



POROVNÁNÍ PEVNOSTI VSTŘIKOVANÉHO DÍLU Z POLYAMIDU S PEVNOSTÍ ZÍSKANOU ZE SIMULAČNÍHO PROGRAMU

Bakalářská práce

Studijní

program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Petr Jedinák**

Vedoucí práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:



POROVNÁNÍ PEVNOSTI VSTŘIKOVANÉHO DÍLU Z POLYADMIDU S PEVNOSTÍ ZÍSKANOU ZE SIMULAČNÍHO PROGRAMU

Anotace:

Bakalářská práce porovnává pevnost vstřikovaného polyamidu s pevností ze simulačního programu Cadmould 3D-F. Teoretická část je zaměřena zejména na popis technologie vstřikování. Experimentální část popisuje výrobu zkušebních vzorků, tahovou zkoušku, simulaci vstřikování a mechanickou analýzu.

Klíčová slova:

vstřikování, plasty, polyamid, simulační program, Cadmould 3D-F, pevnost

Annotation:

Bachelor thesis compares the strength of injected polyamide with the strength of a simulation program Cadmould 3D-F. Theoretical part focuses on the description of the injection molding technology. Experimental part describes production of test samples, tensile test, the simulation of injection molding and mechanical analyses

Key words:

injection, plastics, polyamide, simulation program, Cadmould 3D-F, strength



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Aleši Auspergerovi, Ph.D. za jeho rady a připomínky, Ing. Jiřímu Habrovi za zhotovení vzorků vstříkovaním, dále Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za asistenci při trhací zkoušce a další cenné rady a v neposlední řadě Ing. Michaele Kolnerové, Ph.D. za rady týkající se formální stránky této práce.



Obsah

| | |
|--|--------|
| <i>Seznam použitých zkratk a symbolů</i> | - 9 - |
| 1. ÚVOD | - 11 - |
| 2. TEORETICKÁ ČÁST | - 13 - |
| 2.1 <i>Definice plastů</i> | - 13 - |
| 2.2 <i>Příprava plastů</i> | - 13 - |
| 2.3 <i>Rozdělení plastů</i> | - 14 - |
| 2.3.1 <i>Dle působení teploty</i> | - 14 - |
| 2.3.2 <i>Dle nadmolekulární struktury</i> | - 15 - |
| 2.3.2 <i>Dle druhu přísad</i> | - 16 - |
| 2.4 <i>Polyamidy</i> | - 17 - |
| 2. 4. 1 <i>Navlhavost polyamidů</i> | - 18 - |
| 2.5 <i>Technologie vstřikování</i> | - 19 - |
| 2.5.1 <i>Princip vstřikování</i> | - 19 - |
| 2.5.2 <i>Postup vstřikování</i> | - 19 - |
| 2.5.3 <i>Vstřikovací cyklus</i> | - 20 - |
| 2.6 <i>Vstřikovací zařízení</i> | - 24 - |
| 2.6.1 <i>Vstřikovací jednotka</i> | - 24 - |
| 2.6.2 <i>Uzavírací jednotka</i> | - 25 - |
| 2.6 <i>Technologické parametry procesu vstřikování</i> | - 26 - |
| 2.7 <i>Jevy probíhající po vstřikování</i> | - 29 - |
| 2.7.1 <i>Smrštění</i> | - 29 - |
| 2.7.2 <i>Pnutí</i> | - 30 - |
| 2.7.3 <i>Krystalizace</i> | - 31 - |
| 2.8 <i>Zkouška tahem</i> | - 32 - |
| 2.8.1 <i>Zkušební vzorky</i> | - 32 - |
| 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | - 35 - |
| 3.1 <i>Vstřikované materiály</i> | - 35 - |



| | |
|--|---------------|
| 3.2 Výroba zkušebních vzorků vstřikováním | - 35 - |
| 3.3 Zkouška tahem | - 39 - |
| 3.4 Simulace | - 46 - |
| 3.4.1 Simulační program | - 46 - |
| 3.4.2 Simulace vstřikování | - 47 - |
| 3.4.3 Mechanická analýza | - 49 - |
| 4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ | - 53 - |
| 4.1 Porovnání pevnosti jednotlivých variant z trhací zkoušky | - 53 - |
| 4.2 Porovnání pevnosti suchých a vlhkých vzorků z trhacího zkoušky | - 54 - |
| 4.3 Porovnání pevnosti získané z trhací zkoušky s předepsanou teoretickou pevností ... | - 55 - |
| 4.4 Porovnání výsledků z trhacího zařízení s výsledky ze simulace | - 55 - |
| 5. ZÁVĚR | - 58 - |
| POUŽITÁ LITERATURA | - 60 - |
| SEZNAM PŘÍLOH | - 62 - |



Seznam použitých zkratek a symbolů

ČSN - česká technická norma

EN – evropská norma

ISO - Mezinárodní organizace pro normalizaci

PE - polyethylen

PP - polypropylen

PS – polystyren

PVC - polyvinylchlorid

PA - polyamid

PMMA - polymethylmethakrylát

PC - polykarbonát

PTFE - polytetrafluorethylen

PET - polyethylentereftalát

POM - polyoxymetylen

ABS - akrylonitrilbutadienstyren

HDPE - vysokohustotní polyethylen

LDPE - nízkohustotní polyethylen

PEEK - polyetherketon

FEM – metoda konečných prvků

T_m - teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]

T_f - teplota viskózního toku [$^{\circ}\text{C}$]

T_g - teplota zeskelnění [$^{\circ}\text{C}$]

T_f - teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]

T_v - teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]

p - vnější tlak [MPa]

p_i - vnější tlak [MPa]

p_{vs} - vstřikovací tlak [MPa]

p_z - zbytkový tlak [MPa]

t_{s1}, t_{s2}, t_{s3} - strojní časy [s]



t_v - doba plnění [s]
 t_{ch} - doba chlazení [s]
 t_D - doba dotlaku [s]
 t_{pl} - doba plastikace [s]
 t_m - manipulační doba [s]
 s_k - pohyb šneku [mm]
 s_N - pohyb formy [mm]
 F_p - přisouvací síla [N]
 F_u – uzavírací síla [N]
 S - smrštění [%]
 X_f - rozměr v dutině formy při teplotě 23 °C [mm]
 X_v - rozměr výrobku při teplotě 23 °C [mm]
 σ_m - mez pevnosti v tahu [MPa]
 F_{max} – maximální síla [N]
 S_0 - původní průřez zkušebního tělesa [mm^2]
 σ_y - mez kluzu [MPa]
 ε – poměrné prodloužení [%]
 E - modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa]
 ΔL_0 - zvětšení počáteční měřené délky [mm]
 L_0 - počáteční měřená délka [mm]
 v - trhací rychlost [mm/min]

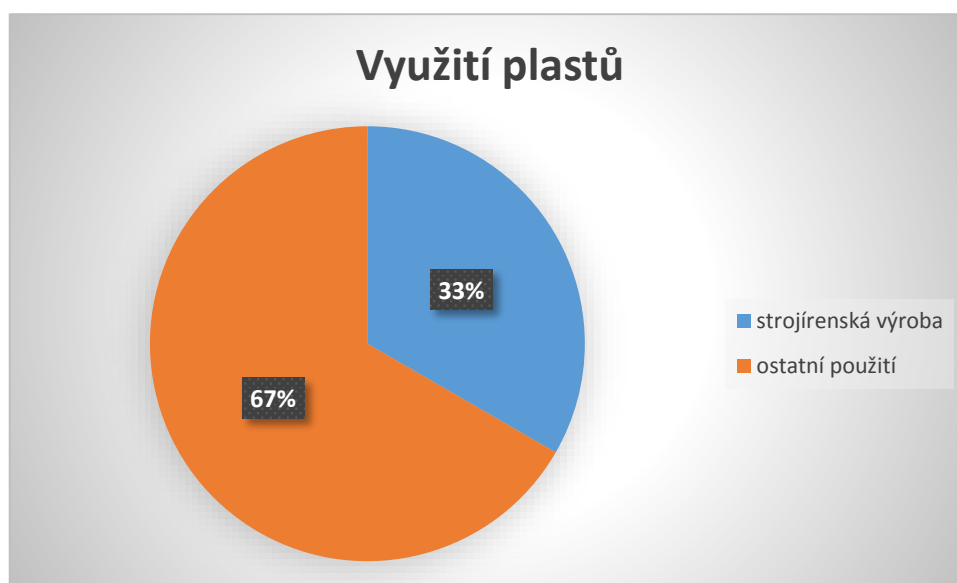


1. ÚVOD

S přírodními polymery (myšleno dřevo, kůže nebo rostlinná vlákna), se lidstvo setkává již od svých začátků. Umělé polymery neboli plasty byly objeveny až v 19. století.

K masovému rozvoji plastů a jejich využití došlo během 2. světové války, kde je začala využívat zejména armáda USA. Druhá polovina 20. století se již dá charakterizovat jako éra plastů.

V dnešní době nám plasty nahrazují tradiční materiály, jako jsou: kovy, dřevo, sklo, kůže, papír, přírodní pryž a další a to zejména díky svým vlastnostem. Jsou lehké, pevné, odolné proti korozi, trvanlivé, snadno zpracovatelné a mají dobré izolační vlastnosti. Nesmíme však zapomínat na velkou nevýhodu plastů, což je závislost téměř všech mechanických vlastností na teplotě, rychlosti a době zatěžování. Naprostá většina plastů se spotřebuje na technické účely, na strojírenskou výrobu přibližně jedna třetina (viz Obr. 1).



Obr. 1 Využití plastů

S objevením těchto materiálů souvisí i otázka jejich zpracování. Mezi nejčastější způsoby zpracování pro strojírenskou výrobu patří lisování, vytlačování, vyfukování, kalandrování (válcování) a konečně i vstřikování.



Vstřikování je nejpoužívanější a nejrozšířenější technologie zpracování plastů. Lze s ní zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů, v omezené míře i některé reaktoplasty a kaučuky.

Vstřikováním se ve zkratce rozumí způsob tváření, při kterém je dávka roztaveného plastu vstříknuta pod tlakem do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne ve finální výrobek.

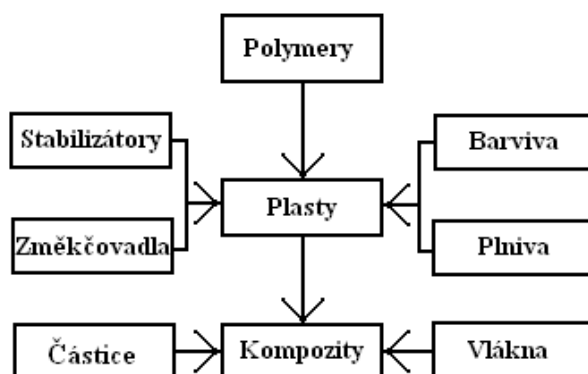
Cílem této práce je porovnání pevnosti vstřikovaného dílu z polyamidu s pevností získanou ze simulačního programu Cadmould 3D-F. Předložená bakalářská práce se dělí na část teoretickou, kde dojde k seznámení se se vstřikovaným materiálem, danou technologií a obecnou tahovou zkouškou plastů, a část experimentální, kde bude popsáno zhotovení dílů z polyamidu (samotné vstřikování), postup zkoušky pevnosti v tahu, modelování, simulace vstřikování a výsledná mechanická analýza z programu Cadmould 3D-F. Na závěr budou porovnány výsledky tahové zkoušky s výsledky ze simulačního programu.



2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Definice plastů

Plasty neboli plastické hmoty jsou dle ČSN 64 0001 materiály, jejichž podstatou jsou makromolekulární látky - polymery, které lze tvářet (teplem, tlakem, atd.). Makromolekulární látka je látka, jejíž molekulová hmotnost je vyšší než 10 000. Z chemického hlediska se jedná o organické sloučeniny.



Obr. 2 polymery – plasty - kompozity

Z obr. 2 vyplývá, že plasty jsou materiály, které jsou tvořeny polymery a přísadami typu plniv, změkčovadel apod.

2.2 Příprava plastů

Makromolekulární látky se připravují tzv. polyreakcemi. Jedná se o jednoduché chemické reakce, které se mohou mnohokrát opakovat. Polyreakce se mohou zúčastnit chemické sloučeniny, které mají v molekule minimálně 2 funkční skupiny, které jsou schopné reagovat s dalšími molekulami. Původní nízkomolekulární sloučenina, zvaná monomer, přechází ve vysokomolekulární látku – polymer. Existují 3 základní druhy polyreakce: polymerace, polykondenzace a polyadice. Jak již bylo psáno výše, polymer se stává plastem poté, co ho



smícháme a smísíme s nezbytnými přísadami a převedeme do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování, např. do formy granulí, tablet, prášků, apod.

2.3 Rozdělení plastů

2.3.1 Dle působení teploty

- **Termoplasty** - polymerní materiály, které při zahřívání mění svůj stav na plastický a stávají se z nich vysoce viskózní neneutronovské kapaliny, které lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod určitou teplotu (teplotu tání T_m u semikrystalických plastů, resp. teplotu viskózního toku T_f u amorfních plastů). Při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, nastávají pouze změny fyzikální povahy, tudíž lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Mezi termoplasty se řadí většina zpracovávaných hmot jako je PE, PP, PS, PVC, PA atd.
- **Reaktoplasty** - polymerní plasty, které se občas (nesprávně) označují termosety. V první fázi zahřívání rovněž měknou a dají se tvářet. Tvářitelnost si ovšem udržují jen omezenou dobu. Při dalším zahřívání dochází k chemické reakci a výsledkem je prostorově zesíťovaná struktura - dojde k vytvrzení. Tento děj je nevratný, vytvrzenou hmotu nelze znovu roztavit ani rozpustit, protože by došlo k degradaci. Do této skupiny plastů patří například fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice a polyesterové hmoty.
- **Kaučuky, pryže a elastomery** - polymerní materiály, které stejně jako reaktoplasty v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, ale jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dojde k chemické reakci - tzv. vulkanizaci. Výsledkem je opět prostorově zesíťovaná struktura.

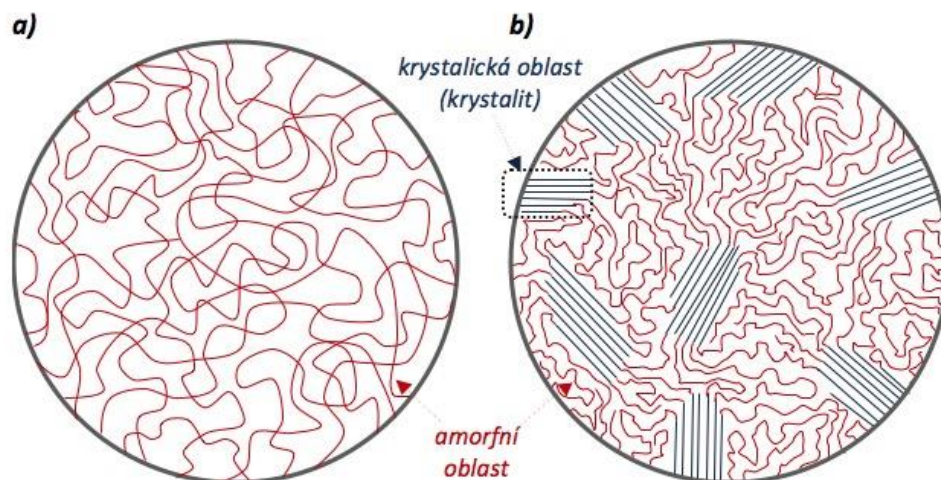
Pozn.: U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, lze tedy podobně jako u termoplastů proces měknutí a tuhnutí opakovat teoreticky neomezeně.



2.3.2 Dle nadmolekulární struktury

Jedná se o schopnost makromolekul dosáhnout většího či menšího stupně uspořádanosti. Dělí se na 2 skupiny, schéma jejich struktury lze vidět na Obr. 3.

- Amorfni - makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici, řetězce v prostoru jsou nepravidelně propleteny a zkrouceny. Jsou charakteristické křehkostí, tvrdostí, vysokou pevností a jsou průhledné či čiré. Patří sem např. PS, PMMA, PC apod. Amorfni polymery lze použít do teploty zesknění T_g .
- Krystalické - makromolekuly vykazují určitý stupeň uspořádanosti, kterému říkáme stupeň krystalinity. Vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených mezi oblastmi amorfni. Uspořádanost makromolekul nedosahuje 100%, proto se plasty označují jako semikrystalické. Podle druhu plasty se stupeň krystalinity pohybuje od 40 do 90%. Jsou charakteristické houževnatostí materiálu, pevností a mléčnou zakalenou barvou. Patří sem PE, PP, PA, PTFE, POM atd. Použitelnost semikrystalických plastů je do teploty tání T_m .



Obr. 3 Schéma nadmolekulární struktury polymerů a) amorfni b) semikrystalické

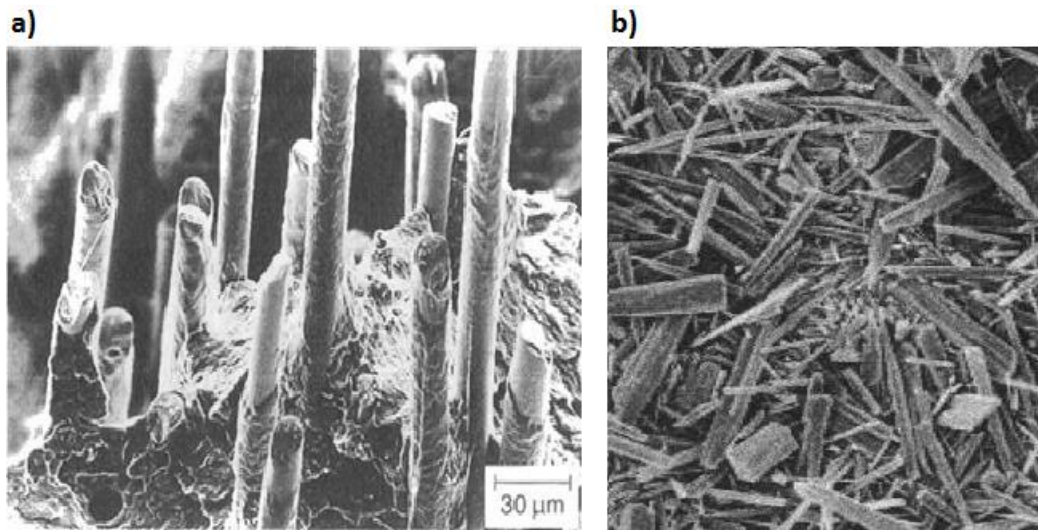


2.3.2 Dle druhu přísad

Přísadami jsou myšlena plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, tvrdidla, nadouvadla, retardéry hoření apod.

- neplněné plasty - plast, u kterého množství přísad prakticky neovlivňuje vlastnosti polymerní matice
- plněné plasty (viz. Obr. 4) - u těchto plastů plnivo výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti

Plniva mají za úkol zlepšovat buď mechanické vlastnosti materiálu, nebo tvarovou stálost či chemickou odolnost při zvýšené teplotě. Rozlišujeme vyztužující (skleněná, uhlíková či bavlněná vlákna) a nevyztužující plniva ve formě prášku. Jedná se např. o moučku z břidlice, kaolinu a křídly.



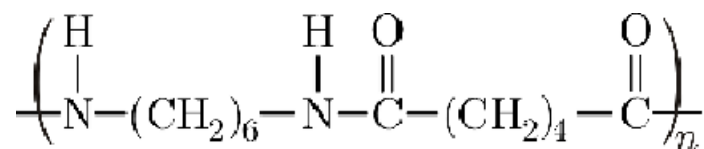
Obr. 4 Struktura plastu a) se skelnými vlákny b) s kovovými pilinami

Dále lze dělit plasty podle polaritity na polární (mají trvalý pól) a nepolární, na přírodní a syntetické a další.

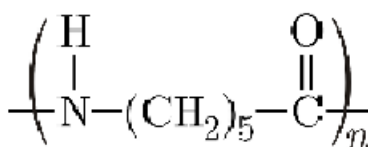


2.4 Polyamidy

Jedná se o řadu polymerů, jejichž hlavní řetězec obsahuje kromě atomů uhlíku i atomy dusíku. Dusík je vázán v tzv. amidové skupině -NH-CO- (viz. Obr. 5), která je pro polyamidy charakteristická.



Nylon 66



Nylon 6

Obr. 5 Chemická struktura polyamidových vláken (Nylon 66 = PA 66, Nylon 6 = PA 6)

Polyamidy (dále jen PA) jsou silně polární. Umožňují tvorbu vodíkových můstků mezi makromolekulami, které představují relativně silnou mezimolekulární vazbu. Ta způsobuje vysokou pevnost a vysoké teploty tání PA. Další významnou vlastností je, že absorbují vodu ve značném množství.

Čísla za označením PA charakterizují výchozí polymery podle počtu atomů uhlíku v jejich molekulách.

PA 6 (polyamid 6, polykaprolaktam)

Je semikrystalický termoplast tvořený lineárními makromolekulami. Obsah krystalické fáze je 25 až 45 %. Jedná se o konstrukční plast s výhodnými mechanickými vlastnostmi, které se mohou měnit podle obsahu monomeru a vody v polymeru. Pevnost v tahu se pohybuje přibližně od 40 do 80 MPa, modul pružnosti od 900 do 1600 MPa. Teplota tání je poměrně vysoká, může být až 250 °C. Má dobré kluzné vlastnosti (díky nízkému součiniteli tření), vysokou houževnatost, odolnost proti otěru a dobrou chemickou stálost. Vykazuje značný sklon ke krípu (tečení). Elektrické vlastnosti jsou v důsledku silné polarizace hmoty špatné a zhoršují se i v důsledku absorpce vody.



PA6 má široké využití. Díky již zmíněným kluzným vlastnostem se používá na výrobu ložisek schopných pracovat i bez mazání. Dále například pro ozubená kola (tichý chod), řetězová kola, těsnicí kroužky, podložky, trubky apod.

Konstrukční vlastnosti PA6 lze zlepšit přidáním krátkých skleněných vláken (v množství 15 až 50%). Skleněné vlákno zvyšuje pevnost (až na 130 MPa), modul v pružnosti (až 9000 MPa), a tvarovou stálost. Nevýhodou je zhoršení houževnatosti a otěruvzdornosti. Tyto plasty se používají na kryty ručních vrtaček, brusek, kotoučových pil apod.

PA 66 (polyamid 66, polyhexamethylenadipamid)

Základem PA66 je hexametyléndiamin a kyselina adipová, z nichž vzniká polykondenzací. Jelikož neobsahuje monomer, má úzkou oblast tání. Oproti PA6 má asi o 20% lepší mechanické vlastnosti ($E = 2000$ MPa). Dokáže trvale odolávat poměrně vysokým teplotám (až 100°C).

Vstřikováním se z něho vyrábějí ozubená kola, kluzná uložení a ložiska, kladky, řemenice apod.

PA 610

Je obdobný typ jako PA66, od něhož se však liší větší rázovou i vrubovou houževnatostí, ale nižší pevností (45 až 55 MPa). Jelikož přijímá méně vody než PA6 a PA66, tak je použitelný i ve vlhkém prostředí, kde si drží svoji rozměrovou stálost.

PA 11 a PA 12

Tyto plasty tvoří přechod k polyolefinům. Mají nízkou hustotu (nejmenší ze všech polyamidů) i nejnižší navlhavost (přijímají méně než 2% vody). Pyšní se vysokou rázovou a vrubovou houževnatostí, ale i dobrými elektroizolačními a dielektrickými vlastnostmi za vlhka.

2. 4. 1 Navlhavost polyamidů

Jak již bylo řečeno, polyamidy absorbují vodu (vlhkost) ve značném množství. Této vlastnosti říkáme navlhavost. Důsledkem navlhavosti polymerů je zejména pokles meze pevnosti a modulu pružnosti, ale také zvýšení houževnatosti a tažnosti.



2.5 Technologie vstřikování

Vstřikování plastů se řadí mezi nejvíce používané technologie zpracování termoplastů. Díl vzniklý vstřikováním - tzv. výstřik je většinou finální výrobek. Jsou i případy, kdy se může jednat o polotovar. Výstřiky se vyznačují vysokou rozměrovou i tvarovou přesností. Mezi další výhody této technologie patří krátký čas cyklu a schopnost vyrábět tvarově složité součásti. Jedná se o finančně náročnou technologii, tudíž se uplatňuje zejména ve velkosériové a hromadné výrobě, kde se tento faktor lehce odbourá. Další nevýhodou jsou dlouhé doby pro výrobu forem a také to, že strojní zařízení je neúměrně veliké v porovnání s finálním výstřikem.

2.5.1 Princip vstřikování

Vstřikováním se rozumí způsob tváření, při kterém je dávka roztaveného plastu z pomocné tlakové komory vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny formy (kovové), kde ztuhne do podoby finálního výrobku. Jedná se o proces diskontinuální a cyklický.

2.5.2 Postup vstřikování

Materiál (plast) ve formě granulí (viz. Obr. 6) se nasype do násypky, z níž ho odebírá otáčející se šnek.



Obr. 6 Granuláty plastu

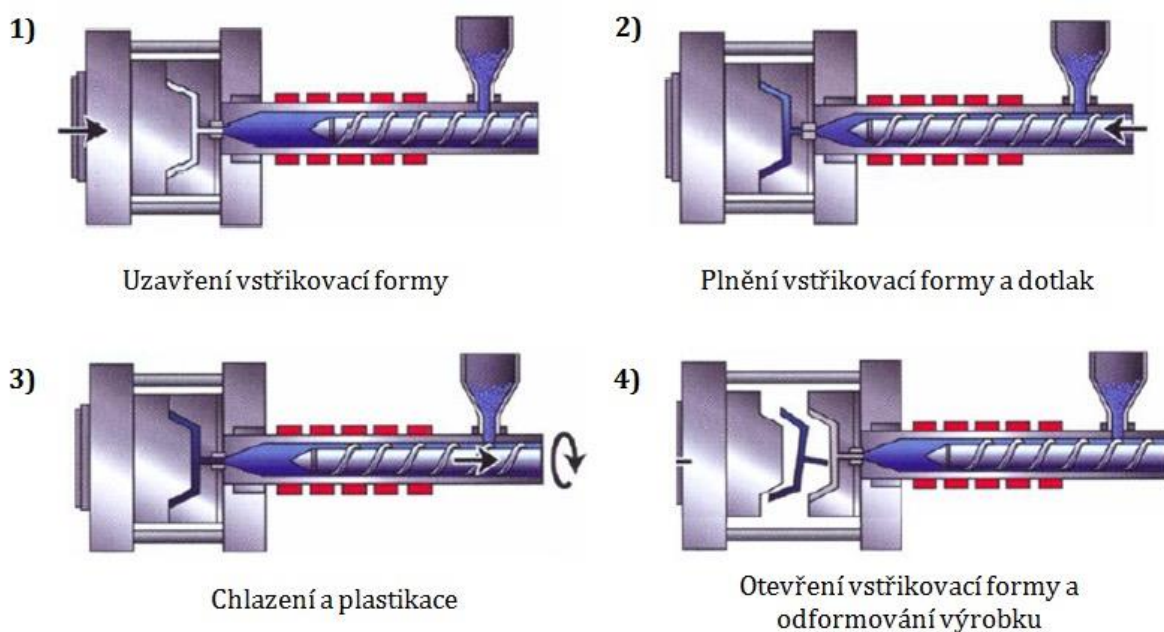
Ten ho dále dopravuje do tavicí komory vyhřívané elektrickými odporovými pásy. Zde dojde k překročení teploty tání daného plastu a stane se z něj tavenina, která je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela vyplní a zaujme její tvar. Forma je kovová a je chlazená vodou, která protéká jejími kanálky. Hmota v dutině předává do formy teplo, tím



chladne a postupně tuhne. Následně se forma otevře a výstřik je vyhozen pomocí vyhazovacích kolíků. Celý cyklus se opakuje.

2.5.3 Vstřikovací cyklus

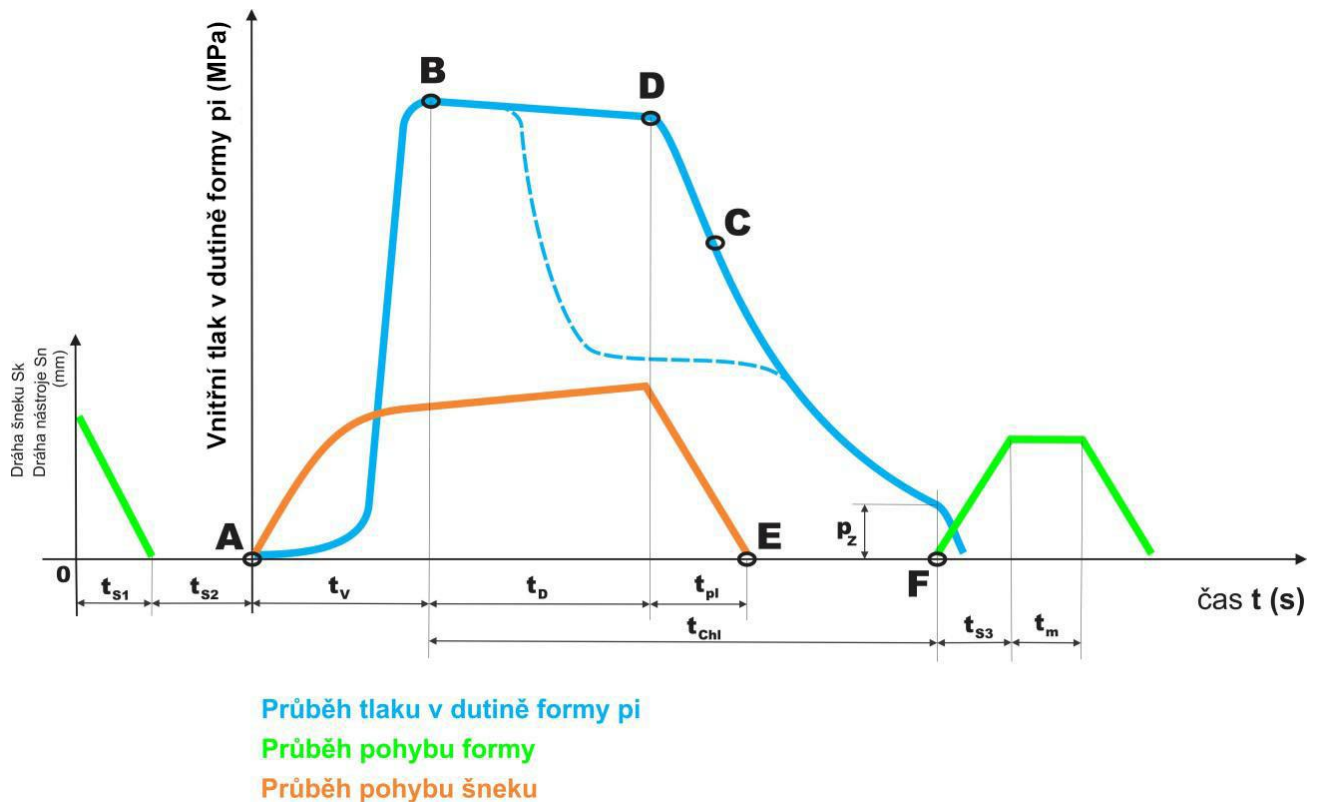
Tento cyklus se skládá z několika za sebou jdoucích specifických operací (viz. Obr. 7), které se opakují. Plast prochází teplotním cyklem - jedná se o proces neizotermický. Počátek celého děje musí být jasně definován. Bývá to okamžik, který odpovídá impulzu k uzavření vstřikovací formy.



Obr. 7 Schéma činnosti vstřikovacího stroje

Vstřikovací cyklus se dá dobře posuzovat i z hlediska zpracovávaného plastu a vyjádřit jej jako závislost tlaku v dutině formy na čase (viz. Obr. 8). Tuto stavovou veličinu nazýváme vnitřní tlak a značí se p_i . Dále se zde vyskytuje i vnější tlak p . Ten je vztažený na jednotku plochy průřezu šneku.





Obr. 8 Průběh tlaku v dutině formy během procesu vstřikování

Na počátku celého cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu. Pohyblivá část formy se v čase t_{s1} přisune k pevné, forma se uzavře a zamkne. Na přisouvání formy se vynaloží poměrně malá síla F_p , naopak na uzamknutí je nutné působit značně vyšší silou F_u . Tato síla nám zaručí, že se forma během vstřikování neotevře. V časovém úseku t_{s2} se vstřikovací jednotka přisouvá k formě. Tyto dva úseky (t_{s1} a t_{s2}) představují tzv. strojní časy.

V místě A začíná pracovat šnek v tavicí komoře a dochází k samotnému vstřikování roztaveného plastu do dutiny formy. Šnek koná axiální pohyb (neotáčí se) a plní jen funkci pístu. Následně dojde k rychlému nárůstu tlaku na maximální hodnotu. Doba t_v , během níž probíhá plnění dutiny formy, se nazývá doba plnění. To je ukončeno v bodě B. Hmota v dutině formy předává teplo samotné formě a postupně chladne. Samotné chlazení trvá až do otevření formy a vyhození výstřiku ze vstřikovací formy. Tuto dobu nazýváme doba chlazení a značíme jí t_{ch} (v praxi se dělí na dobu chlazení při plném a při klesajícím vstřikovacím tlaku). Doba



chlazení závisí na teplotě formy T_f a tloušťce stěny. Doporučené teploty taveniny a formy pro různé plasty lze vidět v Tab. 1.

Tab. 1 Doporučené teploty taveniny a formy pro některé plasty

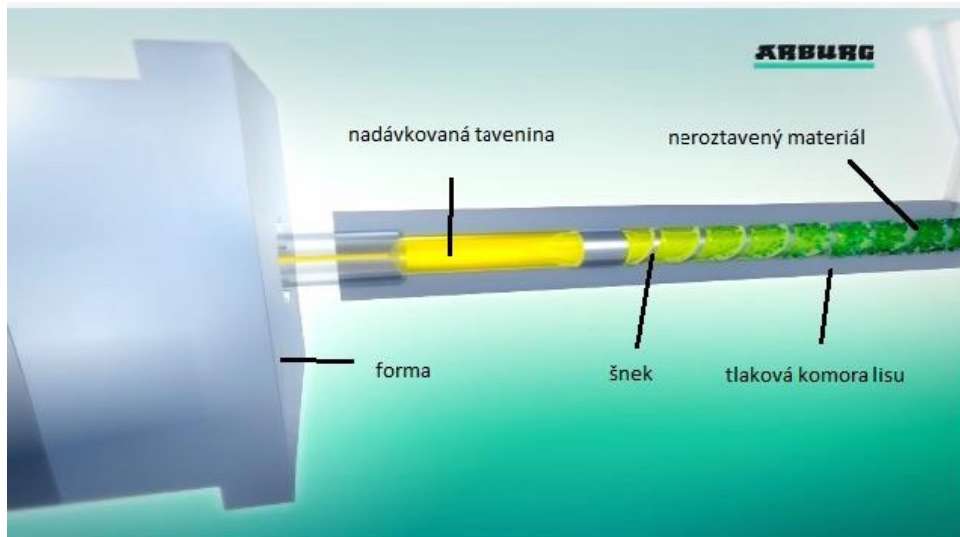
| Termoplast | Teplota taveniny [°C] | Teplota formy [°C] | Teplota vhodná pro vyhození výrobků z formy [°C] |
|-------------|-----------------------|--------------------|--|
| ABS | 190-250 | 50-85 | 80-100 |
| PA 6 | 260-280 | 40-120 | 100 |
| PA 6 - GF | 270-290 | 80-120 | 140 |
| PA 66 | 275-295 | 80-120 | 130 |
| PA 66 - GF | 280-300 | 80-120 | <140 |
| PC | 280-320 | 85-120 | <150 |
| PC - GF | 310-330 | 80-130 | - |
| HDPE | 180-270 | 20-60 | - |
| LDPE | 180-270 | 20-60 | - |
| POM | 180-220 | 50-120 | - |
| PP | 170-280 | 20-100 | - |
| PS | 180-260 | 55-80 | - |
| PVC tvrzené | 190-220 | 30-60 | - |
| SAN | 200-260 | 50-85 | 80-95 |
| PEEK | 380-430 | 160-220 | - |

Během chladnutí má hmota tendenci se smršťovat a zmenšovat svůj objem. Kvůli této skutečnosti je nutné kompenzovat zmenšování objemu dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy (jinak by se na výstřiku tvořily propadliny nebo staženiny). Tento úsek (t_D) se nazývá doba dotlaku. Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak (plná modrá čára na obr. 8) anebo se může po několika sekundách snížit (přerušovaná modrá čára na obr. 8). Proto se dotlak rozděluje na izobarický (tlak je konstantní) a izochorický (objem je konstantní). Abychom mohli dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu (tzv. polštář), na který bude následně šnek působit svým čelem. Tento objem se pohybuje v rozmezí 5 až 10%. Nesmí být moc velký, aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty.

Doba dotlaku končí v bodě D, kdy začíná doba plastikace dalšího plastu t_{pl} (plastikace končí v bodě E). Šnek se zde začne otáčet a nabírá granulovanou hmotu. Plastikuje ji, vtlačuje



do prostoru před čelem šneku (viz. Obr. 9) a současně ustupuje dozadu. Při tomto pohybu musí šnek překonávat protitlak (neboli zpětný tlak). Protitlak ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětění roztavené hmoty. Ohřev plastu při plastikaci se děje převodem tepla ze stěn válce, frikčním teplem vznikajícím třením plastu o stěny komory a o povrch šneku, a dále přeměnou hnětací práce šneku v teplo.



Obr. 9 Schéma nadávkované taveniny plastu před čelem šneku po skončené fázi plastikace

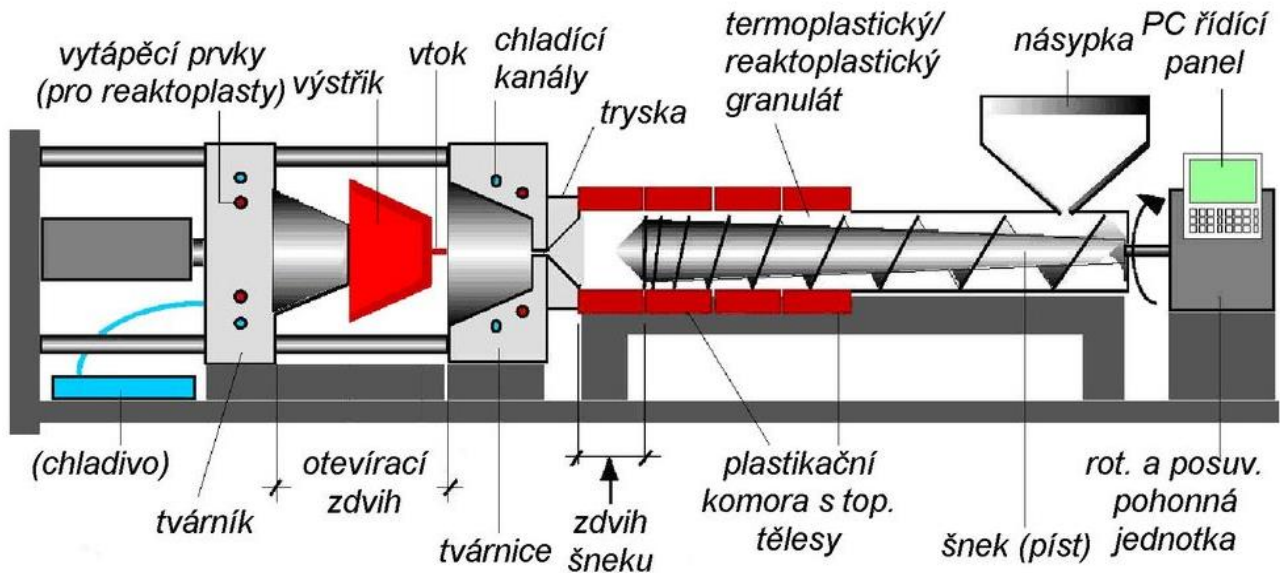
Jak již bylo psáno výše, plastikace končí v bodě E, kde se zastaví otáčivý pohyb šneku a následně dojde k odsunutí tavící komory od formy. Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z . Jedná se o tlak, pod nímž se hmota nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Zbytkový tlak nesmí být příliš vysoký, aby nedocházelo k vysokému vnitřnímu pnutí ve výstřících, případně k samovolnému praskání výstříku. Po úplném zchladnutí výstříku se forma otevře (bod F, doba t_{s3}) a výstřík se z formy vyhodí pomocí vyhazovacích kolíků. Než se zahájí další cyklus, tak může dojít k obslužení formy. Tuto dobu nazýváme dobou manipulační a značíme jí t_m .

Pozn.: Na obr. 8 je pohyb šneku označen s_k a pohyb formy s_N .



2.6 Vstřikovací zařízení

Vstřikovací proces probíhá většinou na plně automatických strojích, aby se dosáhlo vysoké produktivity práce. Základní schéma takového stroje lze vidět na Obr. 10.



Obr. 10 Schéma vstřikovacího stroje se šnekovou plastikací

Stroj se skládá ze dvou hlavních částí a to je vstřikovací jednotka a uzavírací jednotka. Dalšími částmi celého zařízení je řízení a regulace, různé manipulátory, sušárny, dopravníky atd.

2.6.1 Vstřikovací jednotka

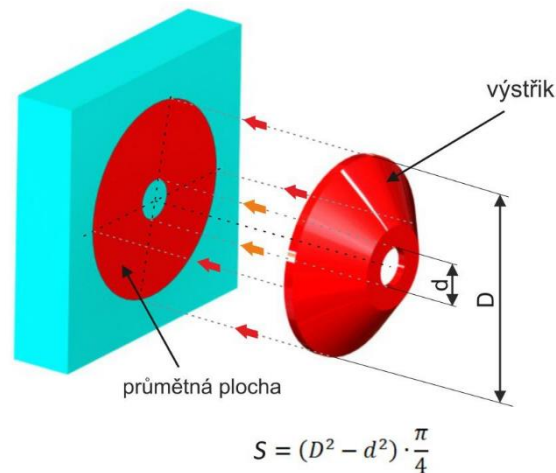
Tato jednotka plní dva hlavní úkoly. Přeměňuje granulát plastu na materiálově i teplotně homogenní taveninu o zvolené viskozitě a dopravuje tuto taveninu velkou rychlostí a pod vysokým tlakem do tvarové dutiny uzavřené formy (vstřikuje).

Dříve se používaly zejména jednotky pístové, které byly postupem času nahrazeny jednotkami šnekovými. Rozdíl obou typů strojů je dán konstrukcí tavicí komory. Jejím úkolem je převést do plastického stavu co největší množství hmoty v co nejkratším čase a zajistit maximální teplotní homogenitu taveniny. Mezi částmi vstřikovací jednotky se tedy řadí tavicí komora, šnek, tryska a topení včetně dalšího příslušenství.



2.6.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka je funkčně i konstrukčně podobná lisům. Jejím úkolem je co možno nejrychleji uzavírat/otevírat formu a přidržovat uzavřenou formu silou, která je větší než síla vyvolaná tlakem taveniny na stěny dutiny formy. Na Obr. 11 lze vidět plochu, na kterou působí síla.



Obr. 11 Průmětná plocha výrobku

Výpočet uzavírací síly: $F_u = p_i \cdot S$ [kN] (1)

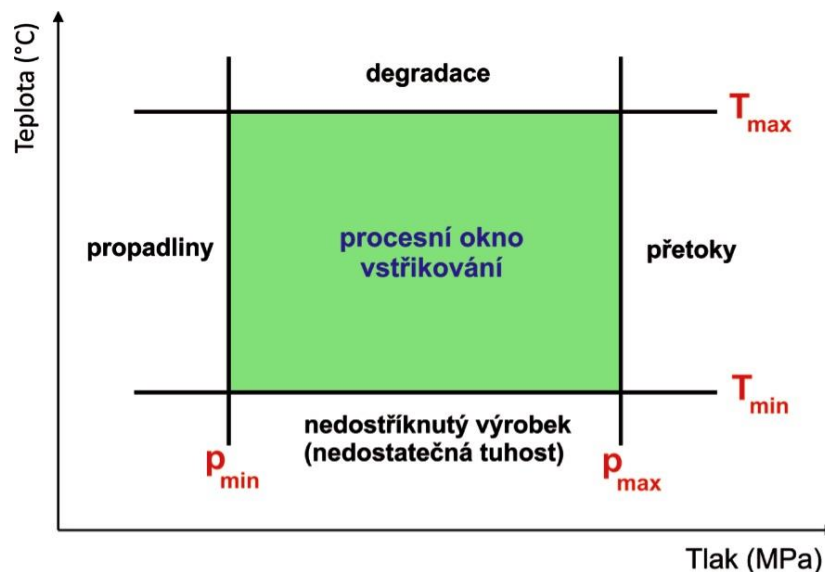
Jednotka se skládá z opěrných desek pevně spojených s ložem stroje, dále z pohyblivé desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy, z vedení a konečně z uzavíracího a přidržovacího mechanismu.

Charakteristické parametry pro vstřikovací i uzavírací jednotku budou uvedeny v experimentální části (viz. Tab. 5 a Tab. 6).



2.6 Technologické parametry procesu vstřikování

Parametrů, které jsou důležité, je poměrně mnoho. Mezi ty nejvýznamnější patří vstřikovací rychlost v_s , vstřikovací tlak p_{vs} , tlak p a doba dotlaku t_D , teplota taveniny T_v a teplota formy T_f . Pro proces vstřikování se dá stanovit tzv. procesní technologické okno (viz Obr. 12). Jestliže budou výtříky vyrobeny při použití technologických parametrů teploty a tlaku, které jsou uvnitř tohoto okna, tak lze zjednodušeně říci, že dostaneme vhodné výrobky. V případě překročení těchto hraničních parametrů je možné, že dojde ke vzniku propadlin, nedotečených dílů, přetoků a spálených dílů.

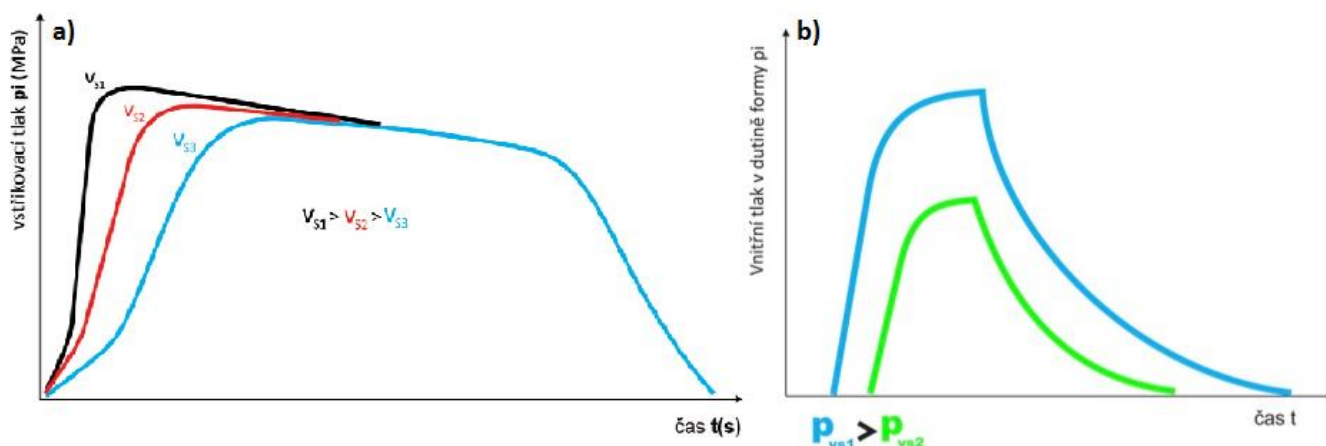


Obr. 12 Procesní okno při vstřikování

Čím bude vyšší vstřikovací rychlost v_s , tím bude křivka v oblasti vstřiku strmější a nárůst tlaku výraznější (viz Obr. 13 - a). Díky zvyšování rychlosti vstřikování roste smykové napětí taveniny, snižuje se její viskozita a dochází ke zvýšení teploty taveniny.

Změna vstřikovacího tlaku p_{vs} výrazně ovlivňuje velikost tlaku v dutině formy (viz Obr. 13 - b). Čím bude vyšší, tím dříve dojde k plnění dutiny formy a nárůstu smykového namáhání taveniny. Snižuje se její viskozita a opět dochází ke zvýšení teploty taveniny. Tento tlak má dále vliv na výslednou kvalitu, hmotnost, ale také pnutí a smrštění výtříku.

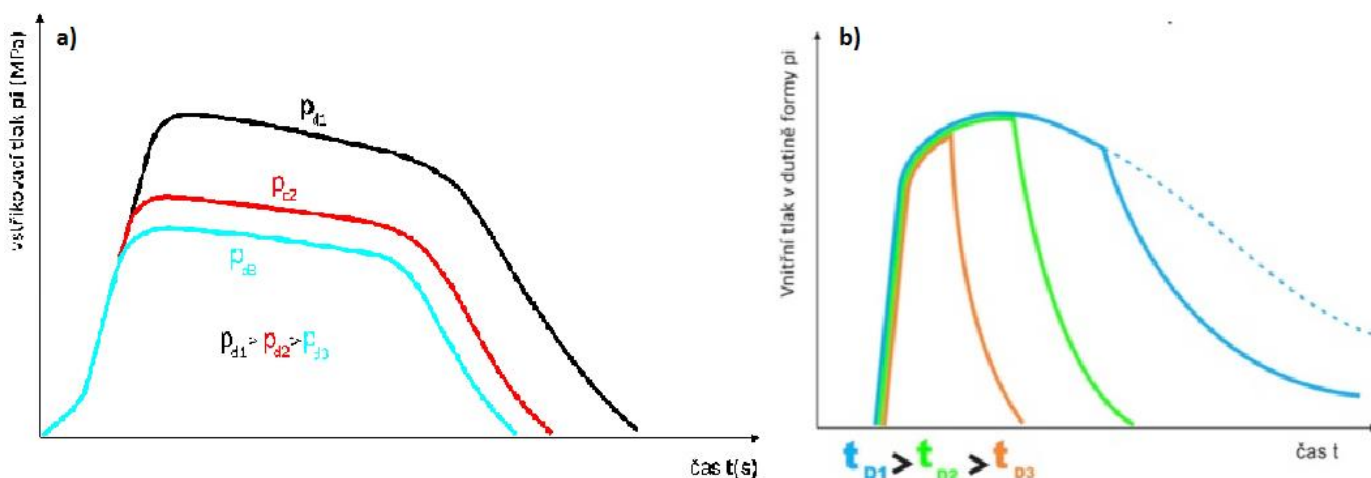




Obr. 13 Vliv a) vstřikovacího rychlosti b) vstřikovacího tlaku, na průběh tlaku v dutině vstřikovací formy

Velikost dotlaku p_d má velký vliv na průběh tlaku uvnitř formy (viz. Obr. 14 - a). Ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu dílu. Vyšší dotlak způsobuje nárůst tlaku uvnitř dutiny vstřikovací formy. Dále zpravidla roste hmotnost výrobku, klesá smrštění, ale současně vzniká větší pnutí ve výstřiku. Oproti tomu nízký dotlak způsobuje vznik propadlin, lunkrů (staženin) a vede k nárůstu smrštění.

Doba dotlaku t_D (i jeho velikost) se podílí na výsledné kvalitě výstřiku, hlavně na hmotnosti, rozměrech, tvaru a kvalitě povrchu výrobku. Když je tato doba příliš krátká, tak má výstřik povrchové vady, propadliny a narůstá hodnota smrštění. Naopak při moc dlouhé době dotlaku může dojít k tvorbě zástřiků. Čím delší doba dotlaku, tím delší doba celého vstřikovacího cyklu (viz. Obr. 14 - b)

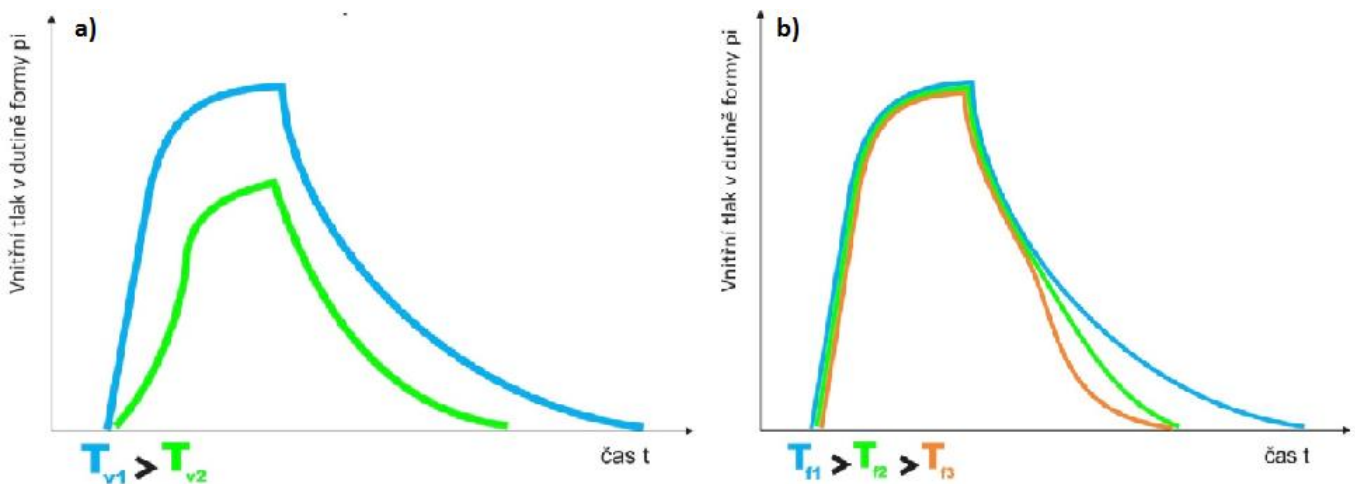


Obr. 14 Vliv a) velikosti dotlaku b) doby dotlaku, na průběh tlaku v dutině vstřikovací formy



Teplota taveniny T_v má výrazný vliv na dobu vstřikovacího cyklu a na tekutost plastu. S vyšší teplotou stoupá tekutost, prodlužuje se celý cyklus, ale dochází i ke zvýšení tlaku v dutině formy (viz. Obr. 15 – a), což může vést ke vzniku přetoků a zástříků. Naopak s nižší teplotou taveniny se zvyšuje riziko vzniku studených spojů.

Teplota vstřikovací formy T_f má opět velký vliv na délku vstřikovacího cyklu (jak lze vidět na. Obr. 15 – b), na kvalitu povrchu a vzhledu finálních dílů, dále také na rozměrovou přesnost (smrštění) a konečně i na mechanické vlastnosti. S vysokou teplotou formy vzrůstá hodnota smrštění, avšak dochází ke snížení pnutí uvnitř dílu. Dále dochází k eliminaci studených spojů a k eliminaci tzv. tiger efektu (zvlnění). S rostoucí teplotou vstřikovací formy se u semikrystalických plastů zlepšují mechanické vlastnosti.



Obr. 15 Vliv a) teploty taveniny b) teploty formy, na průběh tlaku uvnitř dutiny nástroje



2.7 Jevy probíhající po vstřikování

2.7.1 Smrštění

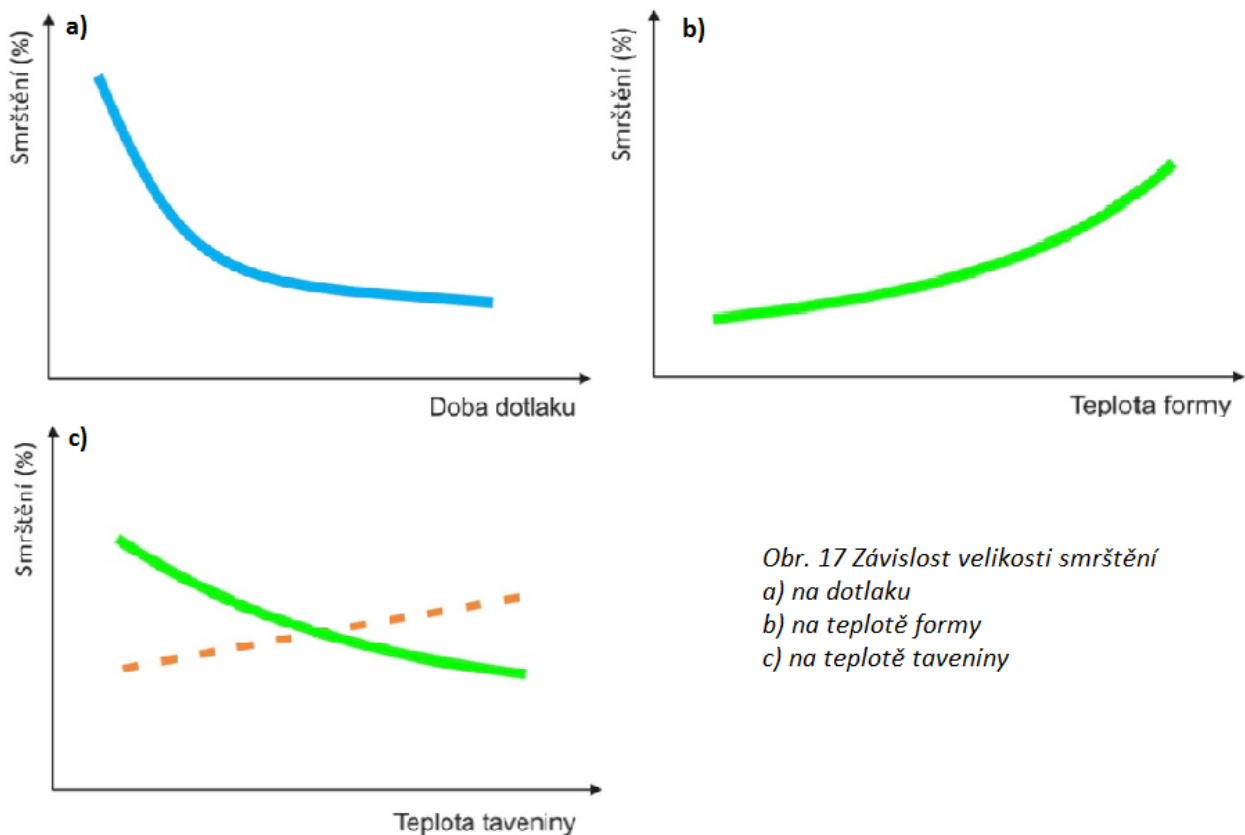
Smrštěním rozumíme zmenšování rozměrů výstřiku, které vzniká v důsledku chlazení výrobku bez současného působení tlaku. Hodnota smrštění udává, o kolik je rozměr výrobku menší, než daný rozměr formy.

Výpočet smrštění:
$$S = \frac{X_f - X_v}{X_f} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

X_f je rozměr v dutině formy při teplotě 23°C [mm]

X_v je rozměr výrobku při teplotě 23°C [mm]

Na velikost smrštění mají vliv technologické parametry (viz Obr. 17), vlastní polymer, vtoková soustava, ale i např. tloušťka stěny. Obecně se dá říct, že čím je teplota vyšší, tím je smrštění větší. Naopak čím je vyšší tlak, tím je smrštění menší.



Smrštění je ovlivněno rovněž strukturou plastu. Amorfni termoplasty mají obecně menší smrštění než semykristalické. U těchto plastů vzrůstá s rostoucí teplotou taveniny podíl krystalické fáze, tím i hustota, což vede k nárůstu smrštění. V Tab. 2 lze vidět velikost smrštění pro vybrané druhy termoplastů. Dále můžeme říci, že přísady v plastech smrštění eliminují (viz Tab. 3).

Tab. 2 Velikost smrštění pro vybrané druhy termoplastů

| Termoplast | Smrštění [%] | Termoplast | Smrštění [%] |
|------------|--------------|------------|--------------|
| LDPE | 1,5 až 3,0 | PA6 | 1,0 až 2,5 |
| HDPE | 2,0 až 4,0 | PA66 | 1,2 až 2,0 |
| PP | 1,5 až 2,0 | POM | 1,0 až 3,2 |
| PS | 0,02 až 0,5 | PC | 0,6 až 0,8 |
| ABS | 0,4 až 0,5 | PBT | 1,7 až 2,3 |
| PVC | 0,2 až 0,6 | PMMA | 0,3 až 0,8 |

Tab. 3 Velikost smrštění pro PA66 s rozdílným procentem skleněných vláken

| Termoplast | Podélné smrštění [%] | Příčné smrštění [%] |
|------------------------------|----------------------|---------------------|
| PA66 + 15% skleněných vláken | 0,55 | 1,40 |
| PA66 + 25% skleněných vláken | 0,42 | 1,32 |
| PA66 + 30% skleněných vláken | 0,35 | 1,25 |
| PA66 + 35% skleněných vláken | 0,32 | 1,20 |

2.7.2 Pnutí

Tento nepříznivý jev vzniká během procesu zpracování, anebo dodatečně při dalších technologických procesech. Může ovlivnit pevnostní a deformační chování plastových dílů.

Dle příčin vzniku dělíme pnutí na:

- **Ochlazovací** - vzniká nerovnoměrným ochlazováním různých částí výstřiku při vstřikování. Na povrchu stěn je ochlazování rychlé a smrštění malé. Zatímco v jádru stěny je ochlazování pomalejší a smrštění větší. Smrštění se ale nemůže plně uplatnit,



jelikož mu v tom brání ztuhlá povrchová vrstva. Výsledkem nerovnoměrného ochlazování je i nerovnoměrné smršťování, což tedy vede ke vzniku pnutí.

- **Orientační a expanzní** - vzniká kvůli vlivu orientace makromolekul a nestejně teplotní roztažnosti. Pnutí může být tahové (v místech vyššího stupně orientace) nebo tlakové (v místech nižšího stupně orientace). Expanzní pnutí vzniká tehdy, jeli výstřik po otevření formy stále pod tlakem. Zmenšuje se snížením vstřikovacího tlaku.
- **Krystalizační** - vyskytuje se pouze u semikrystalických plastů. Vzniká v důsledku toho, že krystalinita je různá (roste od povrchu směrem k jádru), což znamená, že i smršťování je rozdílné.

Všechna uvedená pnutí se sčítají, takže výsledná napjatost ve výstřiku je velmi složitá a nerovnoměrně rozložená. Kritická místa vzniku jsou v okolí vrubů, zářezů, otvorů a v místech výrazné změny tloušťky.

2.7.3 Krystalizace

Tvorba krystalické fáze u polymerů může nastat jen u semikrystalických plastů (PA, PE, PET, PTFE atd.). Tyto polymery krystalizují odlišnou rychlostí a také mají rozdílný stupeň krystalinity (viz Tab. 4). Krystalické útvary vznikají sdružením makromolekul k sobě do víceméně pravidelných tvarů (lamely, fibrily atd.). K pozvolné krystalizaci dochází i po vyhození výrobku ze vstřikovací formy nebo při dodatečném ohřevu vstřikovaného dílu. Tento děj závisí na teplotě vstřikovací formy a tedy i na rychlosti tuhnutí taveniny. Chladnější forma znamená rychlé ztuhnutí a vlastně i potlačení krystalizace, povrchová vrstva zůstává amorfni. U teplejších forem jsou pod povrchem směrově orientovány drobné sférolity, uvnitř jádra stěny velké sférolity. Od povrchu k jádru dochází k růstu stupně krystalinity, což vede k rozdílnému smrštění a následně ke vzniku pnutí.

Tab. 4 *Stupeň krystalinity a rychlost růstu krystalitů pro vybrané polymery*

| Termoplast | Stupeň krystalinity [%] | Rychlost růstu sférolitů [μ /min] |
|------------|-------------------------|--|
| PA6 | 35 až 45 | 200 |
| POM | 70 až 85 | 400 |
| PET | 30 až 40 | 7 |
| PP | 70 až 80 | 20 |
| HDPE | 70 až 80 | 2000 |



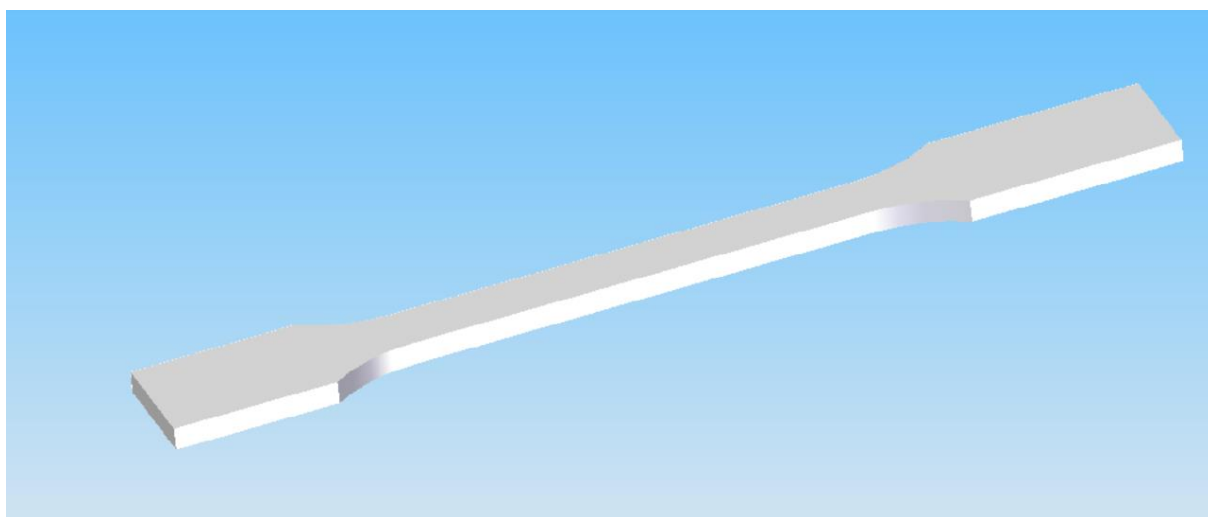
2.8 Zkouška tahem

Tato zkouška patří mezi nejrozšířenější a nepoužívanější metody. Slouží k hodnocení mechanických vlastností (mez pevnosti, mez kluzu, tažnost, kontrakce a další) testovaného materiálu.

Postup tahové zkoušky a popis zkušebního stroje bude popsán v experimentální části této práce pro konkrétní případ.

2.8.1 Zkušební vzorky

Vzorky musí být vzájemně kolmé respektive musí mít rovnoběžné dvojice povrchů. To znamená, že nesmějí být nijak zkrouceny. Dále nesmí dojít k tomu, aby vzorky byly nějak poškozené (škrábance, důlky, vyštípnuté části apod.). Pro vyhodnocení je potřeba minimálně 5 tělísek. Tvar vzorku je zobrazen na Obr. 18.



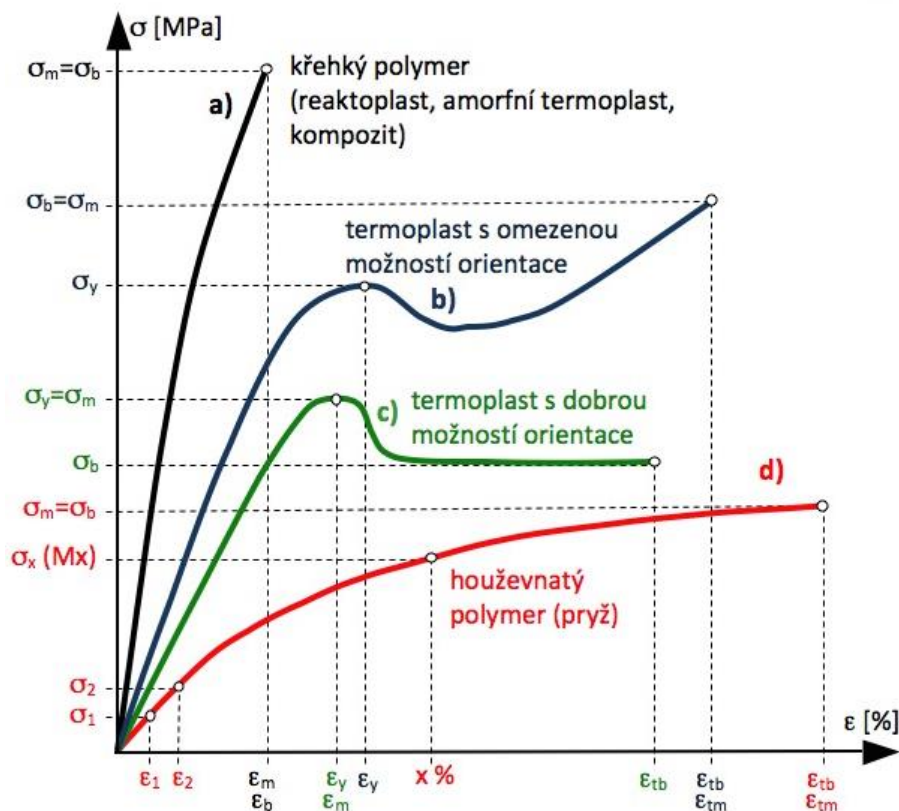
Obr. 18 Zkušební vzorek (model z programu SolidEdge)

Mez pevnosti (σ_m) - je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle F_{max} [N], která je naměřená v průběhu zkoušky. Hodnota této meze se pohybuje při standardní teplotě okolí v rozmezí od 15 do 100 MPa (u vyztužených plastů i více).

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

S_0 je původní průřez zkušebního tělesa [mm^2]





Obr. 19 Pracovní diagram – typické deformační křivky polymerů

Na Obr. 19 je možno vidět pracovní diagram, tedy závislost napětí na poměrné deformaci, pro různé druhy termoplastů. U některých křivek lze pozorovat výraznou mez kluzu, u některých nikoliv.

Napětí na mezi kluzu (σ_y) - je napětí, při němž vzniká plastická (trvalá) deformace, která se projeví tzv. krčkem. Krček se s rostoucím napětím stále rozšiřuje. Tuto mez považujeme za horní hranici napětí přípustného při provozu součástí.

Hookův zákon - říká nám, že deformace je přímo úměrná napětí. Platí pouze do meze úměrnosti (jen v přímkové oblasti pracovního diagramu).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (3)$$

E je Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]

ε poměrné prodloužení [mm]

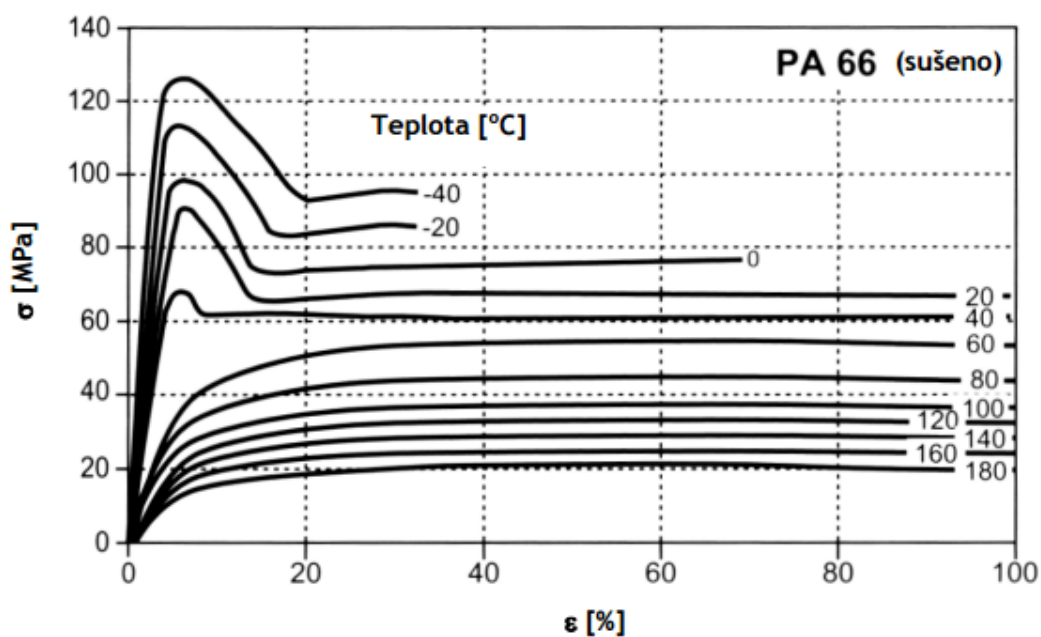


$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} [\%] \quad (4)$$

ΔL_0 je zvětšení počáteční měřené délky [mm]

L_0 je počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm]

Na Obr. 20 je možné pozorovat, že tahová křivka a s ní spojené mechanické vlastnosti silně závisí na teplotě. Trhací rychlost pro tento případ je $v = 1\text{mm}/\text{min}$



Obr. 20 Deformační křivka pro PA66 v závislosti na teplotě

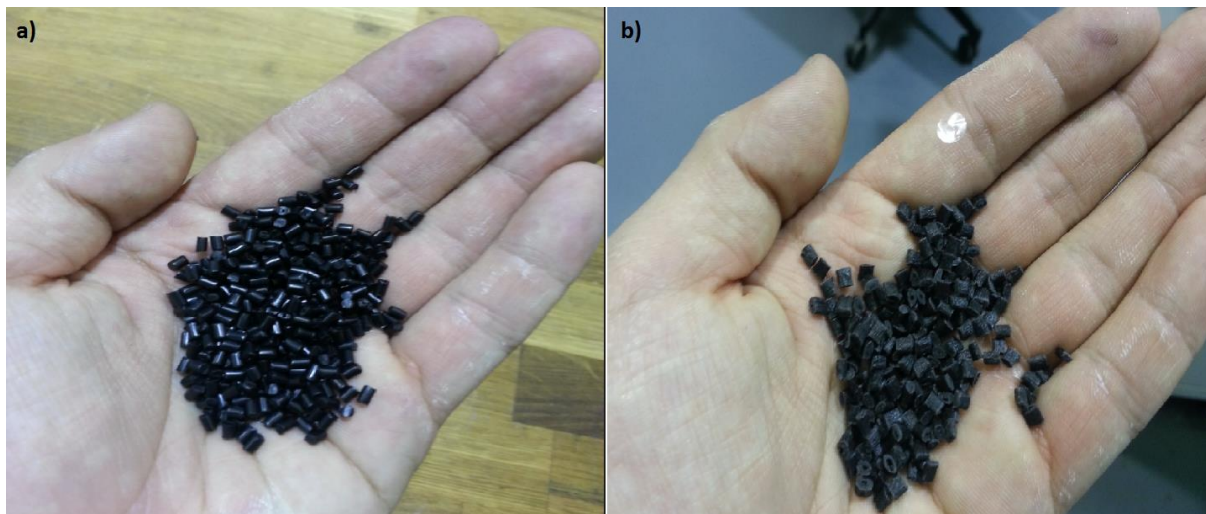


3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jak již bylo psáno v úvodu, tato práce má za úkol porovnat pevnost vstřikovaného dílu z polyamidu (konkrétní materiály budou uvedeny níže) s pevností získanou ze simulačního programu Cadmould 3D-F. Vstřikovány byly 2 různé polyamidy při různých technologických parametrech (teplota formy, teplota taveniny), aby bylo více možností k porovnání.

3.1 Vstřikované materiály

První materiál nese název PA66 TECHNYL A 218 BLACK 21 N (dále jen PA66), druhý je PA66GF (50%) A218 BLACK 21 N (dále jen PA66GF). Z názvu vyplývá, že se jedná téměř o stejné polyamidy s tím rozdílem, že první je neplněný, zatímco ten druhý je plněn skelnými vlákny v rozsahu 50%. Oba materiály v podobě granulátu lze vidět na Obr. 21.



Obr. 21 Granulát a) PA66 b) PA66GF

Vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v materiálových listech, které jsou umístěny v příloze.

3.2 Výroba zkušebních vzorků vstřikováním

Před samotným vstřikováním byl granulát polyamidu sušen (kvůli navlhavosti). Vstřikování bylo provedeno v budově L – v laboratoři na stroji Arburg allrounder 270 S 400-100 (viz. Obr. 22). Arburg je výrobce, allrounder řada, 270 – vzdálenost mezi sloupky, 400 – uzavírací síla a 100 – velikost vstřikovací jednotky.





Obr 22. Vstřikovací stroj Arburg allrounder 270 S 400 - 100

V Tab. 5 a Tab. 6 jsou uvedeny parametry tohoto vstřikovacího zařízení (vstřikovací i uzavírací jednotky).

Tab. 5 Parametry vstřikovací jednotky stroje ARBUG 270S 400-100

| Vstřikovací jednotka | | | |
|--|----------|-----|------|
| Průměr šneku [mm] | 20 | 25 | 30 |
| Délka šneku L/D | 25 | 20 | 16,7 |
| Zdvih dávkování [mm] | 100 | | |
| Otáčky šneku max. [m/min ⁻¹] | 2 | 35 | 42 |
| Plastifikační výkon (měřeno pro PS podle norem) [kg/hod] | 5,5 | 8 | 9,5 |
| Vstřikované množství teoretické hodnoty [cm ³ /s] | 64 | 100 | 146 |
| Maximální objem zdvihu [cm ³] | 31 | 4 | 71 |
| Max. hmotnost vylisku (vztaženo na PS) [g] | 29 | 45 | 65 |
| Specifický vstřikovací tlak [bar] | 2500 | 200 | 1390 |
| Zdvih agregátu x přídržná síla [mm.KN] | 180 x 50 | | |
| Počet topných pásů | 4 | | |



Tab. 6 Parametry vstřikovací jednotky stroje ARBUG 270S 400-100

| Uzavírací jednotka | |
|---|-----------|
| Uzavírací síla [KN] | 400 |
| Dráha otevření lisovacího nástroje [mm] | 350 |
| Vestavěná výška formy min. [mm] | 200 |
| Max. otevření upínacích desek [mm] | 500 |
| Velikost upínacích desek horizontální x vertikální [mm] | 380 x 380 |
| Zvětšené upínací desky horizontální x vertikální [mm] | 380 x 380 |
| Vzdálenost mezi sloupky horizontální x vertikální [mm] | 270 x 270 |
| Šířka vypadávací šachty [mm] | 300 |
| Zdvih vyhazovače x síla vyhazovače [mm.KN] | 100 x 20 |

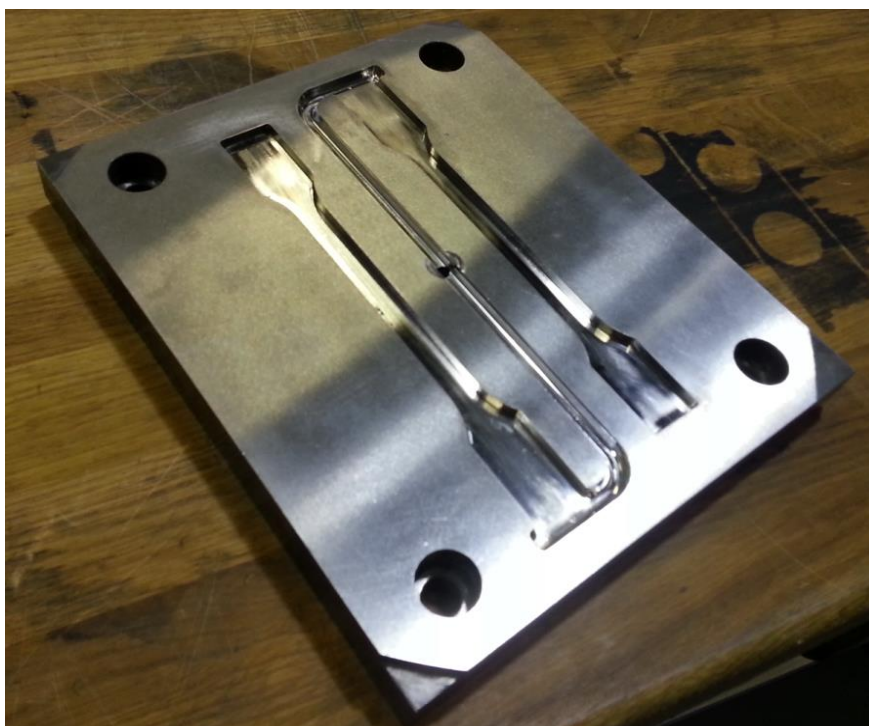
Zkušební tělesa typu A (ve tvaru oboustranných lopatek) v souladu s ČSN EN ISO 3167 byla vstřikována dle obecných principů v souladu s mezinárodním předpisem ISO 294 – 1. Technologické podmínky samotného procesu jsou uvedeny v Tab. 7 Pro výrobu zkušebních těles byla použita univerzální dvoudesková forma, která odpovídá tvaru víceúčelového zkušebního tělesa dle ČSN EN ISO 3167 (viz. Obr. 23).

Tab. 7 Technologické podmínky vstřikování pro PA66

| Parametr | Hodnota |
|---|---------|
| Doba cyklu [s] | 66 |
| Doba dotlaku [s] | 10 |
| Objem dávky [cm ³] | 40 |
| Objem při přepnutí [m ³] | 14 |
| Vstřikovací rychlost [cm ³ /s] | 35 |
| Dotlak [bar] | 250 |
| Protitlak [bar] | 50 |

Technologické podmínky pro vstřikování PA66GF byly totožné s PA66. Lišily se jen v hodnotě dotlaku. Místo 250 bar byl použit dotlak o 100 bar větší, takže 350 bar.





Obr. 23 Dutina univerzální vstřikovací formy

Vstřikováno bylo celkem 80 vzorků (40 z PA66 a 40 z PA66GF), což dává 8 variant, jelikož každá varianta obsahuje 10 tělísek. Popis jednotlivých variant je uveden v Tab. 8

Tab. 8 Popis jednotlivých variant

| Varianta | Vstřikovaný materiál [°C] | Teplota taveniny [°C] | Teplota formy [°C] | Počet výstřiků |
|----------|---------------------------|-----------------------|--------------------|----------------|
| A | PA66 | 275 | 80 | 10 |
| B | PA66 | 275 | 95 | 10 |
| C | PA66 | 295 | 80 | 10 |
| D | PA66 | 295 | 95 | 10 |
| E | PA66GF | 280 | 80 | 10 |
| F | PA66GF | 280 | 95 | 10 |
| G | PA66GF | 300 | 80 | 10 |
| H | PA66GF | 300 | 95 | 10 |

Z Tab. 8 vyplývá to, že pro každou variantu byl zvolen určitý rozsah teploty taveniny a formy. Například varianta A má nízkou teplotu taveniny i formy, varianta B nízkou teplotu taveniny a vysokou teplotu formy atd. Slovy nízká/vysoká teplota formy/taveniny se rozumí hraniční hodnota pro vstřikování daného polyamidu na daném vstřikovacím stroji.



Každé variantě odpovídá 10 vzorků, z nichž bylo po procesu vstřikování dáno 5 do klimatické komory, kde probíhalo zrychlené kondicionování (sušení) dle ČSN EN ISO 1110, aby se následně dala řádně provést tahová zkouška dle ČSN EN ISO 1874-2. To znamená, že ve výsledku budeme mít 40 “suchých“ a 40 “vlhkých“ vzorků, které následně můžeme také porovnat. Pro porovnání mezi skutečností a simulací budeme uvažovat pouze sušené vzorky. Ze zbylých 40 – ti “vlhkých“ vzorků budou vybrány pouze 2 varianty (pro přehlednost) a to varianta B (PA66) a varianta E (PA66FG). Sušení probíhalo v klimatické komoře Vötsch VC 0018 (viz Obr. 24) po dobu 8 dní při teplotě 70 °C a při relativní vlhkosti 62 %.



Obr. 24 Klimatická komora Vötsch VC 0018 a detail uložení vzorků

3.3 Zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedená pomocí trhacího zařízení TIRAtest 2300 (viz. Obr. 25). Samotné měření probíhalo v Laboratoři zkoušení kovů katedry strojírenské technologie TUL.

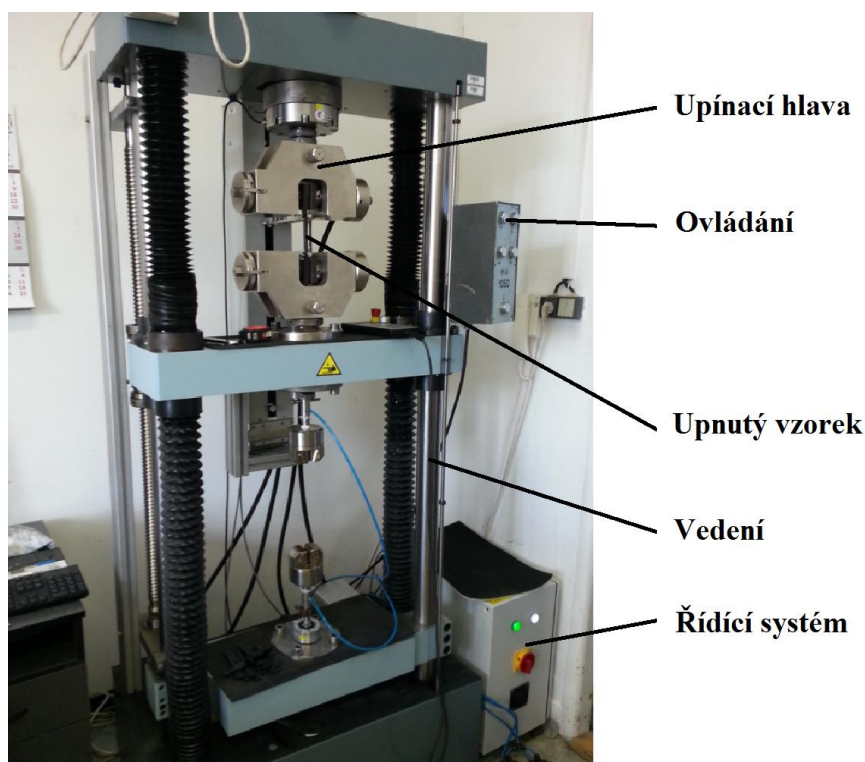
Vzorek byl pomocí ovládacích tlačítek (viz. Obr. 26) pevně upnut mezi čelisti a byl opatřen průtahoměrem (viz. Obr. 27). Průtahoměr měl nastavenou původní délku L_0 na 80 mm. Dále byl zapnut posuv stroje (spodní čelist se pohybovala konstantní rychlostí) a zkoušené těleso bylo natahováno. Během natahování vzorku se průběh zkoušky zaznamenával pomocí softwaru LabNET TahTlak a to tak, že jsme mohli v reálném čase sledovat závislost zatěžující síly a uražené dráhy příčnicku. Síla vždy stoupala až do přetržení vzorku. Díky programu LabNET TahTlak došlo k získání dat z proběhlé zkoušky (síla, dráha, čas, protažení atd.).



Získaná data z tahových zkoušek, všech 8–mi variant, byla následně zpracována v programu Microsoft Office Excel 2013 a upravena do vhodné grafické podoby – pracovních diagramů (závislost napětí na poměrném prodloužení). Tyto diagramy a tabulky s výslednými hodnotami budou uvedeny níže (viz. Obr. 28 – 37 a Tab. 10 – 11).

Tab. 9 Trhací rychlosti jednotlivých materiálů

| Materiál | Trhací rychlost [mm/min] |
|----------|--------------------------|
| PA66 | 50 |
| PA66GF | 5 |

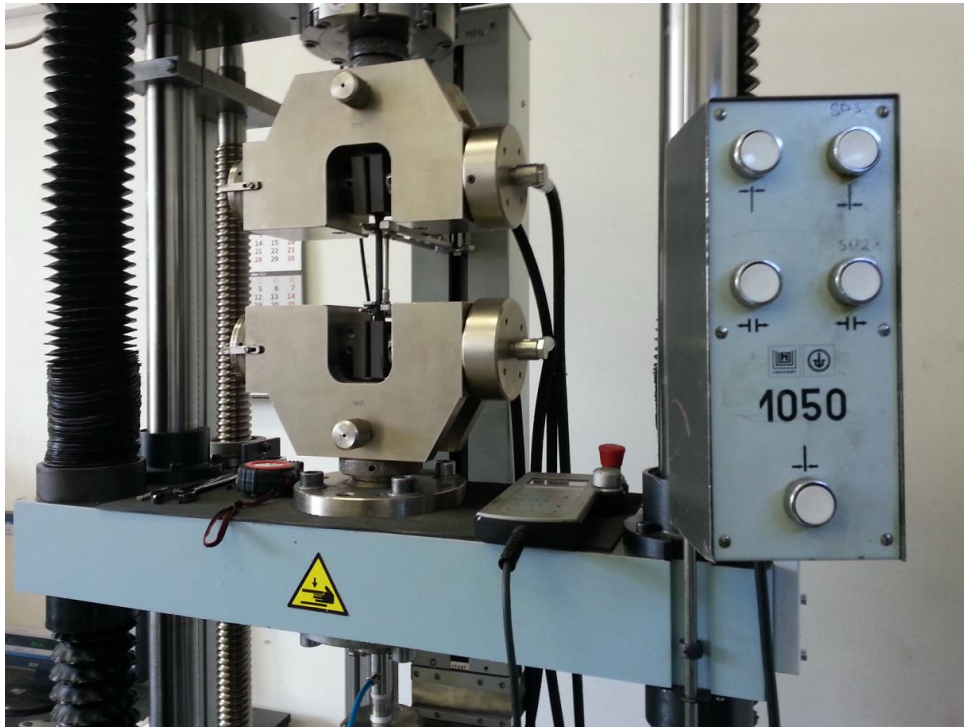


Obr. 25 Trhací zařízení TIRAtest 2300

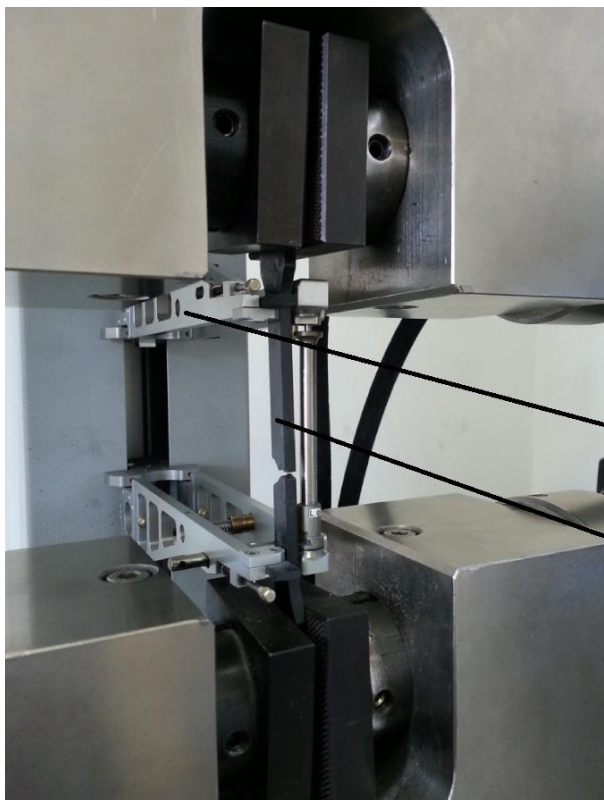
Technické parametry stroje:

- Rozsah měření síly: 0,7 – 100 000 N
- Zdvih příčnicku: 0,0025 – 600 mm
- Šířka pracovního prostoru: 550 mm
- Výška pracovního prostoru:
- nahoře: 1360 mm, dole: 1250 mm





Obr. 26 Detail upínací hlavy a ovládání čelistí

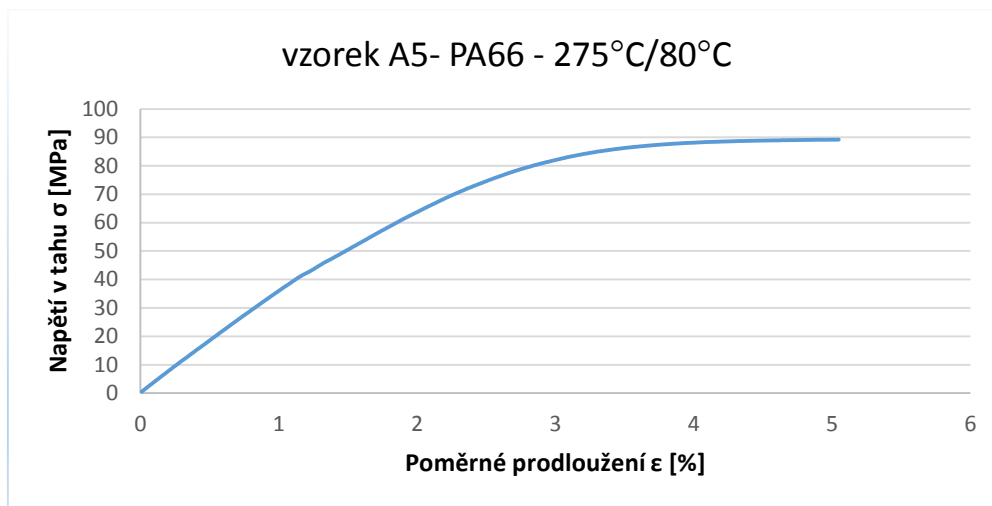


Průtahoměr

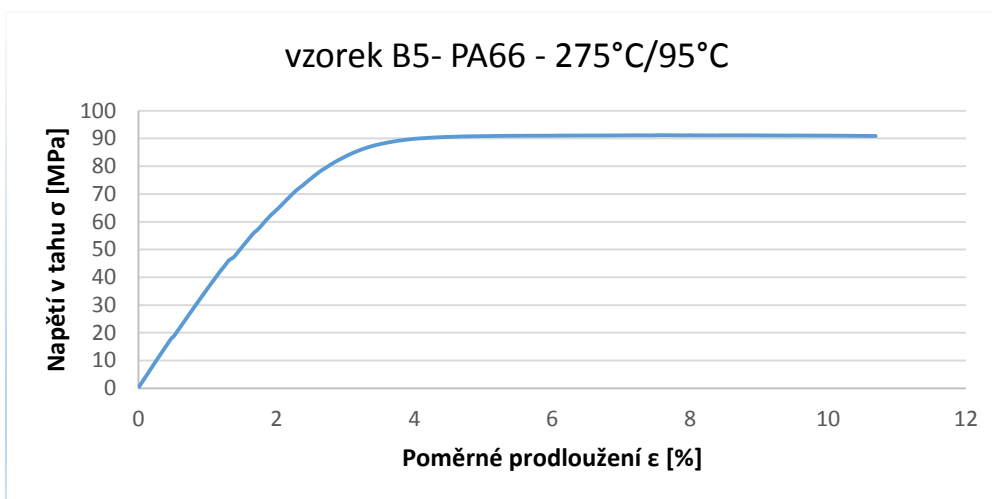
Přetržený vzorek

Obr. 27 Přetržený vzorek opatřený průtahoměrem

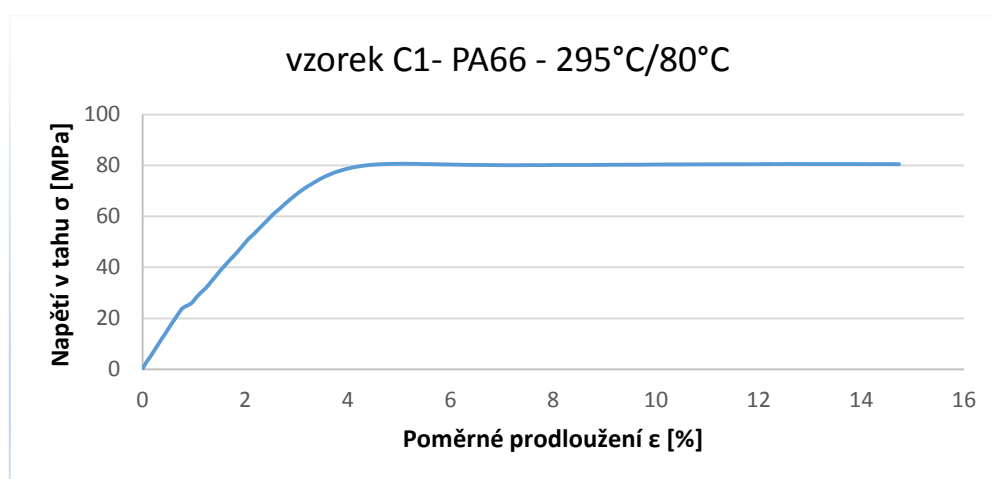




Obr. 28 Pracovní diagram vzorku A5

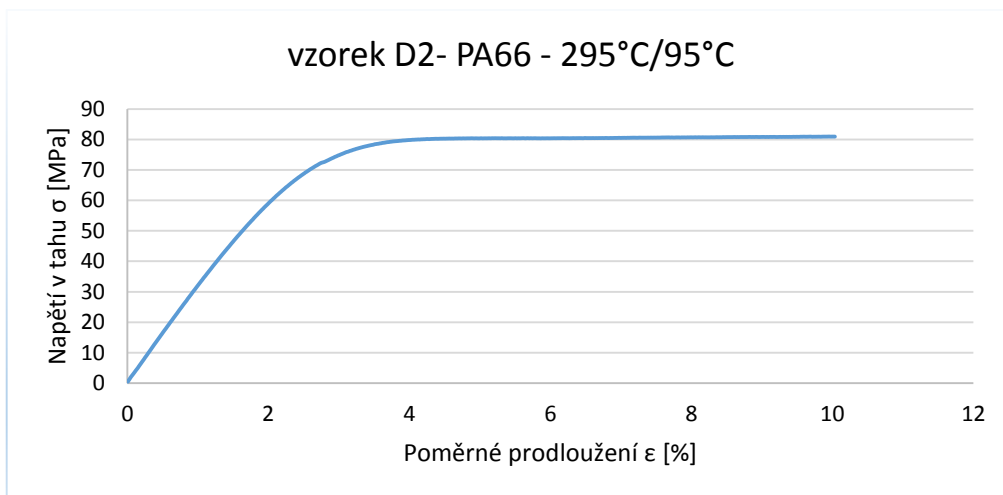


Obr. 29 Pracovní diagram vzorku B5

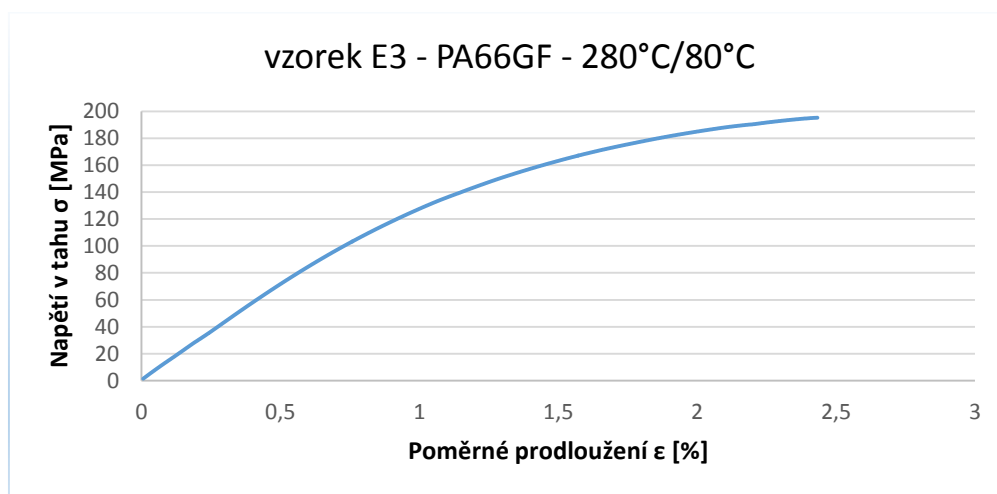


Obr. 30 Pracovní diagram vzorku C1

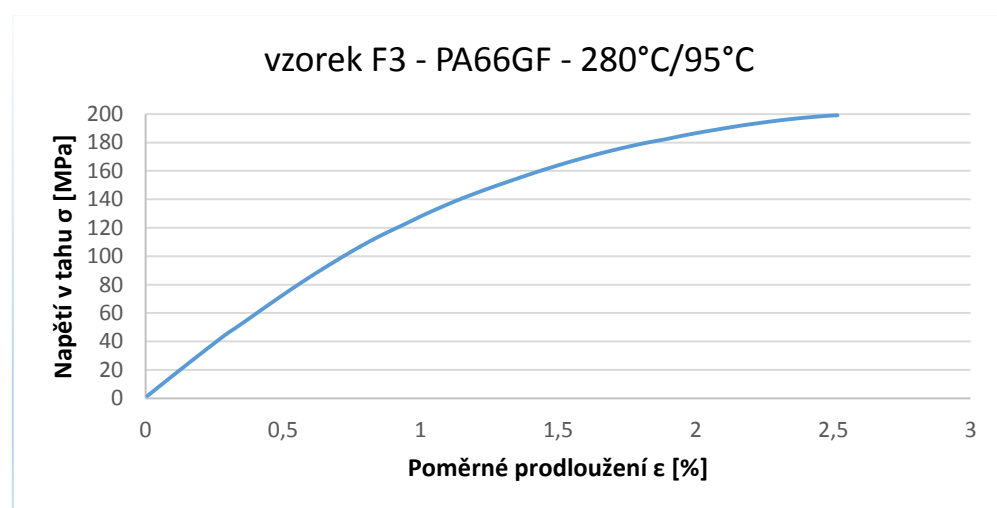




Obr. 31 Pracovní diagram vzorku D2

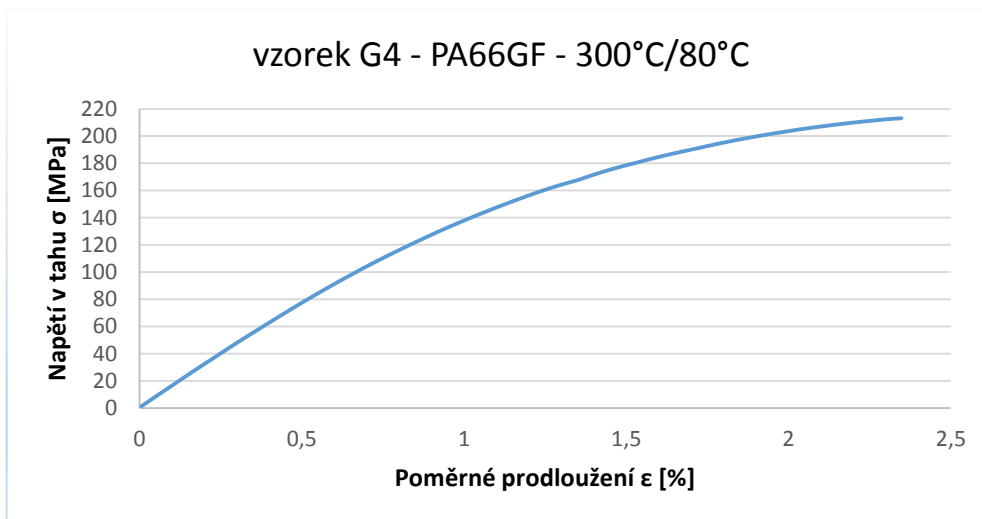


Obr. 32 Pracovní diagram vzorku E3

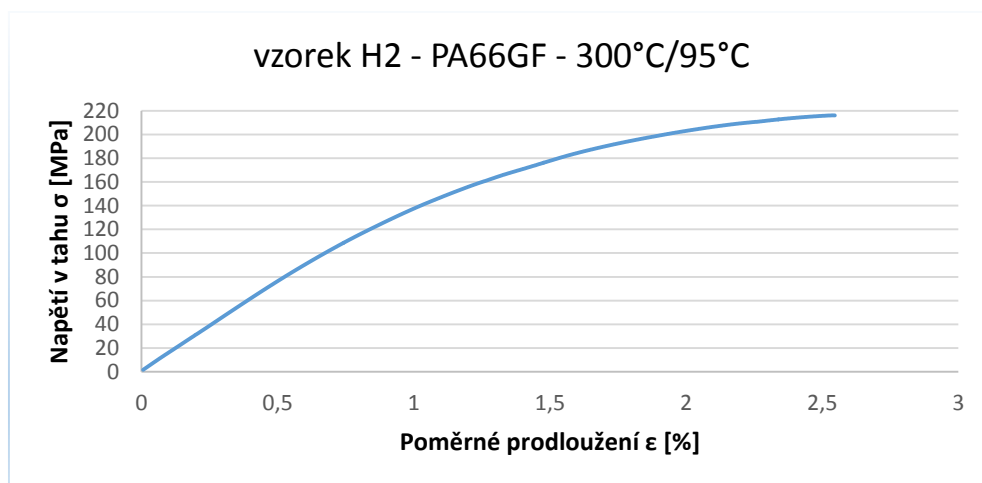


Obr. 33 Pracovní diagram vzorku F3





Obr. 34 Pracovní diagram vzorku G4

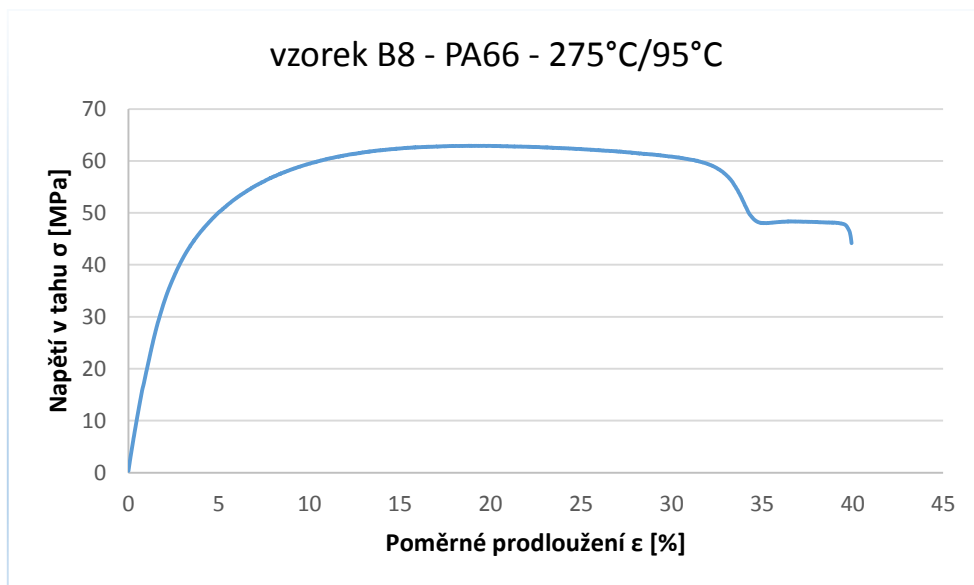


Obr. 35 Pracovní diagram vzorku G4

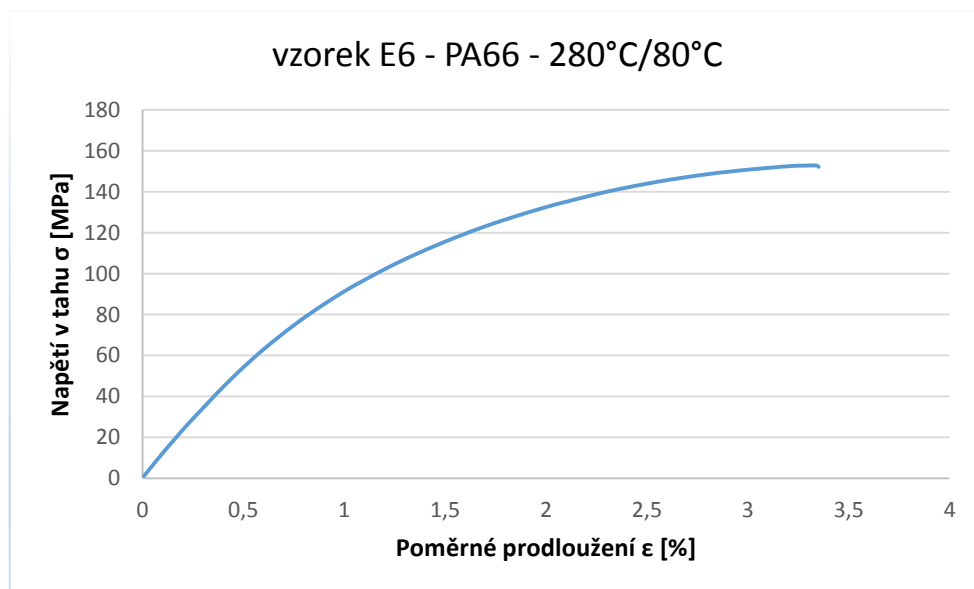
Tab. 10 Souhrn výsledků trhací zkoušky všech sušených vzorků

| Varianta | Mez pevnosti v tahu [MPa] | Poměrné prodloužení na mezi pevnosti [%] | Maximální síla [N] | Prodloužení na mezi pevnosti [mm] |
|----------|---------------------------|--|--------------------|-----------------------------------|
| A | 89,6 | 6,122 | 3584 | 4,898 |
| B | 91,4 | 8,153 | 3656 | 6,523 |
| C | 80,9 | 16,672 | 3236 | 13,338 |
| D | 81,0 | 10,038 | 3240 | 8,030 |
| E | 193,4 | 2,360 | 7736 | 1,888 |
| F | 192,8 | 2,316 | 7712 | 1,853 |
| G | 210,6 | 2,461 | 8424 | 1,969 |
| H | 215,8 | 2,583 | 8632 | 2,066 |





Obr. 36 Pracovní diagram vzorku B8



Obr. 37 Pracovní diagram vzorku E6

Tab. 11 Souhrn výsledků trhací zkoušky “vlhkých” vzorků

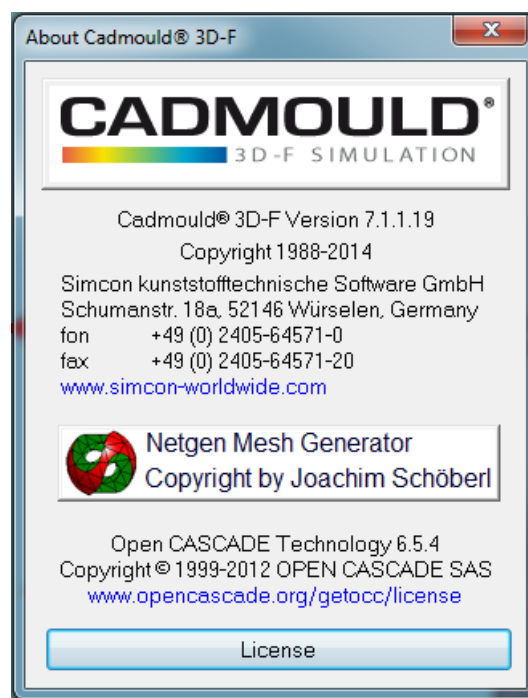
| Varianta | Mez pevnosti v tahu [MPa] | Poměrné prodloužení na mezi pevnosti [%] | Maximální síla [N] | Prodloužení na mezi pevnosti [mm] |
|----------|---------------------------|--|--------------------|-----------------------------------|
| B | 62,4 | 55,441 | 2495 | 44,353 |
| E | 152,7 | 3,633 | 6107 | 2,906 |



3.4 Simulace

3.4.1 Simulační program

Na simulaci vstřikování pro tuto práci byl použit software Cadmould 3D-F. Tento program slouží pro analýzu vstřikování plastů, řadí se mezi nejúspěšnější evropské programy tohoto typu. Dokáže posoudit a optimalizovat konstrukci plastových dílů a vstřikovacích forem, navrhne vhodnou technologii samotného vstřikování a dodá podklady pro ekonomické hodnocení zakázek. Cadmould 3D-F se pyšní především rychlostí výpočtů, přesností výsledků a jednoduchým ovládáním.

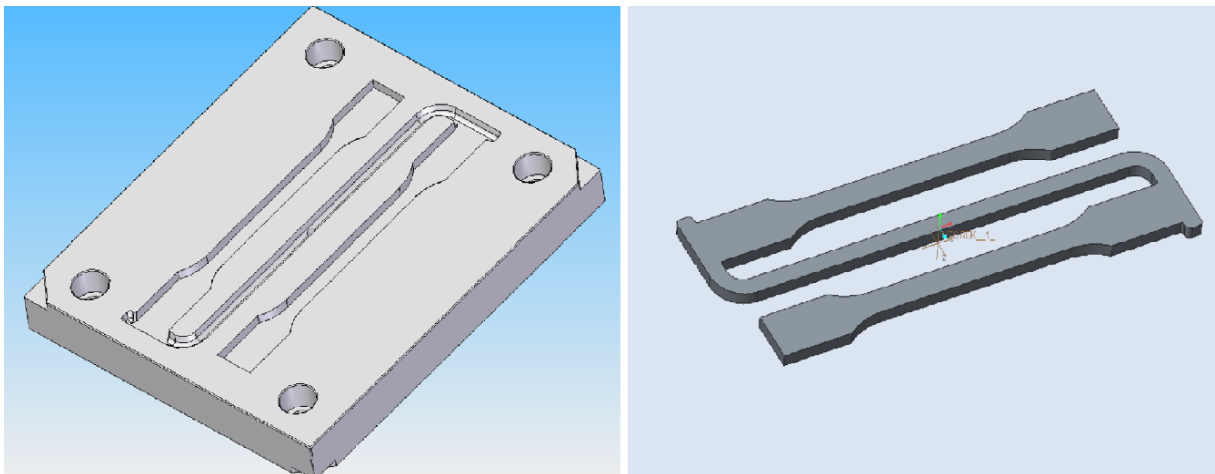


Obr. 38 Cadmould 3D-F

Jak lze vidět z Obr. 38, byla použita verze programu 7.1.1.19. Tato verze obsahuje pro nás důležitou novinku, což je mechanická analýza (neboli FEM výpočet) vstřikovaného dílu. Tento přídatný modul by nám měl umožnit zatížit model vzorku danou trhací rychlostí a spočítat nám deformaci nebo napětí po natažení.

Pro samotnou simulaci vstřikování bylo nejprve nutné vytvořit model výstřiku. Z dané formy (viz. Obr. 39 a) byl vytvořen negativ, který odpovídal výstřiku (viz. Obr. 39 b). Pro tuto činnost byly použity programy PTC Creo a SolidEdge.

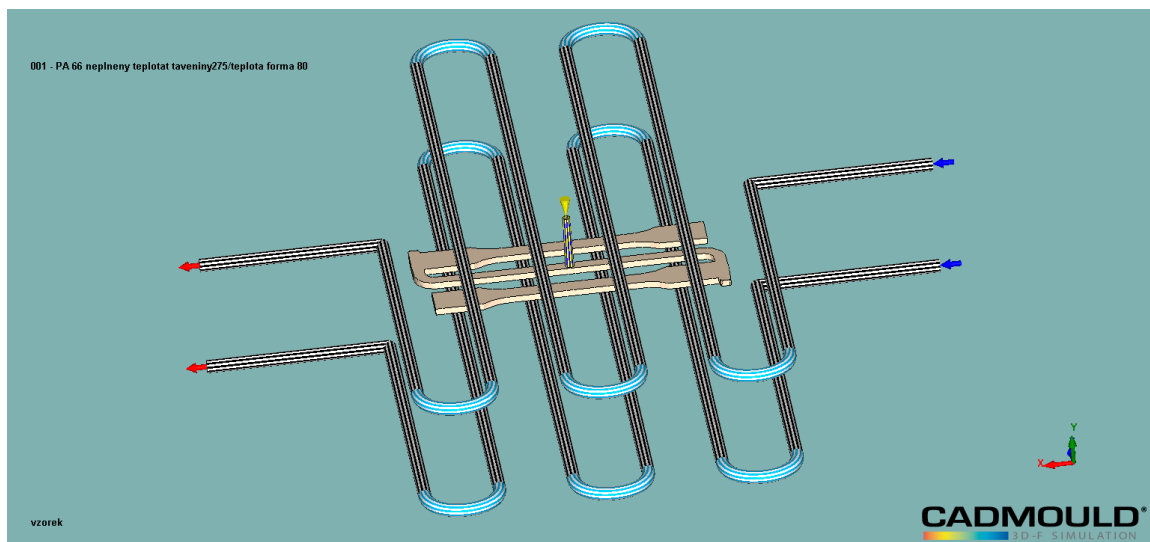




Obr. 39 3D model a) formy b) výstřiku

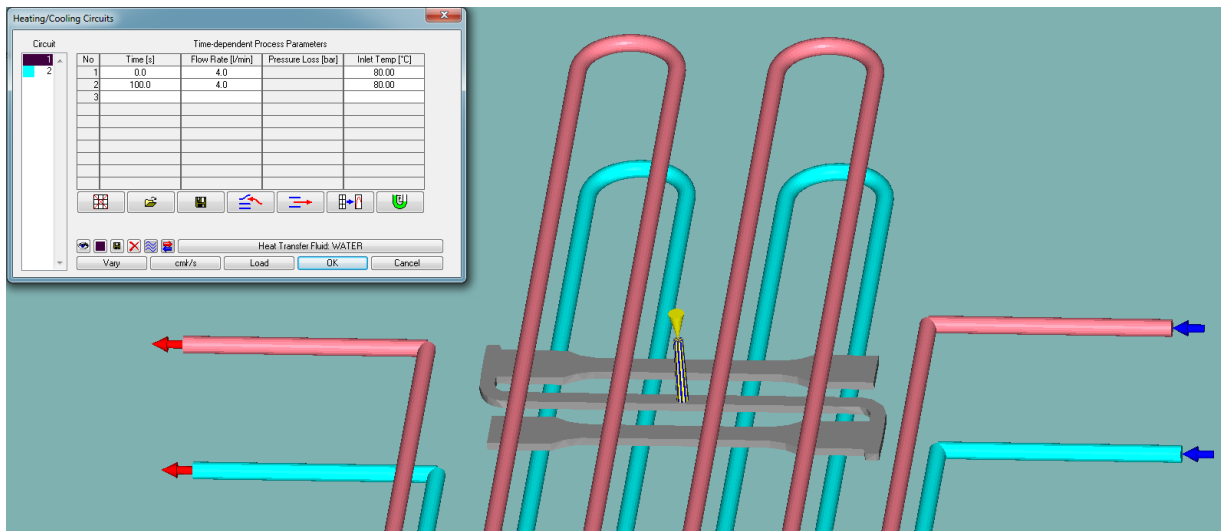
3.4.2 Simulace vstřikování

Následně byl vzorek převeden do programu Cadmould 3D-F (viz. Obr. 40), kde byl opatřen vtokem určitých rozměrů a chladicími kanály (viz. Obr. 41), které byly odměřeny z modelu celé formy. Pro simulaci vstřikování bylo nutné nastavit parametry procesu, což byly: teplota taveniny, teplota formy, doba plnění, doba chlazení, doba dotlaku a teplota výstřiku po vyhození. Samozřejmě se nesmělo zapomenout na zvolení vhodného materiálu výstřiku z knihovny programu (viz. Obr. 42).

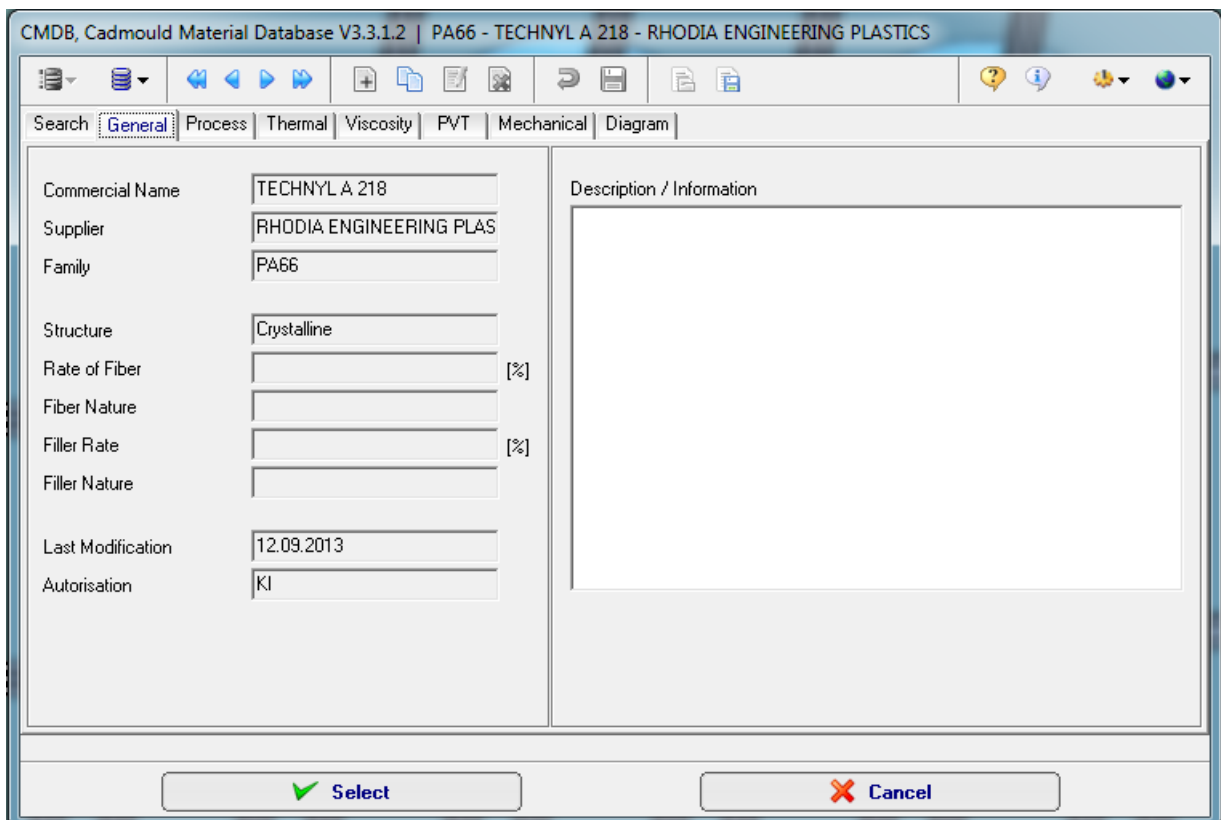


Obr. 40 Vzorek s vtokem a chladicími kanály





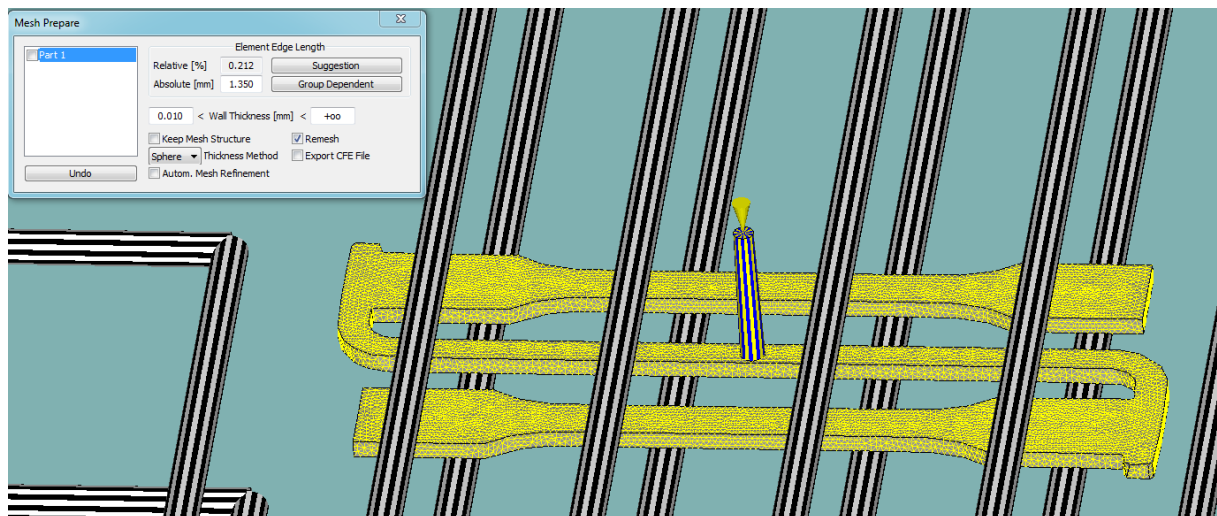
Obr. 41 Nastavení chlazení formy – v tomto případě je chladicí médium voda



Obr. 42 Zvolený materiál v programu – v tomto případě PA66



Pro následnou analýzu bylo nutné na vzorku vygenerovat dostatečně jemnou síť. Tato síť prvek rozdělila na mnoho malých elementů pro přesnější simulaci (viz. Obr. 43).



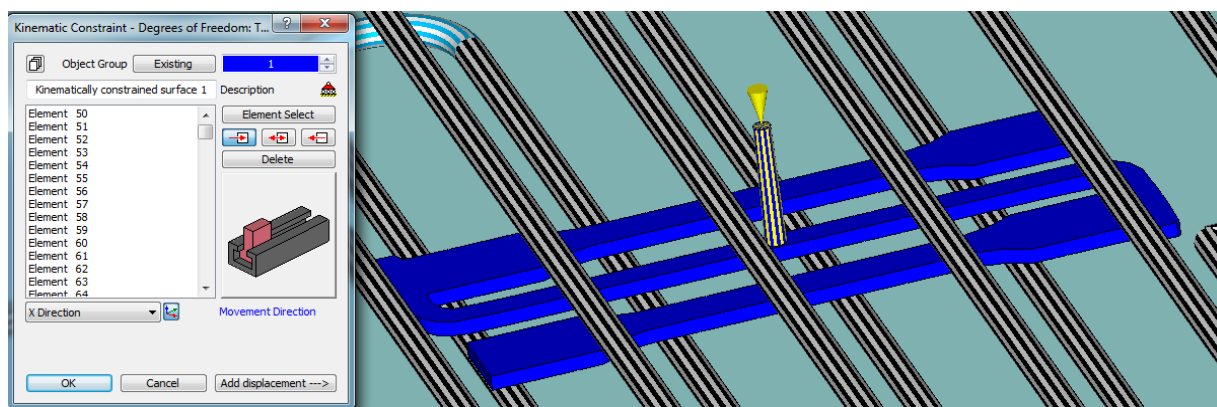
Obr. 43 Vygenerovaná síť na vzorku

V této chvíli se už mohla zahájit vlastní simulace vstřikování. Celý výpočet trval přibližně 30 minut. Po kliknutí na results nám byl ukázán celý výpis všech výsledků, jako je např. průběh teploty, tlaku a dalších veličin v závislosti na čase, ale také kvality výstřiku.

3.4.3 Mechanická analýza

Tyto výsledky pro nás ovšem nebyly směrodatné. V tuto chvíli přišla na řadu mechanická analýza, která nám měla poskytnout výpočet pevnosti v tahu, případně poměrné deformace.

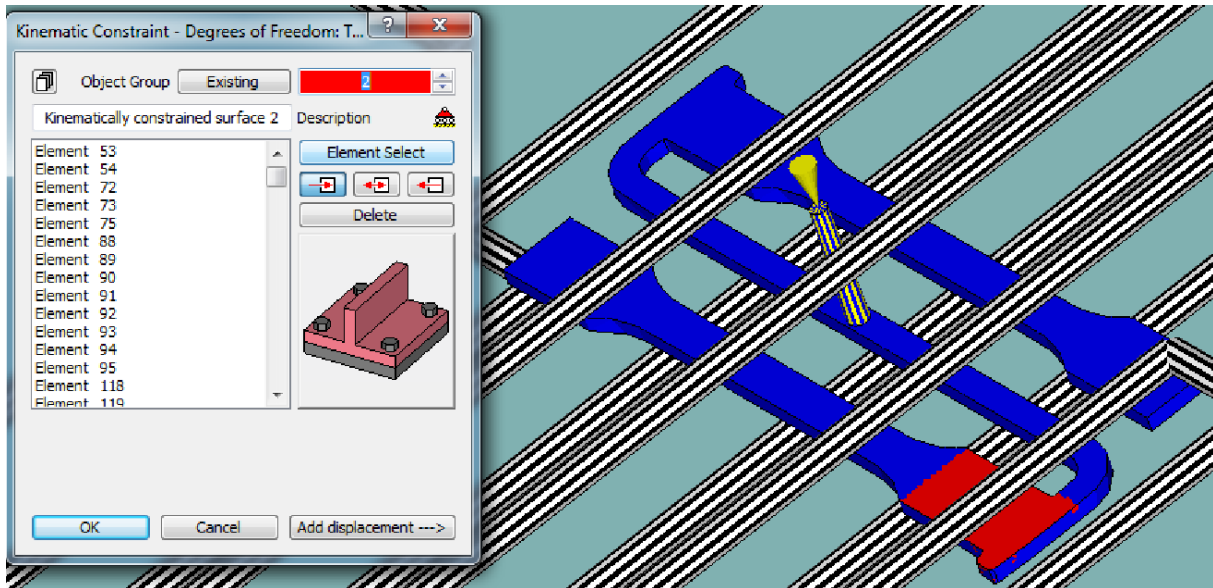
Nejprve bylo nutné vhodně zvolit okrajové podmínky, těleso tzv. zavazbit .



Obr. 44 1. vazba

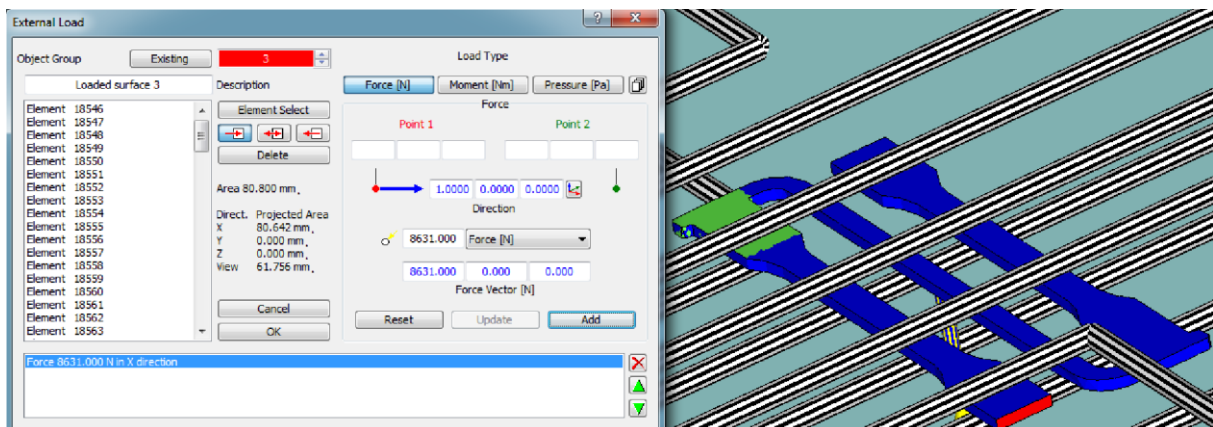


Jak je možné vidět na Obr. 44, 1. vazba byla vybrána pro celý part (pro celé těleso) a to tak, že mu byl umožněn posuv jen v ose x (zkouška tahem také probíhá jen v jednom směru). Dále bylo potřeba vzorek z jedné strany upnout a zamezit mu tak v pohybu, k čemuž nám posloužila 2. vazba (viz Obr. 45). Tato vazba nám představuje pevnou čelist trhacího stroje.



Obr. 45 2. vazba (červeně označená, nachází se i na protilehlé straně vzorku)

V poslední řadě bylo potřeba zatížit těleso jako při zkoušce tahem (viz. Obr. 46). Zde došlo k prvním problémům. Bohužel v programu Cadmould 3D-F nejde nastavit konstantní trhací rychlost, ale pouze jedna konkrétní síla. To znamená, že ani nemůžeme získat pracovní diagram. Jako jedna konkrétní síla byla zvolena maximální síla, která byla získána z trhací zkoušky.



Obr. 46 Přidání tahové síly (červeně označená plocha)

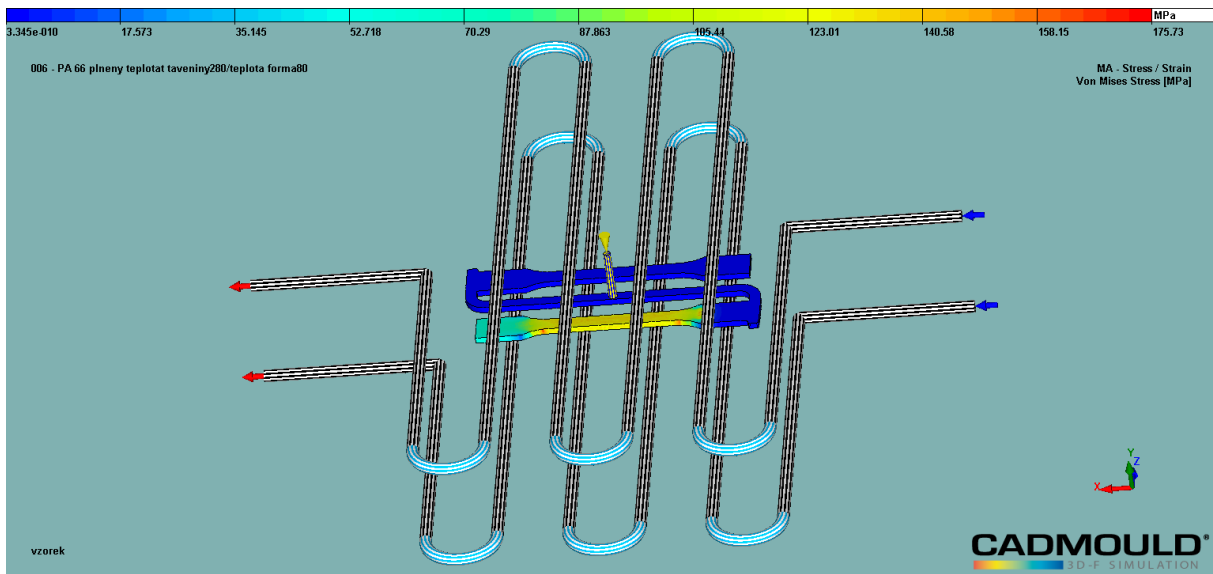


Na první pohled se může zdát, že působiště síly mohlo být zvoleno jinak, například po celé ploše jako u 2. vazby. Avšak po vyzkoušení nespočetného množství simulací s různými zatíženými plochami se tato jevila jako nejpodobnější tahové zkoušce. U ostatních pokusů docházelo zejména k průhybu celého vzorku i v ose y a z, což je pro trhací zkoušku nepřijatelné.

V této chvíli se spustila simulace mechanických vlastností, která trvala přibližně 10 minut. Očekávaný výsledek byl, jak již bylo řečeno, mez pevnosti v tahu a poměrná deformace.

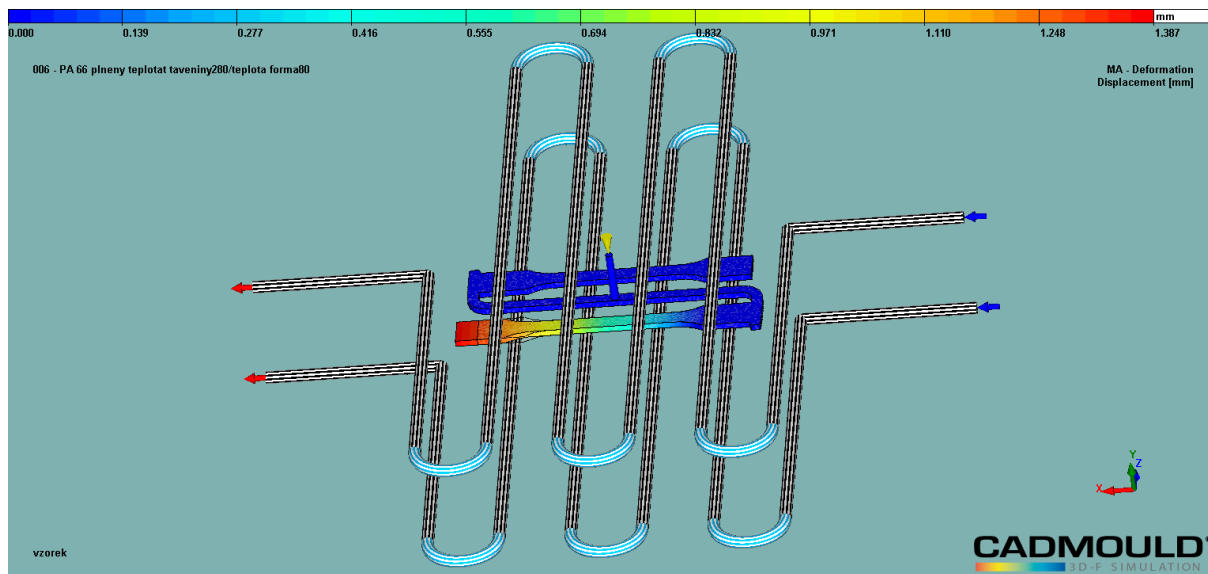
Výsledek v podobě napětí byl získán, bohužel ne ten očekávaný. Místo meze pevnosti tahu program spočítal napětí von Mises (viz. Obr. 47). K dispozici jsou buď maximální napětí von Mises, nebo napětí von Mises v různých vzdálenostech po tloušťce stěny od jejího povrchu. Toto napětí zohledňuje stav napjatosti ve všech třech osách, například i smykové napětí při vzniku krčku. V průběhu výpočtu se elementy deformují a natáčejí, tím mění napjatost, z čehož je patrné, že napětí von Mises neodpovídá napětí v tahu.

Druhým výsledkem byla deformace vzorku (neboli prodloužení), jak je možné vidět na Obr. 48. K dispozici byla deformace ve všech třech osách (zde je použitelná jen deformace v ose x, ostatní se přibližně rovnají nule).



Obr. 47 Výsledek mechanické analýzy – napětí von Mises Stress





Obr. 48 Výsledek mechanické analýzy – deformace (prodloužení)

Shrnutí všech výsledků (napětí a deformace) mechanických simulací programu Cadmould 3D-F pro každou variantu budou uvedeny v následujících tabulce.

Tab. 12 Souhrn všech výsledků z mechanické analýzy

| Varianta | Max. napětí von Mises [MPa] | Prodloužení (deformace) [mm] |
|----------|-----------------------------|------------------------------|
| A | 53,8 | 1,639 |
| B | 58,6 | 1,598 |
| C | 45,6 | 1,387 |
| D | 34,5 | 1,052 |
| E | 175,7 | 1,387 |
| F | 175,1 | 1,380 |
| G | 191,1 | 1,503 |
| H | 198,8 | 1,541 |

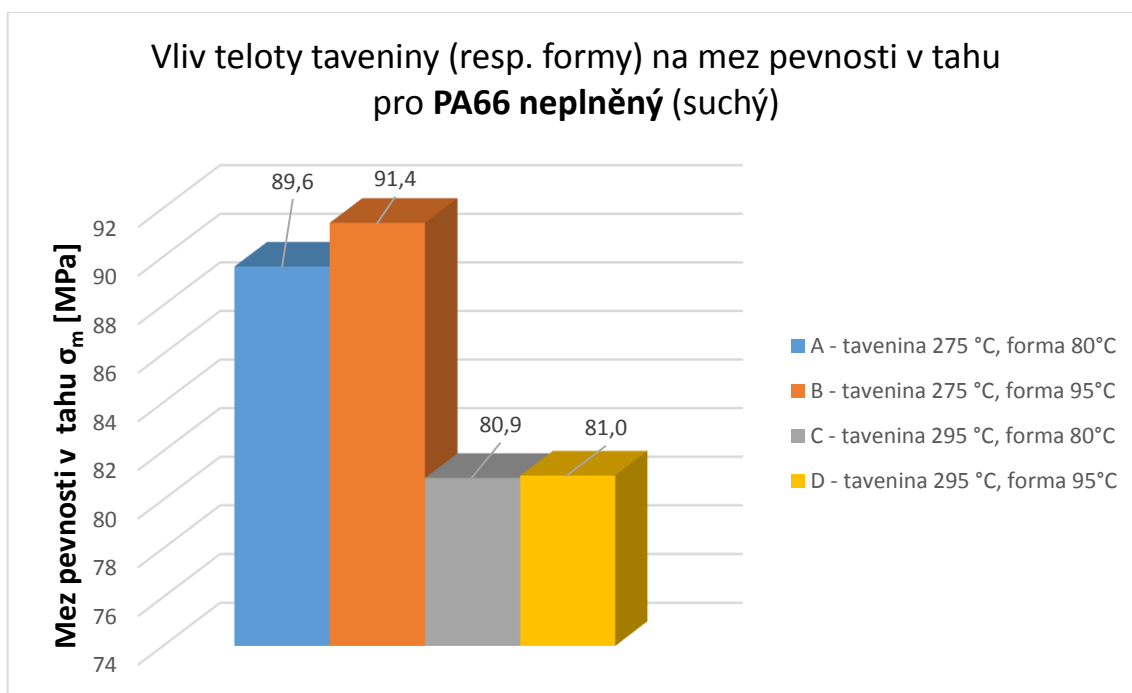


4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

4.1 Porovnání pevnosti jednotlivých variant z trhací zkoušky

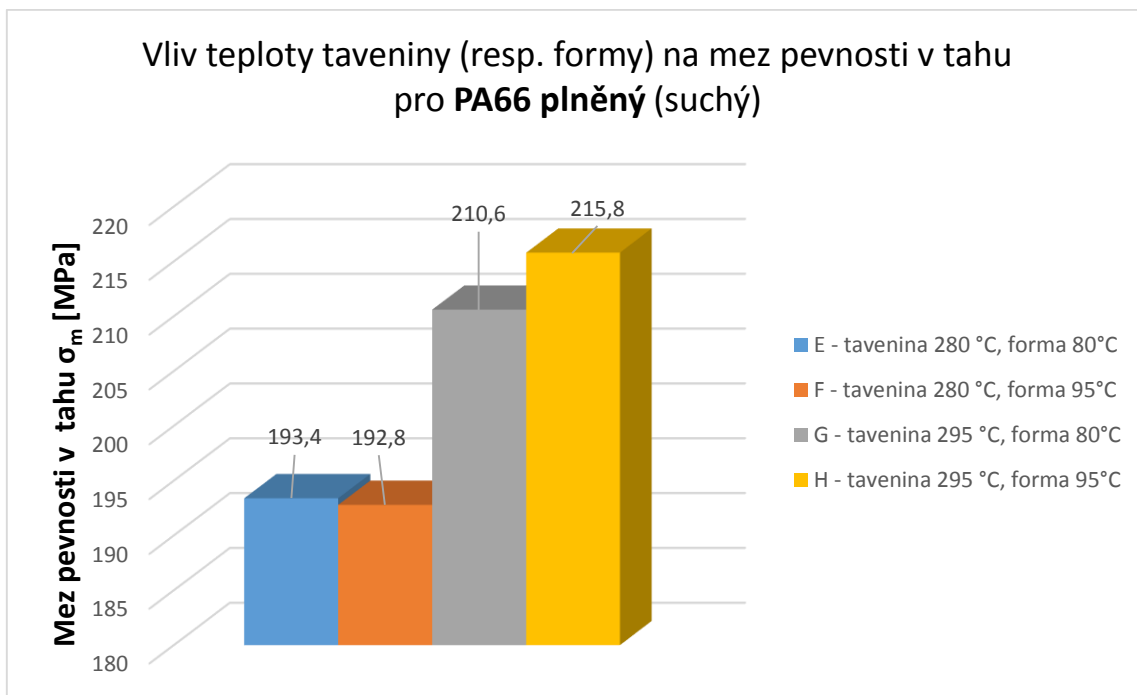
Na Obr. 49 lze vidět porovnání pevnosti jednotlivých variant A až D, tedy variant PA66 neplněného. Už na první pohled je vidět, že zde máme dvojice hodnot, které se přibližně rovnají. Z grafu je též patrné, že teplota formy v tomto experimentu nehrála důležitou roli. Rozhodujícím faktorem je zde teplota taveniny. Polyamid, který se ve vstřikovacím stroji roztavil na teplotu 275 °C, následně vykazoval vyšší pevnost (přibližně 90 MPa), zatímco roztavený polyamid o teplotě 295 °C dosáhl menší pevnosti (přibližně 80 MPa).

Obdobné porovnání je vidět i na Obr. 50. Tentokrát se jedná o varianty E až H, tedy varianty PA66 plněného. Stejně jako u PA66 neplněného, zde teplota formy nehraje větší roli a k rozdílům pevnosti dochází kvůli odlišné teplotě taveniny. Zajímavé je, že v tomto případě vyšší teplota taveniny (295°C) vykazuje vyšší pevnost v tahu (přibližně 213 MPa) a naopak menší teplota taveniny (280°C) představuje menší pevnost v tahu (přibližně 193 MPa).



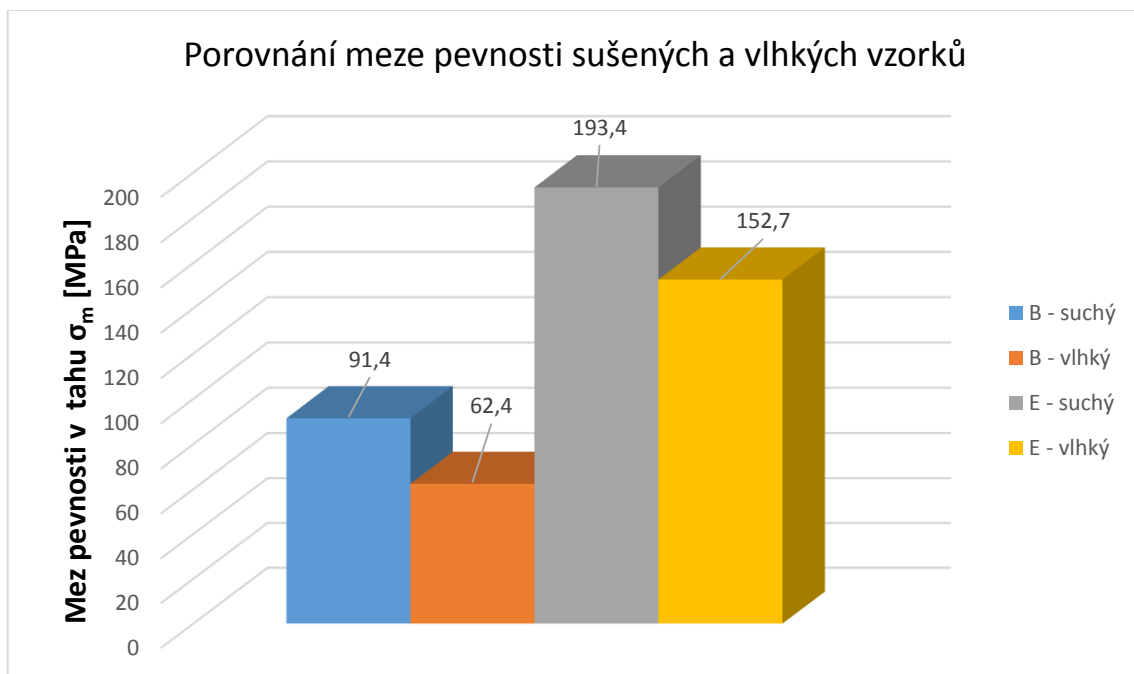
Obr. 49





Obr. 50

4.2 Porovnání pevnosti suchých a vlhkých vzorků z trhacího zkoušky



Obr. 51



Z Obr. 51 je patrné, že rozdíl mezi sušeným a vlhkým vzorkem je poměrně značný. U varianty B (PA66 neplněný 275°C / 95°C) se mez pevnosti v tahu mezi sušeným a vlhkým vzorkem liší přibližně o 30 MPa ve prospěch sušeného. Mez pevnosti varianty E (PA66 plněný 280°C / 80°C) se liší přibližně o 40 MPa. Obecně platí, že sušené vzorky vykazují vyšší pevnost než ty navlhlé, což jsme si teď ověřili.

4.3 Porovnání pevnosti získané z trhací zkoušky s předepsanou teoretickou pevností

Předepsanou teoretickou pevností je myšlena mez pevnosti v tahu pro PA66 TECHNYL A 218 BLACK 21 N resp. pro PA66GF (50%) A218 BLACK 21 N získaná z materiálového listu (dle ISO 527 – 2/1A). Pevnosti variant A až D (PA66 neplněný) se od teoretické pevnosti liší maximálně o 9 MPa. Naopak pevnosti variant E až H (PA66 plněný) se liší oproti teorii více (až o 47 MPa). Hodnoty pevností lze vidět v Tab. 13.

Tab. 13

| Varianta | Mez pevnosti v tahu z trhačky [MPa] | Teoretická mez pevnosti v tahu [MPa] |
|----------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| A | 89,6 | 90 |
| B | 91,4 | |
| C | 80,9 | |
| D | 81,0 | |
| E | 193,4 | 240 |
| F | 192,8 | |
| G | 210,6 | |
| H | 215,8 | |

4.4 Porovnání výsledků z trhacího zařízení s výsledky ze simulace

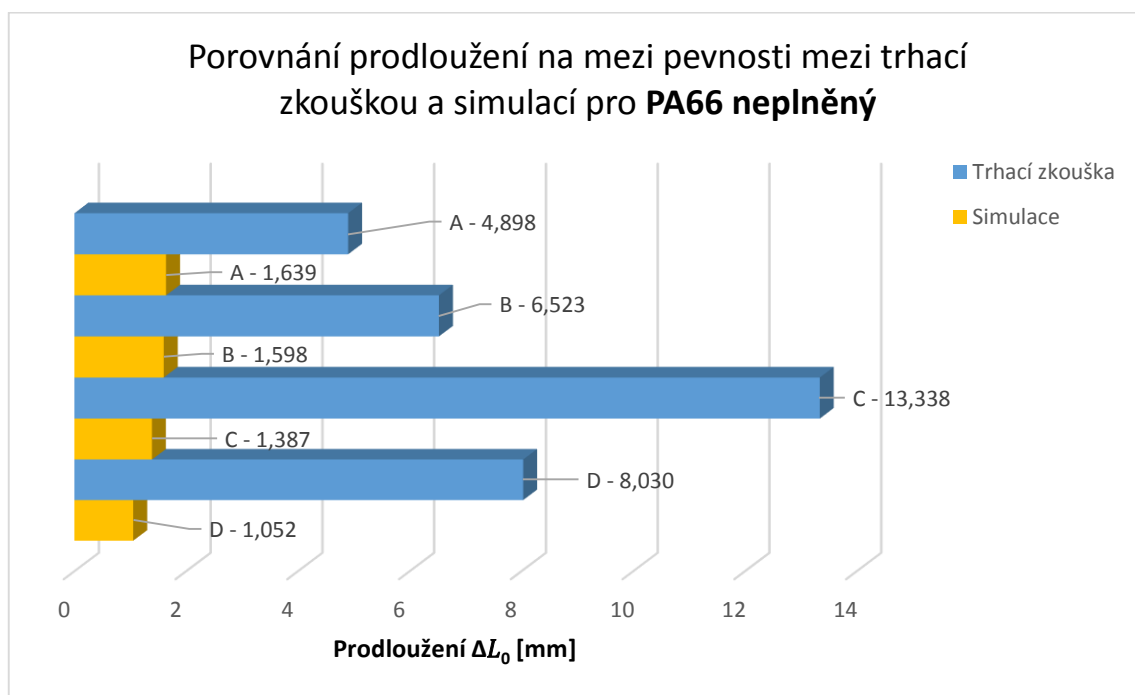
Z mechanické analýzy programu Cadmould 3D – F jsme získali 2 druhy výsledků a to maximální napětí von Misses a prodloužení vzorku. V Tab. 14 je srovnání meze pevnosti v tahu získané z trhací zkoušky s napětím von Misses. Už na první pohled je vidět, že rozdíl je poměrně markantní (zejména u variant A až D, tedy u PA66 neplněného). Na druhou stranu si musíme říci, že porovnáváme 2 odlišné napětí.



Tab. 14

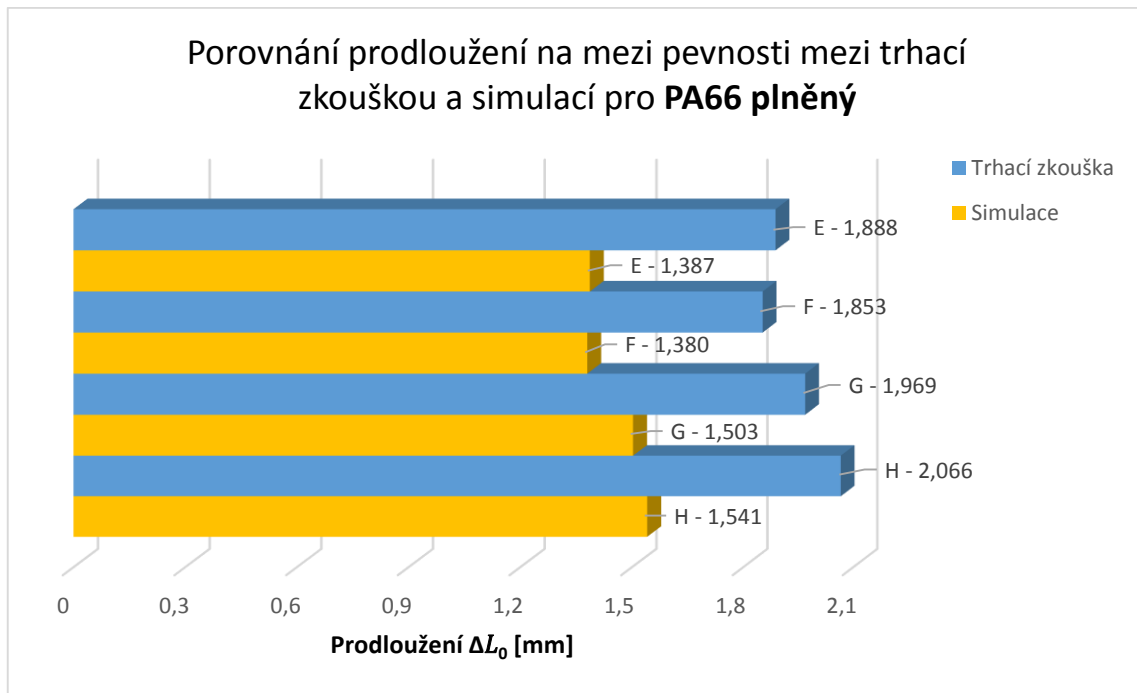
| Varianta | Mez pevnosti v tahu z trhačky [MPa] | Max. napětí von Misses [MPa] |
|----------|-------------------------------------|------------------------------|
| A | 89,6 | 53,8 |
| B | 91,4 | 58,6 |
| C | 80,9 | 45,6 |
| D | 81,0 | 34,5 |
| E | 193,4 | 175,7 |
| F | 192,8 | 175,1 |
| G | 210,6 | 191,1 |
| H | 215,8 | 198,8 |

Dále je na Obr. 52 a na Obr. 53 zobrazen rozdíl prodloužení vzorku na mezi pevnosti v tahu po trhací zkoušce a po simulaci. Opět zde dochází k velkému rozdílu. PA66 neplněný se po trhací zkoušce prodloužil v průměru o 8,197 mm, zatímco v simulaci průměrně o 1,135 mm. Naopak u plněného polyamidu se rozdíl výrazně zmenšil - PA66 plněný se po trhací zkoušce prodloužil v průměru o 1,944 mm a v simulaci průměrně o 1,453 mm.



Obr. 52





Obr. 53



5. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnání pevnost vstříkovaného dílu z polyamidu s pevností, kterou nám měl poskytnout simulační program. Práce je rozdělena na 2 hlavní části a to na teoretickou a experimentální.

V teoretické části se zabývá plasty jako takovými, dále technologií vstříkování plastů. Tato technologie je zde popsána z hlediska jejího fungování, tzn. princip, postup, popis částí stroje, vliv jednotlivých parametrů vstříkování na samotný díl, jevy probíhající po tomto procesu atd. V poslední řadě je v teorii popsána obecná zkouška tahem - pracovní diagram a jeho základní veličiny a zkoušené vzorky.

Experimentální část se nejprve věnuje vstříkovaným materiálům (PA66 TECHNYL A 218 BLACK 21 N a PA66GF (50%) A218 BLACK 21 N). Dále jsou v práci popsány technologické parametry vstříkování, rozdělení jednotlivých variant, které se liší teplotami formy a taveniny a následně samotné vstříkování zkušebních vzorků, které probíhalo na stroji Arburg allrounder 270 S 400-100. V další části už dochází ke zkoušení zhotovených vzorků, konkrétně k tahové zkoušce. Z této zkoušky se získaly výsledky, které byly porovnány s následnou simulací, kterou nám umožnil software Cadmould 3D-F.

V době zadání bakalářské práce bylo výrobcem programu deklarováno, že program zvládne počítat pevnost plastových dílů. Bohužel se tak ale nestalo. Verze, která vyšla na trh v únoru 2015, sice měla přídatný modul mechanické analýzy, ovšem uměla pouze výpočet deformace (a napětí Von Misses) v závislosti na konkrétním zatížení. Z tohoto důvodu musela být práce modifikována a byla zaměřena zejména na porovnání pevností jednotlivých variant mezi sebou, dále na porovnání pevnosti suchých a vlhkých vzorků, porovnání pevnosti daného materiálu z trhačí zkoušky s předepsanou teoretickou pevností.

Z vyhodnocení výsledků lze shrnout to, že pevnost vzorků, které byly sušeny, se pohybovala v rozmezí 80,9 – 91,4 MPa (pro PA66 neplněný – varianty A až D) anebo v rozmezí 192,8 – 215,8 MPa (pro PA66 plněný – varianty E až H). Teplota formy neměla na výslednou pevnost v tahu vliv. Naopak teplota taveniny pevnost ovlivnila a to tak, že čím byla vyšší teplota, tím byla nižší pevnost (u PA66 neplněného) respektive čím byla vyšší teplota, tím byla vyšší pevnost (u PA66 plněného). Dále jsme si ověřili fakt, že suchý vzorek vykazuje vyšší



pevnost v tahu než vlhký vzorek. K posouzení reality a simulace bylo zhodnoceno prodloužení na mezi pevnosti získané z tahové zkoušky a programu.

Na závěr je nutno říci, že program Cadmould 3D-F je výborný na simulaci samotného vstříkování, ovšem na mechanickou analýzu zatím není vhodně uzpůsoben.



POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 250 s. ISBN 80-7372-133-3.
- [2] LENFELD, P. *Technologie II. – 2. část (zpracování plastů)*. Liberec: TU v Liberci, 2009. 139 s. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [3] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [4] MATOCHA P., Bakalářská práce - *Biopolymerní kompozity s rostlinnými vlákny juty a kokosu*. Liberec: TU v Liberci, 2013.
- [5] ČSN EN ISO 294 – 1 (64 0210) – *Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – Část 1: Obecné principy a vstřikování víceúčelových zkušebních těles a zkušebních těles tvaru pravoúhlého hranolu*
- [6] ČSN EN ISO 1110 – 1 (64 3607) – *Plasty – Polyamidy – Zrychlené kondicionování zkušebních těles*
- [7] ČSN EN ISO 1874 – 2 (64 3610) – *Plasty – Polyamidy (PA) pro tváření – Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*
- [8] Lisovna plastů. *Lisovna plastů* [online]. [vid. 2015 – 06 – 15]. Dostupné z: <http://lisovna-plastu.blogspot.cz/2011/01/vyvoj-plastu.html>
- [9] VINK Plasty s.r.o., *VINK* [online]. [vid. 2015 – 06 – 2]. Dostupné z: <http://www.vink.cz/polyamid>
- [10] DITTRICH V., Bakalářská práce – *Pevnost hybridního spoje v závislosti na teplotě zálisku*. Liberec: TU v Liberci, 2014.
- [11] Wikipedie. *Polyamidová vlákna* [online]. [vid. 2015 – 06 – 4]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyamidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [12] Publi.cz. *Polymery* [online]. [vid. 2015 – 06 – 5]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>



[13] Publi.cz. *Technologie vstřikování* [online]. [vid. 2015 – 06 – 5]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>

[14] Katedra strojírenské technologie TUL. *Tahové vlastnosti* [online]. [vid. 2015 – 06 – 5]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p7/tah2.pdf



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Materiálový list TECHNYL® A218 BLACK 21 N

Příloha č. 2 – Materiálový list TECHNYL® A218 V50 BLACK 21 N

