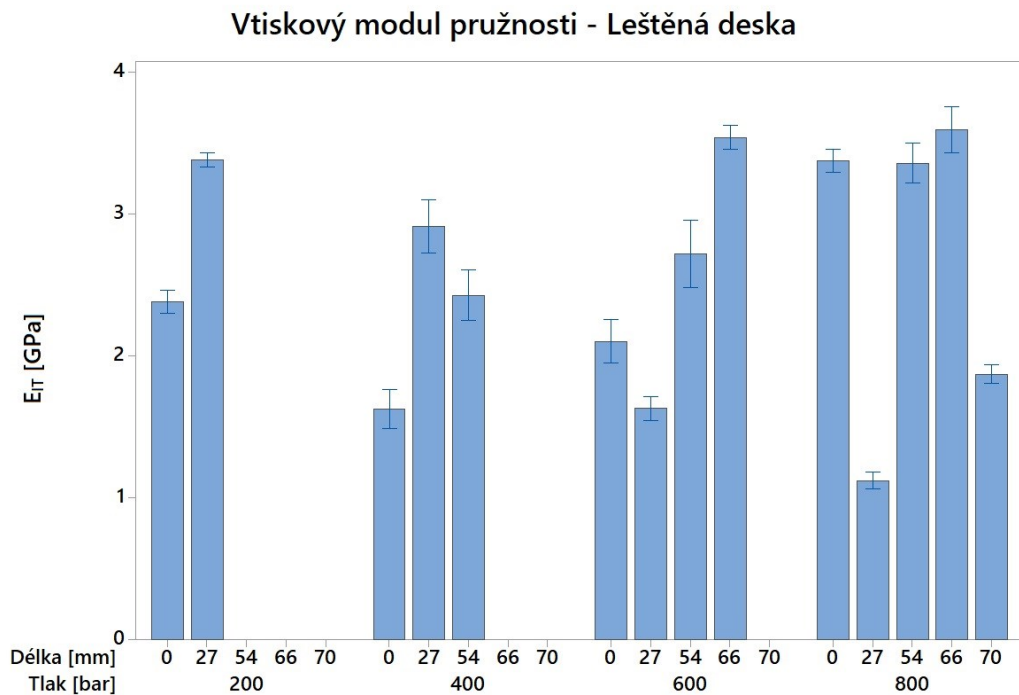
Obr. 49 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – frézovaná deska

U povrchu, který byl frézovaný, byl největší vtiskový modul naměřen při nejnižším vstřikovacím tlaku 200 bar v délce toku 27 mm a to 3,097 GPa. Při vstřikovacím tlaku 400 bar dochází k lineárnímu růstu, se zvětšující délkou roste i vtiskový modul. U tlaku 600 a 800 bar dochází k výkyvům, avšak rozdíl je v tom, že u 600 bar dochází k růstu a u 800 bar spíše k postupnému poklesu.



*Obr. 50 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – broušená deska*

Nejvyšší naměřená hodnota pro broušenou desku 3,427 GPa byla naměřena při použitém tlaku 600 bar v délce 27 mm. U tlaku 200 bar došlo k naměření přibližně stejných hodnot v obou délkách. Při měření hodnot u tlaku 400 bar došlo k výraznému poklesu hodnot vtiskového modulu proti ostatním tlakům. U tlaku 600 a 800 bar jsou pak hodnoty výrazně vyšší než u předchozího tlaku, avšak oba soubory hodnot mají spíše klesající trend.



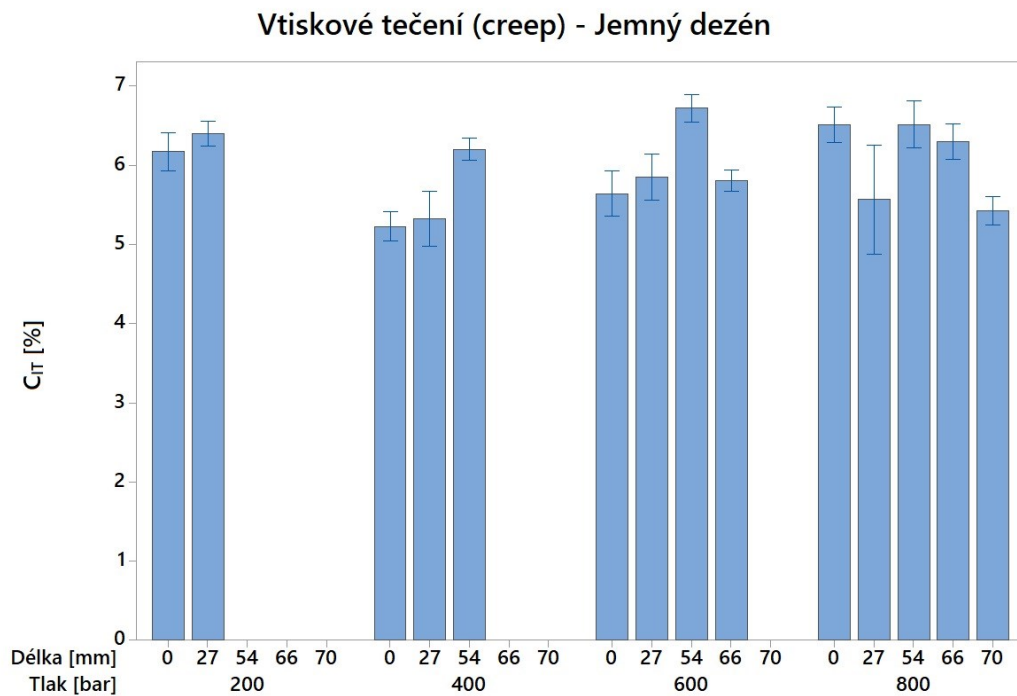
*Obr. 51 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – leštěná deska*

Při měření vtiskového modulu u leštěné desky došlo k výrazným výkyvům hodnot. Při tlaku 200 bar má modul tendenci růstu. U dalších třech tlaků dochází k výrazným výkyvům hodnot. Nejvyšší hodnota vtiskového modulu byla naměřena u tlaku 800 bar v délce 66 mm a to 3,597 GPa.

### 7.3 Vtiskové tečení – creep $C_{IT}$

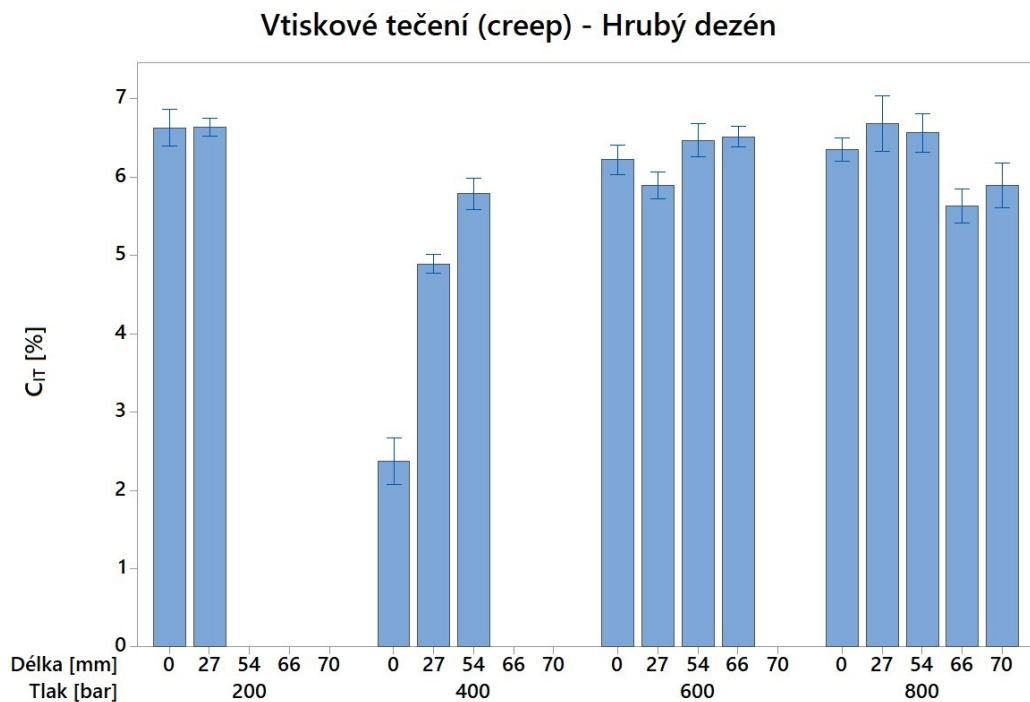
Mezi další veličiny, které byly zkoumány pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti, a také velmi důležité je vtiskové tečení neboli creep. Vtiskové tečení je charakterizováno jako závislost indentační hloubky na čase indentace. Poté, co bylo dosaženo maximální zatěžující síly 1 N, nastává výdrž po určitou dobu na maximální síle. Během tohoto zatížení se projeví vtiskové tečení postupným propadáváním indentoru do materiálu. Lze jej pak určit pomocí vzorce:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 \text{ [%]} \quad (15)$$



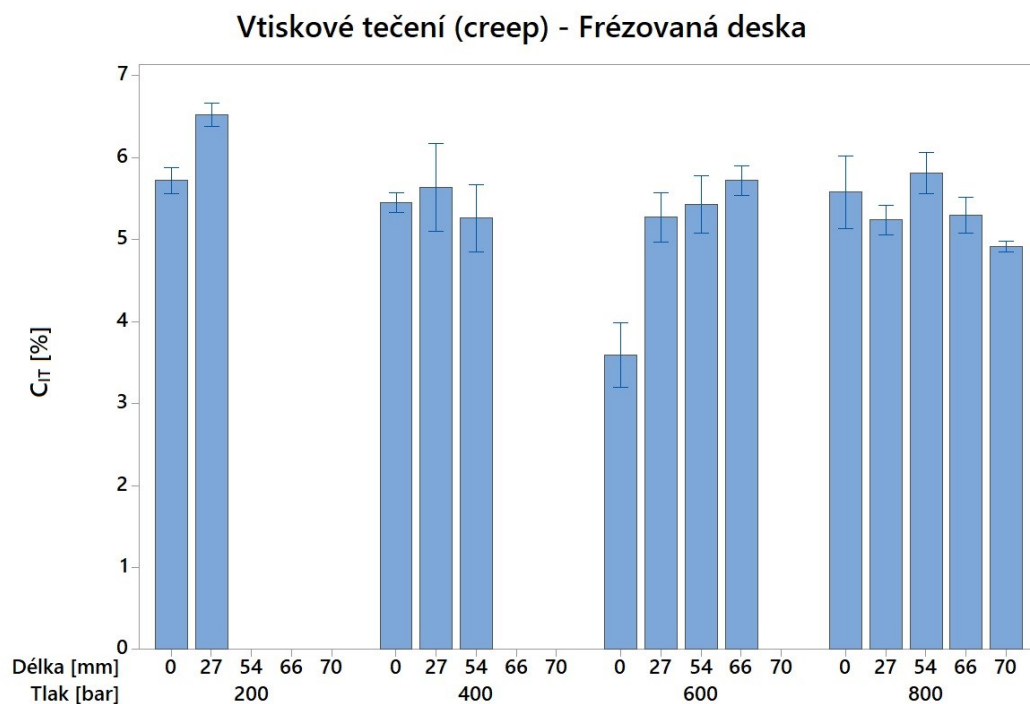
*Obr. 52 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – jemný dezén*

U měření vtiskového tečení s použitím desky s jemným dezénem byla nejvyšší naměřena hodnota 6,718 % při tlaku 600 bar a v délce 66 mm. U hodnot s tlakem 200 a 400 bar dochází k růstu, se zvětšující se délkou roste i vtiskové tečení. U tlaku 600 bar dochází k růstu od vtoku až po délku 66 mm, kde dochází k naměření největší hodnoty a poté dochází k poklesu hodnot. Při použití vstřikovacího tlaku 800 bar dochází k naměření nejvyššího vtiskového tečení ve dvou délkách, a to 0 a 54 mm a poté dochází k poklesu hodnot.



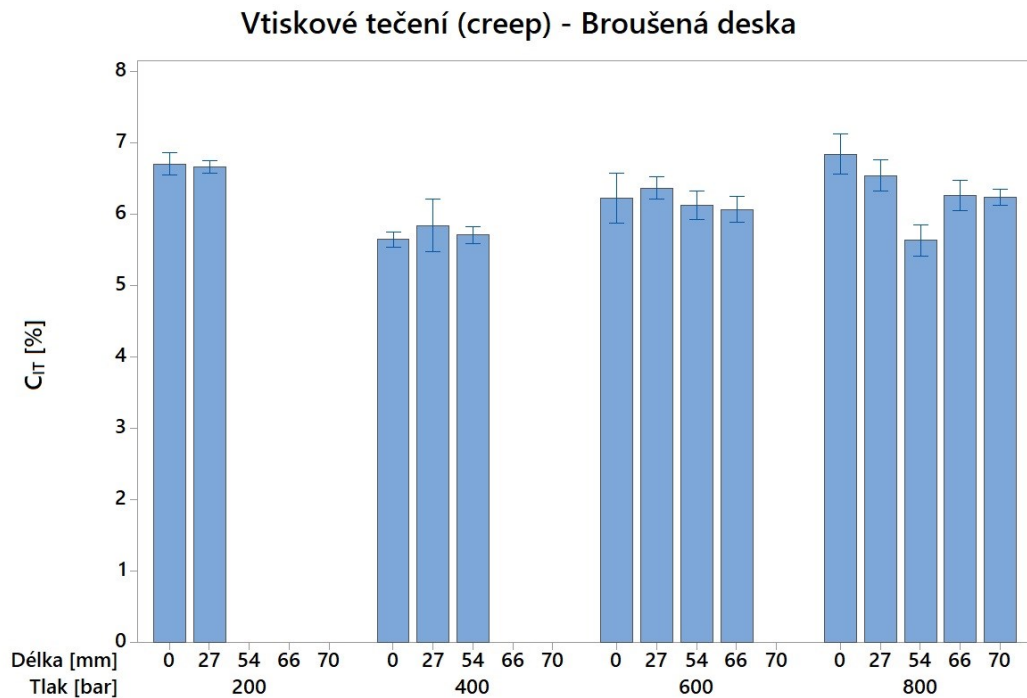
*Obr. 53 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – hrubý dezén*

Při použití desky s hrubým dezénem byla nejvyšší naměřená hodnota 6,682 % při vstřikovacím tlaku 80 baru a v délce 27 mm. U tlaku 200 bar došlo k naměření téměř totožných hodnot u obou délek. U tlaku 400 bar lze vidět lineární růst hodnot. Při vstřikovacím tlaku 600 a 800 bar dochází k menším výkyvům hodnot.



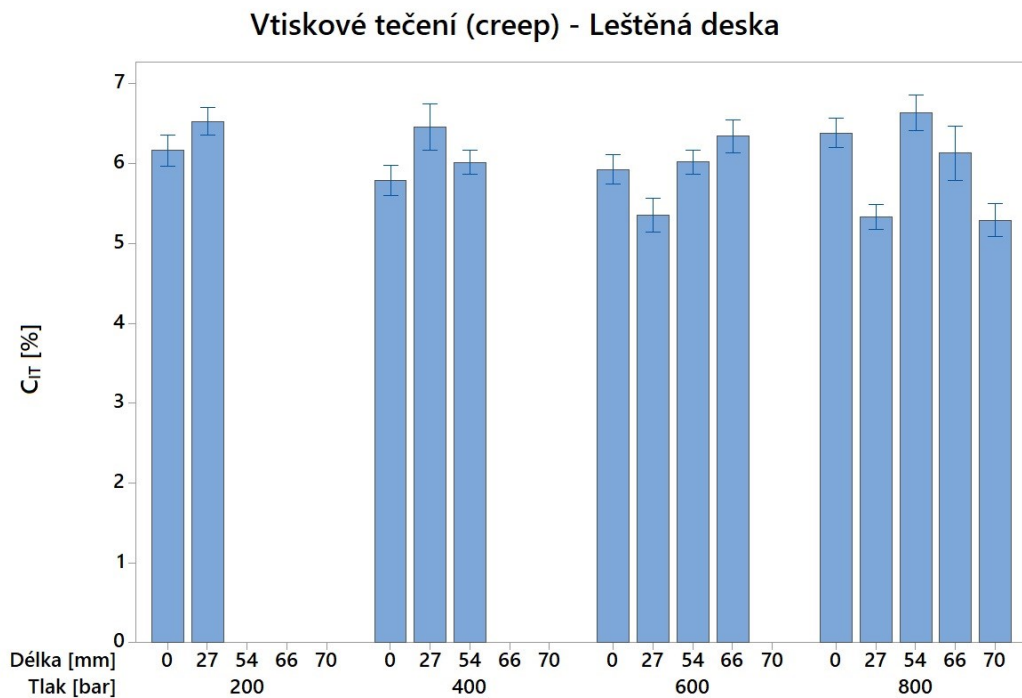
*Obr. 54 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – frézovaná deska*

Při měření vtiskového tečení s použitím frézované desky byla nejvyšší hodnota naměřena při nejmenším vstřikovacím tlaku 200 bar a v délce 27 mm s hodnotou 6,523 %. Následně lze vidět, že u tlaku 200 a 600 bar dochází k postupnému růstu hodnot. Při vstřikovacím tlaku 400 a 800 bar dochází ke kolísání hodnot.



*Obr. 55 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – broušená deska*

Lze vidět z obr. 55, že naměřené hodnoty jsou velice vyrovnané oproti jiným deskám. Nejvyšší hodnota vtiskového tečení, která byla naměřena při použití broušené desky, byla při vstřikovacím tlaku 800 bar na začátku vtoku s hodnotou 6,837%. Dle grafu lze vidět, že ve všech případech dochází spíše ke klesání hodnot s rostoucí délkou.



*Obr. 56 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – leštěná deska*

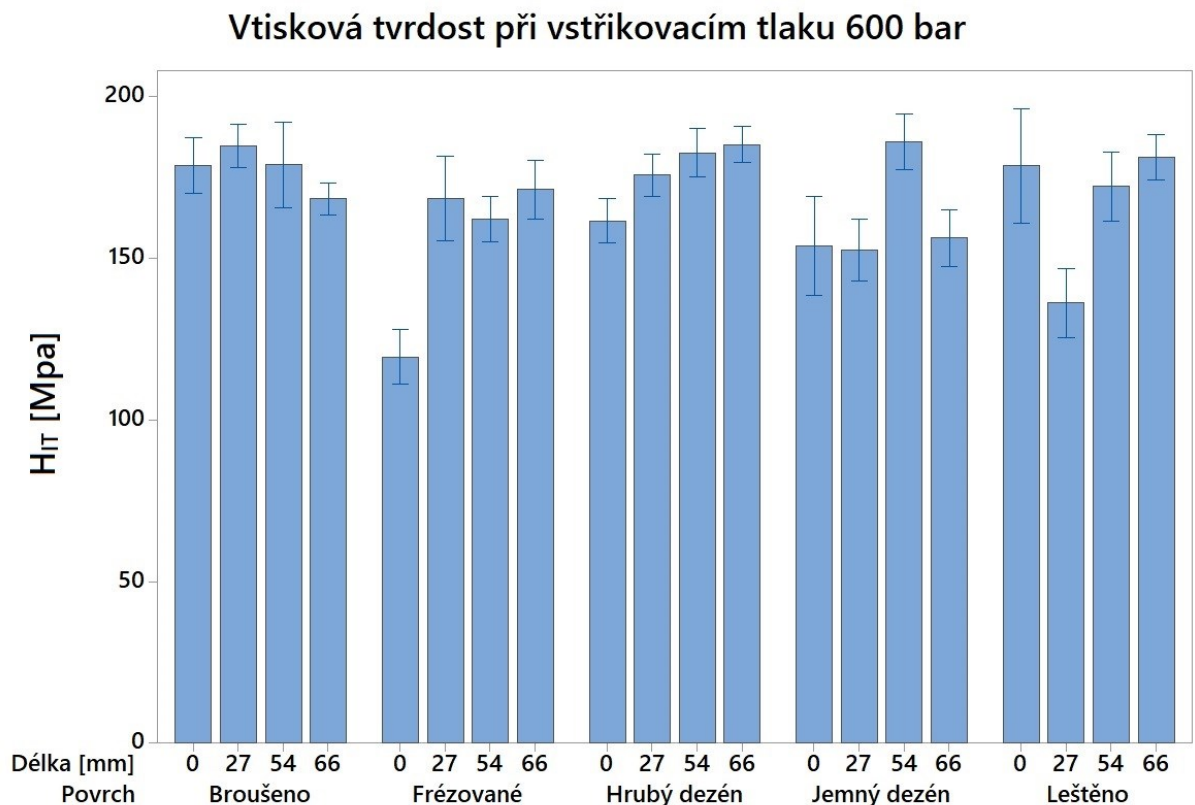
Při měření vtiskového tečení s leštěnou deskou došlo k naměření nevyšší hodnoty 6,636 %. V prvních dvou případech 200 a 400 bar byly nejvyšší hodnoty naměřeny v délce 27 mm a u tlaku 400 bar dochází poté k poklesu hodnot. U tlaku 600 bar dochází s růstem délky a k růstu vtiskového tečení, ovšem v délce 27 mm je menší propad. Při použití vstřikovacího tlaku 800 bar, byla nejvyšší hodnota naměřena v délce 54 mm, poté dochází k postupnému klesání vtiskového tečení.



## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem výzkumu bylo zjistit vliv povrchu desek na zatékavost polymeru a vliv na mechanické vlastnosti, které byly měřeny pomocí Instrumentované zkoušky DSI. Drsnost povrchu desek se pohybovala od  $R_a 0,42 \mu\text{m}$  až po  $R_a 12,74 \mu\text{m}$ . Pro snadnou výměnu desek byla použita vstřikovací forma se snadnou výměnou desek o různé drsnosti. Povrch výměnných desek byl upraven pomocí leštění, broušení, frézování a jemného a hrubého dezénu. Tvarová dutina vstřikovací formy byla spirála. Pro experiment byl vybrán materiál polykarbonát PC. Během experimentu byl měněn vstřikovací tlak jako procesní podmínka a to 200,400,600 a 800 bar. V diskuzi výsledků budou porovnávány jednotlivé výsledky vtiskové tvrdosti –  $H_{IT}$ , vtiskového modulu pružnosti –  $E_{IT}$  a vtiskového tečení neboli creepu –  $C_{IT}$ . Výsledky budou porovnávány při jednom vstřikovacím tlaku, konkrétně byl zvolen tlak 600 bar a také se budou porovnávat mezi jednotlivými typy použitých desek.

### 8.1 Vtisková tvrdost $H_{IT}$

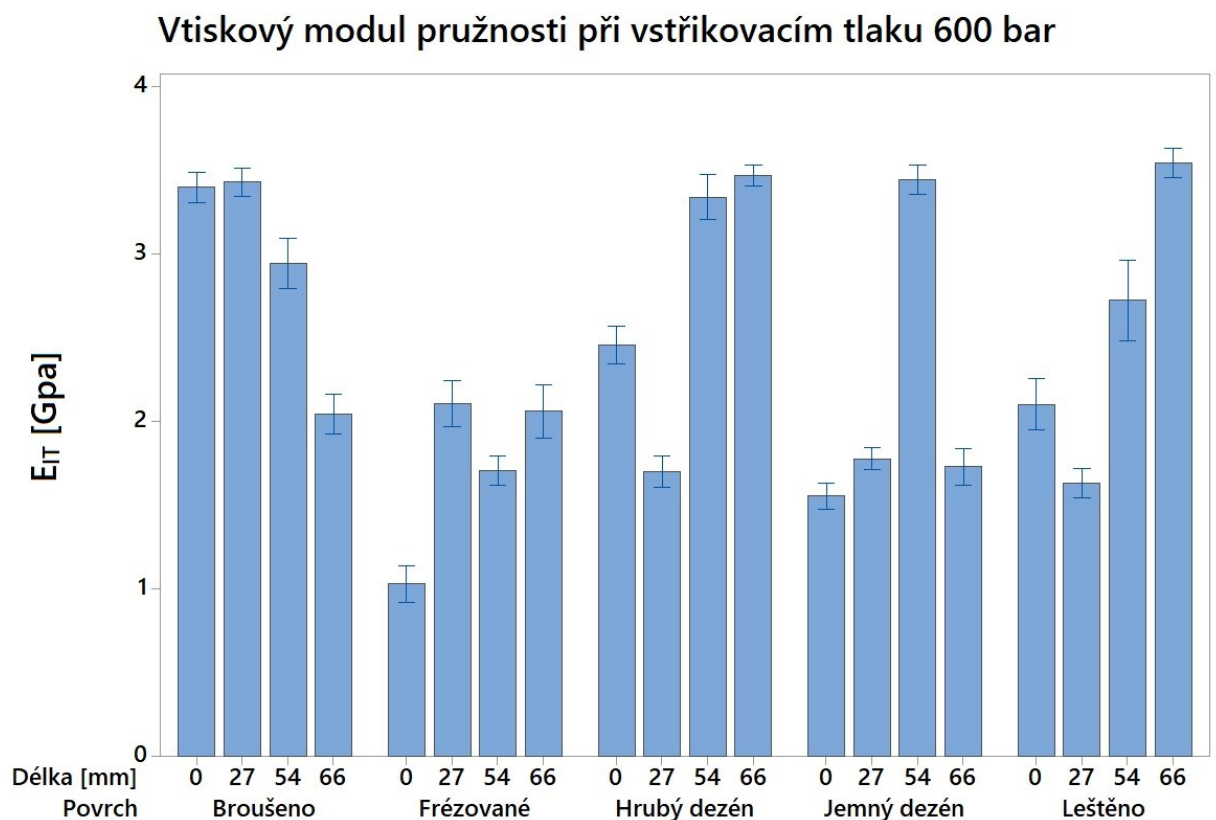


Obr. 57. Porovnání vtiskové tvrdosti v závislosti délky toku a typu povrchu

Na obr. 57 lze vidět srovnání výsledků vtiskové tvrdosti pro vstřikovací tlak 600 bar a při použití všech výměnných desek o různé drsnosti povrchu. Jak lze vidět z obr. 57 u povrchu

s jemným dezénem a leštěného byl poměrně značný výkyv hodnot. U povrchu s hrubým dezénem si lze všimnout lineárního růstu, kdy nejnižší hodnota byla naměřena na začátku vtoku, a to 161,473 MPa a poté vtisková tvrdost rostla až po konec spirály v délce 66 mm, kde byla naměřená vtisková tvrdost 185,083 MPa. U desky s frézovaným povrchem si lze všimnout, že hodnoty měly tendenci lineárního růstu, ovšem v délce 27 mm došlo k menšímu nárůstu, a tak k vychýlení lineární části. Zde byla nejnižší hodnota naměřena opět na začátku vtoku a to 119,408 MPa a opět na konci spirály v délce 66 mm a to 171,228 MPa. Při použití desky s broušeným povrchem si lze všimnout, že nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena v délce toku 27 mm a poté docházelo ke klesání hodnot. Lze říci, že u broušeného povrchu se zvětšující se délkou toku klesá vtisková tvrdost. Naopak u drsnějšího povrchu, jako je frézovaný či hrubý dezén, byla nejnižší hodnota na začátku vtoku a se zvětšující se délkou také rostla vtisková tvrdost. Vůbec nejvyšší vtisková tvrdost byla naměřena u povrchu s jemným dezénem, a to 185,950 MPa. Naopak nejnižší vtisková tvrdost byla naměřena u povrchu, který byl frézován a to 199,408 MPa ihned na začátku vtoku.

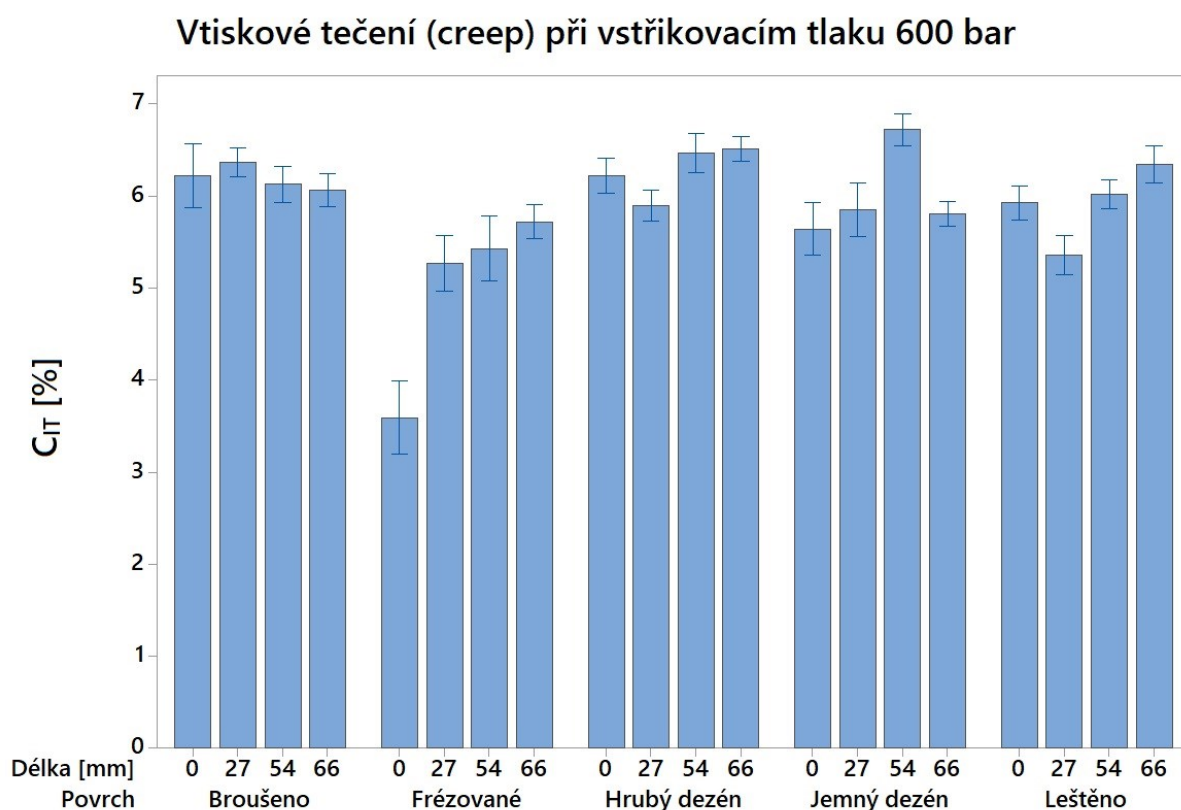
## 8.2 Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$



Obr. 58 Porovnání vtiskového modulu pružnosti v závislosti délky toku a typu povrchu

Při měření vtiskového modulu pružnosti si lze všimnout, že vůbec nejnižší hodnoty byly naměřeny u frézovaného povrchu. Celkově nejnižší hodnota byla naměřena u frézovaného povrchu na začátku v toku a to 1,028 GPa, naopak nejvyšší hodnota byla naměřena u leštěného povrchu 3,541 GPa, a to na konci toku v délce 66 mm. U broušeného povrchu si lze všimnout, že hodnoty měly tendenci spíše klesat. Naopak u ostatních povrchů měly hodnoty spíše tendenci stoupat, výjimkou jsou určité propady v některých vzdálenostech např. hrubý dezén v délce toku 27 mm.

### 8.3 Vtiskové tečení $C_{IT}$



*Obr. 59 Porovnání vtiskového tečení v závislosti délky toku a typu povrchu*

Při měření vtiskového tečení bylo dosaženo maximální síly zatížení 1 N po určitou dobu, aby došlo k projevení creepu neboli vtiskového tečení.

Jak si lze všimnout, u broušeného povrchu došlo opět k tomu, že hodnoty měly tendenci spíše klesat se zvětšující se délkou toku. Nejvyšší naměřené vtiskové tečení u broušeného povrchu bylo v délce 27 mm, poté však došlo ke klesání hodnot. Naopak u frézovaného povrchu si lze všimnout, že hodnoty měly tendenci stoupat. Nejnižší hodnota vtiskového tečení byla naměřena na začátku vtoku a poté došlo k růstu hodnot se zvětšující se délkou toku. Podobný trend má i povrch s hrubým dezénem a leštěný povrch. U obou případů si lze

povšimnout, že v délce toku 27 mm došlo k menšímu propadu, avšak poté již hodnoty se zvětšující se délkou rostly. U povrchu s jemným dezénem docházelo ke stoupání hodnot se zvětšující se délkou, ale v poslední měřené části 66 mm došlo ke klesání. Celkově nejvyšší tečení bylo naměřeno u povrchu s jemným dezénem, a to 6,718 %. Naopak nejnižší tečení bylo zaznamenáno u frézovaného povrchu na začátku vtoku a 3,588 %.

## ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala zkoumáním vlivem délky toku a procesních parametrů vstřikování na mikro-mechanické vlastnosti vstřikovaného tělesa. Jako procesní parametr vstřikovacího stroje byl zvolen vstřikovací tlak, který se měnil od 200 bar až po 800 bar. Dalším proměnným kritériem byl typ povrch vstřikovací desky. Povrch se měnil pomocí výměnné desky. Deska měla odlišnou drsnost povrchu a byla upravena pomocí leštění, broušení, frézování a jemný, hrubý dezén.

Teoretická část diplomové práce se věnovala problematice vstřikování, vstřikovacím formám, polymerním materiálů a poslední části pak Instrumentované zkoušky DSI, pomocí které byly mikro-mechanické vlastnosti měřeny. První bod teoretické části se věnoval polymernímu materiálu a reologickým vlastnostem. Zde byl popsán konkrétní stav polykarbonátu. Druhým bodem pak byla problematika vstřikování a popis vstřikovacího cyklu. Ve třetím bodě byla řešena vstřikovací forma a její části. V posledním čtvrtém bodě byla rozebrána zkouška DSI, její vyhodnocení a popsány konkrétní měřené vlastnosti.

Samotná praktická část obsahovala popis vstřikování zkušebních těles. Byly zde popsány procesní podmínky, vlastnosti polymeru a okolnosti ohledně vstřikovací formy. Poté byly znázorněny výsledky, které obsahovaly vliv délky toku na procesních parametrech a vlivu povrchu desky. Poslední část pak obsahovala vyhodnocení mikro-mechanických vlastností na povrchu desek, délky toku a procesních parametrech.

Pomocí studie bylo potvrzeno, že vstřikovací tlak má značný vliv na délku zatečení. Z obr. 40 lze vidět, že ve všech případech použitých desek měl tlak vliv na délku zatečení. Určitý vliv na délku zatečení měl i typ povrchu desek. U drsnějších povrchů, jako je hrubý dezén či frézovaný povrch došlo k delšímu zatečení, oproti lepším povrchu jako např. broušený nebo leštěný povrch. Z těchto výsledků lze usoudit, že povrch desek měl vliv na zatékavost polymerního materiálu. Nejvyšší hodnoty zatékavosti materiálu jevil povrch s hrubým dezénem. Naopak nejnižší zatékavost se projevila u povrchu, které byl broušený a leštěný.

U vyhodnocení výsledků mikro-mechanických vlastností se ukázal obecný závěr. Během měření všech vzorků bylo zjištěno, že procesní podmínky i typ povrchu měl určitý vliv na mikro-mechanické vlastnosti. Nebyl však bohužel zjištěn konkrétní trend změn mikro-mechanických vlastností.

Určitou výjimkou byl povrch z broušené desky, kdy bylo viditelné, že největší naměřené hodnoty u vzorků byly na začátku toku, až po délku 27 mm, a poté docházelo ke klesání

mikro-mechanických vlastností. Tento průběh byl potvrzen u všech tří vlastností. Nejvyšší vtisková tvrdost vstřikovaných vzorků pro desku s broušeným povrchem byla naměřena 184,574 MPa, a poté docházelo k poklesu hodnot až k nejmenší hodnotě, která byla naměřena v délce 66 mm, což odpovídá měření na konci toku, a to 168,375 MPa. Další vlastností byl pak vtiskový modul pružnosti. Při tomto měření byla nejvyšší hodnota u vstřikovaného vzorku naměřena 3,427 GPa, a poté docházelo ke klesání. Nejnižší hodnota byla naměřena opět na konci toku v délce 66 mm, a to 2,042 GPa. Také při měření vtiskového tečení došlo ke stejnému průběhu. Nejvyšší vtiskové tečení bylo opět na začátku toku 6,363 %, a poté docházelo k poklesu hodnot a nejmenší vtiskové tečení bylo naměřeno opět na konci toku v délce 66 mm, a to 6,062 %.

Opakem bylo měření vstřikovaných vzorků s použitím desky s frézovaným povrchem, který byl drsnější než broušený a docházelo tak k opačnému jevu. Nejmenší hodnoty byly naměřeny na začátku toku a největší na konci. Vtisková tvrdost, vtiskový modul pružnosti a vtiskové tečení, které byly měřeny na začátku toku, se jevily jako nejmenší:  $H_{IT}$  119,408 MPa  $E_{IT}$  1,028 GPa a  $C_{IT}$  3,588%. A nejvyšší hodnoty, které byly naměřeny na konci toku, byly:  $H_{IT}$  171,228 MPa  $E_{IT}$  2,105 GPa a  $C_{IT}$  5,718%.

Celkově nejvyšší naměřené hodnoty vtiskové tvrdosti vstřikovaných vzorků se jevily při použití desky s povrchem, který byl vyroben pomocí broušení. Naopak nejmenší naměřené hodnoty vtiskové tvrdosti vstřikovaných vzorků se jevily při použití desky, která byla vyrobena pomocí frézování. Největší naměřený vtiskový modul pružnosti u vstřikovaných vzorků, byl naměřen při použití desky s broušeným povrchem. Naopak nejmenší vtiskový modul pružnosti u vzorků, byl naměřen při použití desky s povrchem vyrobeného pomocí frézování. Největší vtiskové tečení, které bylo naměřeno u vstřikovaných vzorků, se jevilo při použití desky s hrubým dezénem. Naopak nejmenší vtiskové tečení bylo naměřeno u vzorků s použitím desky s frézovaným povrchem.

Pomocí těchto aplikací a zkoumání zkoušek tečení či mikro-mechanických vlastností lze aplikovat při výrobě a navrhování vstřikovacích forem. Lze tak snížit náklady na výrobu a dokončovací operace vstřikovacích forem. Snížit tak vysoké náklady a ušetřit peníze, které v dnešní době hrají při navrhování a výrobě velkou roli.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír, 2018. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-802-7106-141.
- [2] VOJTĚCH, Dalibor, 2010. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [3] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK, 2000. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles. ISBN 80-859-2072-7.
- [4] BOBČÍK, Ladislav, 1999. *Formy pro zpracování plastů. I. díl, Vstřikování termoplastů*. Brno: Uniplast Brno.
- [5] LENFELD, Petr, *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)
- [6] OSSWALD, Tim A. a Georg MENGES, [2012]. *Material science of polymers for engineers*. 3rd edition. Cincinnati: Hanser Publishers. ISBN 978-1-56990-514-2.
- [7] MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK, 2001. *Aplikovaná reologie*. 3rd edition. Zlín: Univerzita Tomáše Bati. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-731-8039-1.
- [8] WANG, Lijun, Jianhui QIU a Eiichi SAKAI, 2017. Thermal behavior and mechanical properties of nanocomposites of polycarbonate reinforced with multiwalled carbon nanotubes. *Polymer Composites* [online]. 38, E303-E313 [cit. 2020-01-15]. DOI: 10.1002/pc.23801. ISSN 02728397. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.23801>
- [9] HARPER, Charles A. a Edward M. PETRIE, c2003. *Plastics materials and processes: a concise encyclopedia*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience. ISBN 04-714-5603-9.
- [10] KONTOPOULOU, Marianna a Edward M. PETRIE, c2012. *Applied polymer rheology: polymeric fluids with industrial applications*. Hoboken, N.J.: Wiley. ISBN 978-047-0416-709.
- [11] STANĚK, Michal, 2017. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů*. Zlín. Habilitační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [12] JANOSTIK, Vaclav et al., 2016. The Influence of runner system on production of injection molds. *MATEC Web of Conferences* [online]. 76 [cit. 2020-01-15]. DOI:

- 10.1051/matecconf/20167602022. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/matecconf/20167602022>
- [13] TOMIS, František, 1987. *Gumárenská a plastikářská technologie: zpracovatelské procesy*. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické.
- [14] LENFELD, Petr, 2016. *Technologie vstřikování* [online]. Brno: Code Creator [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
- [15] DUCHÁČEK, Vratislav a Jaromír ŠŇUPÁREK, 2011. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [16] MICHAELI, Walter, c2001. *Training in injection molding: a text- and workbook*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Gardner Publications. ISBN 15-699-0302-6.
- [17] FIALA, Tomáš, 2019. *Studium vlivu procesních parametrů na tvrdost vstřikovaných polymerů*. Zlín. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [18] BOBEK, Jiří, 2016. *Princip technologie vstřikování termoplastů* [online]. Code Creator [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>
- [19] SEIDL, Martin, 2016. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. Code Creator [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/03.html>
- [20] SOVA, Miloš a Josef KREBS, 2001. *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashöfer. ISBN 80-862-2915-7.
- [21] BRYCE, Douglas M. a Josef KREBS, c1998. *Plastic injection molding: mold design and construction fundamentals*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers. ISBN 08-726-3495-7.
- [22] REES, Herbert a Josef KREBS, 2001. *Understanding injection mold design: mold design and construction fundamentals*. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications. ISBN 15-699-0311-5.
- [23] GASTROW, Hans, E. LINDNER a P. UNGER, c2002. *Injection molds: 130 proven designs*. 3rd ed. / edited by Edmund Lindner and Peter Unger. Cincinnati: Hanser/Gardner [distributor]. ISBN 15-699-0316-6.
- [24] KOČMAN, Karel, Jaroslav PROKOP a P. UNGER, 2001. *Technologie obrábění: 130 proven designs*. 3rd ed. / edited by Edmund Lindner and Peter Unger. Brno: CERM. ISBN 80-214-1996-2.
- [25] MAŇKOVÁ, Ildikó, Jaroslav PROKOP a P. UNGER, 2000. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 3rd ed. / edited by Edmund Lindner and Peter Unger. Košice: Vienala. ISBN 80-709-9430-4.



- [26] LUKOVICS, I. Konstrukční materiály a technologie. Brno, VUT 1992, ISBN 80-214-0399-3
- [27] OVSÍK, Martin, 2013. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*. Zlín. Disertační práce.
- [28] DUŠEK, Jiří, 2008. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno. Disertační práce. Masarykova Univerzita v Brně.
- [29] PTÁČEK, Luděk, 2001. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM. ISBN 80-720-4193-2.
- [30] ČTVRTLÍK, Radim. Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev. Olomouc, 2009, 155 s. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci
- [31] CHENG, Yang-Tse a Che-Min CHENG, 2004. Scaling, dimensional analysis, and indentation measurements. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 44(4-5), 91-149 [cit. 2020-01-16]. DOI: 10.1016/j.mserr.2004.05.001. ISSN 0927796X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X04000415>
- [32] *Materials Science and Engineering: A* [online], 1998. 253(1-2) [cit. 2020-01-16]. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509398007242>
- [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. 2020-01-16]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.031. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360601171X>
- [34] 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. 2020-01-16]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.10.017. ISSN 00207683. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768306004239>
- [35] DOERNER, M.F., W.D. NIX a X. CHEN, 1986. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments. *Journal of Materials Research* [online]. 1(4), 601-609 [cit. 2020-01-16]. DOI: 10.1557/JMR.1986.0601. ISSN 0884-2914. Dostupné z: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0884291400000662/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0884291400000662/type/journal_article)

- [36] OLIVER, W.C., G.M. PHARR a X. CHEN, 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research* [online]. 7(6), 1564-1583 [cit. 2020-01-16]. DOI: 10.1557/JMR.1992.1564. ISSN 0884-2914. Dostupné z: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0884291400017039/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0884291400017039/type/journal_article)
- [37] NIX, William D., Huajian GAO a X. CHEN, 1998. Indentation size effects in crystalline materials: A law for strain gradient plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [online]. 46(3), 411-425 [cit. 2020-01-16]. DOI: 10.1016/S0022-5096(97)00086-0. ISSN 00225096. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022509697000860>
- [38] MANAS, David et al., 2018. The Effect of Irradiation on Mechanical and Thermal Properties of Selected Types of Polymers: A law for strain gradient plasticity. *Polymers* [online]. 10(2), 411-425 [cit. 2020-01-16]. DOI: 10.3390/polym10020158. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2073-4360/10/2/158>
- [39] BALTA-CALLEJA, F. J. a Stoyko FAKIROV, 2000. *Microhardness of polymers*. Cambridge, [England]: Cambridge University Press. ISBN 05-216-4218-3.
- [40] MOTYKA, Andrea L., 1996. An Introduction to Rheology with an Emphasis on Application to Dispersions. *Journal of Chemical Education* [online]. 73(4) [cit. 2020-01-16]. DOI: 10.1021/ed073p374. ISSN 0021-9584. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed073p374>
- [41] CSN EN ISO 14577-1 *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda*, Říjen 2002. 31s.

**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

$\nu_i$  Poissonův poměr vnikajícího tělesa

$\nu_s$  Poissonův poměr zkoušeného tělesa

$C_{IT}$  Vtiskové tečení (creep)

$H_{IT}$  Vtisková tvrdost

$H_{VIT}$  Tvrdost dle Vickerse

$n_{IT}$  Koeficient zpětné relaxace

$W_e$  Elastická deformační práce

$W_p$  Plastická deformační práce

$W_t$  Celková deformační práce

PC Polykarbonát

ABS Akrylonitrilbutadienstyren

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 zesklenní

UP Polyesterové pryskyřice

HRC Zkouška tvrdosti dle Rockwella

P-V-T Tlak-Měrný objem-Teplota

G Elasticita

$\eta$  Viskozita

$\tau$  Relaxační doba

ITT Index toku taveniny

MFR Melt Flow Rate

MVR Melt Volume Rate

HM Tvrdost dle Martense

SVS Studený vtokový systém

VVS Vyhřívaný vtokový systém

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 Rozdělení polymerů</i> .....	11
<i>Obr. 2 Amorfni a semikrystalické uspořádání [5]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Chemický vzorec polykarbonátu [15]</i> .....	13
<i>Obr. 4 Maxwellův model [40]</i> .....	14
<i>Obr. 5 Toková křivka látek [11]</i> .....	15
<i>Obr. 6 Fontánový tok [11]</i> .....	15
<i>Obr. 7 Zkouška zabíhavosti [7]</i> .....	16
<i>Obr. 8 Vstřikovací cyklus [11]</i> .....	18
<i>Obr. 9 Průběhy přepnutí na dotlak [14]</i> .....	19
<i>Obr. 10 Diagram p.v.T [11]</i> .....	20
<i>Obr. 11 Tlaky při vstřikování [14]</i> .....	21
<i>Obr. 12 Vliv teploty taveniny na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje [17]</i> .....	21
<i>Obr. 13 Vstřikovací stroj [11]</i> .....	22
<i>Obr. 14 Vstřikovací tryska [4]</i> .....	23
<i>Obr. 15 Vstřikovací jednotka [19]</i> .....	24
<i>Obr. 16 Hydraulická jednotka, (a) otevřený, (b) uzavřený [19]</i> .....	24
<i>Obr. 17 Hydraulicko-mechanická jednotka, .....</i>	25
<i>Obr. 18 Řez vstřikovací formou [11]</i> .....	26
<i>Obr. 19 Vtoková vložka [17]</i> .....	27
<i>Obr. 20 Průřez kanálků [17]</i> .....	28
<i>Obr. 21 Jakost povrchu [11]</i> .....	31
<i>Obr. 22 Indentační křivka a časový diagram indentační křivky [27]</i> .....	33
<i>Obr. 23 Průběh zatížení a odlehčení indektoru: a) zatížení, b) odlehčení, c) opětovné zatížení [27]</i> .....	34
<i>Obr. 24 Nespojitý průběh indentačních křivek [30]</i> .....	35
<i>Obr. 25 Závislost zatížení – čas (a), hloubka průniku – čas (b) [27]</i> .....	35
<i>Obr. 26 Tvary indentačních křivek [27]</i> .....	36
<i>Obr. 27 Schématické znázornění hloubky vtisku [27]</i> .....	37
<i>Obr. 28 Indentační křivka [27]</i> .....	37
<i>Obr. 29 Schéma zatěžování a odlehčování [27]</i> .....	38
<i>Obr. 30 Vtiskové tečení [27]</i> .....	39
<i>Obr. 31 Vtisková relaxace [27]</i> .....	40
<i>Obr. 32 Deformační práce [27]</i> .....	41
<i>Obr. 33 Kombinace výroby zkušebních těles</i> .....	44

<i>Obr. 34 Vstříkovací stroj Allrounder 470 C Golden Edition.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 35 Vstříkovaný materiál .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 36 3D model vstříkovací formy .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 37 Označení desek a jejich povrch .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 38 Řez dutinou formy.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 39. Přípravek pro měření délky .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 40 Délka zatečení při různém typu desky a vstříkovacího tlaku.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 41 Micro Combi Tester.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 42. Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – jemný dezén .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 43 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – hrubý dezén.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 44 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – frézovaná deska .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 45 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – broušena deska .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 46 Vtisková tvrdost v závislosti na délce toku a tlaku – leštěná deska.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 47 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – jemný dezén.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 48 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – hrubý dezén .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 49 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – frézovaná deska.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 50 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – broušená deska .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 51 Vtiskový modul v závislosti na délce toku a tlaku – leštěná deska .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 52 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – jemný dezén .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 53 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – hrubý dezén .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 54 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – frézovaná deska .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 55 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – broušená deska .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 56 Vtiskové tečení v závislosti na délce toku a tlaku – leštěná deska .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 57. Porovnání vtiskové tvrdosti v závislosti délky toku a typu povrchu .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 58 Porovnání vtiskového modulu pružnosti v závislosti délky toku a typu povrchu ...</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 59 Porovnání vtiskového tečení v závislosti délky toku a typu povrchu.....</i>	<i>67</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 Základní parametry materiálu .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 2 Technologické parametry .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 3 Podmínky sušení .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 4 Jakost výměnných desek .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 5 Hodnoty délek zatečení při různých tlacích a typu desek .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 6 Odchylky délek zatečení při různých tlacích a typu desek.....</i>	<i>50</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

- P1            CD obsahující
- Diplomovou práci (.pdf)
  - Technický list ARBURG ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION