



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNICKÁ VISKÓZNÍ KŘIVKA PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

TECHNICAL VISCOUS CURVE FOR INJECTION MOLDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anna Hejkalová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bohumil Kandus

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Anna Hejkalová
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Bohumil Kandus
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technická viskózní křivka pro vstřikování plastů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při vstřikování plastů do forem jsou velmi důležité tokové vlastnosti tavenin plastů. Viskozitu tavenin plastů lze snižovat (zlepšovat tokové vlastnosti) zvyšováním teploty a smykové rychlosti, která je závislá na tlaku v tavenině a na rychlosti vstřikování. Vstřikování s ohledem na technickou viskózní křivku umožňuje určit optimální hodnotu vstřikovací rychlosti při níž už odpor proti vstřikování neumožňuje zlepšení tokových vlastností taveniny. Vstřikování na technickou viskózní křivku přináší zvýšení a zrovnoměnění kvality výstřiků a také ekonomicky vyhodnotitelné přínosy.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je experimentem ověřená a potvrzená výhodnost vstřikování na technickou viskózní křivku na konkrétním vstřikovacím stroji v porovnání se standardním postupem nastavování procesních parametrů stroje.

Cílem práce je ověření stability vstřikovacího procesu s dopadem na kvalitu výstřiku plastového dílce a na ekonomiku výroby.

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-25-3.

KAZMER, David O. Injection Mold Design Engineering. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-156990-570-8.

WOEBCKEN, Wilbrand. International Plastics Handbook: for the Technologist, Engineer and User. 3rd ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 1995. ISBN 1-56990-182-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

HEJKALOVÁ Anna: Technická viskózní křivka pro vstřikování plastů.

Vstřikování je velmi závislé na tokových vlastnostech plastů. Bakalářská práce srovnává konvenční měření jejich reologických vlastností s metodou vstřikování na technickou viskózní křivku. Tato metoda umožňuje určit optimální hodnotu vstřikovací rychlosti, při níž už odpor proti vstřikování neumožňuje výrazné zlepšení tokových vlastností taveniny, naopak zvyšuje energetickou spotřebu procesu. Zároveň se snaží prokázat výhodnost této metody.

Klíčová slova: plast, vstřikování, technická viskózní křivka, reologie

ABSTRACT

HEJKALOVÁ Anna: Technical viscous curve for injection molding.

Injection molding is highly dependent on flow qualities of plastics. The bachelor thesis compares the conventional measurement of their rheological attributes with the method of injection molding to the technical viscous curve. This method enables to determine the optimum injection rate at which injection resistance does not allow significant improvement of the melt's flow attributes, on the contrary increases the energy consumption of the process. At the same time, the thesis tries to prove the advantage of this method.

Keywords: plastic, injection molding, technical viscous curve, rheology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HEJKALOVÁ, Anna. *Technická viskózní křivka pro vstřikování plastů*. Brno, 2018. 31s, 3 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 25.5.2018

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych touto cestou poděkovat vedoucímu, panu Ing. Bohumilu Kandusovi, za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D., za připomínky k obsahu práce, Bc. Janu Vysokaiovi za pomoc při realizaci experimentu. Dále sestře Mgr., Bc. Neli Hejkalové za korekturu a v neposlední řadě rodičům, že mi toto studium umožnili.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
	Str.
ÚVOD	10
1 SYNTETICKÉ PLASTY	11
1.1 Rozdělení plastů	12
1.2 Charakteristické teploty.....	14
2 PRINCIP TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ	17
2.1 Popis vstřikovacího stroje a formy	17
2.2 Vstřikovací proces.....	18
2.3 Tokové chování plastů při vstřikování	20
2.4 Měření viskozity.....	22
2.4.1 Index toku taveniny	22
2.4.2 Spirálová metoda.....	22
2.4.3 Metoda vstřikování na technickou viskózní křivku	23
3 NÁVRH IDEÁLNÍCH VSTUPNÍCH PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ POMOCÍ TECHNICKÉ VISKÓZNÍ KŘIVKY	26
3.1 Měření technické viskózní křivky	26
3.2 Vyhodnocení technické viskózní křivky	27
3.3 Ekonomické zhodnocení aplikace metody VTVK.....	29
4 ZÁVĚRY	31
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů	
Seznam použitých zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [1], [2]

Plastové výrobky se těší čím dál větší oblibě. Příčinou je snadná výroba a velmi variabilní vlastnosti. Jsou elektricky nevodivými dielektriky s vysokou životností, jednoduše tepelně a tlakově tvarovatelné, disponující nízkou tepelnou a zvukovou vodivostí. Také umožňují rozmanitou povrchovou a estetickou variabilitu. Z toho plyne i široké pole jejich využití sahající od automobilového a leteckého průmyslu, přes stavebnictví až po obalovou techniku.

Oproti kovům jsou vysoce chemicky odolné a navíc mají mnohonásobně nižší hmotnost, což se podepisuje i na nákladech za dopravu. Další faktor snižující výslednou cenu výrobku je možnost velmi rychle vyrábět velké série, aniž by se snížila kvalita dílu. I přes to se může stát, že produkt není dostatečně rentabilní z důvodu nestability procesu, vysoké zmetkovitosti a dlouhých časů vstřikovacích cyklů. Tyto problémy pramení především z neúplné znalosti tokových vlastností plastů, které značně ovlivňují nejen průběh vstřikování, ale i výslednou kvalitu dílu. Proto je nezbytné se jejich reologií hlouběji zabývat. Například pomocí metody vstřikování na technickou viskózní křivku.



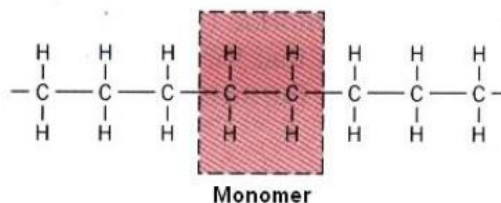
Obr. 1 Příklady použití plastů [3], [4], [5], [6]

1 SYNTETICKÉ PLASTY [1], [7], [8]

Syntetické plasty spadají do kategorie polymerů. Chemických látek skládajících se z makromolekul, které vznikají opakovaným spojováním merů, tedy základních stavebních jednotek. Každý z nich obsahuje atomy uhlíku, které se na sebe váží a vytváří dlouhé řetězce. Z těchto makromolekulárních chemických látek se stávají plasty až ve chvíli, kdy jsou smíšeny s nezbytnými přísadami a zpracovány do formy vhodné k dalšímu technologickému kroku (granule, prášky, tablety, ...).

Existují tři druhy reakcí, jimiž lze polymery vytvořit:

a) Polymerace, jejíž reakce je velmi rychlá a lze ji řídit. Monomery rozštěpí své násobné vazby tak, aby na jeho krajích vznikly nepárové elektrony, které se následně naváží na další stejně přetvořenou jednotku (radikál). Do výsledného řetězce se tedy napojí celá molekula, a tak nedochází ke změně skupiny ani vzniku vedlejšího produktu, viz obr. 2. Proto se polymery tvořené touto exotermickou reakcí označují předponou poly-, za níž se přidá název monomeru např. polyvinylchlorid, polyetylen a další. Touto cestou se ale vyrábí jen část termoplastů, protože výsledné makromolekuly nemají stejnou velikost (molární hmotnost) ani počet monomerů v jedné molekule, neboli polymerační stupeň. Závislost těchto dvou parametrů je lineární, jak je vidět ze vzorce (1.1). Přičemž platí, že čím vyšší je jejich hodnota, tím je vyšší pevnost, tuhost, viskozita a nižší houževnatost.



Obr. 2 Spojení monomerů do polymerového řetězce [9]

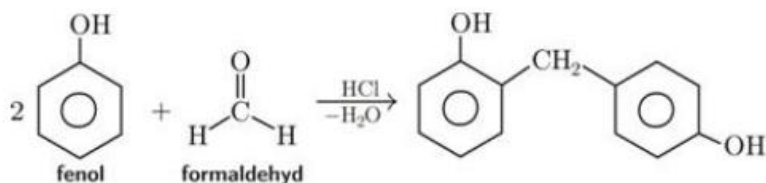
$$M = M_o * n \quad (1.1)$$

kde M ...molární hmotnost polymeru [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]

M_o ...molární hmotnost strukturní jednotky [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]

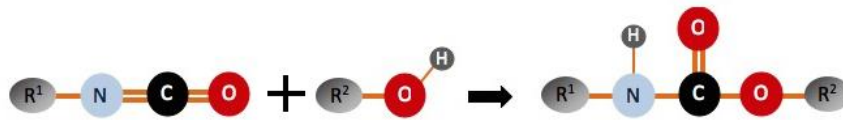
n ...polymerační stupeň

b) Polykondenzace je další způsob výroby polymerů. Tentokrát s nízkou rychlostí reakce a dokonce s možností zastavení. Při tomto typu reakce se mohou do řetězce spojovat různé nízkomolekulární látky a od každé této skupiny základních monomerů se oddělí vedlejší produkt – kondenzát. Právě z toho důvodu má výsledný polymer jiné chemické složení než látky vstupující do reakce. Pokud spolu reagují dvě různé látky, vzniknou lineární makromolekuly termoplastů. Ty je nutné před vstříkáním sušit, neboť jsou, na rozdíl od těch polymerovaných, snadno navlhavé. Reagují-li tři různé látky, vznikají prostorové reaktoplasty.



Obr. 3 Vznik polykondenzátu [10]

c) **Polyadice**, je poslední cestou k vytvoření polymeru. Jde o reakci, která má podobný průběh jako polykondenzace. Je také pomalá a lze ji zastavit, ale liší se tím, že nevzniká vedlejší produkt. Monomery vstupující do reakce mají v molekule atom vodíku, jenž se přesouvá z jedné reaktivní skupiny na jinou, a díky uvolněné vazbě se monomery mohou sloučit. Výsledná chemická struktura polymeru není totožná se strukturou monomeru.



Obr. 4 Polyadice polymerů [11]

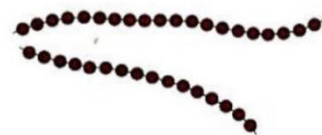
1.1 Rozdělení plastů [1], [8], [12]

Syntetické plasty mají širokou variabilitu stavby, přidávaných látek, chování při změně teploty a dalších vlastností, proto je lze třídit do skupin podle mnoha hledisek.

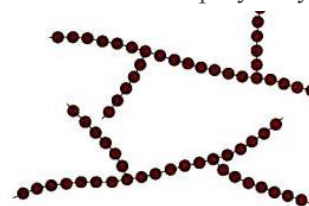
a) Rozdělení podle tvaru molekul

Monomery se dvěma funkčními skupinami, které se při vzniku řadí jeden po druhém za sebou, jsou označovány jako lineární. Jejich prostorové uspořádání umožňuje přiblížit se k sobě na malou vzdálenost a zaplnit menší prostor. To má za následek vyšší hustotu, zároveň vysokou houževnatost a zpracovatelnost taveniny. Také snadno vytváří pravidelné shluky, které jsou příčinou vyššího obsahu krystalických podílů.

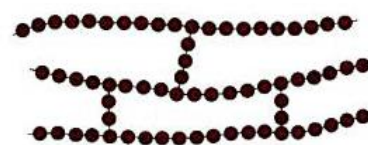
Rozvětvené polymery se od lineárních řetězců liší navázanými bočními větvemi, což zhoršuje jejich pohyblivost, a tedy i tekutost v tavenině. Rozvětvení dále způsobuje větší rozestupy mezi základními řetězci, snižují se tím mezimolekulární síly, které ovlivňují mechanické vlastnosti. Také se snižuje uspořádanost, a proto hůř vznikají krystaly. Lineární, nebo rozvětvené řetězce vzájemně spojené chemickými vazbami takovým způsobem, že vytváří jednu makromolekulu – síť, se označují jako zesíťované. Vytvořením vazeb mezi řetězci dojde ke ztrátě rozpustnosti, tavitelnosti, snížení houževnatosti, ale i zvýšení odolnosti vůči vysoké teplotě, tvrdosti a modulu pružnosti. Na rozdíl od předchozích dvou skupin jsou zesíťované polymery nerozpustné, při použití rozpouštědla bobtnají.



Obr. 5 Lineární polymery [13]



Obr. 6 Rozvětvené polymery [13]



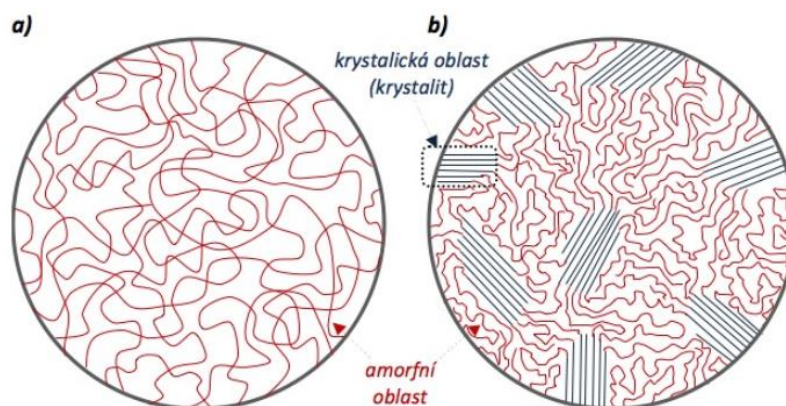
Obr. 7 Zesíťované polymery [13]

b) Rozdělení podle uspořádání molekul

Chaotická struktura s čistě náhodným uspořádáním je charakteristická pro amorfní polymery. Molekuly tvoří vzájemně propletená klubka (globuly) o průměru 10–30 μm . Tato struktura je příčinou tvrdosti, křehkosti, vysoké pevnosti a modulu pružnosti. Materiál má nižší teplotní stupeň roztažnosti a po zpracování může být až čirý.

Ke vzniku semikrystalické struktury je nutná nukleace, neboli tvorba krystalických zárodků, na kterých se vytvoří krystality. Tyto strukturované makromolekuly jsou obklopeny amorfními, krystalizuje tedy pouze část polymeru, obvykle 40–90 %. Stupněm krystalinity můžeme vyjádřit relativní množství krystalických oblastí, jejichž obsah lze ovlivnit chlazením. S rostoucím stupněm krystalinity se zvyšuje pevnost, modul pružnosti a teplotní roztažnost α .

Semikrystalické polymery se od amorfních liší také indexem lomu, a proto jsou mléčně zakalené. Zcela krystalickou strukturu lze vyrobit pouze ze strukturně a chemicky pravidelných makromolekul, proto jde krystalické polymery vytvořit pouze v laboratorních podmínkách.



Obr. 8 Nadmolekulární struktura polymerů a) amorfních, b) semikrystalických [14]

c) Rozdělení podle působení teploty

Polymery jsou materiály, u nichž se zvyšující se teplotou dochází k měknutí, neboli plastikaci. Materiál získává vlastnosti nenewtonovské kapaliny, kdy viskozita není úměrná napětí, a lze ho v tomto stavu jednoduše tvářet. Jakmile teplota klesne zpátky pod teplotu tání T_m u plastů semikrystalických, nebo pod teplotu viskózního toku T_f u plastů amorfních, dojde opět ke ztuhnutí. Tento proces může mít téměř nekonečný počet opakování u termoplastů, protože se jedná o fyzikální děj, u kterého nedochází k žádným chemickým reakcím. Reálně ho ale není možné tolikrát opakovat, protože se postupně řetězce lámou a dochází k degradaci materiálu.

Reaktoplasty (dříve termosety) jsou polymery, které měknou se zvyšující se teplotou, ale na rozdíl od termoplastů neomezeně. Dalším zahříváním nebo použitím katalyzátoru dojde k zesíťování struktury a vytvrzení, po kterém se stávají netavitelnými a nerozpustnými. Nelze je proto tvářet nebo svařovat, neboť by dalším zahřátím došlo k degradaci materiálu. Výrobky vytvořené z této skupiny materiálů mají vysokou tvrdost, tuhost a teplotní i chemickou odolnost.

Poslední skupina polymerů, elastomery, se vyznačují řídkou strukturní sítí lineárních řetězců pospojovaných můstky, které vznikají za zvýšené teploty při chemické reakci, tzv. vulkanizaci. Amorfni materiál díky své struktuře disponuje vysokou elasticitou, proto ho můžeme výrazně zdeformovat malou silou. Poté se bez porušení vrátí do původního stavu. Elastomery na bázi termoplastů můžeme navíc opakovaně podrobit plastikaci a nechat ztuhnout, protože i tady probíhá pouze fyzikální děj.

d) Rozdělení podle druhu přísad

Pokud jsou přísady vmíseny v takovém množství, že neovlivňují výsledné vlastnosti polymeru, jsou považovány za neplněné. V případě plněných mají polymery primárně funkci pojiva a nositele základních fyzikálních a mechanických vlastností výsledné hmoty, ale jejich finální charakter definují přísady. Aditiva ovlivňují například smrštění při chladnutí, tepelnou odolnost, barvu nebo degradaci.

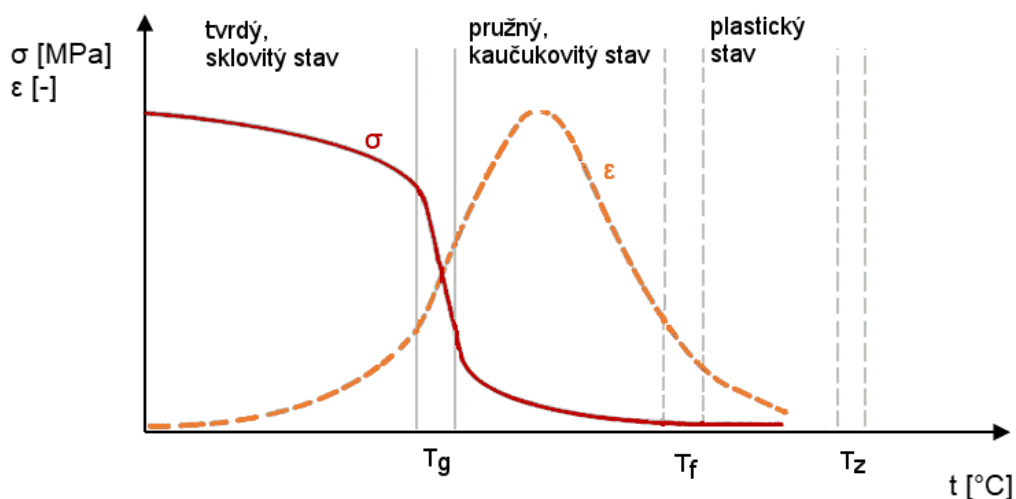
e) Rozdělení podle polaroty

U polárních polymerů má každý atom makromolekuly jinou elektronegativitu, což způsobí posuv elektronů v kovalentní vazbě blíž k elektronegativnějšímu prvku a následnou tvorbu dipólu. V případě, že mají makromolekuly osamocené dipóly, dojde ke zvýšení polárnosti, a tím i vodivosti. Naopak pokud mají monomerní jednotky symetrické řetězce a tvoří je stejné skupiny atomů, dipóly se kompenzují. Navenek potom polymery působí jako nepolární. Jsou tedy vhodné na izolaci elektroinstalací.

1.2 Charakteristické teploty [1], [7], [8]

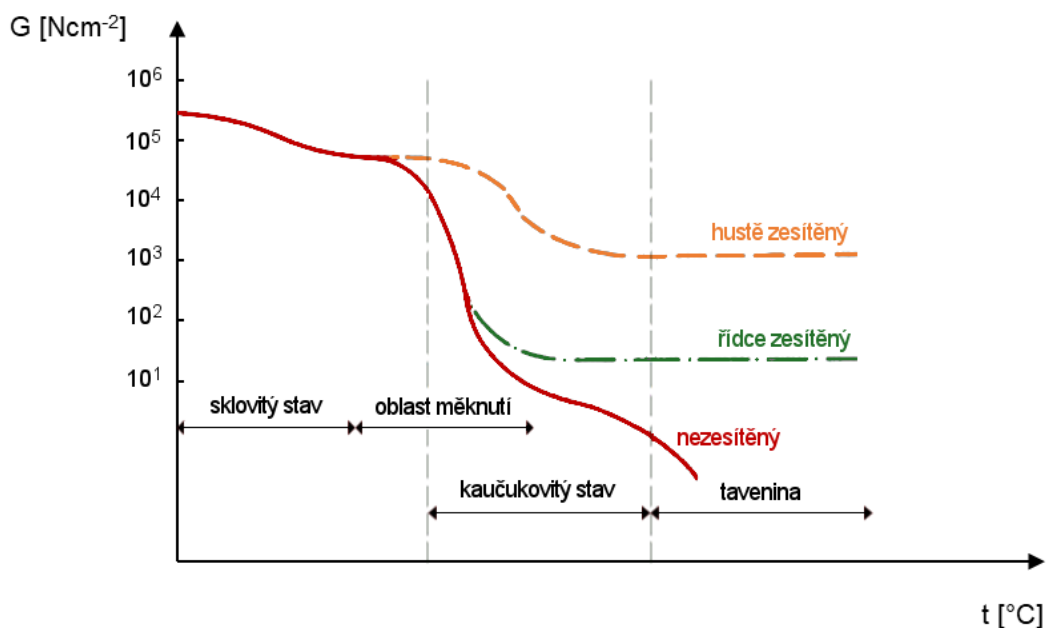
Stejně jako u většiny materiálů, i u polymerů teplota zásadně mění jeho vlastnosti. Částice se pohybují kolem své rovnovážné polohy a jejich pohyb s rostoucí teplotou zvyšuje svou intenzitu, a tím i charakter materiálu. V určitých oblastech dochází ke změnám vlastností rychleji, nebo dokonce skokově. Těmto oblastem říkáme přechodové a jsou pro ně přiřazeny charakteristické přechodové teploty.

Polymery se mohou nacházet ve třech stavech: sklovitém, kaučukovitém nebo kapalném. V plynném stavu se nevyskytují, a to z toho důvodu, že teplota varu je vyšší než teplota degradace polymeru. Polymery těmito stavy procházejí se zvyšující se teplotou. Ovšem chování amorfních a semikrystalických polymerů je odlišné, jak je patrné z průběhů grafů na obrázcích 9 a 11. Amorfní se přiblížením k teplotě skelného přechodu T_g skokově změní ze sklovitého stavu, kdy jsou tvrdé, křehké a mají vysoký modul pružnosti, na velice pružný kaučukovitý stav, kde se modul pružnosti sníží asi o tři řády a koeficient teplotní roztažnosti se zvýší přibližně na dvojnásobek své původní hodnoty. Teplota skelného přechodu T_g je tím nižší, čím menší budou přitažlivé síly mezi molekulami. Vlastnosti, kterých materiál nabyl přechodem přes teplotu skelného přechodu, se ale začnou postupně ztrácet s přicházející teplotou viskózního toku T_f . Po jejím překonání se přemění v taveninu, kterou již lze zpracovávat vstřikováním nebo jinými technologickými postupy. Je nutné dát pozor, aby teplota taveniny nevystoupala až k teplotě degradace polymeru T_z .



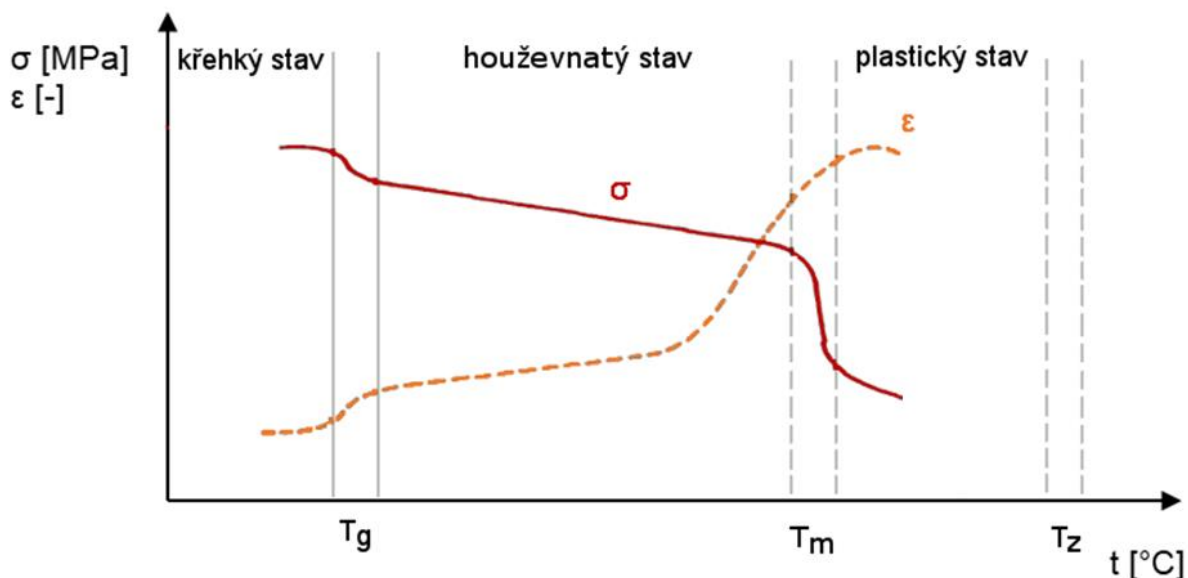
Obr. 9 Vliv teploty na deformační vlastnosti amorfních plastů [10]

Chování amorfních plastů také ovlivňuje jejich zesíťování. Hustě zesíťným plastům neklesá modul pružnosti tak rapidně, ale zůstává po lehkém poklesu konstantní na poměrně vysoké hodnotě až do degradace. Vazby totiž tvoří tuhou síť, která neumožňuje přesun celých makromolekul.



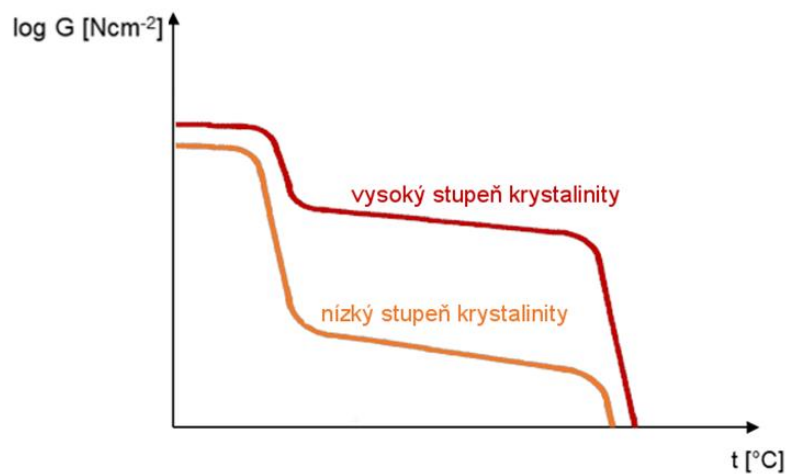
Obr. 10 Ovlivnění modulu pružnosti teplotou a strukturou [16]

Semikrystalické polymery podléhají nejradikálnějším změnám v oblasti teploty tání T_m . V jejím okolí krystality tají a pevný materiál se mění na taveninu, kterou lze snadno zpracovat. Překonání teploty skelného přechodu T_g není tak zřetelné, neboť se týká pouze amorfni části.



Obr. 11 Vliv teploty na deformační vlastnosti semikrystalických polymerů [17]

Velikost skoku v oblasti teploty skelného přechodu T_m tedy závisí na množství krystalických podílů. Čím je vyšší uspořádanost polymeru, tj. vyšší stupeň krystalinity, tím je skok v okolí teploty T_m menší.



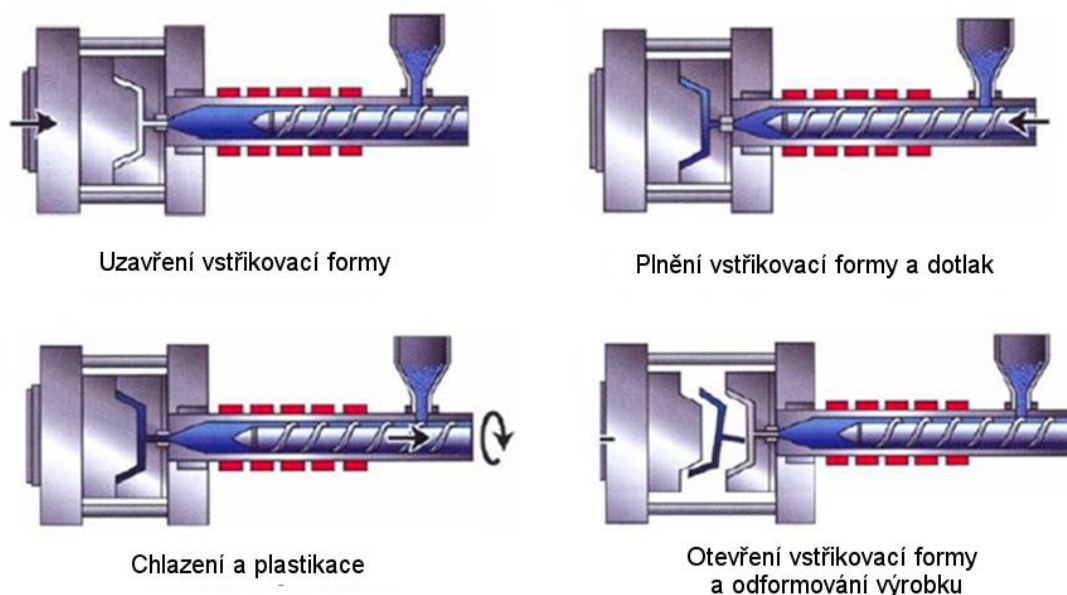
Obr. 12 Závislost stupně krystalinity na modulu pružnosti ve smyku [18]

Protože je tavenina do dutiny vstřikována pod vysokým tlakem, je nutné držet formu uzavřenou pomocí uzavírací jednotky, jejíž pohon může být realizován hydraulickým uzavíracím systémem, elektrickým nebo jejich kombinací. Síla uzavírací jednotky, potřebná k odsunutí a přisunutí pohyblivé upínací desky k pevné a jejich uzamčení, je vytvořena buď zafixováním formy v požadovaném místě mechanickým systémem, nebo hydraulickým pístem či kombinací obou variant.

2.2 Vstřikovací proces [8], [23], [25]

Vstřikování plastů je neustále se opakující cyklický proces s přesně určenými, chronologicky seřazenými kroky, při nichž polymer podléhá teplotním a tlakovým změnám. Cyklus, který je schematicky znázorněn na obr. 14, začíná ve chvíli, kdy je forma prázdná a otevřená. Stroj dostane podnět ke spuštění cyklu. Řídící jednotka vyšle impuls do zavíracího zařízení k zavření formy. V čase t_{s1} se pohyblivá část formy přisouvá k pevné, forma se zavře při působení přisouvací síly F_p a pomocí uzavírací síly F_u a zámku se tzv. „zamkne“ proti otevření způsobem dle typu stroje. Musí být zajištěno, že se forma v průběhu cyklu nepohne. V případě studených kanálů, kdy se k formě přisouvá i vstřikovací jednotka, je tento posuv zaznamenán v úseku strojního času t_{s2} .

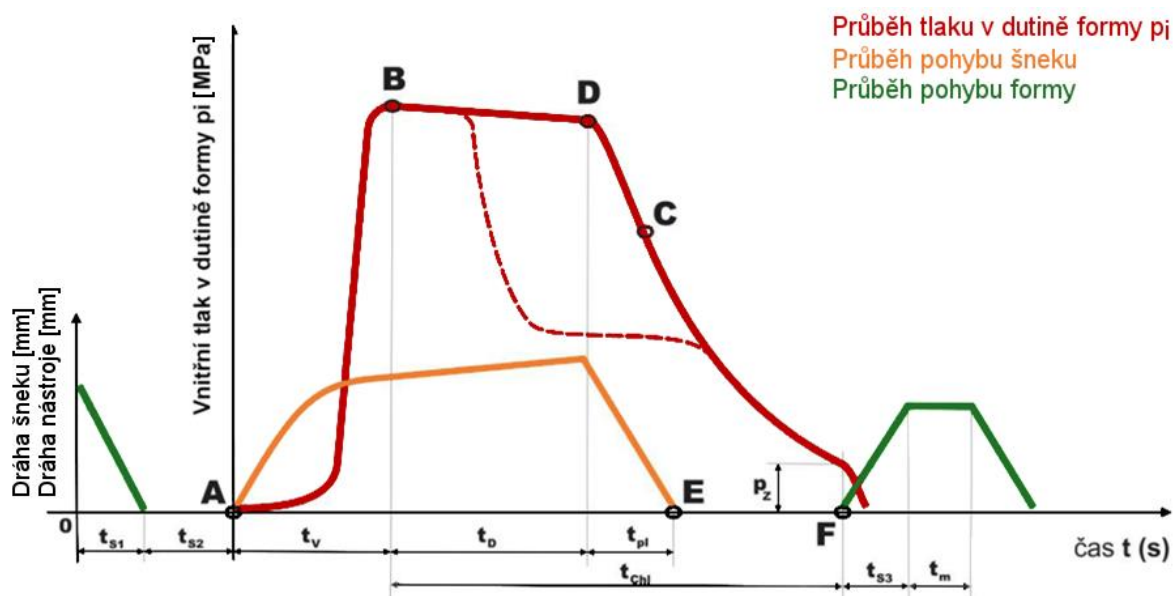
V bodě A se uzavře zpětný ventil a šnek se v tavicí komoře začne pohybovat axiálním pohybem bez rotace. Zastupuje tak funkci pístu a vstřikuje taveninu do formy. V dutině dochází k rychlému nárůstu tlaku. Tavenina je po naplnění celé dutiny ještě stlačena, aby řádně zatekla do všech zákoutí. Vnitřní tlak tím dosáhne na svou maximální hodnotu v cyklu, doba plnění t_v je dokončena a cyklus dospěl k bodu přepnutí na dobu dotlaku t_d . Jakmile roztavená hmota vstoupí do dutiny, okamžitě předává teplo formě a začne chladnout. Zároveň kvůli snižující se teplotě zmenšuje svůj objem a je nutné tento jev vyrovnat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Nezbytné k provedení dotlaku jsou přítomnost plastického jádra uvnitř výstřiku, dostatečné množství roztaveného plastu před čelem šneku a „živý“ materiál na celé trase mezi nimi. Tekutého polymeru však nemůže být před čelem šneku příliš mnoho, aby nedocházelo k tepelné degradaci, proto se jeho množství doporučuje mezi 5 až 15 % objemu potřebného k zaplnění kavit a vtokového systému. Následuje doba chlazení t_{ch} . Trvá až do otevření formy a vyhození výstřiku.



Obr. 14 Schéma vstřikovacího cyklu [26]

Po ukončení dotlaku je dobré nastavit první dekompresi², aby se zpětný ventil uvolnil před začátkem otáčení šneku a nabírání granulátu z násypky. Následně se materiál plastikuje a tlačí před čelo. Probíhá doba plastikace t_{pl} , kdy šnek ustupuje dozadu a překonává zpětný tlak tzv. protitlak, jehož velikost ovlivňuje dobu plastikace a kvalitu prohnětení plastu. Nadměrně vysoký tlak by opět mohl způsobit degradaci materiálu. Samotná plastikace má zajistit tepelnou a materiálovou homogenitu připravené nové dávky. Ukončení plastikace nastane, když šnek připraví požadovaný objem vstřikované taveniny.

Souběžně s plastikací klesá tlak v dutině až na hodnotu zbytkového tlaku p_z . Jeho vysoká hodnota může způsobovat praskliny nebo deformace na výrobku, naopak u nízké hodnoty hrozí vznik propadlin. Po úplném ztuhnutí dojde k otevření formy a vyhození výstřiku v čase t_{s3} . Pokud je výstřik vyjímán manipulátorem, přibývá ještě manipulační doba t_m , která může sloužit i ke vkládání kovových záložek, očištění formy a dalším činnostem. Poté už opět přichází impuls k zavření formy a opakování celého procesu. Průběh celého vstřikovacího cyklu je dobře zřetelný ze závislosti vnitřního tlaku p_i , měřeného v dutině vstřikovací formy během vstřikovacího procesu, na čase doplněný o pohyb šneku a formy na obr. 15.

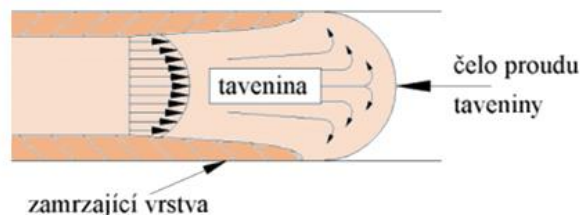


Obr. 15 Průběh tlaku v dutině formy, pohybu formy a šneku [27]

² Odjetí šneku směrem od formy. Posun šneku nesmí být moc rychlý, aby se nevytvořil moc velký podtlak a tryskou do komory před čelo šneku neprošel místo části taveniny z kanálu vzduch.

2.3 Tokové chování plastů při vstřikování [7], [19], [28], [29], [30], [31], [32]

Termoplastické polymery lze velmi dobře tvarovat v kapalném skupenství, proto je velmi důležité znát jejich vlastnosti v toku, neboli reologii. U roztavených plastů je tok popisován zjednodušeným modelem, tzv. fontánovým tokem. Dochází při něm k „valení“ taveniny po stěně kanálu. Okrajová vrstva se proto posouvá mnohem nižší rychlostí a ochlazuje se o stěny, kvůli čemuž potom vzniká tzv. zamrzající vrstva znázorněná na obrázku 16.



Obr. 16 Fontánový tok [33]

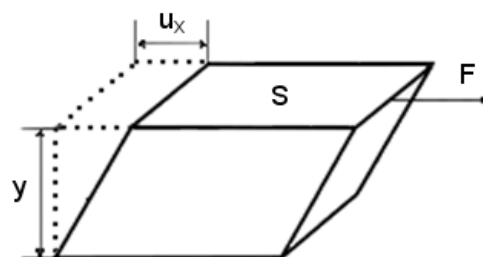
Různé délky trajektorií částic značí odlišnou rychlost vrstev v_x . Molekuly se po sobě smýkají a způsobují tak smykovou deformaci γ . Jelikož se posun u_x jednotlivých vrstev molekul s časem zvětšuje, deformace podle vztahu (2.2) roste také. Potom je její časová derivace definována jako smyková rychlost $\dot{\gamma}$. Vzhledem k tomu, že síla potřebná k tečení působí na plochu elementu, dochází také ke vzniku smykového napětí τ . Práci, kterou tím tekutina koná, lze označit jako vnitřní tření, které se navenek projevuje zvýšením teploty. Vzorce těchto základních reologických veličin jsou vyjádřeny vztahy:

$$v_x = \frac{du_x}{dt} \quad (2.1)$$

kde v_x ...rychlost vrstev [ms^{-1}]
 u_x ...posuv vrstev [m]
 tčas [s]

$$\gamma = \frac{du_x}{dy} \quad (2.2)$$

kde γ ...smyková deformace [-]
 y ...polohová souřadnice kolmá ke stěně [m]



Obr. 16 Schéma k definici reologických veličin [34]

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv_x}{dy} \quad (2.3)$$

kde $\dot{\gamma}$smyková rychlost [s^{-1}]
 v_x ...rychlost toku [ms^{-1}]

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (2.4)$$

kde τ ...smykové napětí [MPa]
 F ...síla [N]
 S ...plocha [m^2]

Zároveň je smykové napětí přímo úměrné smykové rychlosti s konstantou úměrnosti η , neboli dynamickou viskozitou. Viskozita je veličina udávající odpor materiálu proti tečení. Proto čím je vyšší její hodnota, tím méně ochotně se tekutina poddá napětí, a tudíž hůře teče.

Naopak nižší viskozita, tedy nižší odpor proti tečení, představuje snazší tok materiálu. O tom je možné se přesvědčit i z Newtonova zákona pro viskozitu.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

kde τ ...smykové napětí [Pa]

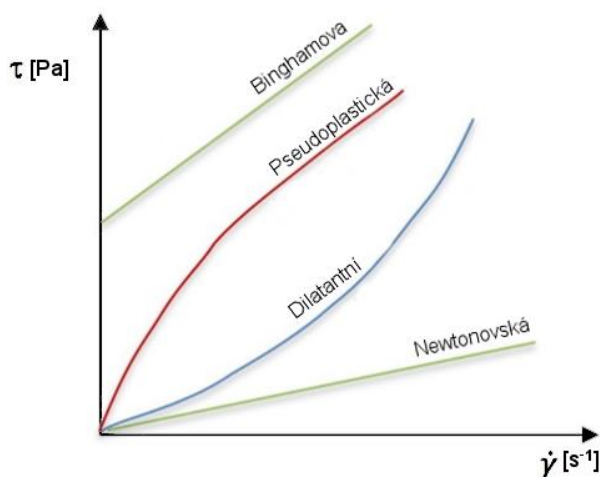
η ...dynamická viskozita [Pa.s]

Newtonova rovnice počítá pouze s variantou, kdy je viskozita konstantní. Dané kritérium je splněno pouze u tzv. Newtonských tekutin, proto v reogramu – grafu, kde reologické křivky znázorňují závislost smykového napětí τ na smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ za dané teploty – rostou jejich hodnoty lineárně z počátku souřadnic. Směrnice této přímky je právě viskozita, která je tím vyšší, čím je teplota a smyková rychlost nižší. Tekutiny, které se nechovají podle Newtonova zákona, jsou obecně označovány jako nenewtonské a popsány analogickým vztahem.

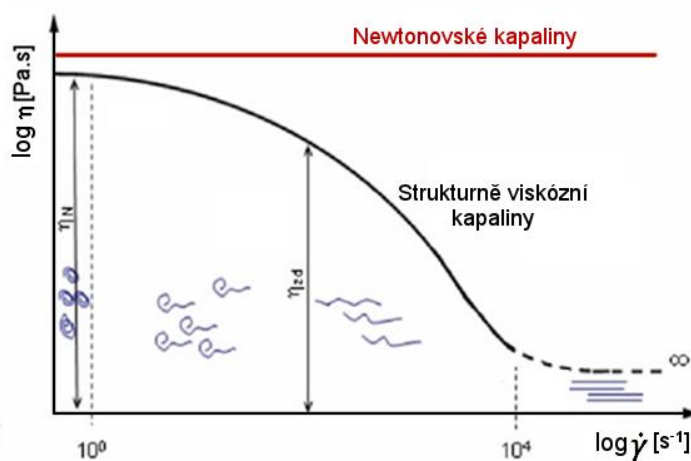
$$\tau = \eta_a \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

kde η_a ...zdánlivá dynamická viskozita [Pa.s]

Zdánlivá dynamická viskozita neplní roli látkové konstanty, ale mění se v závislosti na smykové rychlosti, smykovém napětí a teplotě. Navíc se mění u různých skupin materiálů odlišně – viz obr. 17, proto jsou nenewtonské tekutiny dále děleny podle průběhu reologických křivek na dilatantní, binghamské, nebo pseudoplastické s podkategoriemi právě pseudoplastické a strukturně viskózní kapaliny. Do poslední z vyjmenovaných kategorií, tedy do strukturně viskózních pseudoplastických materiálů, spadají i polymerní taveniny zpracovávané vstřikováním.³ Zdánlivá dynamická viskozita těchto látek se s rostoucí smykovou rychlostí snižuje, neboť se volně „sbalená klubička“ rozbalují do směru toku, jako na obrázku 18, což je pozitivní vlastnost především z pohledu energetické náročnosti zpracování.



Obr. 17 Reogram tekutin [35]



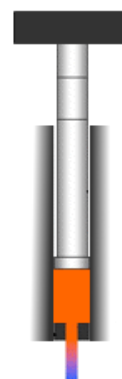
Obr. 18 Porovnání závislosti dynamické viskozity strukturně viskózních pseudoplastických polymerních tavenin a newtonských kapalin na smykové rychlosti [36]

³ Některé taveniny polymerů mohou být i dilatantní, například určité druhy PVC vhodné především k protlačování a vytlačování.

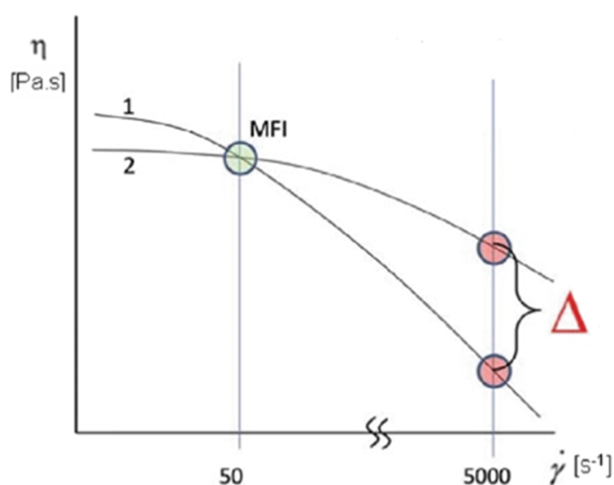
2.4 Měření viskozity [32], [37], [38], [39], [40]

2.4.1 Index toku taveniny

Index toku taveniny MFI či MFR (z angl. melt flow index nebo melt flow ratio) je jedním z mnoha způsobů měření tokových vlastností polymerů. Tento normalizovaný test používaný především k hodnocení kvality materiálu dodaného výrobcem probíhá za dané konstantní teploty a zatížení. Naměřená hodnota udává, kolik gramů nebo centimetrů krychlových proteče 8 mm dlouhou tryskou o průměru 2,095 mm za 10 minut. Schéma zařízení je znázorněno na obrázku 19. MFI je tedy měřen při malých smykových rychlostech. Vzhledem k tomu, že vstřikovací rychlosti jsou výrazně vyšší, neudává index toku taveniny relevantní údaje pro technologii vstřikování a jedná se v tomto případě jen o orientační hodnotu. V grafu na obrázku 20 je znázorněn důvod. Polymer se stejným indexem toku může mít diametrálně odlišnou tokovou křivku. Stačí, aby se u jednoho polymeru se stále stejnou molekulovou hmotností zúžila distribuce molekulové hmotnosti⁴ nebo stupeň větvení molekuly a tvar křivky se ihned změní z tvaru 1 na tvar 2. Proto v některých případech navzdory předpokladům nastane stav, kdy tavenina s vysokým MFI (u které se očekává, že bude téci lépe než tavenina s nízkou hodnotou) do formy nezatéká dobře.



Obr. 19 Plastometr na měření MFI [41]



Obr. 20 Rozdílné tokové křivky daného materiálu se stejným MFI a různou distribucí molekul [43]

2.4.2 Spirálová metoda

Spirálová metoda je další často užívaný způsob popisu reologických vlastností taveniny polymerů. Na rozdíl od MFI je měřena při reálných vstřikovacích rychlostech. Dané množství taveniny je vstříknuto studeným vtokem za konstantního tlaku a teploty formy do speciální formy ve tvaru spirály s danými rozměry a vyznačenými ryskami. Potom platí, že čím více rysek tavenina ve spirále mine, tím má nižší viskozitu a lépe zatéká. Tímto způsobem se primárně porovnává zabíhavost materiálů při shodných technologických podmínkách nebo vliv aditiv na zatékání. Informace zjištěné spirálovou metodou jsou ale stále velmi specifické a reálnému vstřikování výrobku úplně neodpovídají. Spirálová forma má na rozdíl od forem skutečných výrobků buď otevřenou kavitu, kde vzduch může volně odcházet z formy, nebo ji

⁴„Rozdělení makromolekul polymeru na skupiny (frakce) podle jejich molekulové hmotnosti“ [42]

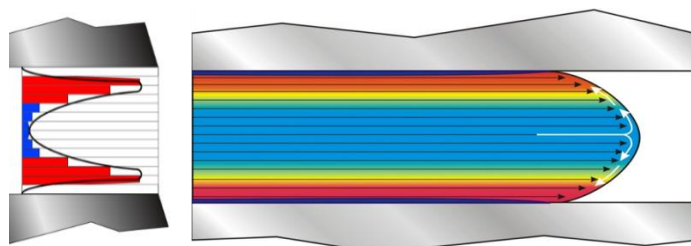
mají uzavřenou. Ale protože tavenina nevyplní kompletně celou dutinu formy, nedochází ani v tomto případě k typickému razantnímu zvyšování tlaku v průběhu vstřikování.



Obr. 21 Příklady spirálových forem [44]

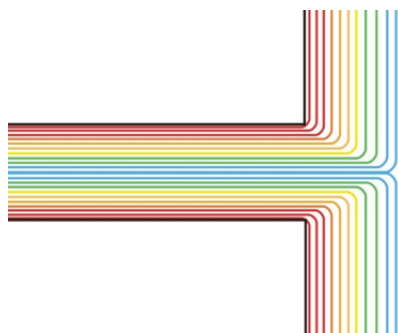
2.4.3 Metoda vstřikování na technickou viskózní křivku

Metoda vstřikování na technickou viskózní křivku, dále VTKV, je nejmodernějším způsobem měření. Vznikla z každodenní potřeby vstřikoven, které usilují o co nejstabilnější proces s minimální zmetkovitostí a o možnost přenosu zdlouhavě laděných optimálních podmínek spolu s formou ze stroje na stroj. Pro tyto podmínky není dynamická a zdánlivá dynamická viskozita definovaná výše ve vzorcích (2.5) a (2.6) zcela vyhovující. Především proto, že jsou měřeny při mnohem menších rychlostech, např. výše zmíněném MFI, a zaznamenány v logaritmických souřadnicích. Dále kvůli chování taveniny při toku kanálem. Na obrázku 22 je vidět, jak smykové napětí působí na teplotu taveniny. U stěny studeného kanálu tavenina ulpívá, má téměř nulovou rychlost a velmi malé smykové napětí, proto je i teplota mnohem nižší než v sousední vrstvě, kde smykové napětí dosahuje maxima. Směrem ke středu kanálu rychlost taveniny stoupá, ale smykové napětí se snižuje, proto se teplota taveniny tolik nemění a zůstává velmi podobná teplotě, při které tavenina vstupuje do kanálu.



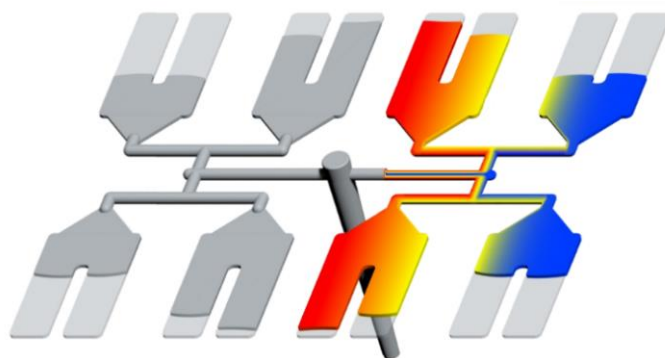
Obr. 22 Rozložení a) smykového napětí b) teplot ve studeném kanálu [45]

Při větvení vtokového kanálu se rozdělí tavenina uprostřed dle schématu na obrázku 23. Stejně se tavenina dělí i při každém dalším rozvětvení. Po odhalení této teplotní nehomogenity v průřezu kanálu nelze očekávat, že by koeficient MFI nebo viskozita zůstávaly konstantní.



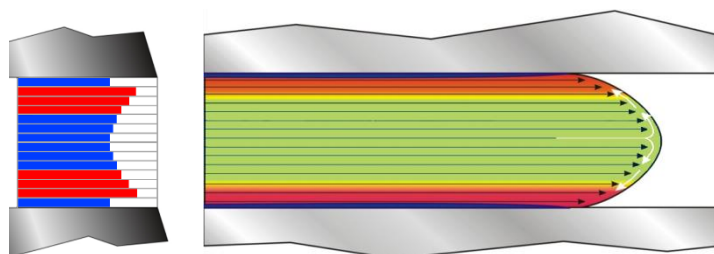
Obr. 23 Rozdělení taveniny při větvení kanálu [46]

Nárůst teploty u stěny kanálu snižuje viskozitu, a tak v těchto místech teče tavenina mnohem rychleji. Proto dochází k jevu, kdy se v násobné formě zaplní nejprve části kavit (dutin) uložené nejbližší ke kanálu vstupujícímu do formy, viz obr. 24.



Obr. 24 Plnění kavit taveninou [47]

Obecně byly rozdíly plnění částí forem řešeny, kvůli nekorektnímu pochopení chování tavenin, pomocí balancování teploty formy. Dnes se raději volí metoda vstřikování na technickou viskózní křivku, při níž sice nedojde k odstranění teplotní nehomogenity v kanálu, ale vzhledem k tomu, že se vstřikuje vyššími rychlostmi, dochází ke zmenšení rozdílů smykových napětí jednotlivých vrstev, a tak se i teplota stává rovnoměrnější, což je znázorněno na obr. 25. Zároveň se zlepší průběh plnění kavit.⁵ Tavenina bude mít v celém průřezu kanálu téměř shodný odpor proti tečení, a tak bude ochotněji téci i do vzdálenějších kavit. Zároveň není vhodné volit maximální možné rychlosti vstřiku, aby zrovnomnění plnění nebylo vykoupeno vysokou spotřebou stroje nebo vadami ve výrobku. K měření technické viskozity není potřeba žádný speciální reometr, neboť tuto funkci zastává samotný vstřikovací stroj. Nemusí být ani vybaven speciálními periferiemi. Stačí, aby uměl detekovat dobu vstřiku a použitý tlak.

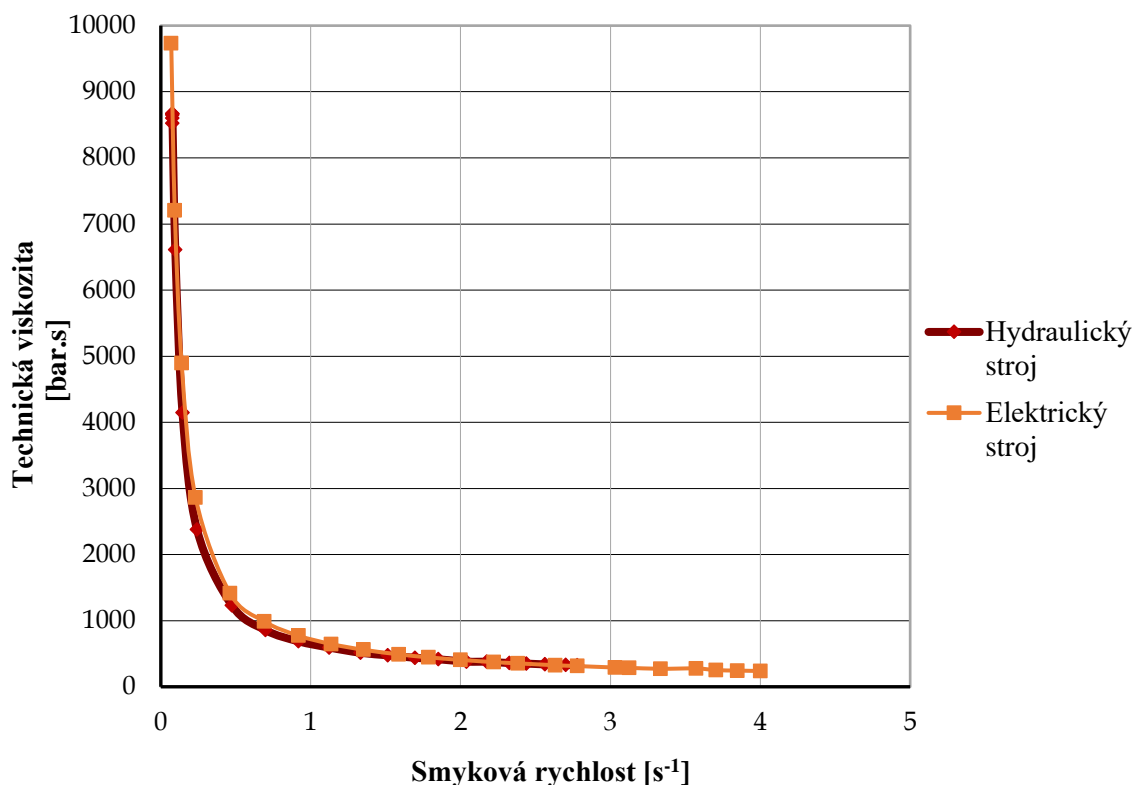


Obr. 25 Rozložení a) smykového napětí, b) teplot ve studeném kanálu při vyšších vstřikovacích rychlostech [45]

Technická viskózní křivka zobrazuje tzv. technickou viskozitu, která zjišťuje průměrnou hodnotu viskozity od začátku do konce plnění. Je závislá na konstrukci formy, tvaru dílu a stroji. Lze tedy říct, že pro každý díl, formu a stroj je jiná, ale ne zcela. Bylo vyzpozorováno, že průběh křivky proložené naměřenými hodnotami při různých rychlostech vstřiku zůstává stále stejný a mění se pouze její měřítko. Obr. 26 na nadcházející straně názorně ukazuje porovnání křivek technické viskozity z hydraulického a plně elektrického stroje s odlišnými výrobky z různých materiálů.

⁵ Ke zvýšení rovnoměrnosti plnění kavit se používají i speciální vložky, které způsobují rotaci taveniny v kanálu.

Cílem je u každé aplikace metody VTVK najít na křivce takový bod, kde bude optimální rychlost plnění a viskozita. Zároveň však nedojde ke zbytečnému zvýšení vstřikovacích tlaků, které je se zvyšujícím se tlakem více a více nákladné kvůli stupňujícím se požadavku na energii potřebnou k vstřikovacímu cyklu. Znalost optimálních parametrů umožní úplné naplnění kavity formy za krátký čas současně s řízením procesu, při kterém i velká obměna technologických podmínek bude mít malý dopad na vlastnosti dílu, čímž se cyklus stane odolnějším vůči změnám a omylům seřizovače. Vstřikovna tak bude potřebovat kratší cyklové časy a bude vyrábět méně zmetků, což je výhodné nejen z pohledu ekonomiky, ale i ekologie.

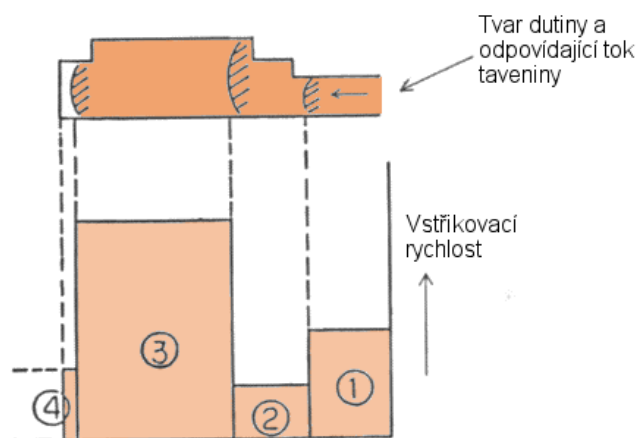


Obr. 26 Porovnání křivek technické viskozity z hydraulického a plně elektrického stroje

3 NÁVRH IDEÁLNÍCH VSTUPNÍCH PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ POMOCÍ TECHNICKÉ VISKÓZNÍ KŘIVKY [22], [48], [49], [50], [51], [52], [53]

Před zahájením výroby daného výstřiku je nutné na stroji nastavit vstřikovací technologické parametry pro udržení požadované kvality a stabilního opakovaného cyklu. A nezáleží na tom, zda se jedná o úplně novou formu pro dosud nevyráběný výrobek, nebo pouze přesun formy ze stroje na stroj. Tlaky, uzavírací a zamykací síly, teploty a vstřikovací rychlost musí být vždy nastaveny s ohledem na vstřikovací stroj, formu a vstřikovaný materiál. Samotné odladění formy může trvat i týdny. A není

výjimkou, že po finálním nastavení vstřikovacích parametrů má každý díl jiné vlastnosti, čímž dochází ke vzniku zbytečných zmetků. Hlavní příčinou odlišnosti dílů je měnící se doba plnění a s ní přímo spojená vstřikovací rychlost. Seřizovači se jí v některých případech snaží profilovat⁶ – občas u vstřikovaných dílů s prolisy, ale především u špatně navržených výstřiků se změnami tloušťky stěny v závislosti na materiálu (viz obrázek 27, kde je znázorněna změna vstřikovací rychlosti v závislosti na aktuální velikosti průřezu dutiny). John Bozzelli ale experimentálně zjistil, že u 80 % dílů profilování není nutné. Stačí pouze dobře zvolit jednu rychlost, při které výrobek dosahuje požadovaných vlastností. Tuto rychlost lze snadno najít a nastavit pomocí metody VTVK.



Obr. 27 Profilování rychlosti při vstřikování dílu s různými tloušťkami stěny [54]

3.1 Měření technické viskózní křivky

Před aplikací metody je nutné ověřit schopnost plnění výstřiku. Pokud je výrobek kompletně naplněn při středních, výrobcem materiálu doporučených hodnotách tlaku, protitlaku, rychlosti vstřikování a teplot, pak lze přejít k nastavení parametrů vhodných k měření technické viskózní křivky.

Hodnota dotlaku se volí ideálně nulová. Ne všechny stroje tuto variantu umožňují, z toho důvodu se volí minimální možná (řádově v jednotkách barů). Dotlak se při měření technické viskozity odstraňuje proto, že není cílem vyrobit celý díl, ale pouze jeho část, aby bylo lépe vidět chování taveniny. Dále je nutné vypnout omezení doby vstřiku, aby nezkracovala měření pomalých cyklů. Naopak kvůli správnému změření rychlých cyklů je třeba odstranit omezovací tlak, který při standardním procesu slouží jako ochrana proti zatečení taveniny do dělicí roviny, tzv. zastříknutí formy. Pozice přepnutí je odladěna zhruba k naplnění 80 % dílu, u složitých dílů s velkým množstvím čelistí i o něco méně. Zároveň musí být zaručeno, že protitlak při šnekování nedoplňuje díl, čemuž lze zamezit u horkých vtoků uzavíratelnou tryskou, u studených vtoků zpožděním dávkování tak, aby vtok ve formě stihl zatuhnout a nedovolil další plnění dílu.

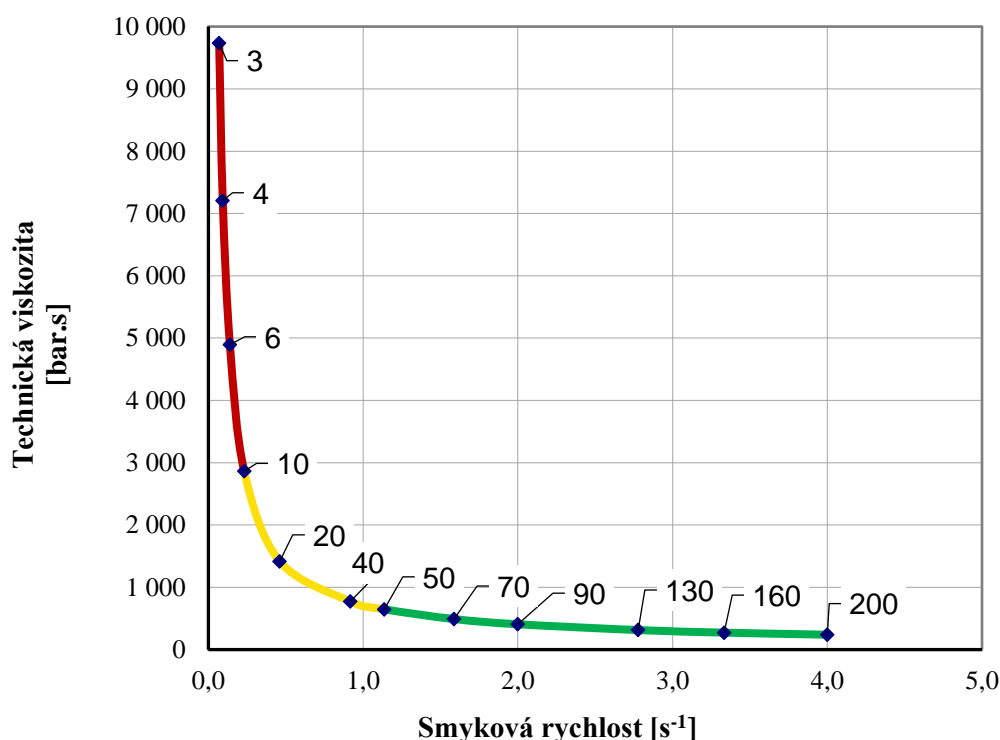
Po zajištění těchto vstupních podmínek už lze přejít k nastavování samotné rychlosti vstřiku. Začíná se u nejvyšší rychlosti, kterou je stroj schopen vytvořit, aniž by došlo k poničení samotného stroje nebo formy. Po vystříknutí dílu se do tabulky dodané distributorem metody VTVK poznamená doba plnění, velikost polštáře a tlak přepnutí (nikoli maximální tlak

⁶ Změna vstřikovací rychlosti v průběhu vstřikování za účelem zachování konstantní rychlosti čela taveniny ve všech částech kavity.

vstřikování, protože starší stroje někdy vykazují vyšší tlaky při startu vstřiku). Rychlost se sníží přibližně na 60 % první hodnoty a opět se zapíše hodnoty, stejně jako v předchozím kroku. Tento postup se opakuje, dokud doba plnění není 10–15 s. K dosažení této délky plnění a správnému vykreslení křivky technické viskozity je obvykle potřeba dvanáct kroků. Nakonec se do záhlaví tabulky vyplní intenzifikační poměr⁷, zdvih šneku včetně dekomprese, pozice přepnutí a velikost zdvihu.

3.2 Vyhodnocení technické viskózní křivky

Technická viskózní křivka z obrázku 28, byla naměřena na stroji JSW-J220ADS460H s uzavírací silou 220 tun, kde se na dvoukavitové formě vyrábí kelímky z polypropylenu. Schéma a parametry stroje jsou uvedeny v příloze 1 a 2. Výrobcem udávaná maximální rychlost posuvu šneku je $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, což při průměru šneku 46 mm odpovídá vstřikovací rychlosti $499 \text{ cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Při měření byla zvolena nejvyšší rychlost posuvu šneku $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, protože vyšší rychlosti vstřikování zvyšovaly spotřebu energie a jističe na tak vysoké odběry nebyly dimenzovány. Mimo jiné je na tomto jevu velmi dobře vidět, že zvyšování vstřikovací rychlosti přes určitou mez (opět závislé na stroji, konkrétním dílu, vstřikovaném materiálu atd.) je vykoupeno příliš vysokou spotřebou a není tedy z ekonomického ani z technického hlediska efektivní. Rychlosti byly postupně snižovány až po nejnižší rychlost šneku, $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Při tomto 14,42 s dlouhém cyklu bylo měření ukončeno, neboť se do formy kvůli nízké smykové rychlosti, a tedy vysoké technické viskozitě, dostalo pouze malé množství hmoty. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 3.



Obr. 28 Technická viskózní křivka naměřená na stroji JSW machines J220ADS460H

Průběh technické viskózní křivky lze rozdělit do tří částí. V červeně vyznačené se i velmi malou změnou vstřikovacích parametrů razantně mění technická viskozita výrobku a jeho vlastnosti. Také se jedinečně v této oblasti křivky zvětšuje objem vzorku, klesá hmotnost, a tedy klesá i hustota se zvyšující se vstřikovací rychlostí. Tok taveniny do dutiny je nestabilní.

⁷ Poměr mezi tlakem v hydraulickém systému stroje a tzv. specifickým tlakem v tavenině před čelem šneku.

Lze se o tom přesvědčit na příkladu z obrázku 29. Tyto konkrétní výstřiky byly vyrobeny při rychlosti pohybu šneku $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ po dobu 10,79 s. Je zřetelně vidět, že i když jsou dutiny formy naprosto stejné, tavenina se při nízkých rychlostech chová nepředvídatelně. Vzorky jsou naplněny nejen asymetricky, ale i diametrálně odlišně, což způsobilo sériové chlazení trysek – první tryška v pořadí je chlazená právě přitékající studenou vodou, druhá už o něco teplejší z předcházející tepelné výměny. Je tedy zřejmé, že v této části technické viskozni křivky není vhodné vstříkovat, a to nejen kvůli nepřijatelnému chování taveniny, ale i zbytečně dlouhým časům cyklů, které rapidně snižují produktivitu stroje.



Obr. 29 Asymetricky naplněné díly

Žlutě vyznačená oblast, ve které byly vyrobeny vzorky na obrázku 30, vykazuje o něco větší stabilitu chování materiálu, ale výsledné vlastnosti mohou s malou změnou stále poměrně výrazně kolísat. Takže i malá změna technologických podmínek má poměrně velký vliv na výsledný výstřik. Což se projevuje i v tomto experimentu. Je vidět, že při rychlostech 20, 40 a $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ má každý vzorek jiný tvar a výšku horního okraje.



Obr. 30 Vzorky vyrobené při vstřikovacích rychlostech 20, 40 a $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Zelená část představuje rozmezí ideálních vstřikovacích rychlostí, kde velká změna technologických podmínek stroje vyvolá jen malou změnu chování tekutého polymeru. Proces je v celém úseku stabilní, což je vidět i na vzorcích z obr. 31, které mají oproti předchozím dvěma oblastem na mnohem větším rozsahu vstřikovacích rychlostí téměř shodnou výšku i tvar. Jejich hmotnost stoupá se zvyšující se vstřikovací rychlostí, stejně jako velikost. Největší rozdíly jsou v tlacích a spotřebě energie potřebné k vytvoření dané rychlosti. Na začátku zelené oblasti křivky je potřeba mnohem nižší tlak než u jejího konce. Z toho důvodu se jako optimální rychlost vstřikování jeví začátek vyrovnání křivky technické viskozity (zelená část křivky). Tedy ta část, kdy se průběh technické viskozity začíná limitně blížit své minimální hodnotě. Jak bylo zmíněno výše, další nárůst vstřikovací rychlosti vyvolává zvýšenou spotřebu elektrické energie, a proto jsou tyto zvýšené rychlosti z ekonomického hlediska nežádoucí. Jako nejideálnější vstřikovací rychlost se tedy jeví $150 \text{ cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$, která odpovídá rychlosti posuvu šneku $90 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, s dobou vstřikování 0,56 s. Při této rychlosti byl následně proveden

plnohodnotný vstřikovací cyklus i s dotlakem, jenž potvrdil schopnost vystříknutí kompletního výrobku. Jedinou vadou na výstřiku byl studený spoj⁸, který ale provázal vzorky v celém rozsahu testovaných hodnot vstřikovacích rychlostí. V tomto případě byl umístěn mimo pohledovou oblast a nijak neovlivňoval funkčnost ani mechanické vlastnosti dílu, proto mohla být při rychlosti 90 mm.s⁻¹ zahájena výroba.



Obr. 31 Vzorky vyrobené při vstřikovacích rychlostech 90, 130, 200 mm.s⁻¹

3.3 Ekonomické zhodnocení aplikace metody VTK

K výrobě daného výrobku byl původně používán stroj, který vykazoval vysoké známky opotřebení, měl nízkou spolehlivost procesu, tudíž vysokou zmetkovitost a k výrobě dílu potřeboval dlouhé cykly. Kolísal tedy okolo hranice rentability. Z toho důvodu byl pořízen stroj nový, konkrétně JSW machines J220ADS460H. Nejprve byl nový stroj s formou laděn konvenční metodou, kdy byli seřizovači nuceni spoléhat se pouze na své předchozí zkušenosti a technologické parametry zkoušeli zadávat ve víceméně náhodných kombinacích, o kterých soudili, že by mohly vést k požadovanému výsledku. Při tomto způsobu volení technologických parametrů se bez problémů pohybují ve stovkách nepoužitelných výstřiků a až týdnech bez možnosti vyrábět díly s požadovanými vlastnostmi. Ale i nový stroj při standardním nastavování parametrů nevykazoval dostatečnou stabilitu procesu, a tedy i nízkou zmetkovitost. Průměrně s časem cyklu 25 s dosahovala 2,5 %. To znamená, že při výrobě 288 kusů za hodinu vzniklo 8 zmetků. Z toho důvodu byla naměřena technická viskózní křivka. Stroj musel být vyřazen z provozu na necelou hodinu, kdy se vyráběly pouze testové vzorky. Při tomto konkrétním testování se vyrobilo pouhých 24 neúplných výstřiků (kdyby forma měla pouze jednu kavitu, jejich počet by byl poloviční). Tudíž už jen v této části byl ušetřen materiál, spotřebovaná energie a čas seřizovače. Po vyhodnocení křivky a nastavení nalezených parametrů zkušební provoz potvrdil předpokládanou zvýšenou stabilitu procesu. Zmetkovitost při 15 s dlouhém cyklu dosahovala pouze 0,2 %, takže při výrobě 480 kusů za hodinu vznikl pouze 1 zmetek. Kratší cykly umožnily vstřikování většího počtu výstřiků za hodinu s menším množstvím nepoužitelných výrobků. Bylo tedy možné zvětšit výrobní sérii, a tím snížit výrobní

⁸ Tekoucí tavenina se rozpojí do dvou proudů a následně spojí. Nedojde ale k úplnému propojení molekul, proto je na výrobku viditelná tenká linie, která signalizuje nižší pevnost v daném místě.

cenu dílu. V tabulce 1 jsou uvedeny náklady na výrobu dávky 1 000 000 kusů s původním a současným nastavením stroje JSW machines, které jsou běžně vyráběny. Čas na výrobu této dávky byl zkrácen o 55,12 dní. Zároveň došlo ke snížení nákladů za elektrickou energii potřebnou k výrobě dávky o 107 267 Kč.

Tabulka 1 Porovnání výrobního času a nákladů před a po aplikaci VTVK

Informace o výrobku, výrobní dávce 1 000 000 ks kelímků	Původní stav	Současný stav
Délka cyklu	24 s	15 s
Zmetkovitost na výrobní dávku	2,5%	0,4%
Čas na výrobu dávky shodných výrobků	138,8 dní	86,8 dní
Čas na výrobu neshodných výrobků	3,47 dní	0,35 dne
Celkový čas na výrobní dávku	142,27 dní	87,15 dní
Náklady el. energie na výrobu dávky shodných výrobků	148 238 Kč	44 497 Kč
Náklady el. energie na výrobu neshodných výrobků	3 706 Kč	180 Kč
Celkové náklady za el. energii na výrobu dávky	151 944 Kč	44 677 Kč

4 ZÁVĚRY

Vstřikování je velmi oblíbená metoda tváření plastů. Především proto, že zajišťuje velmi dobrou tvarovou a rozměrovou přesnost, a to i u výrobků s velmi složitou geometrií za krátký výrobní čas. Často ale v podnicích dochází k neefektivnímu využití strojů. Především kvůli neúplné znalosti tokových vlastností vstřikovaného materiálu, používání zbytečně nízkých vstřikovacích rychlostí a odhadnutí technologických parametrů metodou pokus–omyl opírající se o předchozí zkušenosti seřizovače. Tento fakt mění metoda vstřikování na technickou viskózní křivku, při jejímž použití je zmapován celý rozsah vstřikovacích rychlostí a jim odpovídající tokové vlastnosti. Díky tomu pak lze velmi snadno zvolit optimální vstřikovací rychlost a k ní doladit zbylé technologické parametry. V experimentu, kterým se zabývá tato bakalářská práce, bylo pomocí metody VTVK množství nepoužitelných výrobků sníženo o 2,1 % a délka cyklu zkrácena o 9 s. Díky menšímu množství zmetků, snížení spotřeby elektrické energie, a tím i emisí CO₂, byla nejen výrazně vyšší rentabilita stroje, ale i ekologičnost.

Je ale důležité podotknout, že metoda vstřikování na technickou viskózní křivku není takto účinná nebo dokonce vhodná ve všech případech. Použití této metody není vhodné u dílů, kde nesmí dojít k orientaci molekul, například u optických čoček. Dále metoda VTVK není aplikovatelná na velmi malé díly o hmotnosti řádově desetin gramů – na tak malém vstřikovacím objemu totiž nelze změřit hodnoty potřebné k sestavení křivky dostatečně přesně.

Seznam použitých zdrojů

1. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. publi.cz, 2016 [cit. 2018-04-08]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>.
2. SVOBODA, Rostislav. Vyznejte se ve vlastnostech plastů a jejich dělení. *FactoryAutomation* [online]. FANUC Czech, c2014–2018, 11. 9. 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/vyznejte-se-ve-vlastnostech-plastu-a-jejich-deleni/>.
3. Každodenní využití plastových obalů. In: *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava: Hornicko-geologická fakulta* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyuziti_ropy.html.
4. BOREALIS. Automobilový nárazník. In: *PlasticPortal.cz* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/kompozity-s-termoplastickou-matrici-a-automobilovy-prumysl-5-cast/c/2663/>.
5. IRISA. Reflektor automobilu. In: *Plasticportal.cz* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/irisa-slavi-60-let-existence/c/2361/>.
6. SULKO Profi Line. In: *TZB-info* [online]. c2001-2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/fasadni-okna/13260-sulko-profi-line-je-stale-jednickou-mezi-plastovymi-okny>.
7. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: Úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
8. LENFELD, Petr, Tomáš POUP, Jan BOČEK, Luboš BĚHÁLEK a Jan VYTLAČIL. *Technologie II: Zpracování plastů* [online]. Liberec, 2005 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm.
9. Polyetylen. In: *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity: Sekce fyziky* [online]. Brno: Pedagogická fakulta MU, 2013 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzv1a/fmkomplet3.htm>.
10. Bakelit. In: *Wikipedie* [online]. 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bakelit>.
11. BĚHÁLEK, Luboš. Schéma přípravy polyuretanu polyadící. In: *Publi.cz* [online]. c2011–2018, 2016 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/02.html>.
12. Plasty. In: *Katedra materiálu* [online]. Liberec, c2010 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM2/PLASTY_podklady.pp.
13. Struktura polymerů. In: *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity: Sekce fyziky* [online]. Brno: Pedagogická fakulta MU, 2013 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzv1a/fmkomplet3.htm>.
14. LENFELD, Petr, Tomáš POUP, Jan BOČEK, Luboš BĚHÁLEK a Jan VYTLAČIL. Průběh deformačních vlastností u amorfního plastu. In: *Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, c2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
15. BĚHÁLEK, Luboš. Schéma nadmolekulární struktury polymerů. In: *Publi.cz* [online]. 2016 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>.

16. LENFELD, Petr, Tomáš POUP, Jan BOČEK, Luboš BĚHÁLEK a Jan VYTLAČIL. Vliv struktury na modul pružnosti ve smyku. In: *Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, c2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
17. LENFELD, Petr, Tomáš POUP, Jan BOČEK, Luboš BĚHÁLEK a Jan VYTLAČIL. Průběh deformačních vlastností u semikrystalického plastu. In: *Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, c2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
18. LENFELD, Petr, Tomáš POUP, Jan BOČEK, Luboš BĚHÁLEK a Jan VYTLAČIL. Vliv stupně krystalinity na modul pružnosti ve smyku. In: *Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, c2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm.
19. STANĚK, Michal. *Modelování procesu tváření polymerů, včetně technologického řešení nástrojů: Modelling of polymers forming process inc. tools design: zkrácená verze Ph.D. Thesis*. Brno: VUTIUM, 2005. ISBN 80-214-3025-7.
20. HOVAD, J. *Návrh technologie výroby plastového krytu vrtačky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bohumil Kandus.
21. VYSOKAI, Jan a Jan KOHOUT. *Školení pro seřizovače vstřikovacích strojů*. Liberec: Libeos.
22. SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. publi.cz, 2016 [cit. 2018-04-09]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>.
23. SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi*. Praha: VerlagDashöfer, 2001. ISBN 80-862-2915-7.
24. LENFELD, Petr, Tomáš POUP, Jan BOČEK, Luboš BĚHÁLEK a Jan VYTLAČIL. Schéma vstřikovacího stroje. In: *Technická univerzita v Liberci: Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, c2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm.
25. LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. publi.cz, 2016 [cit. 2018-04-08]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>.
26. LENFELD, Petr. Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování. In: *publi.cz: Technologie vstřikování* [online]. 2016 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>.
27. Vstřikovací cyklus. In: *AvanceEurope* [online]. c2012–2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.vyrobaplastu.eu/vstrikovani-plastu/>.
28. Kontrolní a zkušební metody: Reologie. In: *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. Zlín [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf.
29. JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/14903740-Viskozita-tekutin-a-jeji-mereni.html>. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

30. HOLUBOVÁ, Renata. Newtonovské a nenewtonovské kapaliny. In: *Univerzita Palackého v Olomouci: Moduly jako prostředek inovace v integraci výuky moderní fyziky a chemie* [online]. Olomouc [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://mofychem.upol.cz/vystupy.html>.
31. HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014 [cit. 2018-04-28]. ISBN ISBN978-80-244-4178-8. Dostupné z: http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf.
32. ALEXY, Pavol. Reológia polymérov a výrobná prax. In: SVOBODA, Jan, ed. *Formy Brno 2015*. Brno, 2015, s. 13–21.
33. Zaplňování dutiny formy taveninou. STANĚK, Michal. *Modelování procesu tváření polymerů, včetně technologického řešení nástrojů: Modelling of polymers forming process inc. tools design: zkrácená verze Ph.D. Thesis*. Brno: VUTIUM, c2005. ISBN 80-214-3025-7.
34. ALEXY, Pavol. Definícia základných reologických veličín. In: SVOBODA, Jan, ed. *Formy Brno 2015*. Brno, 2015.
35. Time-independent fluids. In: *Polymer science* [online]. c2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Viscosity2.html>.
36. BĚHÁLEK, Luboš. Závislost dynamické viskozity tavenin polymerů na smykové rychlosti. In: *Docplayer.cz* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/35064912-Reologie-tavenin-termoplastu-v-prumyslove-praxi.html>.
37. SVOBODA, Jan. 10 bodů, které snižují ziskovost lisoven. In: *Formy a plasty Brno 2017*. Brno, 2017, s. 46–51.
38. KAZMER, David O. *Injection mold design engineering*. Cincinnati: HanserGardner, 2007. ISBN 978-3-446-41266-8.
39. BOZZELLI, John. Understanding Polymer Flow: Interpreting the Viscosity Curve. In: *Plastics Technology* [online]. 2012, 58(6), 23–24 [cit. 2018-03-21]. ISSN 00321257. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/>.
40. STANĚK, Michal. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů: Influence of technological parameters on polymer fluidity: teze habilitační práce* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017 [cit. 2018-04-04]. ISBN ISBN978-80-7454-674-7. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/>.
41. TORAY GROUP. Melt mass-flowrate. In: *Toray: Inovation by Chemistry* [online]. 2018 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.toray.jp/plastics/en/torelina/technical/tec_017.html.
42. DUCHÁČEK, Vratislav. *Základní pojmy z chemie a technologie polymerů, jejich mezinárodní zkratky a obchodní názvy* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1996 [cit. 2018-03-29]. ISBN 80-708-0265-0. Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-003/.

43. ALEXY, Pavol. MFI a reálna viskozita pri vstrikovaní pre rozdielne tokové krivky toho istého polyméru. In: SVOBODA, Jan, ed. *Formy Brno 2015*. Brno, 2015.
44. Ukázka dostupných forem pro spirálové zkoušky zatékavosti. STANĚK, Michal. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů: Influence of technological parameters on polymer fluidity: teze habilitační práce* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017 [cit. 2018-04-04]. ISBN 978-80-7454-674-7. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/41577/stan%C4%9Bk_2017_teze.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
45. BEAUMONT, Alex. Shear-sensitive plastic. In: *Beaumont Technologies, Inc.* [online]. c2018 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://www.beaumontinc.com/meltflipper/>.
46. BELZ, Travis A. Temperature difference across a runner channel before and after a branch. In: *Med Device Online* [online]. c1996–2018 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <https://www.meddeviceonline.com/doc/the-most-misunderstood-problem-in-medical-injection-molding-and-how-to-solve-it-0001>.
47. Sheared Plastic. In: *Beaumont Technologies, Inc.* [online]. c2018 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://www.beaumontinc.com/meltflipper/>.
48. BOZZELLI, John. Do You Need to Profile Injection Velocity? *Plastics Technology* [online]. 2016, 62(3), 20-21 [cit. 2018-03-21]. ISSN 00321257. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/>.
49. BOZZELI, John. Good Reasons to Make a Short Shot, And How to Do It Right. *Plastics Technology* [online]. 2010, 56(2), 13-13 [cit. 2018-03-21]. ISSN 00321257. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/>.
50. GATTSHALL, Robert. Scientific Molding Gone Wrong. *Plastics Technology* [online]. 2015, 61(5), 38-41 [cit. 2018-03-21]. ISSN 00321257. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/>.
51. BOZZELLI, John. Understanding Polymer Flow: Interpreting the Viscosity Curve. *Plastics Technology* [online]. 2012, 58(6), 23-24 [cit. 2018-03-21]. ISSN 00321257. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/>.
52. The Japan Steel Works, Ltd. *Injection Molding Machine Lessons: Basic Practise*. Japan.
53. AUSPERGER, Aleš. Vstrikovani na technickou viskozni krivku Tanitech. In: *YouTube* [online]. 14. 7. 2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://youtu.be/DHIIZoxzGVk>.
54. The Japan Steel Works, Ltd. Program Settings of Injection Speeds. *Injection Molding Machine Lessons: Basic Practise*. Japan.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
F_u	Uzavírací síla	[N]
F_p	Přisouvací síla	[N]
M	Molární hmotnost polymeru	[g.mol ⁻¹]
M_o	Molární hmotnost strukturní jednotky	[g.mol ⁻¹]
n	Polymerační stupeň	[-]
p_i	Vnitřní tlak	[Pa]
p_z	Zbytkový tlak	[Pa]
T_f	Teplota viskozního toku	[°C]
T_g	Teplota skelného přechodu	[°C]
T_m	Teplota tání	[°C]
T_z	Teplota degradace polymeru	[°C]
t_d	Doba dotlaku	[s]
t_{ch}	Doba chladnutí	[s]
t_m	Manipulační doba	[s]
t_{pl}	Doba plastikace	[s]
t_{s1}	Doba pohybu pohyblivé části formy	[s]
t_{s2}	Doba pohybu vstřikovací jednotky k formě	[s]
t_{s3}	Doba k otevření formy a vyhození výstřiku	[s]
t_v	Doba vstřikování	[s]
u_x	Posun vrstvy při toku	[m]
v_x	Rychlost toku	[m.s ⁻¹]
y	Souřadnice kolmá ke stěně	[m]
α	Teplotní roztažnost	[K ⁻¹]
$\dot{\gamma}$	Smyková rychlost	[s ⁻¹]
η	Dynamická viskozita	[Pa.s]
η_a	Zdánlivá dynamická viskozita	[Pa.s]
τ	Smykové napětí	[Pa]

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
MFI	Index toku taveniny
MFR	Index toku taveniny
VTVK	Vstřikování na technickou viskózní křivku

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklady použití plastů [3], [4], [5], [6].....	10
Obr. 2 Spojení monomerů do polymerového řetězce [9].....	11
Obr. 3 Vznik polykondenzátu [10].....	11
Obr. 4 Polyadice polymerů [11].....	12
Obr. 5 Lineární polymery [13].....	12
Obr. 6 Rozvětvené polymery [13].....	12
Obr. 7 Zesíťované polymery [13].....	12
Obr. 8 Nadmolekulární struktura polymerů a) amorfních, b) semikrystalických [14].....	13
Obr. 9 Vliv teploty na deformační vlastnosti amorfních plastů [10].....	14
Obr. 10 Ovlivnění modulu pružnosti teplotou a strukturou [16].....	15
Obr. 11 Vliv teploty na deformační vlastnosti semikrystalických polymerů [17].....	15
Obr. 12 Závislost stupně krystalinity na modulu pružnosti ve smyku [18].....	16
Obr. 13 Schéma horizontálního vstřikovacího stroje [24].....	17
Obr. 14 Schéma vstřikovacího cyklu [26].....	18
Obr. 15 Průběh tlaku v dutině formy, pohybu formy a šneku [27].....	19
Obr. 16 Fontánový tok [33].....	20
Obr. 16 Schéma k definici reologických veličin [34].....	20
Obr. 17 Reogram tekutin [35].....	21
Obr. 18 Porovnání závislosti dynamické viskozity strukturně viskózních pseudoplastických polymerních tavenin a newtonských kapalin na smykové rychlosti [36].....	21
Obr. 19 Plastometr na měření MFI [41].....	22
Obr. 20 Rozdílné tokové křivky daného materiálu se stejným MFI a různou distribucí molekul [43].....	22
Obr. 21 Příklady spirálových forem [44].....	23
Obr. 22 Rozložení a) smykového napětí b) teplot ve studeném kanálu [45].....	23
Obr. 23 Rozdělení taveniny při větvení kanálu [46].....	23
Obr. 24 Plnění kavit taveninou [47].....	24
Obr. 25 Rozložení a) smykového napětí, b) teplot ve studeném kanálu při vyšších vstřikovacích rychlostech [45].....	24
Obr. 26 Porovnání křivek technické viskozity z hydraulického a plně elektrického stroje.....	25
Obr. 27 Profilování rychlosti při vstřikování dílu s různými tloušťkami stěny [54].....	26
Obr. 28 Technická viskózní křivka naměřená na stroji JSW machines J220ADS460H.....	27
Obr. 29 Asymetricky naplněné díly.....	28
Obr. 30 Vzorčky vyrobené při vstřikovacích rychlostech 20, 40 a 60 mm.s ⁻¹	28
Obr. 31 Vzorčky vyrobené při vstřikovacích rychlostech 90, 130, 200 mm.s ⁻¹	29

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání výrobního času a nákladů před a po aplikaci VTVK

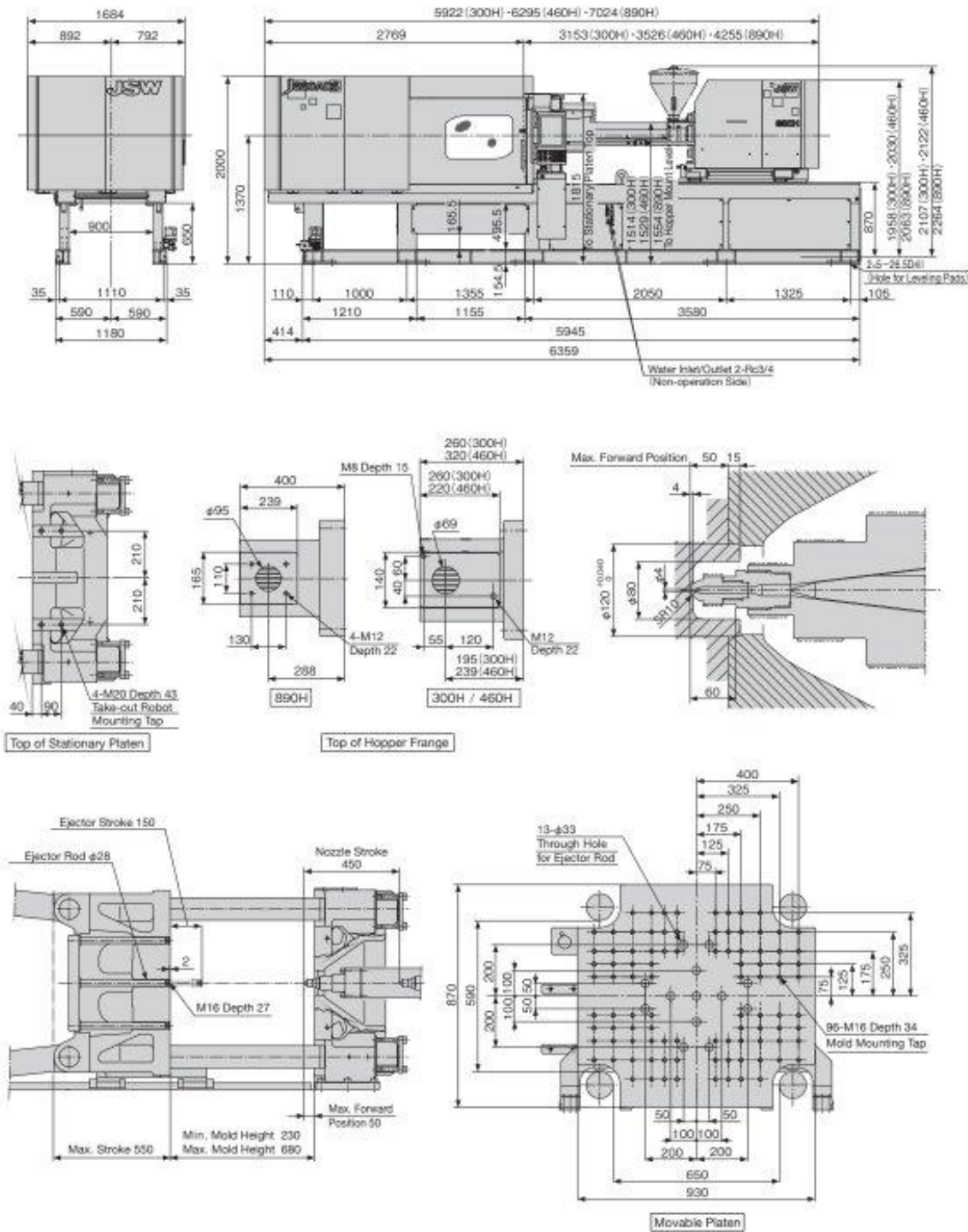
Seznam příloh

- Příloha 1 Schéma a rozměry stroje JSW machines J220ADS460H
- Příloha 2 Parametry stroje JSW machines J220ADS
- Příloha 3 Tabulka hodnot k vytvoření technické viskózní křivky

Příloha 1 - Schéma a rozměry stroje JSW machines J220ADS460H



Equipment Dimensions And Mold Related Dimensions



JSW

Příloha 2 - Parametry strojů JSW machines J200ADSP



Performance Table

Unit	Item	Model	J220ADS									
			300H			460H			890H			
Injection Unit	Screw Diameter	mm	40	46	51	46	53	58	58	66	72	
	Screw Stroke	mm	180			210			260			
	Theoretical Injection Capacity	cm ³	226	299	368	349	463	555	687	890	1059	
	Injection Capacity (GP-PS)	g	206	273	335	318	421	505	625	810	965	
	Standard	Injection Pressure (Max.)	MPa(kg/cm ²)	250 2550	189 1920	154 1570	234 2380	177 1800	147 1490	229 2330	177 1800	149 1510
		Holding Pressure (Max.)	MPa(kg/cm ²)	227 2310	172 1750	140 1420	213 2170	161 1640	134 1360	208 2120	161 1640	135 1370
		Injection Speed	mm/s	240			160			160		
		Injection Rate	cm ³ /s	302	399	490	266	353	423	423	547	651
		Plasticizing Rate (GP-PS)	kg/h	130	184	232	115	163	197	197	262	336
		Screw Speed	min ⁻¹	400			250			250		
	High Speed (Option)	Injection Pressure (Max.)	MPa(kg/cm ²)	250 2550	189 1920	154 1570	234 2380	177 1800	147 1490	229 2330	177 1800	149 1510
		Holding Pressure (Max.)	MPa(kg/cm ²)	227 2310	172 1750	140 1420	213 2170	161 1640	134 1360	208 2120	161 1640	135 1370
		Injection Speed	mm/s	330			300			270		
		Injection Rate	cm ³ /s	415	548	674	499	662	793	713	924	1099
Plasticizing Rate (GP-PS)		kg/h	130	184	232	161	226	275	197	262	336	
Screw Speed		min ⁻¹	400			350			250			
Clamping Unit	Nozzle Touch Force	kN(tf)	39.3 4.0 Center Nozzle Touch									
	Nozzle Stroke from Platen	mm	50									
	Type of Nozzle		Open Nozzle (Tip Type)									
	Barrel Temperature Control		Barrel4, Nozzle1			Barrel5, Nozzle1						
	Heater Wattage	kW	12.0			12.4			18.7			
	Mechanism		Double Toggle									
	Clamping Force	kN(tf)	2160 220									
	Daylight Opening (Max.)	mm	1230									
	Opening Stroke (Max.)	mm	550									
	Mold Height	mm	230~680									
General	Distance Between Tie-bars (HxV)	mm	650x590									
	Platen Size (HxV)	mm	930x870									
	Locating Ring Diameter	mm	φ120H7 (Depth15)									
	Ejector Point		13 Points									
	Ejector Force	kN(tf)	44.2 4.5									
	Ejector Stroke	mm	150									
	Machine Weight	t	10.5			11.1			11.6			
	Machine Dimensions (LxWxH)	m	6.36x1.68x2.00			6.36x1.68x2.03			7.02x1.68x2.06			

Remarks:

1. Maximum injection pressure and maximum holding pressure may be restricted due to molding condition.
2. The theoretical injection capacity is (cross sectional area of barrel) × (stroke of screw).
3. The injection capacity is applicable for GP-PS and variable according to the grade of resin, molding conditions and mold.
4. The plasticizing rate is applicable for GP-PS.
5. PC, HPVC, other engineering plastic, etc., low temperature setting and high speed molding may require a high torque depending on the grade or molding conditions. Please contact us if you plan.

Note:

1. Due to continual improvements, specifications are subject to change without notice.
2. Actual figures of the specification will vary depending on final machine configuration. Please contact us if you require more specific data.
3. Performance specifications are based on theoretical data.
4. High speed injection is optional.
5. 1MPa=10.2 kgf/cm², 1kN=0.102tf

JSW

Příloha 3 - Tabulka hodnot k vytvoření technické viskózní křivky

Datum	16.3.2018	Stroj, uzavírací síla		J220ADS, 220 tun	Intenzifikační poměr			1,0	
Název formy		Rail 1897			Zdvih šneku včetně dekomprese [mm]			81,00	
Materiál		PP			Pozice přepnutí [mm]			40,00	
Díl	Vzorek	Vybraný čas plnění [s]	0,56	Velikost zdvihu [mm]			41,00		
Číslo vstříku	Nastavená v. rychlost	Čas plnění	Hydraulický tlak při přepnutí	Inten. poměr	Tlak v tavenině	Technická viskozita	Smyková rychlost	Reálná v. rychlost	Velikost polštáře
[-]	[mm.s ⁻¹]	[s]	[bar]	Ri	[bar]	[bar.s]	[s ⁻¹]	[mm.s ⁻¹]	[mm]
1	200	0,25	956	1,0	956	239	4,00	164,00	35,01
2	160	0,30	907	1,0	907	272	3,33	136,67	35,74
3	130	0,36	871	1,0	871	314	2,78	113,89	36,17
4	90	0,50	813	1,0	813	407	2,00	82,00	36,77
5	70	0,63	778	1,0	778	490	1,59	65,08	37,06
6	50	0,88	735	1,0	735	647	1,14	46,59	37,34
7	40	1,09	710	1,0	710	774	0,92	37,61	37,48
8	20	2,17	653	1,0	653	1 417	0,46	18,89	37,77
9	10	4,32	663	1,0	663	2 864	0,23	9,49	37,90
10	6	7,20	680	1,0	680	4 896	0,14	5,69	37,95
11	4	10,79	668	1,0	668	7 208	0,09	3,80	37,97
12	3	14,42	675	1,0	675	9 734	0,07	2,84	37,98