

# Vliv předeřevu zálsků na kvalitu hybridního spoje

## Disertační práce

*Studijní program:* P2303 – Strojírenská technologie  
*Studijní obor:* 2303V002 – Strojírenská technologie  
*Autor práce:* **Ing. Roman Paclt**  
*Vedoucí práce:* prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld



# Effect of Inserts Preheating on Quality of hybrid Connection

## Dissertation

*Study programme:* P2303 – Engineering Technology  
*Study branch:* 2303V002 – Engineering Technology  
*Author:* **Ing. Roman Paclt**  
*Supervisor:* prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld



# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA STROJNÍ

**Disertační práce**  
ve studijním oboru  
2303 V002 Strojírenská technologie

se zaměřením na  
Zpracování plastů

na  
Katedře strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

### **Vliv předehřevu záložek na kvalitu hybridního spoje**

Dissertation thesis

### **Effect of Inserts Preheating on Quality of hybrid Connection**

**Autor: Ing. Roman Paclt**

**Vedoucí katedry: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.**

**Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld**

**Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 119

Počet obrázků: 79

Počet tabulek: 14

Počet příloh: 6



## **Anotace**

*Téma práce:* **Vliv přehřevu zálišků na kvalitu hybridního spoje**

Disertační práce zkoumá problematiku záliškových technologií. Zkoumá teplotně tlakové poměry během zástřiku kovového komponentu a to jednak analyticky, numericky pomocí počítačových simulací a měření. Konfrontuje teoretické předpoklady a reálné výsledky měření. Dále podrobně analyzuje vliv teploty kovových zálišků v kombinaci s dalším faktorem, kterým je volba plastového materiálu, na pevnost spoje mezi kovem a plastem a nadmolekulární strukturu plastu pomocí polarizační mikroskopie u mikrotomových řezů a metody DSC. Výsledkem disertační práce je popis závislosti stupně krystalinity plastu v místě hybridního spoje i mimo něj, pevnosti spoje a dalších vlastností na technologických parametrech vstřikovacího procesu.

*Klíčová slova:* zálišková technologie, simulace, hybridní spoj, přehřev, analýza DSC, mikrotomové řezy

## **Annotation**

*Theme of dissertation:* **Effect of inserts preheating on quality of hybrid connection**

The dissertation thesis deals with problematic of insert technologies. It investigates temperature and pressure relation during over-molding of metal component with analitic way, numerical way with usage of computer simulations and by measurement. In this way are confronted theoretical preconditions to the real results of measurement. Next point of this thesis is analysing of influence of metal inserts temperature in combination with another factor which is a choice of plastic material on connection between metal and plastic. A special focus is aimed on the stiffness of connection and supermolecular structure of polymer. Polarization microscopy for observing of microtom cuts and method DSC is used for this proposal. The result is a description of relation of cristalinity of polymer in place of connection and away from this place, stiffness of the connection and various properties on technological parameters of injection moulding process.

*Keywords:* Insert technology, Simulation, hybrid connection, preheating, DSC analyse, microtom cuts



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační 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 disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační 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.

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

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

## Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/200 Coll. Applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation on the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations with the adviser and the consultant.

At the same time I honestly declare that the printed version of the Ph.D. thesis corresponds with the electronic version inserted into the IS STAG system

Datum / Date:

Podpis / Signature:



## Poděkování:

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu mé disertační práce prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za správné nasměrování mého bádání a také zaměstnancům společnosti HPQ -Plast za pomoc při výrobě vstřikovacího nástroje a za pomoc při samotném vstřikování. Jmenovitě panu Milanu Eichlerovi (nástrojař) a Petru Hudci (technolog). Dále všem kolegům a plastikářům z TUL i mimo ni za pomoc, konzultace a pozitivní přístup, jmenovitě Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D za pomoc s DSC analýzou a provedením mikrotomových řezů. Poděkování patří i mé rodině za morální podporu i citlivost, s jakou tolerovala moji práci.

Disertační práce vznikla za finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.



## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	9
1 ÚVOD .....	12
1.1 Cíle disertační práce .....	14
1.2 Rešerše odborných článků a publikací .....	14
2 PROBLEMATIKA VSTŘIKOVÁNÍ ZÁLISKOVÝCH DÍLŮ .....	18
2.1 Materiály používané v hybridních spojkách .....	18
2.1.1 Materiály kovových zálisků .....	18
2.1.2 Plasty používané pro zástrík kovových zálisků .....	21
2.1.3 Morfologie polymerů .....	22
2.2 Vstřikovací proces .....	30
2.2.1 Reologie plastů .....	32
2.2.2 Tlakové poměry během vstřikování .....	36
2.2.3 Diagram p-v-T .....	39
2.2.4 Smrštění plastů .....	45
2.2.5 Vstřikování dílů se zálisky .....	46
2.3 Konstrukce dílů z plastů .....	47
2.3.1 Návrh výstřiků vyráběných záliskovými technologiemi .....	47
2.4 Pevnost hybridního spoje kov/plast .....	50
3 VÝZKUM MEZIFÁZOVÉHO ROZHŘANÍ PLAST-KOV .....	54
3.1 Konstrukce dílu .....	55
3.2 Volba materiálu .....	57
3.3 Volba stroje: rozhraní nástroj - stroj .....	59
3.4 Návrh vstřikovacího nástroje .....	61
3.5 Parametry procesu .....	68
3.6 Analytické výpočty .....	71
3.6.1 Výpočet pevnosti hybridního spoje .....	72
3.6.2 Výpočet tlaku taveniny v místě hybridního spoje .....	73
3.7 Simulace vstřikovacího procesu (Mold-flow analýza) .....	75
3.8 Předehřev ocelových zálisků hybridního spoje .....	84
3.9 Měření stavových veličin v místě hybridního spoje .....	84
3.9.1 Časové průběhy vnitřního tlaku .....	85
3.9.2 Časové průběhy teplot .....	86
3.9.3 Transformace procesu do p-v-T diagramu .....	89

3.10 Diskuze výsledků výzkumu průběhu stavových veličin v místě mezifázového rozhraní .....	91
3.11 Měření axiální přídržné síly hybridního spoje .....	95
3.11.1 Výsledky měření axiální síly.....	96
3.11.2 Diskuze výsledků měření axiální síly .....	98
3.12 Výzkum stupně krystalinity v místě hybridního spoje.....	100
3.12.1 Příprava vzorků pro DSC měření.....	100
3.12.2 Výstup a vyhodnocení DSC měření.....	101
3.12.3 Diskuze výsledků výzkumu stupně krystalinity.....	105
3.13 Výzkum morfologie v místě hybridního spoje .....	105
3.13.1 Polarizační mikroskopie.....	106
3.13.2 Diskuze výsledků výzkumu morfologie.....	107
4 ZÁVĚR .....	109
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	113
6 SEZNAM PUBLIKACÍ.....	117
7 SEZNAM PŘÍLOH.....	119



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\frac{dv}{dx}$	gradient rychlosti [ $s^{-1}$ ]
$b_i$	materiálové konstanty pro daný polymer [-]
C	bezrozměrná konstanta spoje [-]
$C_p$	tepelná kapacita [J/K]
Cr	chrom
D	smyková rychlost [ $s^{-1}$ ]
$D_1$	původní průměr čepu [m]
$D_2$	průměr plastu pokud bychom rozebrali spoj [m]
$D_f$	finální průměr čepu (i plastu) [m]
dH	změna entalpie [J]
dQ	přivedené, nebo odvedené teplo [J]
$D_{S\ MAX}$	maximální možný průměr šneku [m]
$D_{S\ MIN}$	minimální možný průměr šneku [m]
$D_s$	průměr šneku [m]
DSC	diferenciální skenovací kalorimetrie
dT	diferenciální změna teploty [K]
E	modul pružnosti [Pa]
$E_1$	modul pružnosti čepu [Pa]
$E_2$	modul pružnosti plastu [Pa]
f	koeficient tření mezi materiály [-]
$F_a$	axiální síla hybridního spoje [N]
$F_U$	uzavírací síla stroje (někdy nazývaná uzamykací) [N]
h	tloušťka kanálu, vtokového ústí či stěny výstřiku [m]
K	index konzistence [ $Pa\ s^n$ ]
L	délka spoje [m]
$L_{CH}$	délka vtokového kanálu [m]
$M_k$	kroučící moment [Nm]
Mn	mangan
n	index toku, který určuje odchylku od linearity [-]
$n_F$	násobnost formy [-]

$\bar{T}$	odvozená teplota [K]
$p$	tlak v místě hybridního spoje [Pa]
$p$	tlak [Pa]
PA	polyamid
PA6	polyamid 6
PHM	polymer hybrid metal
$p_i$	vnitřní tlak v dutině formy [Pa]
POM	polyoxymetylen
PP	polypropylen
$p_v$	vstřikovací tlak [Pa]
$Q$	objemový průtok [ $m^3/s$ ]
$R$	materiálová konstanta polymeru [ $J/(kg \cdot K)$ ]
$r$	poloměr kanálu [m]
$r_1$	vnitřní poloměr plastu [m]
$r_2$	vnější poloměr plastu [m]
$r_{kr}$	kritická velikost nukleačního zárodku [m]
$R_m$	mez pevnosti [Pa]
$R_v$	poloměr vtokového kanálu [m]
$s_K$	dráha šneku [mm]
$s_N$	dráha nástroje [mm]
$S_P$	průmětná plocha dílu do dělicí roviny [ $m^2$ ]
$t$	čas [s]
$T$	termodynamická teplota [K]
$t_d$	doba dotlaku [s]
$T_g$	teplota zesklnění [ $^{\circ}C$ ]
$t_{ch}$	doba chlazení [s]
$t_{KR}$	krystalizační teplota [ $^{\circ}C$ ]
$t_m$	doba manipulace [s]
$T_m$	teplota tání [ $^{\circ}C$ ]
$t_{pl}$	doba plastikace [s]
$T_{př}$	přechodová teplota [K]
$t_{s1}$	doba uzavírání formy [s]
$t_{s2}$	doba přisunutí vstřikovací jednotky [s]

$t_{s3}$	doba otevření formy [s]
$T_X$	teplota nukleačního maxima [°C]
$v$	měrný objem polymeru [ $m^3/kg$ ]
$V_D$	objem dávky = objem výstřiků a vtokové soustavy [ $m^3$ ]
$W$	šířka kanálu, vtokového ústí či stěny výstřiku [m]
$w_p$	hmotnostní podíl polymeru v plněném plastu [-]
$X_C$	stupeň krystalinity [%]
$z$	zdvih šneku [m]
$\Delta D_1$	deformace průměru čepu způsobená tlakem spoje [m]
$\Delta D_2$	deformace průměru plastu způsobená tlakem spoje [m]
$\Delta G$	změna volné (krystalizační) energie [J]
$\Delta h$	změna měrné entalpie [J/kg]
$\Delta H_{100}$	změna entalpie polymeru se 100% krystalinitou [J]
$\Delta H_C$	změna volné entalpie (uvolněné krystalizační teplo) [J]
$\Delta H_m$	změna entalpie vzorku během tání [J]
$\Delta p_{celk}$	celkové tlakové ztráty k místu hybridního spoje [Pa]
$\Delta p_{ik}$	úbytek vnitřního tlaku ve vtokovém kanálu [Pa]
$\Delta p_{io}$	úbytek vnitřního tlaku v obdélníkovém průřezu [Pa]
$\Delta S$	změna entropie [J/K]
$\mu_1$	Poissonova konstanta čepu [-]
$\mu_2$	Poissonova konstanta plastu [-]
$\pi$	vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě [MPa]
$\sum \Delta p_{ik}$	celkové tlakové ztráty ve vtoku a trysce [Pa]
$\tau$	smykové napětí [Pa]
$\omega$	měrný objem polymeru při 0 K [ $m^3/kg$ ]
$\eta$	dynamická viskozita [ $s^{-1}$ ]
$\eta_{zD}$	zdánlivá viskozita [ $s^{-1}$ ]

## 1 ÚVOD

Termoplasty jsou v současné době jedním z nejpoužívanějších materiálů v nejrůznějších oblastech výroby. Mezi jejich přednosti patří hlavně poměr jejich pevnosti a hmotnosti, který je velmi příznivý. Nespornou výhodou je velká škála jejich způsobů zpracování, kterými jsou různé tvářecí a tvarovací technologie spočívající ve změně jejich vlastností závislých zejména na teplotě. To znamená, že ke zpracování dochází za vyšších teplot, kdy dojde ke snížení vzájemných sil mezi makromolekulami plastu, a tím k dosažení plastického stavu a pak za působení vnějších sil strojů a nástrojů k dosažení finálního tvaru výrobku během jedné, nebo několika následných operací. Současné nástroje mohou být použity pro výrobu až několika milionů cyklů. Při použití vícenásobných forem tak můžeme na jednom nástroji vyrobit až několik desítek milionů výrobků s opakovatelností vhodnou pro aplikace, kde se požadavky pohybují v řádech setin milimetru. Jednou z nejrozšířenějších technologií je vstřikování termoplastů. Tato technologie dostala své základy již v roce 1872, kdy si americký vynálezce John Wesley Hyatt nechal patentovat jednoduchý vstřikovací stroj. V roce 1943 byl patentován plastikační šnek s vratným pohybem firmou BASF a v roce 1956 je patentována šneková vstřikovací jednotka tak, jak ji známe dnes [1]. Od této doby se proces vyvíjí zejména v oblasti regulace a řízení procesu, čemuž dopomáhá vývoj v oblasti elektroniky a informačních technologií. Dále dochází k velkému nárůstu počtu speciálních technologií, a to zejména pro automobilový a letecký průmysl. Tato disertační práce se bude věnovat záliskové technologii vstřikování (zástřík zejména kovových komponentů), která patří k jedné z prvních speciálních technologií. Dnes je velmi rozšířenou technologií s širokým uplatněním ve všech oblastech průmyslu.

Záliskové technologie, zúžíme-li je na technologie zástříku kovů plastem, mají za výsledek tzv. hybridní spojení polymeru a kovu (z anglického polymer metal hybrid technology). Potřeba dílů vyráběných záliskovými technologiemi pramení z nutnosti výhodně kombinovat vlastnost kovu a plastu. U kovů využíváme zejména jejich vyšší hodnoty mechanických vlastností (např. oceli), dále to mohou být výborné elektrické vlastnosti (slitiny mědi, stříbra, zlata), nebo jejich rozměrová přesnost (slitiny zinku). U plastů pak využíváme především jejich nižší měrnou hmotnost případně elektroizolační vlastnosti, dále jejich vlastnosti vzhledové, antikorozi, možnost tváření finálního tvaru výstříku, ergonomicky příznivé hodnoty

tvrdosti atd. Tyto výstřiky, které kombinují vlastnosti dvou z hlediska fyziky i chemie zcela odlišných materiálů, nacházejí uplatnění u dílů, které musí zajistit více charakteristik najednou. Typickým příkladem jsou skříně přístrojů a zařízení, skrz které prochází elektrické obvody. Další aplikací mohou být různé typy elektrických zásuvek, případně kombinace skříní či přírub a zásuvek. Třetí, velmi častou aplikací je použití záliskových technologií u pevnostně namáhaných součástí, které v místě předpokládaného vnějšího účinku síly potřebují získat lepší mechanické vlastnosti, které poskytne lokálně umístěný kov. Často se jedná o zástřík pouzder pro vedení a přenos axiální síly šroubů. Může se jednat o zástřík namáhaných částí nástrojů a zařízení.

U všech těchto aplikací je většinou podíl objemu plast/kov vyšší než 1. To znamená, že objemové zastoupení kovu ve výsledném výrobku je výrazně menší než objemové zastoupení plastu. Existují ještě aplikace, kde kov tvoří většinu objemu dílu s hybridním spojem. Tento typ se používá tam, kde například konstruktér předpokládá velké namáhání celé součásti, ale v určitých místech jsou žádoucí vlastnosti plastu (třecí plochy, plochy elektricky izolované, chránění proti korozi, krytky, výstelky kluzných ložisek). V těchto případech je často nezbytně nutný předehřev kovové součásti, neboť v případě zástříku tvoří zálisek velkou část styčné plochy se vstříknutým plastem.

Často používaným ekvivalentem k záliskové technologii je technologie dodatečného zalisování kovového dílu. Tato technologie šetří čas strávený zakládáním zálisku do formy a zkracuje tak cyklus stroje. Zároveň ovšem přidává další technologickou operaci. Tyto operace probíhají většinou na ručních či pneumatických lisech a stupeň automatizace závisí na celkovém objemu produkce dílů či potřeby zanedbání chyby člověka během procesu montáže. Operace zalisování kovových částí do plastu často způsobují otřepy v místech zalisování. Otřepy vznikají kvůli záměrnému přesahu kovu a plastu, který zaručuje to, aby spoj držel definovanou silou. Během zalisování pak hrany zálisku strhávají vrstvu plastu přilehlou ke spoji a vzniklé otřepy se často musí dočišťovat, čímž vzniká další následná operace. Zároveň se do spoje vnáší pnutí, které může mít za následek praskání součástí.

V případě zástříku zálisků plastem tyto problémy odpadávají. Pokud je zajištěno vzájemné uložení mezi záliskem a stěnami formy tak, že vůle je menší než kritická mez pro vznik otřepů vlivem zastříknutí, je vše technologicky v pořádku. Další výhodou je vyšší pevnost spoje, která může být posílena tvarovou vazbou, jež

díky negativnímu tvaru v kovovém zálisku může zabránit jakémukoliv vzájemnému pohybu.

## 1.1 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je výzkum vazeb a struktury rozhraní mezi plastem a kovem a zjištění závislosti pevnosti spoje, geometrie a morfologie plastu v místě hybridního spoje na teplotě přehřívání zálisku v kombinaci s volbou materiálu plastu.

Cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Rešerše odborných článků a publikací týkajících se dané problematiky, zjištění úrovně současného stavu výzkumu ve světě.
2. Návrh a konstrukce dílu z plastu a kovu pro výzkum hybridního spoje včetně volby základních materiálů pro díl s hybridním spojem.
3. Návrh a konstrukce formy pro zástřik kovového dílu plastem. Vybavení formy tlakovým čidlem a návrh měřicího přípravku pro měření teploty uvnitř stěny plastu pomocí termočlánku. Výroba formy a přípravku.
4. Analytické výpočty pevnosti hybridního spoje.
5. Simulace vstřikovacího procesu.
6. Měření tlakových a teplotních poměrů uvnitř dutiny formy v blízkosti hybridního spoje.
7. Výzkum vlivu vybraných činitelů na kvalitu hybridního spoje (přehřev zálisku a volba polymeru s různým stupněm krystalinity).
8. Porovnání výstupních hodnot měření s výsledky z výpočtové části a simulace vstřikovacího procesu.

## 1.2 Rešerše odborných článků a publikací

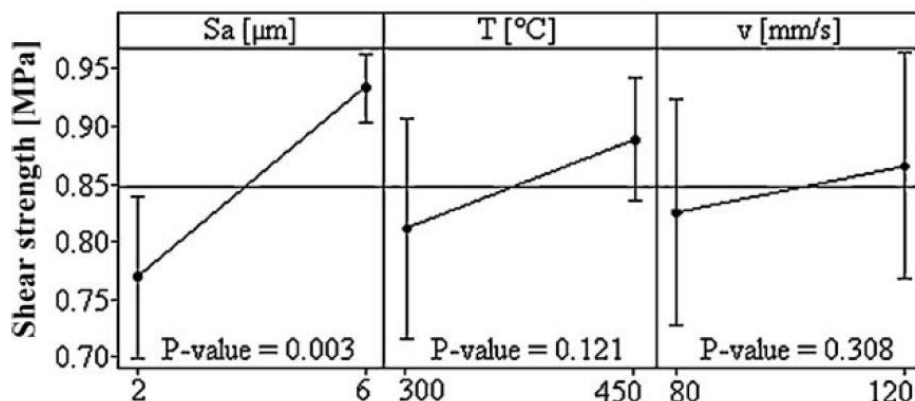
Prvním cílem disertační práce byla rešerše odborných článků a publikací k tématu záliskových spojů. V databázích odborných publikací jsem objevil relativně malé množství odborných článků zabývajících se výzkumem spojení plast – kov ve smyslu zástřiku kovových komponentů plastem. Termín PHM (polymer hybrid metal) vystihuje kromě klasického spojení kovu a plastu v záliskových technologiích i plasty s kovovými plnivými různými forem.

Adhezi spoje kovu a plastu řeší ve své odborné publikaci *Aluminum sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer metal hybrid overmolding* autoři G. Lucchetta, F. Marinello, P.F. Bariani [2]. Zkoumanými materiály byla slitina hliníku a plast PPS se skleněným plnivem. Výzkum se týkal závislosti adheze plastu a kovu na následujících parametrech:

- 1) Drsnost povrchu hliníkové destičky
- 2) Teplota hliníkové destičky
- 3) Vstřikovací rychlost

Adheze byla interpretována, jako napětí ve smyku, při odtržení plastu od destičky. Výsledkem byla následující zjištění:

- 1) S rostoucí drsností povrchu hliníkové destičky adheze roste
- 2) S rostoucí teplotou destičky adheze roste
- 3) S rostoucí vstřikovací rychlostí adheze roste



**Obr. 1** Závislost smykového napětí na drsnosti destičky, teplotě destičky a vstřikovací rychlosti [2]

Výsledky jsou hodnoceny hlavně ve vztahu k povrchu destičky, její drsnosti a schopnosti plastu tento povrch kopírovat a ovlivňovat tím koeficient tření. Tento výzkum je velmi podobný s mým výzkumným záměrem. Já však budu posuzovat hybridní spoj na základě změny jiných parametrů a geometrie spoje bude zcela odlišná. Metody zkoumání budou zaměřeny jiným směrem, a to posouzením morfologie hybridního spoje.

Důležitým faktorem spojeným s pevností hybridního spoje je koeficient tření plastu a kovu. Tato problematika je popsána ve článku *Material transfer of POM in sliding contact* [3], autora Y.J. Merglera. Tribologickými zkouškami je zde určen

koeficient tření mezi polyoxymetylenem a ocelí. Obdobnou tematikou se zabývá např. A. Pogačnik ve článku *Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel* [4], kde navíc do testů zahrnuje polyamid.

Mold-flow analýzu zaměřenou na výpočet zbytkového pnutí v materiálu po zástřiku plechu plastem nabízí článek M. Grujicice s názvem *Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components* [5]. Jedná se o využití metody konečných prvků k získání obrazu napětí, a tím i částečně adhezních sil při simulaci zástřiku. Ve výsledku je uvedena deformace plechu a velikost normálových sil působících mezi plastem a kovem. Vzhledem k mému záměru použít mold-flow analýzu pro výzkum poměrů v místě hybridního spoje je tento výzkum velmi zajímavý. Kovový zálisek je ale tvořen tenkým plechem, což je mimo oblast mého bližšího zájmu, protože se chci soustředit na zálisek masivnější a posuzovat tím lépe tepelné procesy během vstřikování.

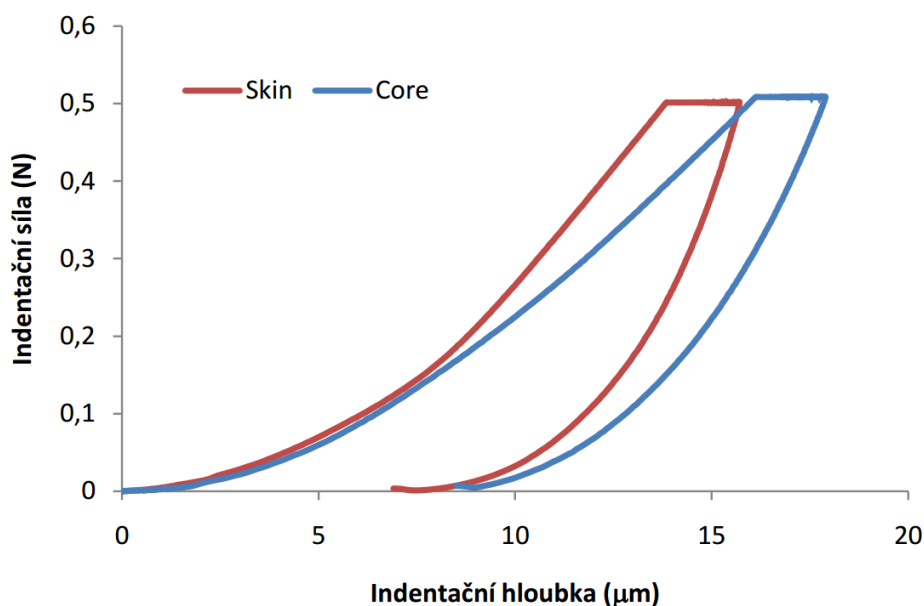
Oblast zájmu představuje hodnocení mechanických vlastností hybridního spoje. Zejména pak modul pružnosti, který je jedním z hlavních parametrů určujících pevnost spoje při zástřiku plastem. O tomto tématu pojednává například práce Y. Rémonda, *Measurement of local elastic properties of injection moulded polymer structures by analysis of flexural resonant frequencies. Applications in POM, PA66, filled PA 66* [6]. Článek obsahuje výstupy z měření modulu pružnosti vzorků na základě změny typu materiálu a různých procesních parametrů. Zároveň obsahuje grafický výstup velikosti modulu pružnosti směrem od povrchu výstřiku k jeho středu. Projevuje se zde stupeň krystalinity a jeho vliv na modul pružnosti. Blíže povrchu je modul pružnosti nižší a směrem ke středu se zvyšuje až do svého maxima a pak opět klesá. Podobný problém zkoumá Steve Meister ve svém článku *Influence of manufacturing conditions on measurement of mechanical material properties on thermoplastic micro tensile bars* [7]. Zde testuje mechanické vlastnosti výstřiku v závislosti na velikosti (tedy i tloušťce) zkušebních tělísek. S klesající tloušťkou stěny modul pružnosti klesá.

Otázkou však je, jak probíhá tato závislost přímo na povrchu materiálu v intencích setin milimetrů.

Na tuto otázku odpovídá např. Petra Pavelová ve své diplomové práci s názvem *Studium skin-core efektu u vstřikovaných dílů semikrystalických*



*termoplastů* [8]. V práci zkoumá povrchovou vrstvu pomocí zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse, která je při použití nižších zátěžových sil aplikovatelná i na plasty. Z hodnot mikrotvrdomosti povrchové vrstvy a středu zkušebních tělísek je jednoznačné, že tenká povrchová vrstva má mnohem vyšší mikrotvrdomost, a tím tedy i modul pružnosti. Odlišný průběh síly v závislosti na hloubce během zkoušky mikrotvrdomosti je znázorněn na obrázku 2.



**Obr. 2** Závislost indentační síly na indentační hloubce u skinu a coru [8]

Otázkou závislosti mechanických vlastností plastů na teplotě formy se zabývá D. Drummer ve článku s názvem *Characterization of Material Stiffness on Injection moulded Microspecimens Using different Test Methods* [9]. Výzkum je zaměřen podobně jako v mé disertační práci na tři typy plastů a dvě různé rychlosti ochlazování taveniny v závislosti na teplotě nástroje (já řeším teplotu předehřevu zálisku). Použitými nástroji jsou analýza DSC, polarizační mikroskopie a normalizované zkoušky tahem a ohybem. Výsledkem je jednoznačný nárůst modulu pružnosti, pokles tažnosti a zvětšení povrchové zdánlivě amorfnní vrstvy (skin) u vzorků, kde byla aplikována nižší teplota nástroje.

Závislost síly spoje plastu a kovu na geometrii spoje zkoumá např. M. Miklavec ve svém odborném článku *Fatigue strength of a hybrid joint formed between a PA6-GF60 polymer matrix and a S420MC steel insert* [10]. Tento okruh nemám v plánu zkoumat, protože efekt geometrie spoje použitím mechanického zámku zcela přebíjí vliv vstřikovacích parametrů a teploty zálisku na pevnost hybridního spoje. Nicméně jednotlivé typy konstrukčních řešení zde zmíním.

## 2 PROBLEMATIKA VSTŘIKOVÁNÍ ZÁLISKOVÝCH DÍLŮ

V této části disertační práce se budu věnovat volbě a užití materiálů pro vstříky s hybridním spojem, a to jak kovových, tak plastových. Další podkapitoly budou věnovány rozboru vstřikovací části procesu, tj. teplotně-tlakovým procesům a reologickým vlastnostem polymerních sloučenin. U polymerů si popíšeme jejich morfologii, zejména v závislosti na teplotách formy a zálisků a metody výzkumu morfologie polymerů. Poslední část pojednává o zásadách návrhu dílů vznikajících zástřikem kovových zálisků včetně možnosti výpočtu pevnosti těchto spojů.

### 2.1 Materiály používané v hybridních spojkách

Hybridní spoje plast – kov, co se týká materiálového složení, vycházejí zejména z požadavku funkce dílu. Plasty a kovy jsou z chemického hlediska tak odlišné materiály, že v rámci portfolia klasických konstrukčních kovů a slitin a polymerů neexistuje omezení z hlediska jejich možné kombinace.

#### 2.1.1 Materiály kovových zálisků

Kovy používající se v technické praxi jsou krystalické látky, které se nejčastěji používají jako slitiny základního kovu s jinými kovovými i nekovovými prvky. Primárně kovy rozdělujeme na železné a neželezné. Železné kovy pak zastupují oceli a litiny, přičemž oceli obsahují méně než 2,14 % uhlíku a litiny naopak více.

Volba materiálu kovového zálisku závisí zejména na účelu použití dílu s hybridním spojem. Pokud se jedná o použití dílu jako nástroje, rozhodující jsou vlastnosti mechanické. Pokud se jedná například o součást určenou do oblasti elektroprůmyslu, jsou rozhodující vlastnosti elektrické. Často je spolurozhodovacím kritériem také chemická odolnost, jejíž charakter vyplývá z prostředí, ve kterém se díl bude pohybovat během jeho použití (například vlhké prostředí).

V praxi jsou pro záliskovou technologii z železných slitin zastoupeny nejvíce oceli, ať už se jedná o oceli konstrukční, nástrojové nebo korozivzdorné. Oceli jsou využívány pro jejich vysokou pevnost. Často v podobě pouzder, čepů, šroubů, matic, pružin, částí nástrojů. Často se také jedná o ocelové díly s povrchovou úpravou pokovením, které má za následek zejména odolnost proti korozi. Nelegované oceli

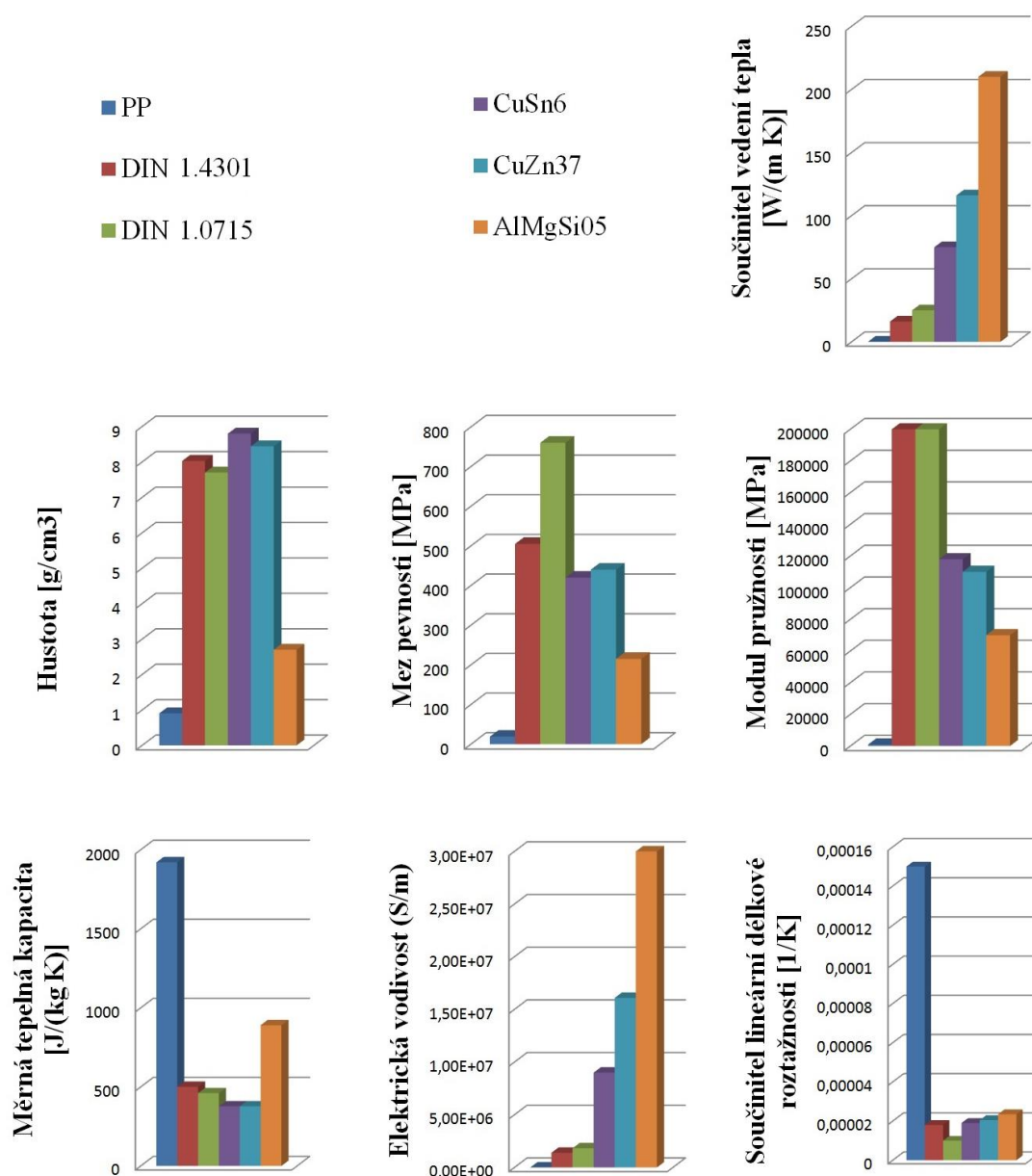
mají hustotu  $7,85 \text{ kg/m}^3$ , legované vyšší. To znamená cca 7 x vyšší hustotu než plasty. Pevnost ocelí se pohybuje mezi 250 až 2 000 MPa a modul pružnosti je roven 210 GPa. Ocel je v porovnání s plastem dobrým vodičem tepla a také elektřiny. Rozdílný součinitel vedení tepla a také rozdílná měrná tepelná kapacita u kovů a plastů pak ovlivňuje mimo jiné tepelné procesy během vstřikování u záliskových technologií. Součinitel délkové teplotní roztažnosti ocelí je zhruba 10 x až 20 x nižší, než u plastů. To může mít za následek například vznik pnutí při teplotním zatěžování hybridních spoju, nebo vznik netěsností. Pro představu - na 100 mm dlouhém spoji či 100 mm velkém průměru spoje může dojít při ohřevu o  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ke zvětšení délky spoje na straně plastu až o 0,6 mm, zatímco na straně kovu je změna rozměru zanedbatelná.

Pokud je volba oceli nevhodná, například je-li třeba snížit hmotnost, nebo zajistit lepší vodivost materiálu, otevírá se celkem široká paleta neželezných kovů. Neželezné kovy se dělí podle hustoty na kovy lehké (hořčík, hliník, titan) a na kovy těžké (měď, zinek, cín, olovo, stříbro, zlato, nikl). Většina kovových slitin pro výrobu zálisků pro elektrické součásti je ze slitin mědi. Měď má výbornou elektrickou vodivost, ale např. proti oceli relativně nízkou pevnost. Proto se nejčastěji používá jako slitina s jinými kovy, a to jako bronz Cu – Sn, nebo jako mosaz Cu – Zn. Velmi často je ve slitinách přítomen i nikl pro zvýšení pevnosti. Mosazné a bronzové polotovary se většinou dodávají ve formě svitků, které jsou pak na postupových střižných nástrojích na rychloběžných lisech stříhány a ohýbány do finální podoby, nebo podoby téměř finální, kdy dochází k jejich téměř úplnému oddělení, ovšem ponechání spojovacích můstků a opětovné navinutí na cívku. Mosazné a bronzové zálisky se velice často upravují pokovením. Pokovení probíhá buď žárově, nebo galvanicky. Nejčastěji je to pocínování, niklování a někdy se pro zaručení extrémní vodivosti používá tenká vrstva stříbra nebo zlata. K pokovení může docházet buď před střižně ohybovým procesem, nebo po něm, a to buď na polofinálním svitku s můstkem nebo na jednotlivých (tzv. padaných) dílech. Před vlastním návrhem technologického postupu výroby je třeba si uvědomit, že v případě pokovení vstupního pásu dojde v místech stříhu k tomu, že kontakty budou na střižných stěnách bez galvanické vrstvy.

Slitiny hliníku se používají zejména pro jeho nízkou hustotu a vysoký poměr pevnosti vůči hmotnosti. Slitiny hliníku mají přeci jen vyšší pevnost než plast, ale oproti kupříkladu korozivzdorné oceli mnohem nižší hustotu. Co se týká koroze, tak

na hliníku se vytváří tenká tzv. pasivační vrstvička oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ . Tato vrstvička by z hlediska vedení elektrického proudu mohla způsobit problém, ale z hlediska ochrany proti korozi plní svoji úlohu dokonale.

Charakteristika základních materiálů pro kovové zálisky je uvedena v tabulce 1. a grafický výstup z ní na obrázku 3. Uvedeny jsou materiály, které se nejčastěji používají pro kovové zálisky. Záměrně je pak v prvním řádku tabulky uveden polypropylen, aby bylo zřejmé, jak odlišné jsou vlastnosti plastů od kovů. [11, 12, 13, 14]



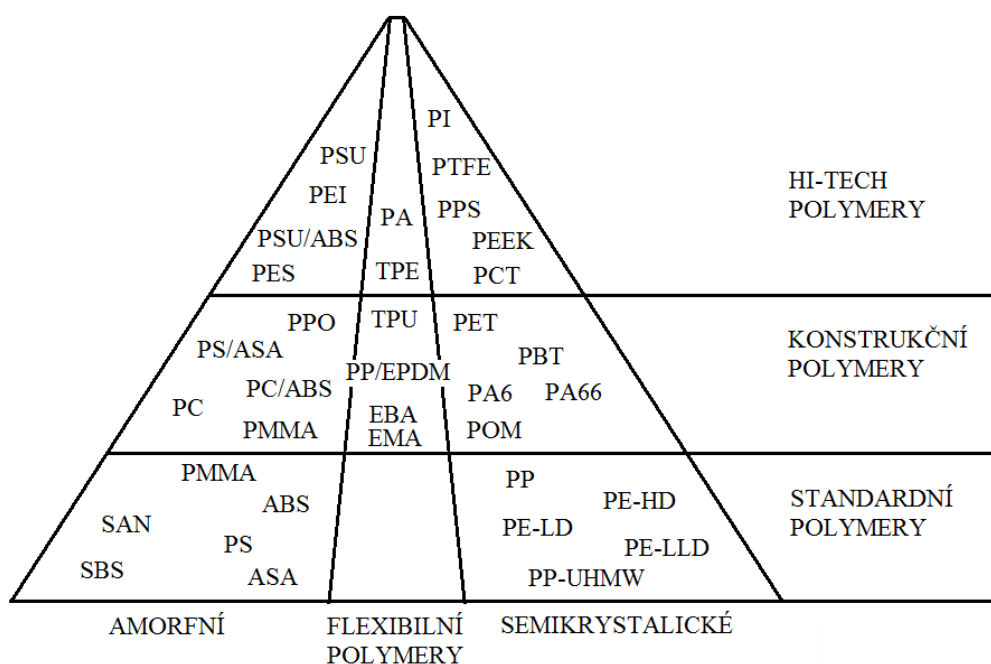
Obr. 3 Srovnání materiálových vlastností

**Tab. 1** Vlastnosti vybraných materiálů

Materiál	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Součinitel vedení tepla [W/(m K)]	Měrná tepelná kapacita [J/(kg K)]	Elektrická vodivost (S/m)	Součinitel lineární délkové roztažnosti [1/K]
PP	0,905	19	950	0,16	1920	1,00E-21	0,00015
Korozivzdorná ocel DIN 1.4301	8,03	505	200000	16,2	500	1390000	0,000018
Automatová ocel DIN 1.0715	7,7	760	200000	25	460	1820000	0,000010
CuSn6	8,8	420	118000	75	377	9000000	0,000019
CuZn37	8,44	440	110000	116	377	16100000	0,0000205
AlMgSi05	2,7	215	70000	210	890	30000000	0,0000235

### 2.1.2 Plasty používané pro zástřik kovových zálisků

Pro aplikace výstřiků se zálisky, kde není třeba příliš velké pevnosti, lze volit ze standardních polymerů, pro získání lepších pevnostních vlastností je možné volit některý z plastů na bázi konstrukčních polymerů a pro vysoce namáhané plasty lze zvolit tzv. hi-tech polymery. Rozdělení plastů z hlediska nadmolekulární struktury a jejich použití znázorňuje obrázek 4.



**Obr. 4** Pyramida rozdělení plastů dle nadmolekulární struktury a použití

Plasty stojí z hlediska elektrických vlastností na opačném pólu spektra oproti kovům. Vykazují dobré dielektrické vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou mnohem nižší než u většiny kovových slitin. Pokud se jedná o výběr plastu, jako druhého komponentu do dílu s hybridním spojením, je nutné posoudit, která charakteristika je pro nás důležitá. Volit lze jak z plastů na bázi amorfních, tak semikrystalických polymerů.

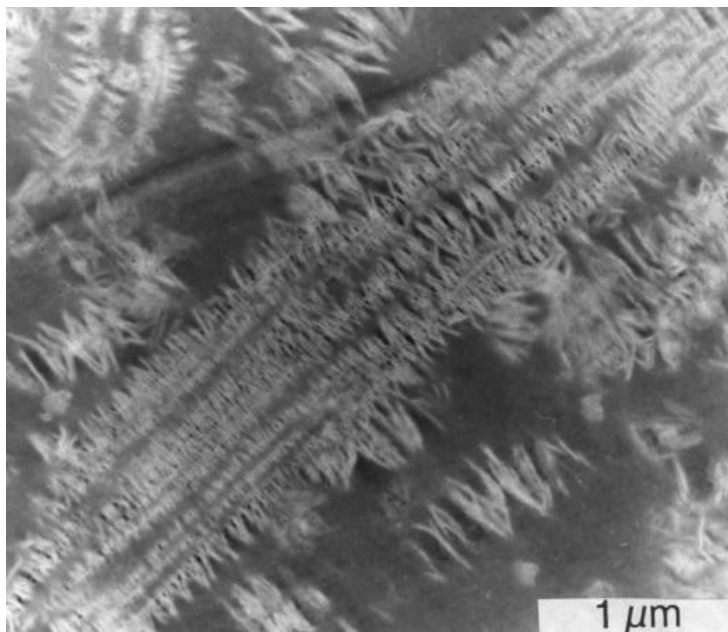
Velmi často plasty v aplikacích s hybridními spoji obsahují plniva. Zde stojí za zmínku hlavně skleněná vlákna, která zvyšují tuhost, ale nesnižují dielektrické vlastnosti. Častou přísadou také bývají zejména v případě elektrických komponentů retardéry hoření, které snižují riziko požáru při vystavení plastu vysokým teplotám nebo přímému ohni. Elektrické vlastnosti jsou testovány na zkušebních tělíscích i na hotových dílech. Častými testy jsou zkoušky odhalující případný zkrat mezi jednotlivými kontakty, nebo vysokonapěťové zkoušky elektrického průrazu mezi kontakty. Elektrické vlastnosti by měly být součástí každého materiálového listu. Mezi základní elektrické vlastnosti patří např. relativní permitivita [-], povrchová rezistivita [ $\Omega$ ], objemová rezistivita [ $\Omega\text{m}$ ] nebo elektrická pevnost [kV/mm].

### 2.1.3 Morfologie polymerů

V místě hybridního spoje dochází vlivem setkání horké taveniny s výrazně studenějším povrchem zálisku ke složitému termodynamickému procesu, který má za následek specifický vývoj krystalizace polymeru a vliv na finální morfologii plastu. Morfologii polymerů rozumíme uspořádání, tvar a strukturu polymerních molekul v krystalických a amorfních oblastech. [15] Přeneseně se termín morfologie používá pro uspořádání na nadmolekulární úrovni.

Studiem polymerních monokrystalů bylo zjištěno, že makromolekuly se u semikrystalických termoplastů shlukují do lamel, které vznikají tzv. skládáním samotných makromolekul do rovin skladu a vytváří destičkovité útvary. Během chlazení taveniny se v reálných podmínkách vytvářejí lamelární útvary, které se nejčastěji rozrůstají v polykrystalických útvarech, tzv. sférolitech. Sférolity jsou kulové agregáty krystalických substruktur. Při průchodu polarizovaným světlem se jeví ve tvaru maltézskeho kříže. Růst sférolitu zpravidla končí dotykem se sousedním sférolitem.[15] Velikost sférolitu se může pohybovat od několika nm do několika

mm. Místa dotyku jednotlivých sférolitů jsou vždy slabší z hlediska pevnosti.



*Obr. 5* Struktura šiš kebab pro polyetylen [16]

Je-li roztok, či tavenina vystavena smykovému namáhání, nevznikají útvary destičkovité, ale vláknité či jehlicovité. Často mohou vznikat také kombinované útvary zvané šiš kebab (česky někdy označovány jako ražniči).[17] Tyto útvary ukazuje obrázek 5. Útvary typu šiš kebab jsou tvořeny jak vláknitými částmi, tak skládanými řetězci.

Co se týká teploty krystalizace, tak ta se pohybuje mezi teplotou zesklenní  $T_g$  a teplotou tání  $T_m$ . Krystalizace začíná vždy nukleací, tj. vznikem krystalizačních zárodků a pokračuje jejich růstem. Pro popis krystalizace polymerů se používá tzv. Gibsova volná energie.

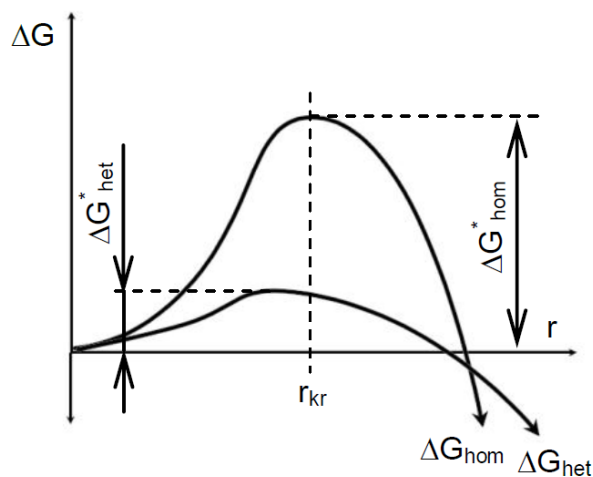
$$\Delta G = \Delta H_C - T \cdot \Delta S \quad (1)$$

kde  $\Delta G$  [J] je změna volné (krystalizační) energie  
 $\Delta H_C$  [J] je změna volné entalpie (uvolněné krystalizační teplo)  
 $T$  [K] je termodynamická teplota  
 $\Delta S$  [J/K] je změna entropie

Při teplotě tání je hodnota změny Gibsovy energie rovna nule. Aby mohla probíhat krystalizace musí platit  $\Delta G < 0$ . Změna volné entalpie je v momentu krystalizace vždy menší než nula a entropie značí míru neuspořádanosti, to znamená,



že s pokračující krystalizací se její hodnota zmenšuje,  $\Delta S$  nabývá v záporných hodnotách velikost bližší nule a přílišný pokles entropie může brzdit krystalizaci. Pro úspěšný začátek nukleace musí soustava překonat tzv. nukleační bariéru. Tato bariéra je znázorněna na obrázku 6.

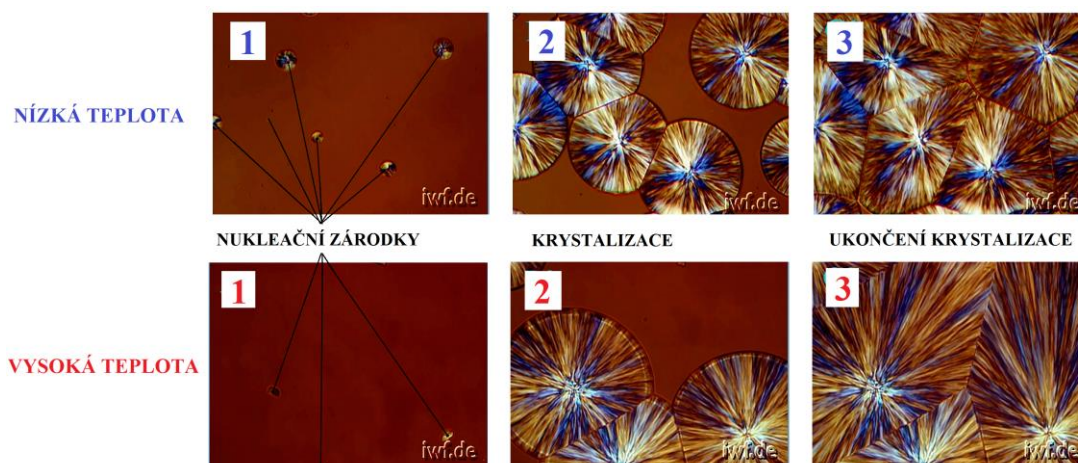


**Obr. 6** Nukleační bariéra

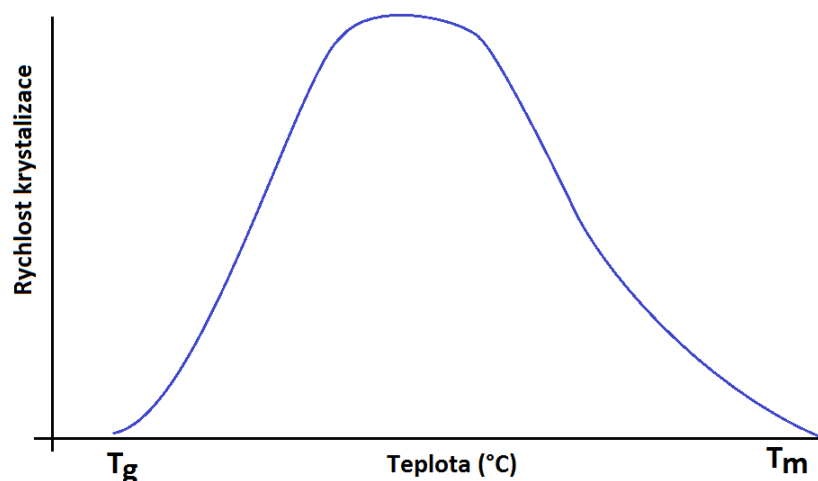
Proto, aby byla úspěšná nukleace zárodku, musí zárodek překonat kritickou velikost  $r_{kr}$ , a tím pádem i kritickou hodnotu  $\Delta G'$ . Po jejím překonání je již zárodek schopen růstu v krystalit. [17]

Abychom zvýšili počet zárodků v tavenině, je nutné určité podchlazení taveniny. Čím vyšší je toto podchlazení, tím vyšší počet zárodků obdržíme (až do nukleačního maxima  $T_x$ ). Zároveň se ale s nižší teplotou snižuje pohyblivost řetězců, takže klesá rychlost růstu krystalů. [18] Při pouze mírném poklesu teploty pod  $T_m$  dochází k nízké nukleaci zárodků. Na těchto zárodcích začínají růst krystal, které nejsou omezeny v růstu, takže výsledná struktura je „hrubozrná“. Pokud dojde k tomu, že tavenina je více podchlazena, dojde ke vzniku většího počtu nukleačních zárodků, které však budou mít omezený potenciál k růstu. Struktura bude „jemnozrnější“. [19] Na obrázku 7 je zachyceno, jakým způsobem probíhá nukleace a krystalizace při malém a vyšším podchlazení taveniny a na obrázku 8 je vyjádřena závislost rychlosti krystalizace na teplotě. Během vstřikování reálné taveniny se uplatňuje jednak hydrodynamické pole a také pole teplotní. To znamená, že tavenina je vystavena jak smykovému namáhání, tak teplotnímu gradientu – většinou ve směru od stěny formy směrem do středu výstřiku. Přítomnost hydrodynamického napětí se projevuje nukleací v řadách [18]. Je to důsledek orientace makromolekul během toku.





Obr. 7 Nukleace a krystalizace [18]



Obr. 8 Závislost rychlosti krystalizace na teplotě

Vlivem teplotního gradientu, zejména při styku s chladnějším okolím (stěna formy, ale i povrch zálisku) dochází k takzvané transkrystalinitě. Povrchová vrstva je v tomto případě zcela odlišná od vrstvy uvnitř stěny výstřiku. Vrstva je zdánlivě amorfni. Dochází zde totiž vlivem velkého podchlazení k velmi rychlé nukleaci. Dalším důvodem vzniku této vrstvy je malá rychlost růstu krystalických útvarů a zároveň nedostatečný čas pro jejich růst vlivem velmi rychlého ochlazení taveniny pod krystalizační teplotu. Tento efekt bývá označován termínem z anglického skin-core. Pod povrchovou vrstvou se nachází transkrystalická (přechodová) vrstva. Tato vrstva je příznačná tím, že vzniklé krystalické útvary vykazují orientaci ve směru teplotního gradientu (tedy ve směru kolmém na stěnu formy či zálisku).

Vzhledem k tomu, že materiál velmi rychle chladne směrem od chladnějšího povrchu, nukleace a krystalizace postupuje tímto směrem.

Dalším nezanedbatelným faktem technické praxe je to, že se nevstříkují čisté polymery, ale plasty, tzn. polymery s aditivami. Nukleace probíhá snadněji na površích některých příměsí. Jedná se například o anorganická plniva, barviva, nečistoty atd. Někdy je do materiálu přidána úmyslně příměs, která podporuje nukleaci zárodků v tavenině. Jedná se především o minerální aditiva jako mastek, silika nebo kaolin. Materiály s těmito plnivami jsou modifikovány zejména pro zlepšení jejich mechanických vlastností, urychlení krystalizace, a tím zkrácení vstřikovacího cyklu či zlepšení rozměrové stálosti.

Nejčastěji používanými metodami zkoumání morfologie polymerů jsou rentgenová difrakce, polarizační mikroskopie a analýza DSC. My se budeme věnovat pouze polarizační mikroskopii a analýze DSC, protože těch se bude týkat i část experimentu.

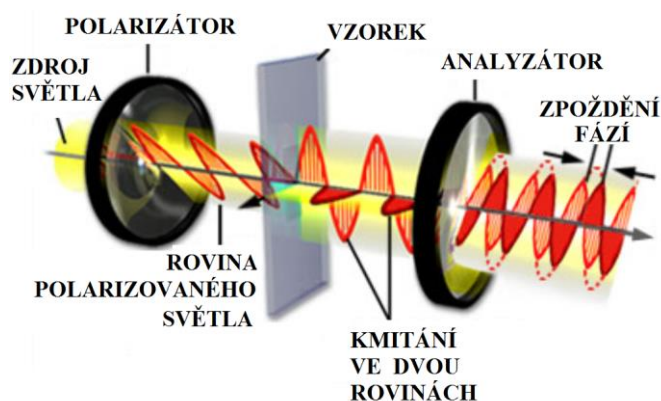
### **Polarizační mikroskopie**

Polarizační mikroskopie patří svou podstatou do mikroskopie světelné. Její výhodou je přímé zobrazení morfologie polymeru. Díky obrazu můžeme v semikrystalických polymerních sloučeninách sledovat podíl krystalické a amorfni fáze, tvar a velikost sférolitů, druh a orientaci krystalických útvarů a změnu struktury v různých místech vzorku.

Vzorek se připravuje v podobě tenkých řezů, tloušťka řezu by měla odpovídat cca 10 -16  $\mu\text{m}$ . Tento vzorek se umístí mezi 2 sklíčka za přítomnosti imerzního oleje, který nesmí ovlivnit vzorek. Takto připravený vzorek se pak pozoruje v procházejícím světle. Příprava vzorků je velmi důležitá, řezy pro tuto aplikaci se nazývají mikrotomové a připravují se na zvláštním zařízení.

Princip pozorování v polarizovaném světle je následující: světlo vychází ze zdroje světla a prochází skrz tzv. polarizátor. Při průchodu polarizátorem dochází k polarizaci světla. Polarizované světlo má tu vlastnost, že kmitá pouze v jedné rovině. Dále světlo prochází sklíčkem, imerzním olejem a samotným vzorkem. V jednolomných látkách (imerzní roztok) zůstávají látky při zkřížených filtrech tmavé, zatímco ve dvojlomných (vzorek polymeru) dochází k rozložení paprsku na dva, jejichž kmitové roviny jsou vzájemně kolmé. Po průchodu vzorkem prochází světlo analyzátozem, kde se oba paprsky opět skládají do jedné roviny kmitu. [20] Bez použití této technologie by nebylo možné mikrotomové řezy semikrystalických

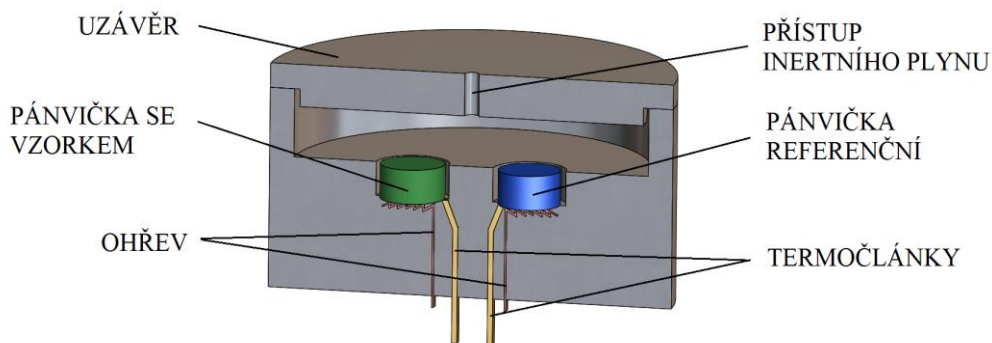
plastů pozorovat a rozeznat morfologické útvary typu sférolitů, šiš-kebabů aj. Schéma tohoto procesu je zachyceno na obrázku 9.



*Obr. 9 Princip polarizační mikroskopie [20]*

### Metoda DSC

Zkratka DSC znamená diferenciální skenovací kalorimetrie (z angl. differential scanning calorimetry). [21] DSC metoda je jednou z nejrozšířenějších technik ke zkoumání termodynamických dějů v látkách. Má uplatnění ve více oborech. Pracuje na principu ohřevu a ochlazování, či držení konstantní teploty a jejím výsledkem je energetická hodnota v závislosti na teplotě nebo čase.



*Obr. 10 Princip měření DSC metodou*

Princip zařízení, které zkoumá termodynamické děje uvnitř vzorků z plastů je následující. Zařízení obsahuje dvě měřicí pánvičky. Každá je vybavena vlastním ohřevem a vlastním termočlánkem pro měření teplot. V jedné pánvičce je umístěn vzorek, který chceme měřit. Druhá pánvička obsahuje pouze vzduch a vlastní tělo, které je z hliníku. Předpoklad je, že se musí obě pánvičky ohřívat a ochlazovat konstantní rychlostí. Během ohřevu a ochlazování dochází k tomu, že referenční (prázdná) komora je ohřívána a ochlazována za pomoci konstantního tepelného

výkonu, zatím co do pánvičky se vzorkem je nutné dodávat větší, či menší topný výkon v závislosti na její teplotě. Vysvětlením jsou termické pochody uvnitř polymerů během ohřevu a ochlazování. Zatímco měrná tepelná kapacita vzduchu a hliníku v referenční pánvičce je v rozsahu měřených teplot konstantní, u polymeru se mění vlivem změn stavu soustavy a chemicko-fyzikálních pochodů uvnitř měřeného vzorku.

Polymerní sloučeniny, speciálně pak semikrystalické polymery mění s teplotou velikost tepelné kapacity  $C_p$  [J/K], což je velikost tepla, které soustava musí přijmout aby se její teplota zvýšila o 1 K. Tato veličina se mění v důsledku přeměn uvnitř plastu. Stejně jako například u vody, kde během ohřevu při teplotě tání ledu 0°C a v bodě varu okolo teploty 100 °C, musíme dodat vyšší množství tzv. latentního tepla, aby byla voda schopná fázové přeměny, rozeznáváme i u plastů teploty, během kterých dochází ke změně tepelné kapacity. Při změnách, kdy musíme do soustavy teplo dodat, hovoříme o tzv. endotermních pochodech, opačný případ nastává při procesech exotermních. Pokud se tedy energie soustavy zvyšuje – například tání, musíme pro udržení konstantního přírůstku teploty v čase (podstata DSC) zvýšit příkon elektrické energie topidel. Ochlazujeme-li s konstantní rychlostí (např. °C / s) soustavu, dostáváme se v místě krystalizace do oblasti, kde se jedná o exotermní děj – energie soustavy se snižuje vlivem krystalizace a tato musí být v důsledku zákona zachování energie předána do okolí. Výsledkem je tedy změna opačná.

Při zpracovávání grafických výstupů velmi často pracujeme s hodnotou tzv. entalpie. Entalpie je termodynamická výpočtová veličina značící celkovou energetickou hodnotu systému, zapisujeme ji jako  $H$  [J]. Pro naši aplikaci je důležité, že pro měření v DSC přístroji se dá její změna vyjádřit takto [22, 23]:

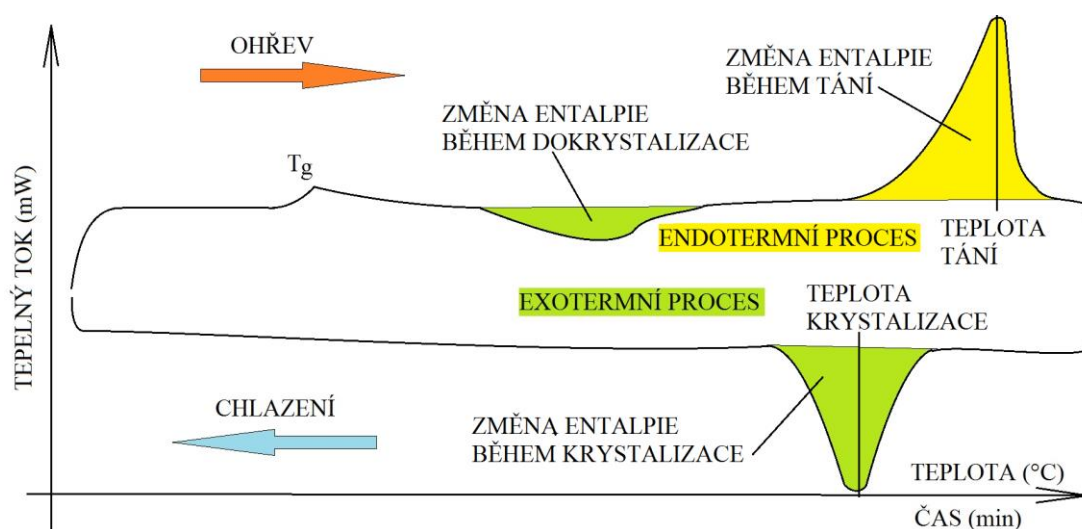
$$dH = dQ = C_p dT \quad (2)$$

kde	$dH$ [J]	je změna entalpie
	$dQ$ [J]	je přivedené, nebo odvedené teplo
	$C_p$ [J/K]	je tepelná kapacita
	$dT$ [K]	je změna teploty

Je to díky tomu, že vzorek nemění výrazně svůj objem a nedochází zde ani ke změně tlaku. Proto můžeme říci, že změna entalpie, neboli změna celkové energie systému (vzorku) je rovna přivedenému/odvedenému teplu.

Výsledek měření se zaznamenává do souřadnic teploty ( $^{\circ}\text{C}$ ), či času (min) na ose vodorovné a topný výkon (mW) na ose svislé. Hodnota změny entalpie = hodnota přijatého/odebraného tepla je shodná s integrálem topného výkonu zařízení ve sledovaném časovém intervalu. Z grafického a geometrického hlediska při interpretaci křivek se jedná o plochu pod křivkou. Pokud se hodnotí, kolik energie například spotřebovalo tání materiálu, hodnotí se obsah anomálií křivek, tzv. peaků. Ty totiž udávají odklon od příkonu, který by byl použit v případě, že by tepelná kapacita vzorku během měření byla konstantní.

Na obrázku 11 je zachycen výstup z DSC analýzy se svými charakteristickými vlastnostmi. Ohřev je znázorněn v horní části grafu směrem zleva doprava k vyšším hodnotám teploty vzorku. První charakteristikou, kterou jsme schopni rozeznat je teplota zesklenní, při které se mění tvar křivky. Další možnou změnou, kterou mohou některé materiály během ohřevu vykazovat, je dokrystalizace. Jedná se o exotermní proces, tedy proces, kdy je předáno teplo okolí. Proto se v této části při udržení konstantní rychlosti ohřevu zmenšuje příkon topení a křivka klesá. Další výraznou oblastí s typickým peakem je oblast tání materiálu (endotermní proces). V hodnotě maxima můžeme identifikovat teplotu tání polymeru. Po roztavení vzorku se vzorek začíná postupným ubíráním příkonu topení ochlazovat. O něco níže z hlediska teploty nalézáme teplotu krystalizace (minimum peaku). Plochy vyznačené žlutě a zeleně představují změnu entalpie přímo spojenou s těmito pochody, které se uskutečňují uvnitř vzorku.



**Obr. 11** Příklad grafického výstupu z DSC

Výstupy z DSC analýzy tedy ukazují jednak teploty přeměn, ale také hodnoty změn entalpie. Tyto hodnoty nám například u hodnoty tání mohou pomoci při určení krystalinity polymeru. Pokud známe hodnotu změny entalpie 100% krystalizujícího polymeru, můžeme určit hodnotu krystalinity. [24] Krystalinita se určí jako podíl změny entalpie v oblasti peaku tání a změny entalpie pro 100% krystalický polymer. V případě, že se jedná o vzorek, ve kterém je aditivum (například talek v PP), musí se toto zohlednit, protože krystalinita se týká pouze polymerní části. Můžeme tedy psát:

$$X_C = 100 \cdot \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{100} \cdot w_p} \quad (3)$$

kde  $X_C$  [%] je stupeň krystalinity  
 $\Delta H_m$  [J] je změna entalpie vzorku během tání  
 $\Delta H_{100}$  [J] je změna entalpie polymeru se 100% krystalinitou  
 $w_p$  [-] je hmotnostní podíl polymeru v plněném plastu

Hodnota změny měrné entalpie při tání 100% krystalického polymeru je např. pro izotaktický polypropylen  $\Delta h = 209$  J/g. Pouze pro vysvětlení: měrná entalpie je entalpie vztažená k hmotnosti ( $\Delta h = \Delta H / m$ ). Pro syndiotaktický PP je to  $\Delta h = 196$  J/g. Pro POM je to 186 J/g. [25] Pro PA6 je to 230 J/g. [26] Tyto materiály budou zkoumány v experimentální části.

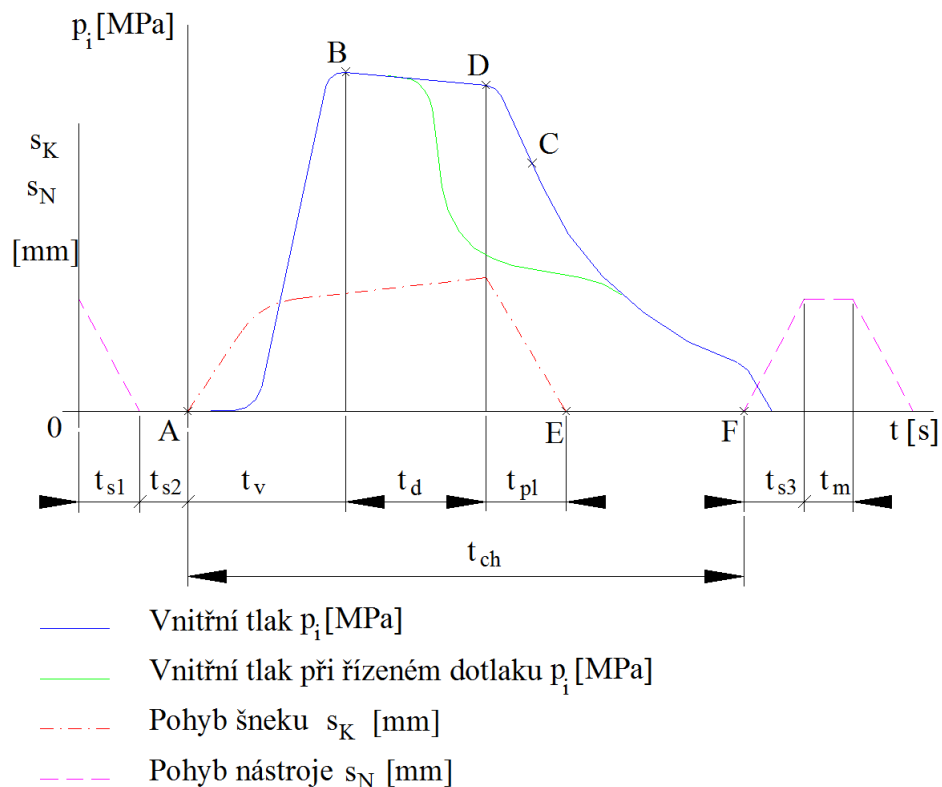
## 2.2 Vstřikovací proces

Vstřikování je cyklický přetržitý proces, během kterého se vstřikuje dávka taveniny plastu do uzavřené formy. [27] Základními etapami vstřikovacího cyklu jsou: vstřik, dotlak, dávkování, doba chlazení, otevření nástroje, vyhození výstřiku a uzavření nástroje. Snad nejnázorněji a nejčastěji je tento cyklus zobrazen pomocí průběhu vnitřního tlaku v dutině formy a dráhy šneku a nástroje v závislosti na čase.

Vnitřní tlak v dutině formy je tlak, který je možno snímat tlakovými čidly a jeho záznam a analýza umožňuje lépe optimalizovat a řídit vstřikovací proces. Za počátek vstřikovacího cyklu považujeme uzavření formy. Graf vnitřního tlaku, někdy označovaný jako vstřikovací diagram, je zachycen na obrázku 12. V tomto diagramu je zobrazena závislost tlaku v dutině formy  $p_i$  na čase  $t$ . Dále do tohoto grafu



zakresluje také pohyb (dráhu) šneku a pohyb formy. Vstřikovací cyklus rozdělujeme do několika časových úseků a definujeme důležité časové okamžiky.



**Obr. 12** Průběh vnitřního tlaku  $p_1$  v čase  $t$

#### Doba $t_{s1}$

V této fázi se otevřená a prázdná dutina formy uzavírá přísouvací silou  $F_p$  a uzamyká mnohem větší uzavírací silou  $F_u$ , která zaručuje to, že se při plnění a dotlaku forma nepootevře.

#### Doba $t_{s2}$

V tomto časovém úseku se k formě přisune tavicí komora vstřikovací jednotky. Stejně jako  $t_{s1}$  je i  $t_{s2}$  dobou činnosti stroje.

#### Doba $t_v$

V bodě **A** začíná vlastní vstřik. Čas  $t_v$  se nazývá časem plnění formy. Dochází k axiálnímu pohybu šneku a k nárůstu tlaku v dutině formy. Tato fáze končí v bodě **B**, kde je dosaženo maximální hodnoty vnitřního tlaku.

#### Doba $t_d$

Časový úsek označovaný jako doba dotlaku. Tato fáze zabezpečuje dodávku taveniny do dutiny formy, která kompenzuje úbytek objemu v důsledku smršťování materiálu s klesající teplotou. Může se jednat o tlak konstantní, velikosti tlaku v bodě **B**, nebo o tlak pomalu klesající. Doba dotlaku končí v bodě **D**. Bod **D** může ležet nejdále na

bodu C, protože za bodem C už by byl dotlak v důsledku zatuhnutí vtoku bezúčelný. Za bodem D dochází k prudkému poklesu tlaku v důsledku smrštění a odlehnutí výstřiku od stěn formy. Vlastnosti výstřiku jsou rozhodujícím způsobem určovány úrovní termodynamických veličin v bodě C (tlak, teplota). Proto se dá úroveň tlaku v tomto bodě ovlivnit řízeným průběhem dotlaku (na obrázku znázorněno zeleně). Vysoký tlak v tomto bodě může zapříčinit vysoké vnitřní pnutí způsobující samovolné praskání součástí. Naopak nízký tlak je příčinou vzniku propadlin.

#### **Doba $t_{ch}$**

Je to čas chlazení, který probíhá až do otevření formy. Dělí se na dobu chlazení při plném a při klesajícím tlaku. Během této doby nastává okamžik úplného zatuhnutí vtoku, označený písmenem C. Dochází v něm k přerušení toku taveniny mezi tavicí komorou a dutinou formy.

#### **Doba $t_{pl}$**

V bodě D začíná plastikace nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet a zároveň se posouvá dozadu. Teplo potřebné pro plastikaci je předáváno ze stěn válce, dále vzniká třením o stěnu válce, třením o plochu šneku, třením mezi plastem a také přeměnou z hnětací práce. Plastikace je ukončena v bodě E, kdy se zastaví rotační pohyb šneku. Následuje odsunutí tavicí komory od formy (doba  $t_k$ ), které zaručuje to, aby nedocházelo k nežádoucímu přechodu tepla do chladnoucího materiálu a naopak, aby se neochlazovala tryska tavicí komory.

#### **Doba $t_{s3}$**

Doba  $t_{s3}$  je strojní doba potřebná k otevření formy po potřebném zchladnutí součástí. Počátek je v bodě F.

#### **Doba $t_m$**

Doba manipulace následuje po otevření formy, pokud je součást vyjímána manipulátory. [27, 28]

### **2.2.1 Reologie plastů**

Během vstřiku taveniny do vtokového systému formy dochází ke styku roztaveného polymeru se studenými stěnami kanálu. Zároveň vlivem velkých rychlostí vstřikování je plast nucen za účinku velkých smykových napětí téci do dutiny formy. Tečením plastů se zabývá reologie a na základě reologických modelů si může konstruktér lépe uvědomit důležitost správného návrhu vtoků a technolog může lépe diagnostikovat a odstranit vady na výstřicích.

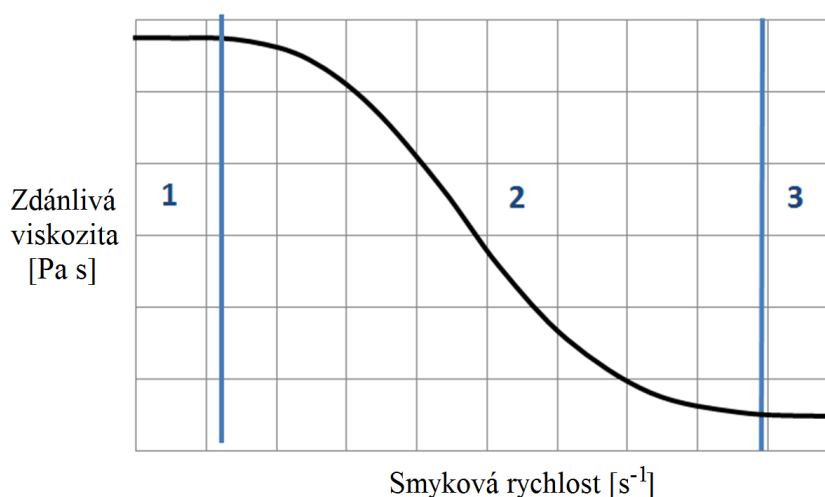


Reologie se primárně zabývá vztahem mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Nejjednodušším vyjádřením je Newtonův zákon, který platí pro laminární tok nízkomolekulárních kapalin [6]:

$$\tau = \eta \cdot D = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (4)$$

kde  $\tau$  [Pa] je smykové napětí  
 $D$  [ $s^{-1}$ ] je smyková rychlost  
 $\eta$  [Pa s] je dynamická viskozita  
 $\frac{dv}{dx}$  [ $s^{-1}$ ] je gradient rychlosti

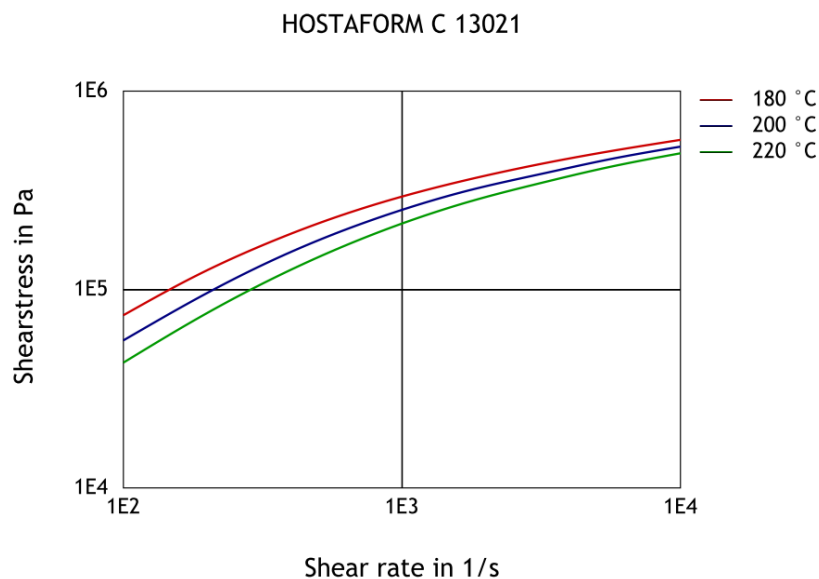
Pro Newtonské kapaliny platí, že dynamická viskozita je konstantní. Pro polymery však toto neplatí. Dynamická viskozita je funkcí smykové rychlosti a se zvyšující se smykovou rychlostí klesá. V důsledku smykové rychlosti totiž dochází k napřimování makromolekul ve směru toku materiálu a dynamická viskozita tím klesá, jak je znázorněno na obrázku 13. Při velmi malých rychlostech je viskozita konstantní a vysoká, při rychlostech vyšších dochází k poklesu viskozity a ta je v této části označována jako  $\eta_{zd}$  (zdánlivá viskozita). [29] Ve třetí části grafu je již smyková rychlost tak vysoká, že její další zvýšení nemá na velikost dynamické viskozity vliv a tato se opět jeví jako konstantní.



**Obr. 13** Graf závislosti zdánlivé viskozity polymeru na smykové rychlosti

Z poklesu viskozity v závislosti na smykové rychlosti vychází tzv. tokové křivky charakteristické pro jednotlivé plasty. Z centrální databáze campusplastics.com [30] vychází toková křivka pro materiál Hostaform C13021,

tedy polyoxymetylen (POM), který bude použit v části experimentu. POM je charakteristický zejména svou vysokou krystalinitou a dlouhými řetězci makromolekul. Toková křivka je zachycena na obrázku 14.



**Obr. 14** Toková křivka – závislost smykového napětí na smykové rychlosti [30]

Pokud by byla dynamická viskozita konstantou, byly by tokové křivky lineární funkcí. Díky neneutonské charakteristice polymerů mají ovšem nelineární průběh. Graf zachycuje navíc závislost na teplotě taveniny.

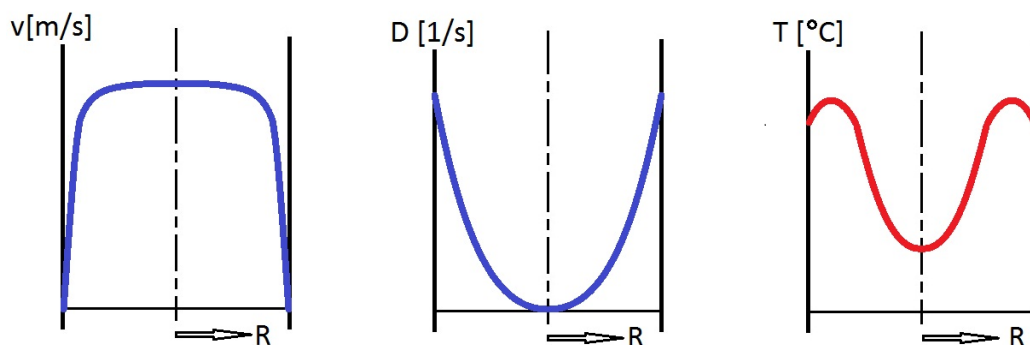
Tomuto tvaru grafického zobrazení odpovídá tzv. druhý tvar mocninového zákona, který zní [29]:

$$\tau = K \cdot D^n \quad (5)$$

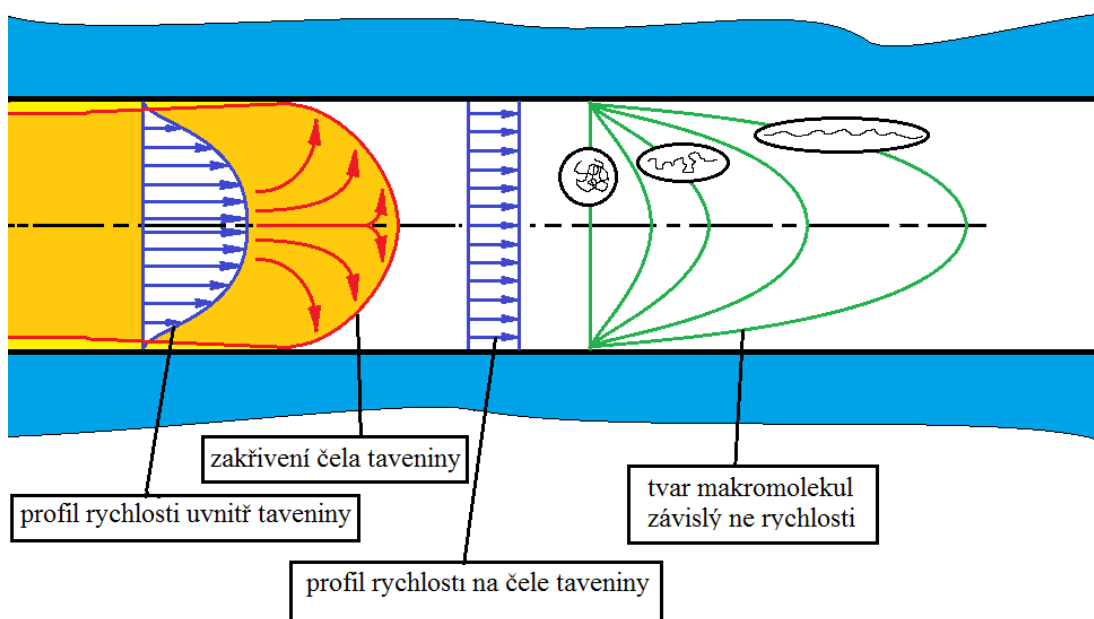
kde  $K$  [Pa s<sup>n</sup>] je index konzistence  
 $n$  [-] je index toku, který určuje odchylku od linearity

Ve vtokovém systému se makromolekuly na čele taveniny pohybují různou rychlostí v závislosti na vzdálenosti od stěny. U stěny kanálu je jejich teoretická rychlost nulová, pak se prudce zvedá a u středu je téměř konstantní. U newtonské kapaliny by byl při tom průběh od stěny ke středu lineární. Nelinearita nárůstu rychlosti ke středu kanálu má za následek zvýšené smykové napětí u stěn kanálu a jeho minimum ve středu kanálu. To souvisí i s teplotním profilem. V blízkosti stěny kanálu je paradoxně nejvyšší teplota taveniny. Tyto závislosti jsou znázorněny na obrázcích 15 a 16.

Protože se makromolekuly uprostřed kanálu pohybují vyšší rychlostí, ale na okraji, blízko stěny, se pohybují pomaleji a přesto má čelo taveniny totožnou rychlost, musí pro to existovat logické vysvětlení. Tímto je tzv. zakřivení čela taveniny. [31] Tavenina uprostřed kanálu má nižší viskozitu vlivem napřímění makromolekul a vektor rychlosti se ohýbá směrem ke stěnám. Takto se chová tavenina i během plnění dutiny formy a tento jev se nazývá laminární tok.



**Obr. 15** Rychlost taveniny, smyková rychlost a teplota napříč kanálem



**Obr. 16** Profil rychlosti uvnitř taveniny, zakřivení čela taveniny, profil rychlosti na čele taveniny a tvar makromolekul závislý na rychlosti taveniny

Tato schémata jsou podstatná například pro návrh vtokového systému a určení smykových rychlostí a smykových napětí během fáze plnění. Čím nižší je průměr plnicího kanálu či tloušťka stěny dílu, tím vyšší je při stejné vstřikovací

rychlosti smyková rychlost, neboť roste gradient okamžité rychlosti napříč průřezem. Tím pádem roste i smykové napětí. Z toho důvodu je pro plnění formy důležité, aby měla soustava plnicích kanálů včetně ústí vtoku dostatečný průměr a stěna dílu dostatečnou tloušťku. Při překročení kritického smykového napětí totiž může docházet k degradaci materiálu a to tím, že vlivem silového účinku dojde k jejich zpřetrhání a vlivem zvýšení tepelného účinku i k jejich úplnému rozkladu. Smykovou rychlost pro kruhový průřez kanálu lze spočítat podle vztahu 6.

$$D = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot r^3} \quad (6)$$

kde  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] je objemový průtok  
 $r$  [m] je poloměr kanálu

Pro jednotlivé druhy plastu existují kritické smykové rychlosti, při jejichž překročení dochází k porušení makromolekul, jejich degradaci a vadám jako např. spáleninám u vtoku. V tabulce 2 jsou uvedeny kritické smykové rychlosti pro PP, POM a PA [6]. Výběr polymerů předchází části experimentu.

**Tab. 2** Kritické smykové rychlosti pro polymery

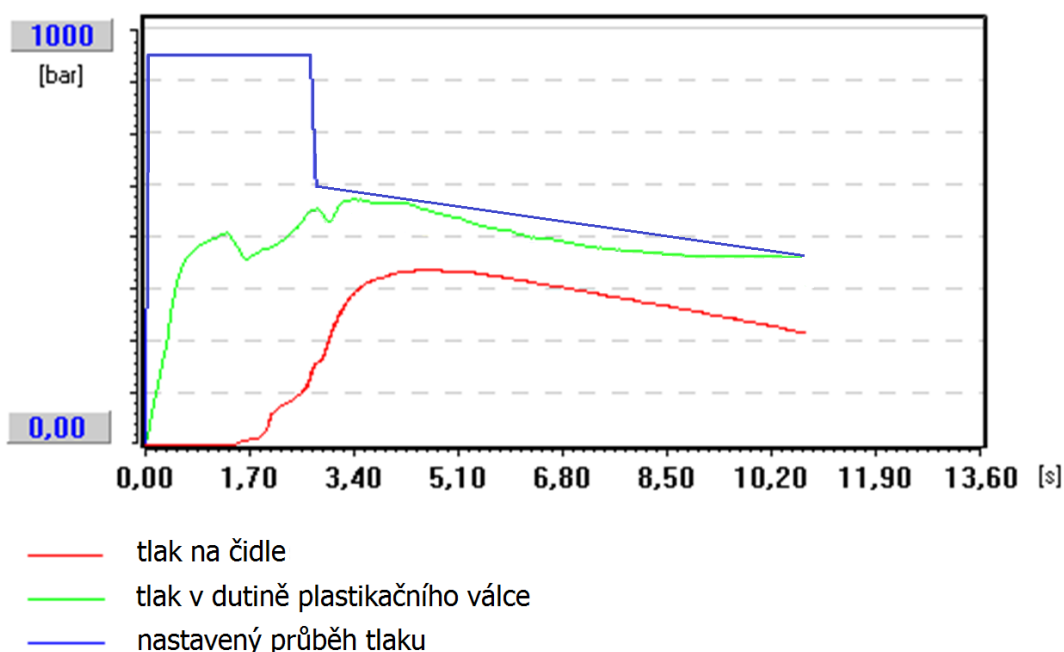
Polymer	Kritická smyková rychlost $D$ [s <sup>-1</sup> ]
POM	40 000
PA	60 000
PP	100 000

Pokud tedy při návrhu plnicích kanálů dojde k jejich poddimenzování, tj. příliš malému průměru kanálů, nebo je při fázi vstřiku použita příliš velká vstřikovací rychlost, je překročena kritická smyková rychlost.

### 2.2.2 Tlakové poměry během vstřikování

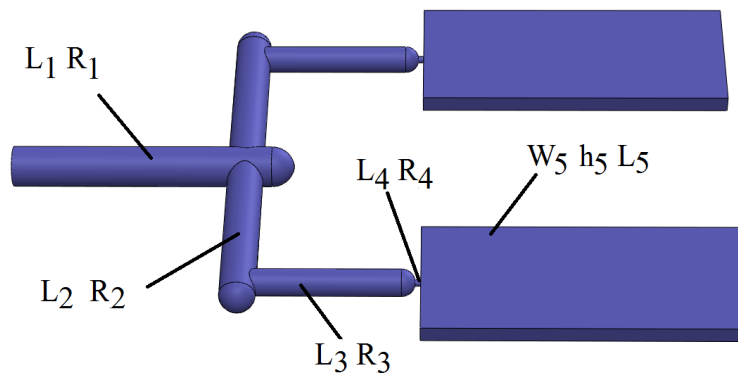
Jedním z cílů disertační práce je měření a výzkum průběhu vnitřního tlaku v místě hybridního spoje v závislosti na čase. Během vstřikovacího cyklu reaguje tavenina uvnitř dutiny formy na působení vnějších sil od vstřikovacího stroje. Je nutné si uvědomit, že odezva je závislá na tlakových ztrátách, které jsou vyvolány třením a viskoelastickým chováním polymeru. Tyto ztráty jsou závislé na geometrii stroje (průměr trysky), vtokového systému a výstřiku, přičemž jsou ovlivnitelné parametry vstřikování, především vstřikovacím tlakem, vstřikovací rychlostí,

dotlakem a teplotou taveniny, formy, případně vkládaného zálisku. Proto je dobré rozdělit jednotlivé tlaky na systémový tlak hydrauliky stroje, nastavený maximální tlak stroje, skutečný tlak taveniny před čelem šneku, tlak ve vtokové soustavě vstřikovacího nástroje a tlak v dutině formy. Na obrázku 17 je znázorněn průběh nastaveného tlaku, tlaku před čelem šneku a vnitřního (skutečného) tlaku v dutině formy. Vlivem tlakových ztrát ve trysce stroje, vtokové soustavě formy a úseku dutiny formy mezi ústím vtoku a měřicím čidlem je tento profil výrazně menší a zároveň posunutý v čase. Nastavená hodnota tlaku je pak výrazně odlišná ve fázi plnění dutiny formy. To je dáno tím, že v této fázi je vstřikovací proces řízen vstřikovací rychlostí a nastavená hodnota tlaku je pouze možné maximum, které si řízení stroje může žádat od systému k dosažení této rychlosti.



**Obr. 17** Průběh nastaveného tlaku, tlaku před čelem šneku a vnitřního (skutečného)

Tlakové ztráty vznikají v důsledku tření a to zejména smykového mezi jednotlivými makromolekulami. Princip vzniku smykového napětí a jeho závislosti na viskozitě a smykové rychlosti byl detailně popsán v předchozí kapitole. Tlakové ztráty vznikají jak ve vtokové soustavě, tak v dutině formy.



**Obr. 18** Schéma uspořádání vtokové soustavy a dutin – tlakové ztráty

Na obrázku 18 je zakreslen možný případ vtokové soustavy a dutin formy pro dvounásobné řešení formy pro vstřikování plochých destiček včetně charakteristických rozměrových údajů potřebných k určení tlakových ztrát. Ve vtokové soustavě i v dutině formy se tavenina pohybuje rychlostí mnohonásobně nižší, než odpovídá hodnotě Reynoldsova čísla  $Re = 2300$ . To znamená, že můžeme pro výpočet použít vztahy pro oblast laminárního proudění.

Tlaková ztráta v kruhovém průřezu vtokového kanálu se vyjádří vztahem 7.

$$\Delta p_{ik} = 2 \cdot \tau \frac{L_V}{R_V} \quad (7)$$

kde	$\Delta p_{ik}$ [Pa]	je úbytek vnitřního tlaku
	$\tau$ [Pa]	je smykové napětí
	$L_{CH}$ [m]	je délka vtokového kanálu
	$R_V$ [m]	je poloměr vtokového kanálu

Smykové napětí lze nejlépe určit z tokových křivek materiálu (obr. 14), pokud jsou k dispozici, nebo z mocninového zákona (vztah 5), přičemž smyková rychlost v kruhovém kanálu či kruhovém výstřiku pro určení smykového napětí se určí ze vztahu 6. Smyková rychlost kanálu, vtoku, či dílu obdélníkového průřezu se spočítá ze vztahu 8.

$$D = \frac{6 \cdot Q}{W \cdot h^2} \quad (8)$$

kde	$W$ [m]	je šířka kanálu, vtokového ústí či stěny výstřiku
-----	---------	---

$h$  [m] je tloušťka kanálu, vtokového ústí či stěny výstřiku

Pro tlakovou ztrátu v obdélníkovém průřezu pak platí vztah 9.

$$\Delta p_{io} = 2 \cdot \tau \frac{L_V}{h} \quad (9)$$

Celková tlaková ztráta se pak vždy určí jako suma dílčích tlakových ztrát ve všech částech vtokového systému a dílu. Při návrhu vtoku a dílu lze předem získat informace o případných tlakových ztrátách a optimalizovat tak jednotlivé části. V případě vysokých tlakových ztrát totiž hrozí kromě překročení kritické hodnoty smykového napětí i nedostatek maximálního vstřikovacího tlaku vstřikovacího stroje a problém během plnění i fáze dotlaku. [29, 32, 33, 34]

Uvedené vztahy budou využity k výpočtu tlaků v místě hybridního spoje a pro ověření jejich platnosti srovnány s výsledky mold-flow analýzy a reálného měření.

### 2.2.3 Diagram p-v-T

Stav termodynamické soustavy je v procesu vstřikování plně určen třemi veličinami, tlakem, termodynamickou teplotou a objemem. Ne jinak je tomu u plastů. Pokud tedy známe hodnoty těchto tří veličin v dutině formy, víme přesně, co se s taveninou, tuhnoucím či již ztuhlým plastem děje. Úplný popis stavu soustavy uvnitř dutiny formy lze tedy popsat matematicky i graficky.

Plasty mají ve srovnání s jinými konstrukčními materiály poměrně velký součinitel teplotní roztažnosti a jsou vysoce stlačitelné v roztaveném stavu. [35] Proto se objem daného polymeru mění se změnou tlaku i teploty. Grafické znázornění stavových veličin plyne z tzv. modifikované stavové van der Waalsovy rovnice (10). [27, 28, 35]

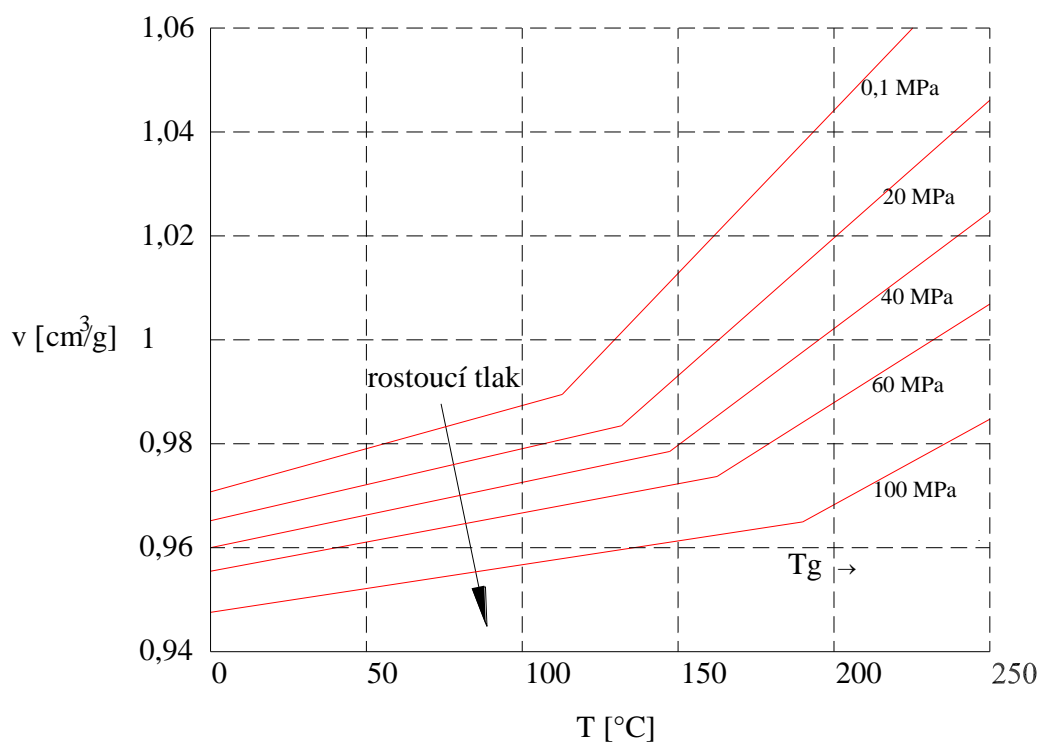
$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R \cdot T \quad (10)$$

kde	$p$ [MPa]	je vnější tlak
	$\pi$ [MPa]	je vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě
	$v$ [m <sup>3</sup> / kg]	je měrný objem polymeru
	$\omega$ [m <sup>3</sup> / kg]	je měrný objem polymeru při 0 K
	$T$ [K]	je termodynamická teplota

$R$  [kJ/(kg·K)] je materiálová konstanta polymeru obdobná individuální plynové konstantě

Při aplikaci stavové rovnice je nutné znát hodnoty  $R$ ,  $\omega$ , a  $\pi$ . Van der Waalsova rovnice při konstantním tlaku je v podstatě rovnicí přímky, avšak diagram  $p$ - $v$ - $T$  vykazuje zlomy. Je to důsledek skokově se měnících vlastností plastu. Tyto zlomy jsou vázány na přechodové teploty. Proto mají uvedené tři konstanty jiné hodnoty v závislosti na tom, ve které oblasti se teplota právě pohybuje. U amorfních termoplastů rozlišujeme oblast nad a pod  $T_g$ . U semikrystalických plastů je pak nutno při výpočtech rozlišovat oblast nad  $T_g$  až do teploty asi  $40\text{ }^\circ\text{C}$  pod  $T_m$ , další oblastí je rozmezí teplot  $40\text{ }^\circ\text{C}$  pod  $T_m$  až k hranici  $T_m$  a poslední, čtvrtou oblastí, kterou považujeme za stabilní, je teplotní pásmo nad  $T_m$ .

Křivky v  $p$ - $v$ - $T$  diagramu ukazují, že plasty jsou vysoce stlačitelné při teplotách a tlacích vyskytujících se během vstřikovacího procesu. Procesní proměnné, jako vstřikovací tlak nebo dotlak, potom mají významný vliv na rozměry součásti a smrštění. Průběh  $p$ - $v$ - $T$  diagramu pro amorfní plasty (viz obr. 19), je velmi odlišný od průběhu diagramu pro semikrystalické plasty (viz obr. 20).

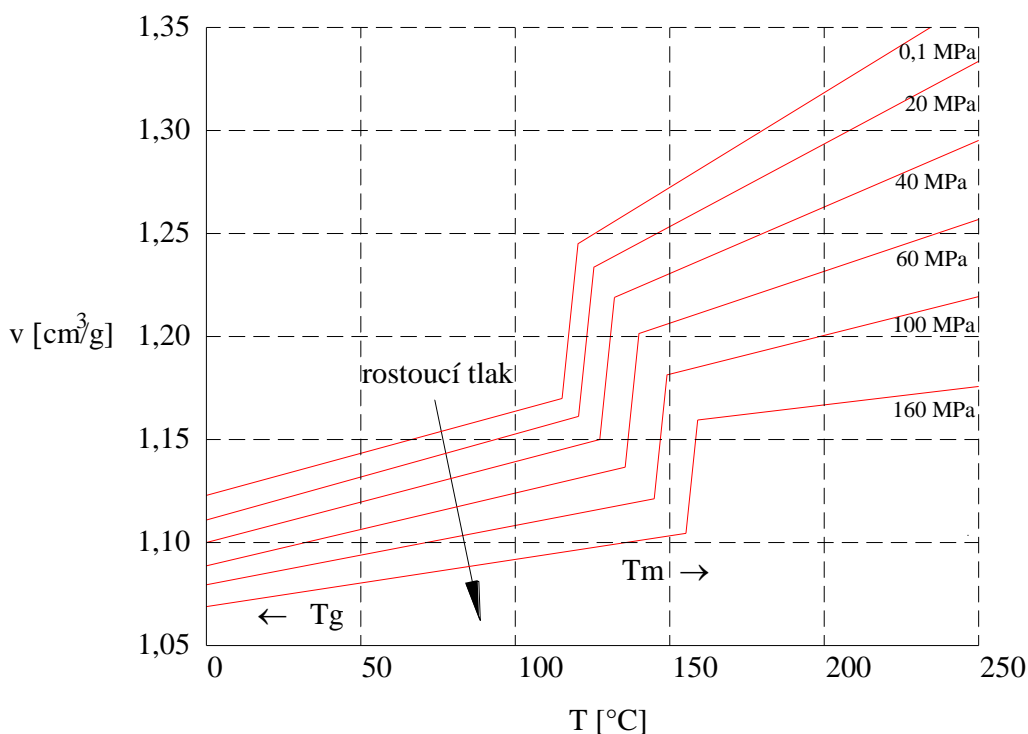


**Obr. 19** Diagram  $p$ - $v$ - $T$  pro polystyren



Stejně jako amorfni, tak i semikrystalické polymery vykazují růst měrného objemu s rostoucí teplotou v důsledku teplotní roztažnosti a pokles měrného objemu s rostoucím tlakem (při konstantní teplotě) v důsledku stlačení.

Během chladnutí semikrystalických plastů v dutině formy amorfni tavenina chladne a krystalizuje. Výrazný pokles měrného objemu je spojen s fázovou přeměnou projevující se přiblížením molekul blíže k sobě a zaujetím daných poloh v krystalové struktuře. Během této přeměny se amorfni tavenina přemění na částečně uspořádanou semikrystalickou strukturu, což objasňuje větší smrštění semikrystalických plastů v porovnání s amorfni. Smrštění semikrystalických plastů může být několikrát větší než smrštění amorfni plastů. Objemová smrštitivost plastů může být určena teoreticky, jestliže známe p-v-T diagram polymeru a podmínky vstřikovacího procesu. [27]

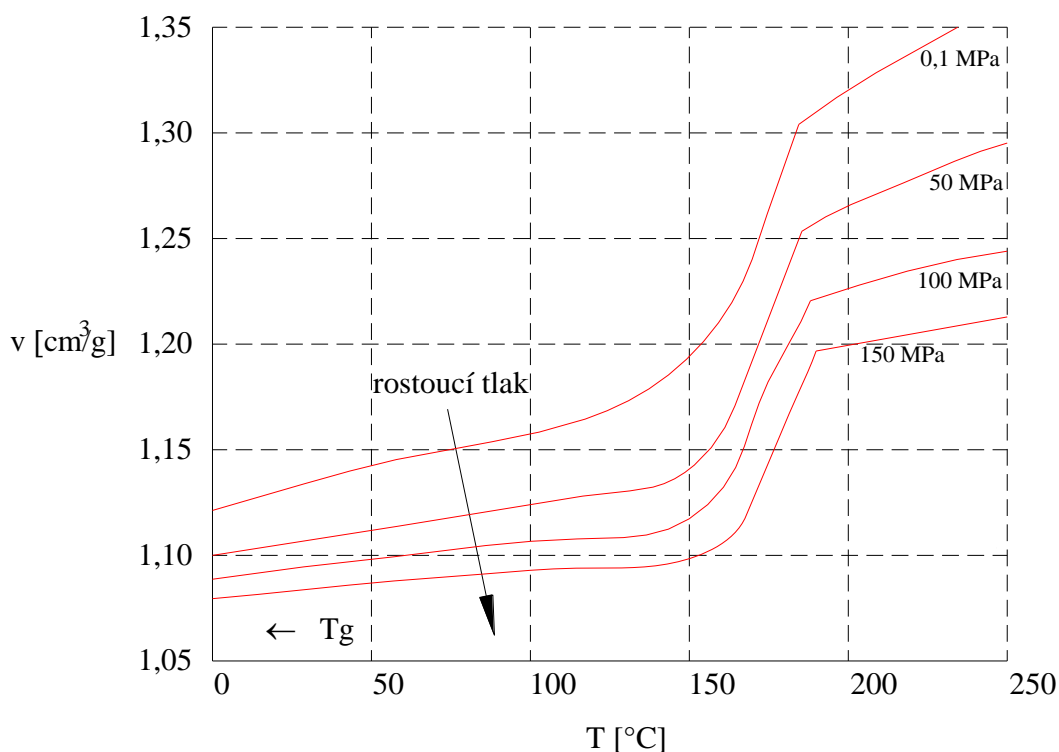


*Obr. 20 Diagram p-v-T pro polypropylen*

Van der Wallsova stavová rovnice zcela přesně nezachycuje chování plastů. Izobary v souřadnicích měrný objem - teplota mají tvar přímek, které se ostře lámou v oblastech přechodových teplot. Pro lepší přiblížení se realitě je dnes používanější tzv. **dvuoborová modifikovaná Taitova rovnice** (z angl. Double-domain Modified Tait equation). [35] Při použití Taitovy rovnice jsou přímky izobar mírně zaobleny

tak, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. U semikrystalických plastů jsou navíc ostré zlomy izobar na spodní hranici oblasti krystalizace nahrazeny exponenciálními křivkami, jak je to vyobrazeno na obr. 21.

Taitova rovnice obsahuje konstanty, specifické pro konkrétní materiál, které jsou zjistitelné z materiálových listů nebo z databází softwarů pro simulace mold-flow. Výhody Taitovy rovnice jsou zřejmé právě z její aplikace v různých simulačních programech. Taitovu rovnici simulační programy využívají pro výpočet objemu jako funkce tlaku a teploty při smršťování hmoty v dutině formy během fáze dotlaku a vlastně celé doby chladnutí taveniny.



**Obr. 21** Diagram  $p$ - $v$ - $T$  pro polypropylen vycházející z Taitovy rovnice

Taitova rovnice má následující tvar dle rovnice 11 v kombinaci se vztahy 12 a 13, které zohledňují dva definiční obory (zlom křivek) :

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{př} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \cdot \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{pr} \quad (13)$$

kde	$p$ [Pa]	je tlak
	$v$ [m <sup>3</sup> / kg]	je měrný objem polymeru
	$T$ [K]	je termodynamická teplota
	$T_{pr} = b_5 + b_6 \cdot p$	je přechodová teplota
	$\bar{T} = T - b_5$	je odvozená teplota
	$C = 0,0894$	je univerzální konstanta
	$b_i$ [-]	jsou materiálové konstanty pro daný polymer

Přechodovou teplotou je u amorfních termoplastů myšlena teplota zesklenní  $T_g$  a u semikrystalických termoplastů teplota tání  $T_m$  při konkrétním tlaku  $p$ . Tím je přesně určena teplota, kde se jednotlivé izobary „lámou“.

### Vstřikovací proces v p-v-T diagramu

Vstřikovací cyklus v p-v-T diagramu je zachycen na obrázku 22. Jedná se o vstřikovací cyklus amorfního termoplastu. Průběh lze rozdělit do následujících fází:

#### 0-2 Ohřev a plastikace

Začátek vstřikovacího procesu je v bodě 0, kterému odpovídá teplota okolí (20 °C) a barometrický tlak označený jako  $p_1$ . Následuje ohřev, probíhající pro zjednodušení při barometrickém tlaku až do bodu 1. Plastikace je ukončena v bodě 2, kde již tlak narostl na hodnotu  $p_2$  v důsledku hnětací práce šneku a účinku zpětného tlaku.

#### 2-3 Plnění dutiny formy

Tento úsek začíná v bodě 2 prudkým nárůstem tlaku vyvolaným axiálním pohybem šneku, přičemž pro zjednodušení uvažujeme děj izotermický. Tlak stoupá až na hodnotu  $p_3$  v bodě 3.

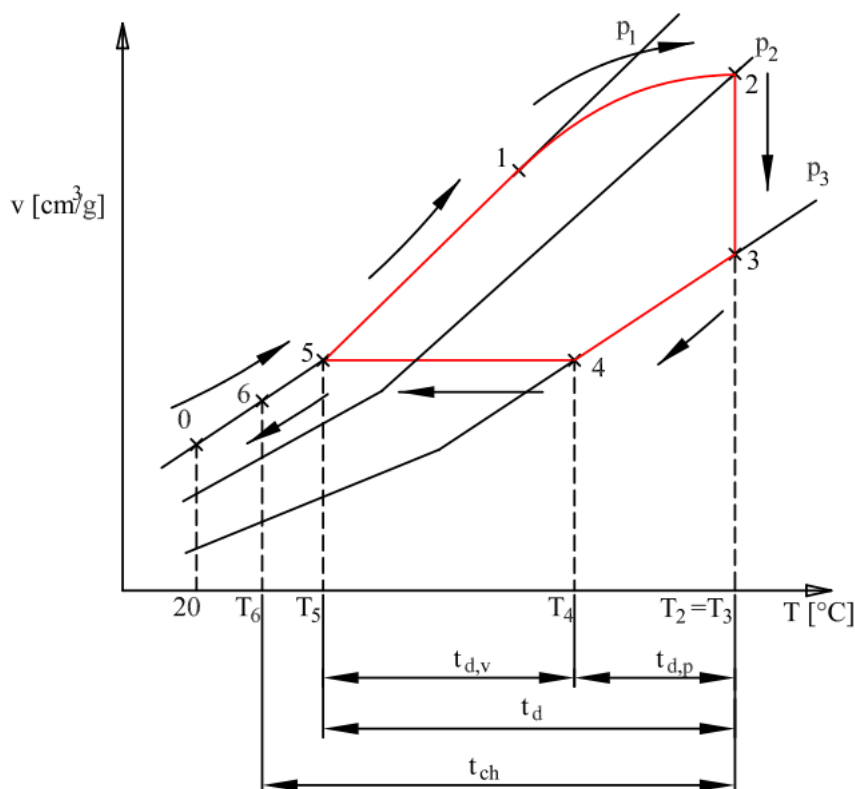
#### 3-5 Dotlak

Dotlak probíhá ve dvou částech. Mezi body 3 a 4 se jedná o dotlak izobarický. Přísluší mu hodnota tlaku  $p_3$  a čas  $t_{d,p}$ . V bodě 4 se dotlak změní na izochorický, tj. dotlak při konstantním měrném objemu. Tato fáze, časově vymezená dobou  $t_{d,v}$ , končí v bodě 5, kde tlak dosáhne počáteční hodnoty  $p_1$ . Poloha tohoto bodu, potažmo

hodnoty stavových veličin v tomto bodě, ovlivňují kvalitu výstřiku a jeho vlastnosti (mechanické vlastnosti, přesnost, hmotnost).

### 5-6 Chladnutí výstřiku

Mezi body 5 a 6 dochází k chladnutí výstřiku ve formě bez působení dotlaku a ke zvyšování jeho tuhosti. V bodě 6 se forma otevírá a výrobek je vyhozen. V oblasti mezi bodem 6 a bodem 0 chladne výrobek již mimo formu a postupně dosáhne teploty okolí, tedy výchozího bodu 0.



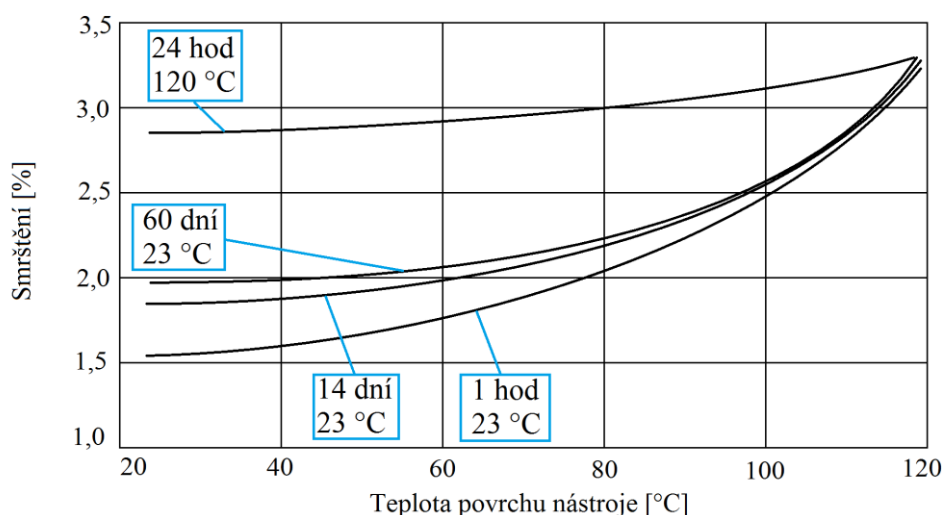
**Obr. 22** Vstřikovací cyklus v diagramu  $p$ - $v$ - $T$

Diagram  $p$ - $v$ - $T$  a Taitova rovnice slouží k úplnému popisu stavu uvnitř dutiny formy. Vzhledem k jejímu použití v simulačních programech jsou konstanty této rovnice pro většinu běžně používaných plastů snadno dostupné. Předpokladem je její využití pro výrobce vstřikovacích strojů. Překážkou k využití v procesu vstřikování je však problematické měření tlaku a teploty uvnitř dutiny formy s možností vyhodnocování průběhu stavových veličin. Navíc má křivka různý tvar, uvažujeme-li odlišné místo výstřiku a to jak vzdálenost od vtoku, tak i poloha vzhledem ke směru tloušťky stěny.

## 2.2.4 Smrštění plastů

V podstatě od vstříku taveniny plastu do vstříkovacího nástroje začíná proces chlazení taveniny a právě průběh, zejména rychlost chladnutí, má přímý vliv na smrštění. V přírodě neprobíhají žádné změny nespojitě a stejně je tomu i s krystalizací termoplastů. Mechanismus krystalizace polymerů byl popsán v kapitole věnující se morfologii. Zjednodušeně můžeme říci, že čím delší čas je tavenině umožněno uspořádat se do krystalických útvarů, tím větší je změna měrného objemu (smrštění). Technologické parametry, které jednoznačně a nejvíce ovlivňují v reálných procesech délku chlazení materiálu a tím i dobu, po kterou tavenina krystalizuje, jsou teplota taveniny a teplota stěny formy. V případě použití zálisků pak závisí doba chlazení v místě hybridního spoje i na průběhu teploty zálisku a přítomné taveniny v místě spoje. Z hlediska konstrukce výstříku je pak hlavním faktorem ovlivňujícím dobu chlazení, a tím i smrštění, tloušťka stěny. [33]

Na obrázku 23 je graf, který znázorňuje vliv teploty nástroje na velikost smrštění. Velice obdobně by vypadal graf, kde by byla na svislé ose vynesena krystalinita polymeru. Graf zahrnuje ještě tzv. dodatečné smrštění plastu, tedy jev, kdy po určité době vlivem pohybu makromolekul dochází ke změně objemu plastu. Zároveň v něm je na horní křivce naznačen proces dokrystalizace, tj. jevu, který nastává při teplotním působení na již vychladnutý výstřík. Podchlazením formy dochází k tomu, že čas pro krystalizaci taveniny se zkracuje a tím pádem je „uměle“ sníženo smrštění. Vlivem dokrystalizace ale dochází k tomu, že bez ohledu na předchozí proces se plast dostává na mnohem vyšší hodnotu smrštění. Čím je podchlazení vyšší, tím je skok větší. Ke stejným mechanismům dochází i při styku taveniny se zálisky. U zálisků však nedochází k intenzivnímu a kontinuálnímu chlazení, jako je tomu v případě stěny formy. Jejich ohřátí vlivem přestupu tepla z taveniny do zálisku může způsobit částečnou dokrystalizaci již během samotného procesu vstříkování. Důsledkem smrštění plastů je také deformace. Deformace je v podstatě důsledkem nehomogenního smrštění napříč výstříkem. U plastů, které neobsahují skelná vlákna je deformace dána nejčastěji nevhodnou konstrukcí výstříku, kdy v různých oblastech je měřitelná různá tloušťka stěny a tím dochází k nerovnoměrnému chladnutí. Oblasti s delší dobou chlazení pak vykazují větší smrštění a vzniklé pnutí ve výstříku způsobí deformaci. [36]



**Obr. 23** Smrštění POM v závislosti na teplotě formy

## 2.2.5 Vstřikování dílů se zálisky

Při vstřikování se zálisky dochází ke vkládání chladného cizího tělesa do dutiny formy a jeho zástřiku taveninou plastu. Zálisky mohou být jak plastové, tak kovové. Při zástřiku kovových zálisků, které jsou rozměrnější, někdy nastává zejména u zástřiku semikrystalickými termoplasty problém s povrchovou teplotou zálisků. Doporučené teploty formy pro vysoce krystalické plasty se pohybují mezi teplotami 70 °C až 120 °C. Založíme-li do temperované vstřikovací formy studený zálisek, dojde při styku horké taveniny se studeným kovem k prudkému ochlazení povrchové vrstvy taveniny. To má za následek odlišnou morfologii povrchové vrstvy - skin core efekt, tím pádem změnu mechanických vlastností polymeru i hybridního spoje a zhoršení zabíhavosti taveniny (v extrémním případě dokonce může docházet k problematickému doplnění tvaru výstřiku). Z těchto důvodů je pro určité typy výstřiků s hybridními spoji aplikován v sériovém procesu předeřev zálisků. Proces předeřevu je častější zejména u dílů s masivnějšími kovovými zálisky, v případě drobných zálisků z plechů se toto neprovádí. [37]

K předeřevu se používá různých prostředků a mechanismů. Buď je možné použití horkého vzduchu, sálavého tepla nebo například indukčního ohřevu. Velmi důležitá je při procesu předeřevu dobrá regulace teploty a zajištění minimální prodlevy při zakládání. Důležité je taky uvažovat při procesu předeřevu s délkovou roztažností zálisku. Při ohřevu kovových zálisků připadá na 10 °C cca 0.01 až 0,02 mm rozdílu v délce vztažené na 100 mm. Při ohřevu o několik desítek stupňů to může mít za následek problémy při zakládání do dutiny formy.

## 2.3 Konstrukce dílů z plastů

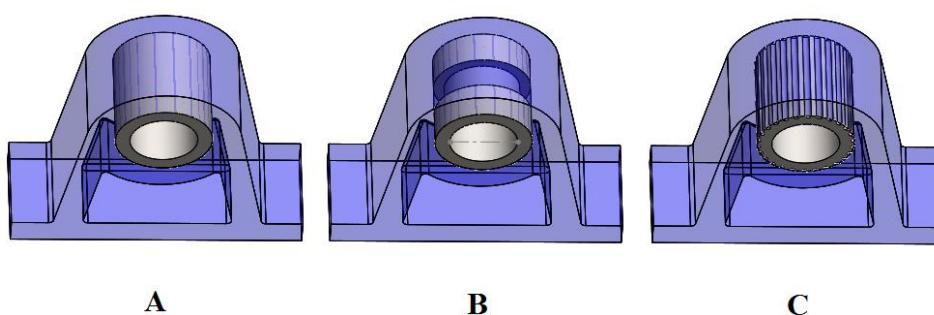
Konstrukce plastových výstřiků vyplývá vždy z funkční charakteristiky konkrétního dílu. To znamená, že funkce výrobku si žádá určitý tvar, pevnost, odolnost proti rázovému namáhání, odolnost proti cyklickému namáhání, případně chemickou odolnost apod. Pro výstřiky z plastů platí určité zásady návrhu, které jsou vázány k technologii jejich výroby, k jejich vlastnostem souvisejícím s jejich chemickým složením a nadmolekulární strukturou. Proto se při návrhu dílů z plastů musí postupovat zcela odlišně, než při návrhu kovových dílů vyráběných např. třískovým obráběním.

### 2.3.1 Návrh výstřiků vyráběných zálistkovými technologiemi

Výstřik obsahující kovový zálistek je nutno navrhovat s ohledem na pevnost, kterou od spoje požadujeme. Někdy musí spoj vykazovat ještě těsnost (např. v tlakových nádobách). V praxi se často předepisuje na výkresech např. minimální síla pro vytlačení pouzdra. Dále se předepisuje limitní únik určitého média při předepsaném tlaku. Nejčastěji je těsnost testována vzduchem, někdy pak heliem, to pro výhodu menších molekul, které mohou lépe proniknout skulinami mezi plastem a kovem.

Pevnost hybridního spojení závisí zejména na konstrukci tohoto spoje. Pokud bychom se zabývali otázkou přirozené adheze mezi kovem a plastem, tak ta by k pevnosti spoje příliš nepřispěla. Adheze závisí mimo jiné na povrchové energii obou materiálů. Anorganické materiály, jako například kovy, vykazují vysokou povrchovou energii, polymery naopak mají povrchovou energii nízkou. K dobré adhezi dvou materiálů dochází, pokud mají povrchovou energii zhruba stejnou. Tímto se tedy hybridní spoje plast-kov řadí do kategorie málo adhezivních. [38] Ve speciálních případech se různými cestami upravuje povrchová energie plastů, aby došlo k lepší přilnavosti – například plazmou nebo chemicky. Bývá to ale většinou za účelem lepení, pokovení nebo potisku, nikoliv pro účely zástřiku, neboť v tomto případě přichází plast do styku s kovem ve formě taveniny, jejíž povrch nelze modifikovat. Z tohoto důvodu je nutné pro zajištění pevnosti spoje využít smrštění materiálu plastu během procesu vstřikování a doplnit výstřik o tvarové zámky, které zabezpečí pevnost spoje. Na obrázku 24 je naznačeno, jakým způsobem lze vytvořit tvarový zámek na kruhovém zálistku tak, aby zálistek držel ve výstřiku. Varianta A je

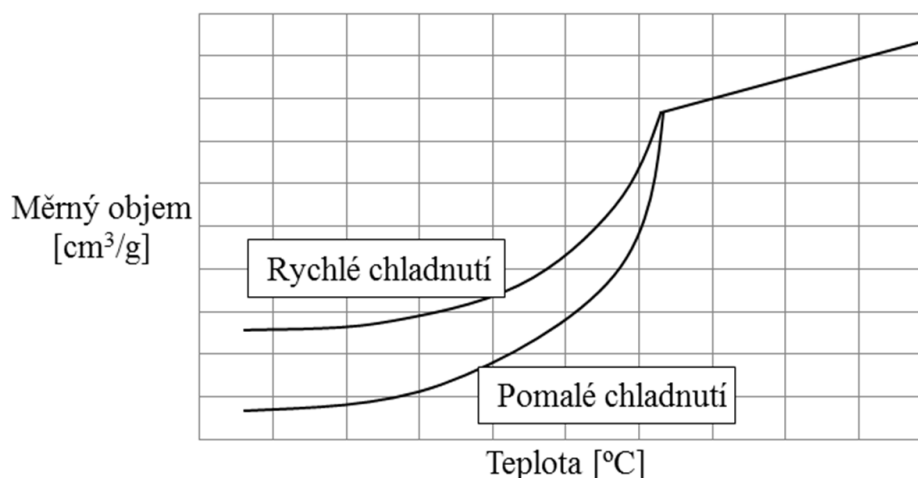
nejjednodušší, zálisek drží pouze na základě třecích sil vyvolaných smrštěním plastu okolo pouzdra. Varianta B zajišťuje fixování zálisku v axiálním směru, nezabraňuje však protáčení pouzdra. Konečně varianta C zabráňuje protáčení pouzdra. Varianta C může ovšem vnést do procesu problém s nečistotami ve formě malých kovových třísek vznikajících při obrábění pouzdra takzvaným rádlováním. Důležitým faktorem u tohoto typu záliskového spoje je vzájemný poměr tloušťky plastové objímky a průměru pouzdra. Tenká stěna plastu se rychle ochlazuje a může dojít k praskání. Minimální tloušťka stěny plastu okolo kovového pouzdra by měla být rovna jeden a půl násobku průměru pouzdra.



**Obr. 24** Možnosti tvarového zámku pro zálisky

Tlustostěnné výstřiky, doporučené u zálisků, vykazují vady jako jsou propadliny a vnitřní staženiny. Je to způsobeno dlouhou dobou chladnutí. Na obrázku 25 je znázorněn průběh závislosti měrného objemu na rychlosti chladnutí.

### p-v-T diagram

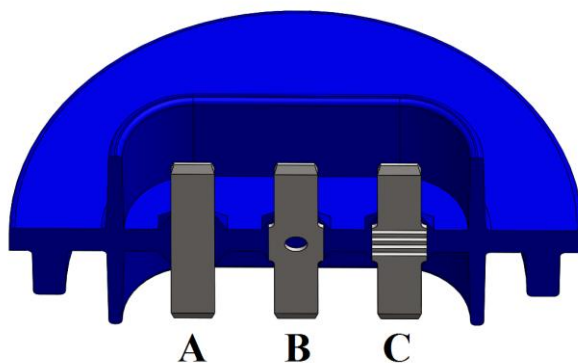


**Obr. 25** Vliv rychlosti chladnutí na měrný objem semikrystalického polymeru



Rychlejší chladnutí vykazuje výstřik s tenkou tloušťkou stěny, pomalejší chladnutí vykazuje výstřik s tlustou stěnou. Stejně tak materiál blízko stěny formy či zálisku chladne rychleji, než materiál uvnitř stěny výstřiku, tedy dále od stěny formy či zálisku. Důležitým faktorem je také snaha o dodržení konstantní tloušťky stěny výstřiku. Tím je dosaženo podobného smrštění napříč celým výstřikem a zabraňuje se nepříjemným deformacím. [35, 39]

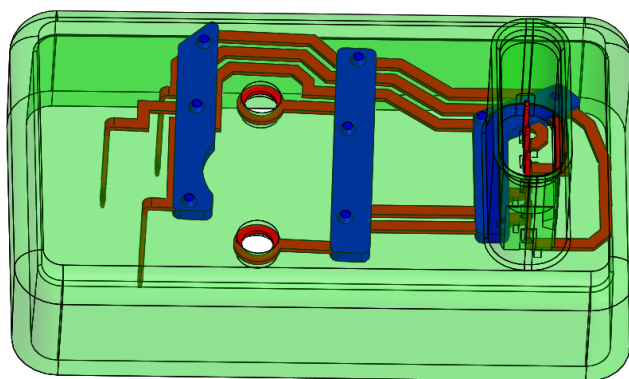
Při návrhu záliskovaných dílů, které obsahují tenké zálisky typu kontaktů lze postupovat následujícím způsobem. Na obrázku 26 je znázorněno, jak se dá zabezpečit pevnost spoje. Varianta A je bez tvarového zámku, varianta B obsahuje děrovaný kontakt s rozšířením tvarové části a varianta C zahrnuje vrubovaný kontakt. Typy spojení B a C vykazují nejen lepší mechanické vlastnosti, ale také lepší hodnoty těsnosti. Proto jsou výhodné pro aplikace, kdy je třeba garantovat těsnost – například u palivových systémů nebo tlakových nádob.



*Obr. 26 Možnosti tvarového zámku pro kontakty*

V případě složitějších tvarů kontaktů je třeba zajistit to, aby byl kontakt ve formě, a tudíž v díle dobře fixován. Zálisek tvaru kontaktu je totiž velmi poddajný a během zaformování, vstřiku taveniny a odformování hrozí nebezpečí jeho deformace. Dynamický účinek taveniny během vstřiku může kontakty ohnout do té míry, že jsou přitisknuty na stěnu nebo posunuty tak, že při použití může dojít ke zkratu. Jedním ze způsobů, který se dá použít k zafixování zálisků ve formě, je použití takzvaného předobstříku. Předobstřík spočívá ve vytvoření plastových můstků na menší vstřikovací formě, do které je podavačem zakládán pás s kontakty. Tyto kontakty jsou po zástřiku můstky dohnuty a separovány ve střížném nástroji. Následně dojde k založení kompaktního paketu do dutiny finálního nástroje a začíná

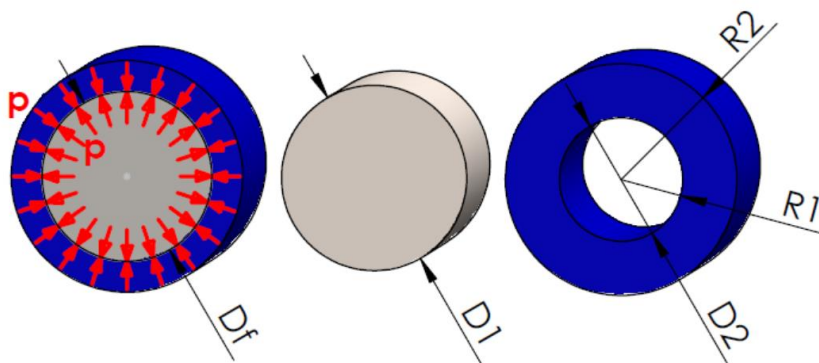
vlastní zástřík a výroba kompletního dílu. Na obrázku 27 je zachycena možnost takovéto aplikace. Modré můstky zajišťují vzájemnou polohu kontaktů, a zároveň díky dosedovým čepům vymezují polohu kontaktů ve směru zavírání formy. Pro fixaci kontaktů je možné formu ještě doplnit o vymezovací a centralizační trny. Tyto jsou pak na finálním dílu viditelné jako kuželové díry vedoucí až ke kontaktu. Pokud to není dovoleno, mohou se vymezovací trny aplikovat pouze ve fázi vstřiku a během dotlaku pomocí například pneumatického válce se zasunou do těla formy. Stopy po trnech jsou pak minimální.



*Obr. 27 Díl se zálistky a můstky vzniklými předobstříkem*

## 2.4 Pevnost hybridního spoje kov/plast

Pokud řešíme pevnost hybridního spoje, je nutné si uvědomit, zda bude použito tvarového zámku, či ne. Pokud ne – pevnost spoje je dána pouze třecími silami, které vznikají na základě působení tlaku plastu na kovový zálistek. Tento tlak vyplývá ze smrštění plastu během procesu vstřikování a během chlazení mimo dutinu nástroje. Princip je tedy z hlediska mechaniky stejný jako u spoje zalisovaného, kde svěrná síla vzniká zalisováním dvou částí do sebe s přesahem.



*Obr. 28 Rozložení napětí v hybridním spoji*

V našem případě by tento přesah byl měřitelný po oddělení zálisku a plastu.

Pokud bychom chtěli tento „přesah“ u zastříklého zálisku tvaru čepu vyjádřit analyticky, pak bude funkcí mechanických vlastností materiálu zálisku a plastu a vzniklého tlaku ve spoji.

Závislosti jsou následující a plynou z rovnic, které se používají pro výpočet nalisovaných spojů. [40]

Deformace dřívku:

$$\Delta D_1 = D_f - D_1 = -\frac{p \cdot D_f}{E_1} (1 - \mu_1) \quad (14)$$

kde	$\Delta D_1$ [m]	je deformace průměru čepu způsobená tlakem spoje
	$D_f$ [m]	je finální průměr čepu (i plastu)
	$D_1$ [m]	je původní průměr čepu
	$p$ [Pa]	je tlak v místě hybridního spoje
	$E_1$ [Pa]	je modul pružnosti čepu
	$\mu_1$ [-]	Poissonova konstanta čepu

Deformace plastu:

$$\Delta D_2 = D_f - D_2 = \frac{p \cdot D_f}{E_2} (C + \mu_2) \quad (15)$$

kde	$\Delta D_2$ [m]	je deformace průměru plastu způsobená tlakem spoje
	$D_f$ [m]	je finální průměr plastu (i čepu)
	$D_2$ [m]	je průměr plastu pokud bychom rozebrali spoj
	$p$ [Pa]	je tlak v místě hybridního spoje
	$E_2$ [Pa]	je modul pružnosti plastu
	$\mu_2$ [-]	Poissonova konstanta plastu
	$C$ [-]	Bezrozměrná konstanta spoje

$$C = \frac{r_1^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (16)$$

kde	$r_1$ [m]	je vnitřní poloměr plastu
	$r_2$ [m]	je vnější poloměr plastu

Celkový přesah:

$$\Delta D = |\Delta D_1| + |\Delta D_2| = p \cdot D_f \left( \frac{1-\mu_1}{E_1} + \frac{C+\mu_2}{E_2} \right) \quad (17)$$

U hybridních spojů lze předpokládat, že deformace průměru kovového čepu bude minimální ve srovnání s deformací vnitřního průměru plastu. Vyplývá to z poměru hodnot modulů pružnosti. Budeme-li například uvažovat modul pružnosti oceli čepu  $2,1 \times 10^5$  MPa a modul pružnosti například polypropylenu 900 MPa, pak vzájemný poměr je 1 : 233. To znamená, že deformace čepu je skutečně zanedbatelná. Můžeme tedy psát:

$$\Delta D_2 = D_1 - D_2 = \frac{p \cdot D_1}{E_2} (C + \mu_2) \quad (18)$$

Výsledný tlak v případě, že známe předpokládanou deformaci plastu po smrštění je:

$$p = \frac{\Delta D_2 \cdot E_2}{D_1 (C + \mu_2)} \quad (19)$$

Důležitou poznámkou je, že vztah (6) platí i pro spojení plastu s pouzdem pokud budeme pouzdro brát za nekonečně tuhé.

Z tlaku pak lze vypočítat kroutící moment a axiální sílu dle následujících vztahů:

$$M_k = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot p \cdot f \cdot \frac{D_1}{2} \quad (20)$$

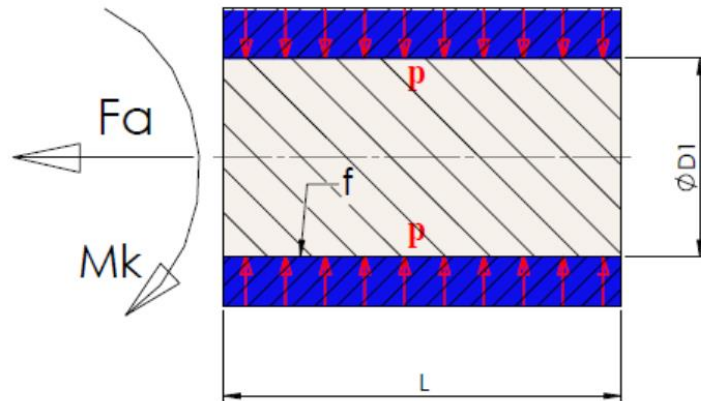
kde  $M_k$  [Nm] je kroutící moment  
 $f$  [-] je koeficient tření mezi materiály  
 $L$  [m] je délka spoje

$$F_a = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot p \cdot f \quad (21)$$

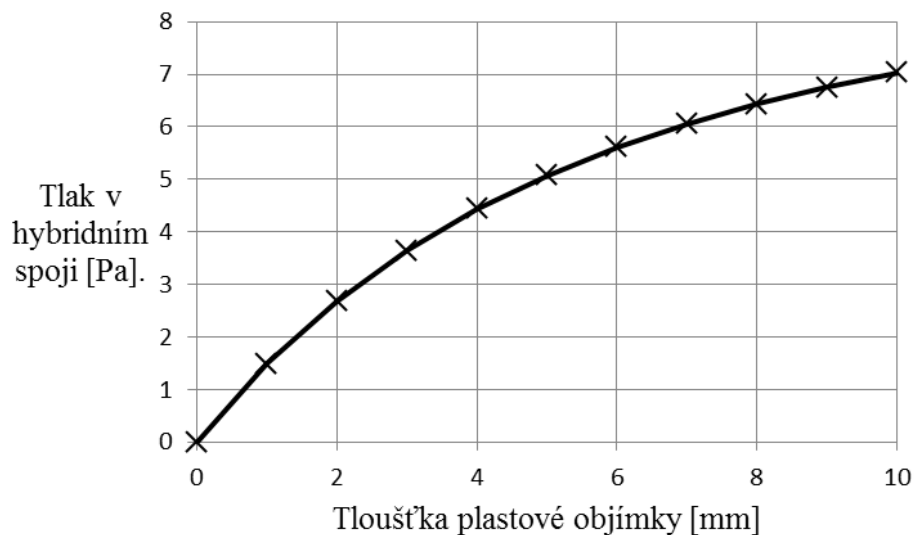
kde  $F_a$  [N] je axiální síla hybridního spoje

Co nám tyto vztahy říkají? Tlak v hybridním spoji je přímo úměrný velikosti smrštění plastu a modulu pružnosti plastu. Nepřímo úměrný pak průměru spoje a Poissonově konstantě. Závislost tlaku na tloušťce stěny plastu pak vyplývá z konstanty  $C$  (charakteristika spoje). Pokud bychom chtěli znázornit závislost tlaku hybridního spoje na tloušťce plastu tvořícího objímku zálisku graficky, měla by funkce průběh podle grafu na obrázku 30. Hodnoty v grafu odpovídají polypropylenu s modulem pružnosti  $E = 950$  MPa. Z grafu vyplývá, že s nárůstem tloušťky materiálu kolem kovového čepu roste tlak v místě spoje, ovšem s přibývajícím

tloušťkou klesá směrnice křivky a tlak se asymptoticky blíží k hodnotě 9,5 Pa, kterou nabývá při teoreticky nekonečné tloušťce materiálu.



**Obr. 29** Kroutící moment a axiální síla

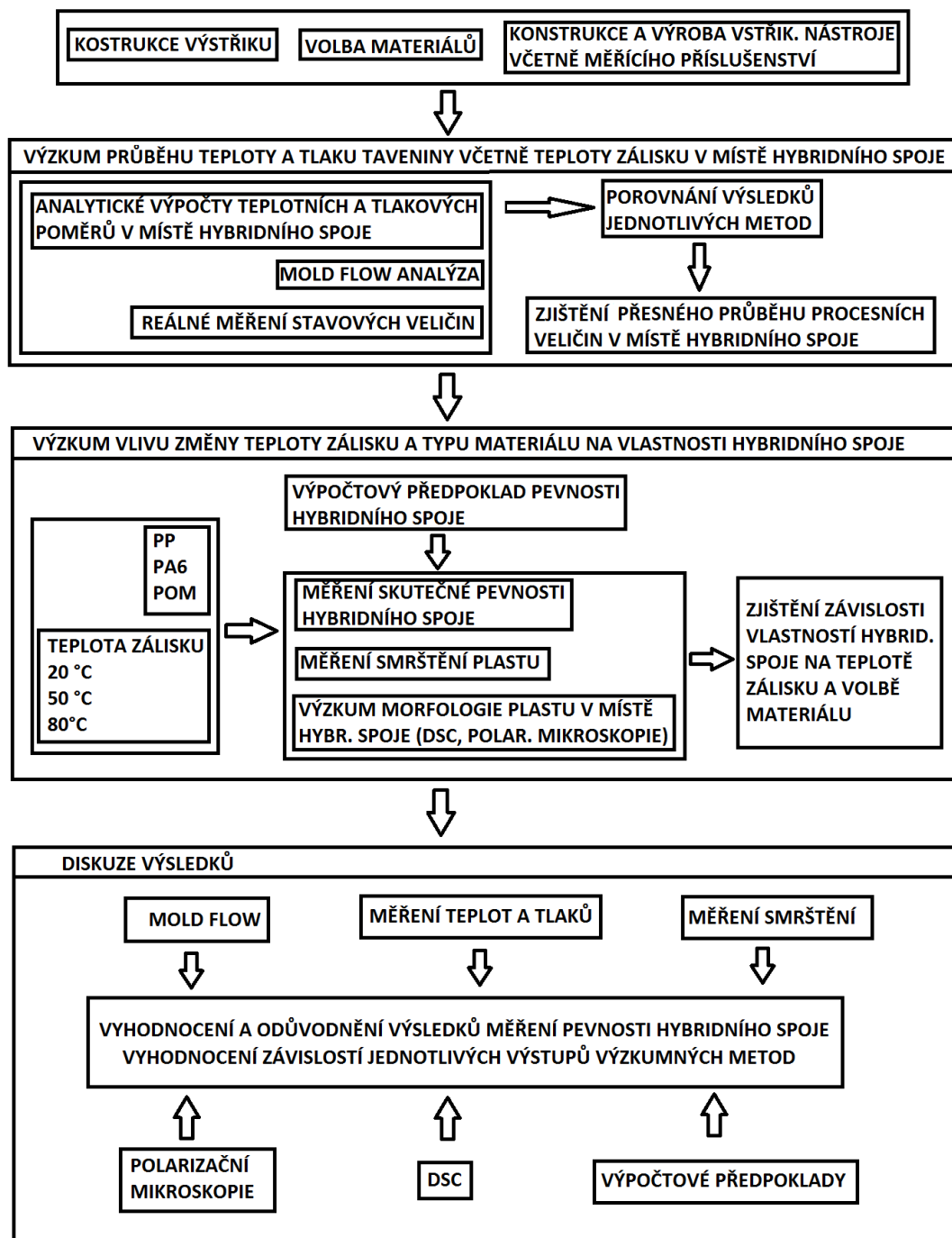


**Obr. 30** Závislost tlaku v hybridním spoji na tloušťce plastové objímky

Vztahy uvedené v této kapitole řeší teoretický výpočet axiální síly a kroutícího momentu v místě hybridního spoje. Neřeší případné porušení plastu v místě blízkém hybridnímu spoji. To závisí na konstrukci zálisku a plastového dílu v okolí spoje. Vztahy také nezohledňují závislost velikosti smrštění na tloušťce plastu a změnu mechanických hodnot (především modulu pružnosti) vlivem styku plastu se studeným materiálem kovového zálisku.

### 3 VÝZKUM MEZIFÁZOVÉHO ROZHRAŇÍ PLAST-KOV

Výzkum chování plastu a kovu v místě hybridního spoje jsem inicioval konstrukcí výstřiku vhodného ke zkoumání teplotních a tlakových poměrů během vstřikovacího procesu, mechanických vlastností spoje a morfologie plastu v místě spoje s ohledem na vhodný poměr objemu plastu a kovu a zároveň možnosti přehřívání kovový zálisek. Následovala volba vhodného materiálu pro zálisek a volba základních materiálů pro plastovou část výstřiku pro výzkumný záměr. Další fáze spočívala v konstrukci a technologické přípravě výroby formy pro tento výstřik včetně vybavení formy příslušenstvím k měření stavových veličin procesu. Konstrukci formy doprovázely výpočty velikosti vtokové soustavy a temperačního systému a také volba a výpočet vhodnosti vytypovaného vstřikovacího stroje. Po dokončení výroby nástroje jsem provedl první vstřikování do formy s cílem definovat vstřikovací podmínky pro všechny typy materiálů určených k výzkumu. Tím byly provedeny všechny kroky nutné k úspěšnému provedení výzkumu. Cílem výzkumu bylo zjistit, jak se chová soustava kov – plast během procesu vstřikování, jak lze ovlivnit výsledné vlastnosti hybridního spoje volbou různých typů polymerů s různými vlastnostmi a zejména, jak lze ovlivnit výsledný stav hybridního spoje přehříváním kovového zálistku. K určení průběhu teplot a tlaků v místě hybridního spoje jsem použil analytický výpočet, numerickou simulaci (mold-flow analýzu) a přímé měření v dutině formy v místě hybridního spoje. Pro určení výsledných vlastností hybridního spoje v závislosti na volbě plastu a teplotě přehřevu jsem změřil skutečnou axiální pevnost spoje, dále stupeň krystalinity v místě spoje 4metodou DSC a vizuálně ověřil morfologii v místě hybridního spoje pomocí polarizační mikroskopie. Výstupy z těchto výpočtů a měření jsem dále podrobil analýze v podobě srovnání a vysvětlení vzájemných vztahů, příčin a následků pro objasnění celé problematiky mezifázového rozhraní. Pro snadnější interpretaci mých záměrů uvádím následující schéma (obr. 31).



Obr. 31 Schéma postupu výzkumu

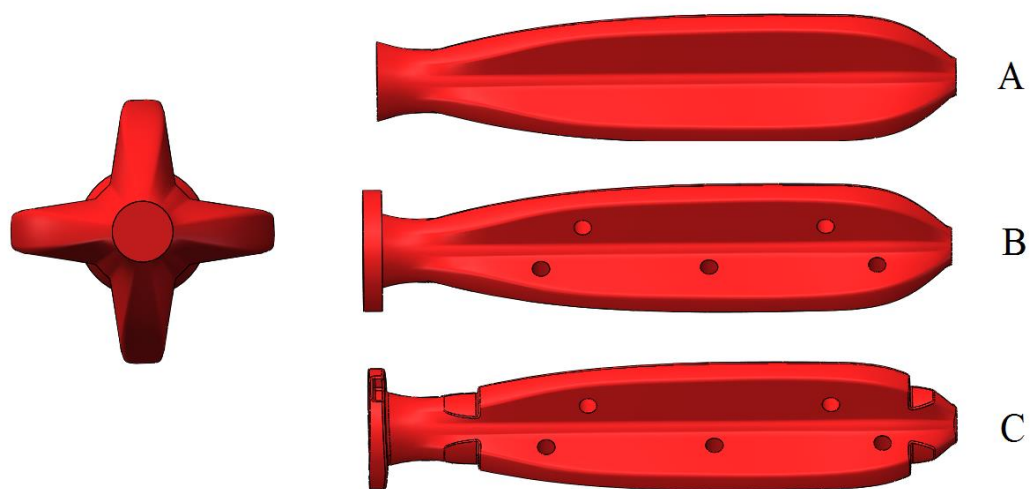
### 3.1 Konstrukce dílu

Jako díl, který zahrnuje rozměrově dostačující kovový zálisek, jsem zvolil šroubovák tvořený kovovým dříkem, 1. komponentem plastu (komponent HARD) a 2. komponentem plastu (komponentem SOFT).

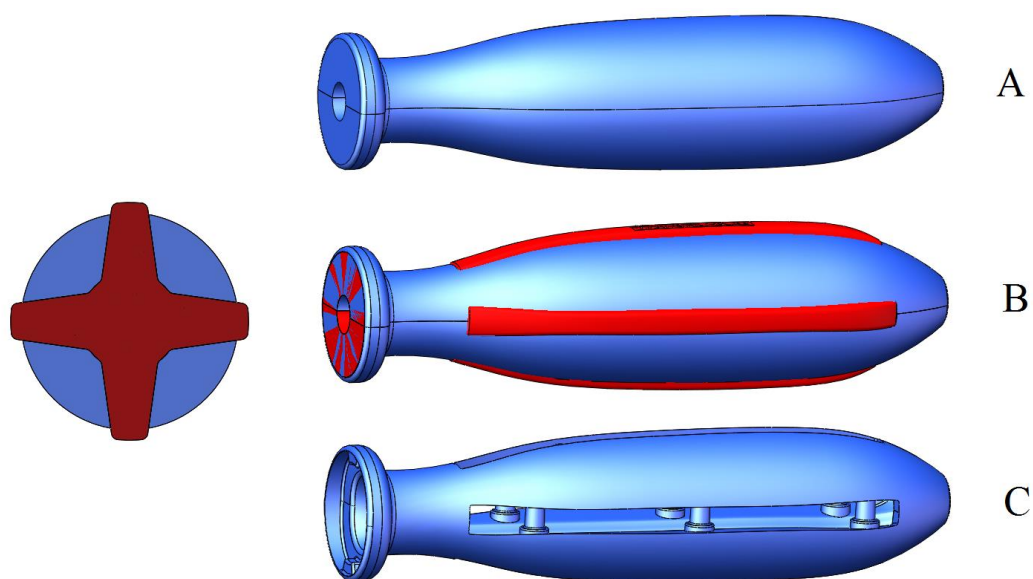
Vlastní konstrukci dílu jsem realizoval v programu SolidWorks. Jedná se o plně parametrizovaný 3D modelář od společnosti Dessault Systems. Postup



konstrukce komponentu 1 je zachycen na obrázku 32. Komponent 1 jsem konstruoval ve tvaru kříže tak, aby se zachovalo ergonomické držení, ale zároveň se maximálně možné snížila tloušťka stěny. Tvar kříže zaručuje i to, že druhý komponent bude po nástřiku odolný proti torznímu namáhání. Ve druhém kroku jsem konstruoval přední část pro možnost zapření axiální síly při šroubování a zároveň průchozí otvory, které tvoří mechanické zámky pro druhý komponent. V dalším kroku jsem vytvořil tvarové zámky v přední části šroubováku, záseky v podélných žebrech a celý díl jsem zúkosoval.



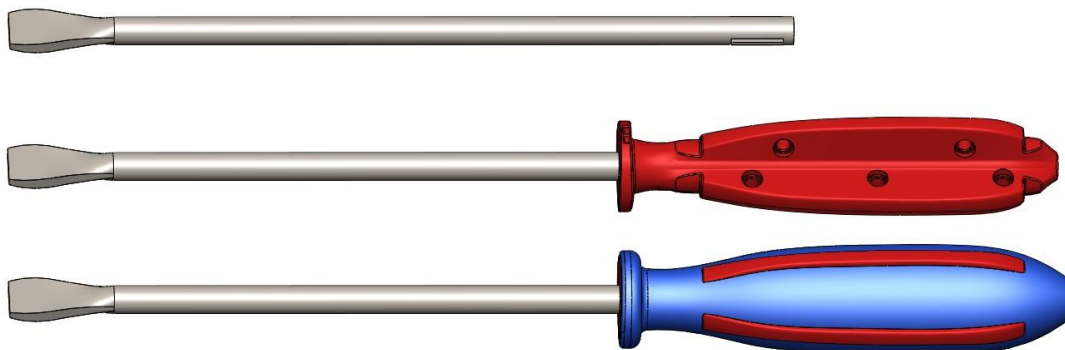
*Obr. 32 Postup při konstrukci 1. komponentu výstřiku*



*Obr. 33 Postup při konstrukci 2. komponentu výstřiku*



Komponent 2 jsem zkonstruoval tak, aby doplnil kruhový tvar rukojeti. Postup je zachycen na obrázku 33. Nejprve spojením kruhových profilů vzniklo tělo rukojeti. Poté bylo vloženo přes tělo 1. komponentu a konečně byla těla odečtena a vznikl model komponentu 2. Finální náhled na model sestavy je pak znázorněn na obrázku 34.



*Obr. 34* Komponenty výstříku

Kovový dřík je ve verzi od firmy Narex Bystřice opatřen křídélky pro zamezení prokluzu během utahování. Ve verzi určené pro experimenty s nařezanými tyčemi z ocelového polotovaru nikoliv.

### 3.2 Volba materiálu

Primárními materiály byly polypropylen s minerálním plnivem a příměsí termoplastického elastomeru DAPLEN EE002AE pro komponent HARD a termoplastický elastomer s termoplastickou bází z PP doplněnou o složku EPDM (etylen-propylen-dienový terpolymer) ALFATER XLA6512GP0000 pro komponent SOFT [41]. Materiály jsem volil s ohledem na jejich mechanické vlastnosti a na vzájemnou snášlivost a přilnavost. Tím, že je komponent SOFT chemickým složením na bázi polyolefinů, je zajištěna vysoká přilnavost. Komponent HARD plní ve výstříku funkci přenosu kroučícího momentu mezi dříkem a rukojetí plastu a komponent SOFT plní funkci ergonomickou, tj. zajišťuje příjemné držení díky svojí nižší tvrdosti.

Dříky byly z blíže nespecifikované korozivzdorné oceli dodané z firmy Narex Bystřice v omezeném počtu. Pro část experimentu však byla použita automatová ocel DIN 1.0715 v podobě kruhové tyče tvářené za tepla.

Pro účely experimentu jsem jako komponent HARD vstříkoval tři druhy materiálů, všechny tři semikrystalické termoplasty s různým stupněm krystalinity, různou hodnotou smrštění, různou pevností a modulem pružnosti. První variantou byl již zmíněný polypropylen DAPLEN EE002AE. Druhou variantou byl Polyamid 6 ALTECH PA6 A 1000/209. Třetí variantou byl polyoxymetylen HOSTAFORM C 13021 natur. Tabulka 3 zobrazuje jejich vlastnosti. Důležitým faktem je, že materiál PP obsahuje minerální plnivo – tzn. nukleační činidlo. Oba další plasty žádné plnivo neobsahují, je tedy předpoklad, že například na teplotu zálisku budou z hlediska morfologie a změny mechanických vlastností reagovat citlivěji. Materiál POM má charakteristicky vysoký stupeň krystalinity, materiál PA6 obecně krystalizuje hůře.

**Tab. 3** Vybrané vlastnosti volených materiálů komponentu HARD

		DAPLEN EE002AE	ALTECH PA6 A 1000/209	HOSTAFORM C 13021	
Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Hodnota	Hodnota	Norma
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	0,905	1,13	1,41	ISO 1183
Mez pevnosti v tahu (50mm/min)	MPa	19,5	45	65	ISO 527-2
Modul pružnosti v tahu při 23 °C (50mm/min)	MPa	950	1500	2900	ISO 527-2
Smrštění	%	1,4	0,8	1,8	-
Poissonova konstanta	-	0,4	0,39	0,35	-

Tabulka 4 zobrazuje vybrané vlastnosti komponentu SOFT.

**Tab. 4** Vybrané vlastnosti materiálu komponentu SOFT

ALFATER XLA6512GP0000			
Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Norma/Metoda
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	0,950	ISO 1183
Mez pevnosti v tahu (50mm/min)	MPa	6	ISO 527-2
Tvrdość (Shore A)	-	65	ISO 868

### 3.3 Volba stroje: rozhraní nástroj - stroj

Jako první věc před započítím konstrukce jsem vytypovat vhodný stroj. Nejdůležitější faktory jsou:

#### Uzavírací síla stroje:

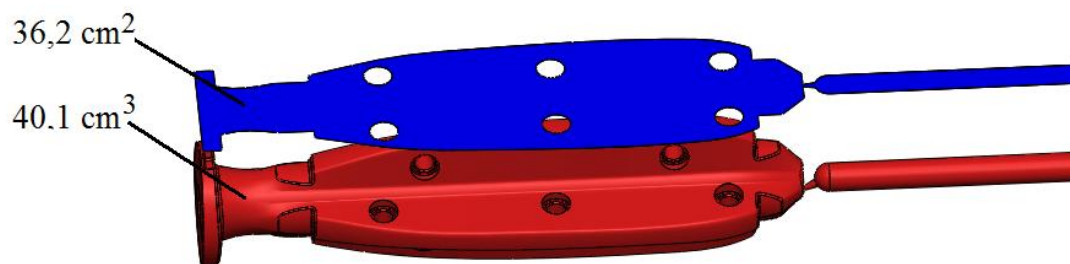
Nejjednodušším a dostačujícím způsobem je určení uzavírací síly stroje z průmětu dílu do dělicí roviny a vstřikovacího tlaku. Platí tedy vztah 22.

$$F_U = n_F \cdot p_v \cdot S_p \quad (22)$$

kde	$F_U$ [N]	je uzavírací síla stroje (někdy nazývaná uzamykací)
	$n_F$ [-]	je násobnost formy
	$p_v$ [Pa]	je vstřikovací tlak (vnitřní tlak v dutině formy)
	$S_p$ [m <sup>2</sup> ]	je průmětná plocha dílu do dělicí roviny včetně podílu průmětné plochy vstřikovacího kanálu na díl

Pro výpočet jsem volil násobnost 1. Vstřikovací tlak vzhledem k tomu, že výpočet probíhal před vlastním procesem vstřikování bylo nutné odhadnout, proto jsem do výpočtu dosadil doporučenou hodnotu 50 MPa [42]. Jedná se o předpokládaný vnitřní tlak v dutině formy pro PP. Průmětná plocha výstřiku do dělicí roviny formy je rovna 36,2 cm<sup>2</sup> (viz obr. 35).

$$\underline{\underline{F_U}} = n_F \cdot p_v \cdot S_p = 1 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 36,2 \cdot 10^{-4} = 181\,000\,N = \underline{\underline{181\,kN}}$$



*Obr. 35 Průmětná plocha výstřiku do dělicí roviny a objem výstřiku včetně vtoku*

#### Průměr šneku:

Odpovídající průměr šneku lze odvodit z pravidla, že minimální zdvih nesmí být menší než hodnota průměru šneku a maximální velikost zdvihu nesmí být větší než trojnásobek průměru šneku.

$$1 \cdot D_s \leq z \leq 3 \cdot D_s \quad (23)$$

kde  $D_s$  [m] je průměr šneku  
 $z$  [m] je zdvih (rozdíl velikosti dávky bez dekompresního zdvihu a velikosti polštáře)

Představíme-li si prostor před čelem šneku jako ideální válec, z rovnice objemu válce lze vyjádřit vztahy pro minimální a maximální možné průměry šneku:

$$D_{S \text{ MAX}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_D}{\pi}} \quad (24)$$

$$D_{S \text{ MIN}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_D}{3 \cdot \pi}} \quad (25)$$

kde  $D_{S \text{ MAX}}$  [m] je maximální možný průměr šneku  
 $D_{S \text{ MIN}}$  [m] je minimální možný průměr šneku  
 $V_D$  [m<sup>3</sup>] je objem dávky = objem výstřiků a vtokové soustavy vynásobený expanzním koeficientem taveniny 1,2

Pro náš případ platí maximální možný průměr šneku  $D_{S \text{ MAX}}$  a minimální možný průměr šneku  $D_{S \text{ MIN}}$ :

$$\underline{\underline{D_{S \text{ MAX}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 40,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{\pi}} = 0,0394 \text{ m} = \underline{\underline{39,4 \text{ mm}}}$$

$$\underline{\underline{D_{S \text{ MIN}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 40,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{3 \cdot \pi}} = 0,0273 \text{ m} = \underline{\underline{27,3 \text{ mm}}}$$

Pro vstřikování jsem zvolil stroj Arburg 420 C vertical se vstřikováním do dělicí roviny formy. Tento typ stroje jsem zvolil s ohledem na pohodlné zakládání zálisku do dutiny formy. Základní parametry vstřikovacího stroje důležité pro návrh formy jsou uvedeny v tabulce 5, na obrázku 36 je fotografie stroje a v příloze 1 je schéma stroje se základními rozměry.



*Obr. 36 Arburg 420 C Vertical*

*Tab. 5 Parametry vstřikovacího stroje*

Arburg 420 C vertical		
Parametr	Jednotka	Hodnota
Max. vstřikovací tlak	[MPa]	139
Průměr šneku	[mm]	40
Světlost mezi sloupky	[mm]	420
Maximální otevření lisu	[mm]	750
Zdvih upínacích desek	[mm]	500
Rozhraní pro tahač jader	[ - ]	ano
Rádus na špičce trysky	[mm]	15
Průměr trysky	[mm]	5
Průměr středících kroužků	[mm]	125

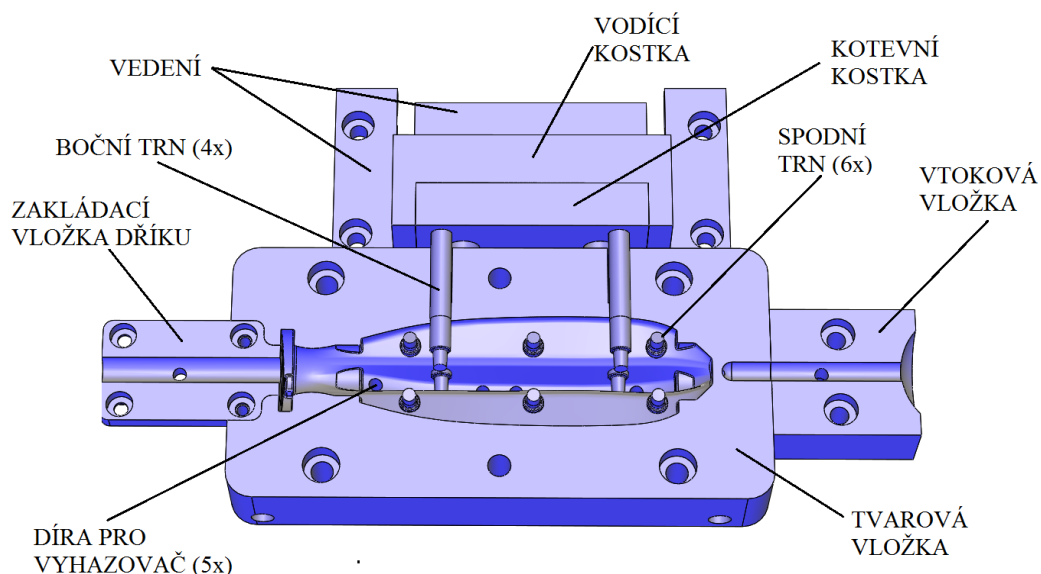
### 3.4 Návrh vstřikovacího nástroje

Geometrie výstřiku ovlivňuje jako hlavní určující prvek konstrukci formy. Její velikost, tvar, pohyblivé součásti, vtokovou a temperační soustavu atd. Velmi

důležité je také rozhraní forma – stroj, což jsou faktory, které v počáteční fázi konstrukce hrají důležitou roli.

Jako první jsem začal s konstrukcí tvarových dutin. Tvarové dutiny jsou negativem výstřiku zvětšeným o smrštění plastu. Smrštění plastu je dáno dodavatelem granulátu a je určeno na základě laboratorních zkoušek. Většina výrobců granulátu uvádí pouze jednu nebo dvě hodnoty lineárního smrštění. Pokud uvádí dvě hodnoty, jedná se o hodnotu smrštění ve směru podélném a směru kolmém na tečení materiálu. Pro konstrukci se většinou používá aritmetický průměr z těchto dvou hodnot. Skutečná hodnota smrštění se vždy odchyluje od teoretické hodnoty dané v materiálovém listu. Smrštění je závislé zejména na tloušťce stěny výstřiku a také na technologických parametrech (velikost dotlaku, teplota taveniny a teplota stěny formy), dále například na konstrukci vtokové a temperační soustavy. Tvarová dutina včetně zakládací a vtokové vložky a bočního odformování pro komponent HARD je na obrázku 37. Pro PP Daplen EE002AE je předepsáno smrštění 1,4 %. Toto smrštění jsem použil pro modelování celé tvarové dutiny. Směr vstřikování je do dělicí roviny. Pro zaformování průchozích děr ve výstřiku, které jsou odformovatelné ve směru otevření formy, jsem zvolil vsazené trny (na obrázku 37 označeno – spodní trn).

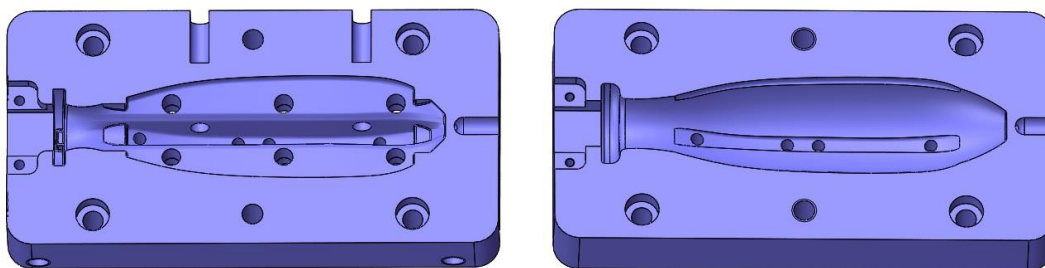
Pro zaformování děr, které nejsou odformovatelné otevřením formy jsem formu opatřil pohyblivými tvárníky (bočními trny). Odformování musí být provedeno před vlastním otevřením formy, proto jsem volil otevření pomocí hydraulického válce, který posouvá ve vedení vodící a kotevní kostku a boční trny.



*Obr. 37 Tvarová vložka*

Pro možnost zakládání různých průměrů dřívku jsem formu vybavil výměnnými zakládacími vložkami dřívku. Všechny tyto části formy jsou nenormalizované, vyrobené z nástrojové oceli ČSN 19 552 (1.2343), která byla po obrábění kalena.

Aby bylo možné vstříkovat v tomto nástroji dvoukomponentní výstřík, byla forma opatřena výměnnou sadou tvarových vložek, tzn. vložkami pevné a pohyblivé části formy pro komponent HARD a vložkami pevné a pohyblivé části pro komponent SOFT. Nejedná se tedy v pravém slova smyslu o klasické dvoukomponentní vstříkování, kdy k zástříku prvního komponentu druhým dochází s prodlením několika sekund, ale o vstříkování, při kterém je v omezené sérii nalisován komponent HARD včetně kovového dřívku a po výměně vložek je komponent HARD s kovovým dřívkem zakládán do formy a dojde k nástříku komponentu SOFT.

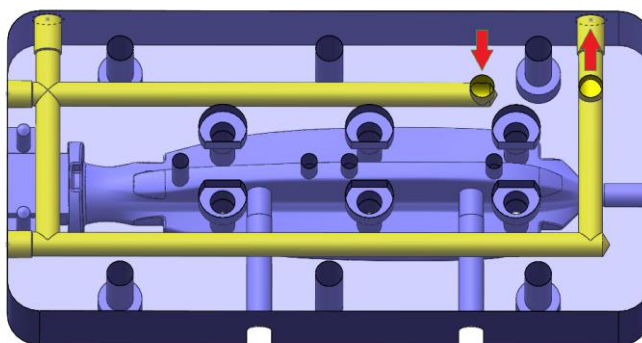


**Obr. 38** Porovnání tvarových vložek SOFT (vpravo) a HARD (vlevo)

Temperační soustava byla volena tak, aby byl díl chlazen co nejsymetričtěji. Tím je zabráněno možným deformacím výstříku. Přívod vody do formy byl volen pomocí rychlospojek přes rám do tvarových vložek, kde těsnění obstarávají O-kroužky. Pro nezbytné zneprůchodnění děr jsou použity závitované ucpávky. Průměr kanálu je 6 mm. Vzdálenost od stěny formy je minimální. Jak pevná, tak pohyblivá strana má shodné, zrcadlově obrácené vrtání. Schéma temperační soustavy vložky je na obrázku 39.

Parametry temperační soustavy jsem ověřil výpočtem. Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tabulce 6. Pro výpočet byly použity vztahy uvedené v odborném článku O. Zoellnera: *Optimised mould temperature control* [43], kde jsou uvedeny všechny rovnice sdílení tepla, pomocí kterých lze dospět k určení všech tepelných toků a z nich spočítat teploty stěn formy, teploty temperačních kanálů a kolísání teplot stěn formy. Stejně vztahy uvádí také J. Nožička [44] a J. Olehla [45].





*Obr. 39 Schéma temperační soustavy*

*Tab. 6 Výpočet tepelných a teplotních poměrů ve formě – výsledky*

<b>Tepelné toky</b>		
Tepelný tok z roztaveného materiálu	0,52	kW
Tepelný tok – konvekce tepla mezi formou a vzduchem	0,03	kW
Tepelný tok vedením tepla do stroje	0,05	kW
Tepelný tok zářením	0,004	kW
Tepelný tok z dutiny formy do temperačního média	0,44	kW
<b>Průtok vody</b>		
Rozdíl vstupní a výstupní teploty vody	1,57	°C
Reynoldsovo číslo	21511,07	-
<b>Teploty</b>		
Teplota stěny temperačního kanálu	41,54	°C
Teplota stěny formy	46,70	°C
Rozdíl teploty stěny dutiny - J [%]	15,05	%
Rozdíl teploty stěny dutiny - J [°C]	7,03	°C

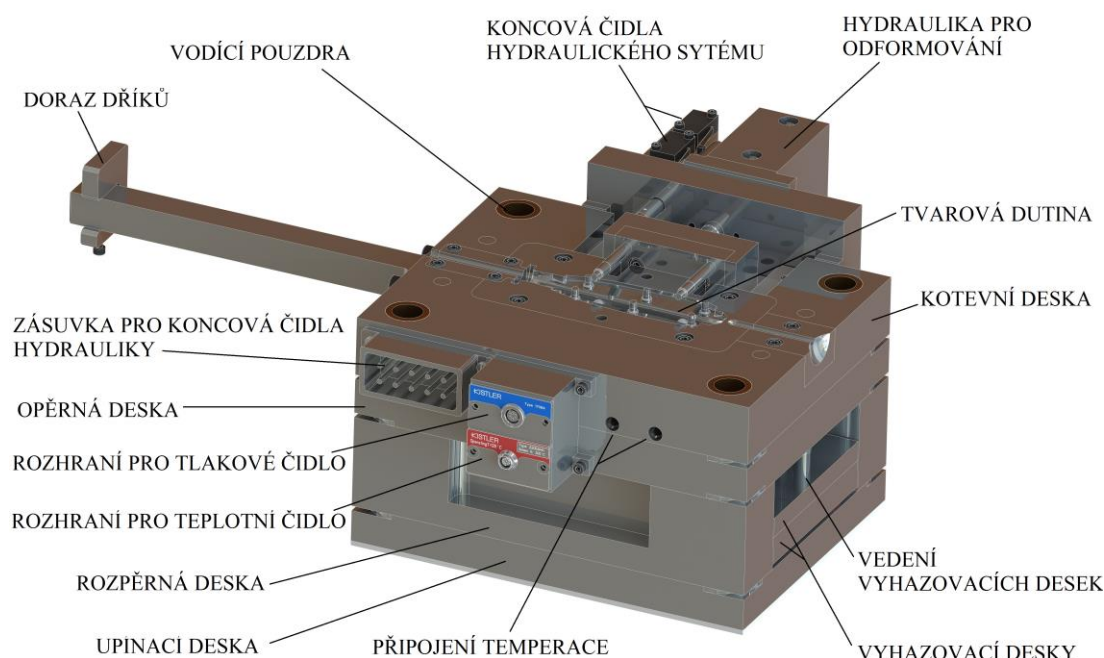
Důležitými parametry pro výpočet je teplota taveniny a vyhazovací teplota výstřiku včetně předpokládané doby cyklu. Tyto parametry (veličiny) v závislosti na typu polymeru nejvýznamněji určují množství tepla, které bude třeba ze soustavy odejmout. Teplo ze soustavy je odvedeno především vodou. Proto jsou důležitými zadávacími parametry např. průměr a geometrie temperačních kanálů, teplota vody a její průtok.

Z výsledků analytického výpočtu plyne následující. Temperačním médiem je během cyklu odvedeno 84,6% tepla z taveniny. Tepelný tok je roven 0,44 KW,



přičemž chladicí výkon standardních temperačních jednotek je zhruba desetkrát vyšší. Zbytek připadá na vedení tepla do stroje, konvekci s okolním vzduchem a lze říci, že složka uniklá radiací je téměř zanedbatelná. Rozdíl teploty vody na vstupu a na výstupu odpovídá hodnotě 1,57 °C, což je mírně nad doporučenou teplotou 1 °C. Hodnota Reynoldsova čísla je 21511,07. To znamená, že se příznivě pohybujeme výše, nežli je kritická hodnota přechodu z laminárního do turbulentního proudění ( $Re = 2300$ ), a tím pádem výrazně roste hodnota koeficientu přestupu tepla mezi vodou a stěnou kanálu. Co se týká teplot, z výpočtu plyne, že teplota stěny formy se dá předpokládat o 6,7 °C vyšší než teplota vody a rozdíl nejteplejšího a nejstudenějšího místa formy pak činí 7,03 °C což procentuálně znamená 15,05 %. Tato hodnota je o cca 50 % vyšší než doporučená mez pro semikristalické materiály. Matematicko-fyzikální model ovšem nezohledňuje křížový tvar výstřiku, takže lze předpokládat příznivější hodnotu v reálu.

Tvarové části jsem umístil do kotevních desek a formu opatřil dalšími normalizovanými deskami a středícími, vodícími, dosedovými a vyhazovacími elementy od firmy Hasco Austria Ges.m.b.H. Na obrázku 40 je vyobrazen model spodní části formy s popisky základních částí formy. Výkres sestavy formy včetně soupisky dílů je v příloze 2.



**Obr. 40** Model spodní části formy

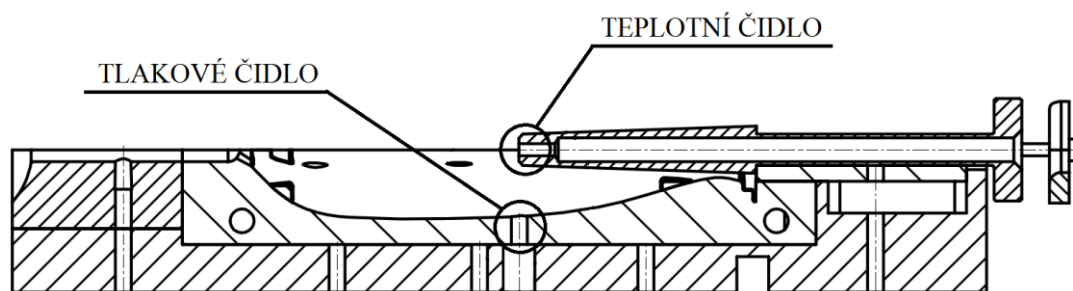
Komponenty rámu nejsou tak výrazně namáhány teplem a tlakem jako komponenty tvarových částí. Jako materiál kotevních desek byla volena ocel ČSN

19 520 (1.2312), tj. zušlechťená nástrojová ocel s pevností  $R_m = 950$  MPa. Ostatní části rámu jsou vyrobeny z oceli ČSN 19083 (1.1730), což je nástrojová uhlíková ocel s pevností 650 MPa dodávaná v žíhaném stavu. Vyhazovače jsou z oceli ČSN 19 421 (1.2210) – chrom-vanadové nástrojové oceli s dobrou houževnatostí. Vodicí elementy jsou vyrobeny z oceli ČSN 14 220 (1.7131) – ušlechtilé cementované konstrukční oceli legované Mn a Cr. Ocel má dobrou odolnost proti opotřebení a vysokou povrchovou tvrdost při zachování houževnatosti jádra. Vyhazovací, středící a vodicí komponenty jsou vždy v uložení zajišťující zaručenou minimální vůli H7/g6 nebo H7/f6. [46, 47, 48, 49, 50]

Do rámu jsem integroval systém dorazu ocelových dříků, který zabraňuje posuvu dříků vlivem tlaku taveniny směrem ven z formy. Dále jsem rám vybavil hydraulickým válcem pro pohyb bočních jader, koncovými čidly hydrauliky a rozhraním pro teplotní a tlakové čidlo.

Pro měření průběhu tlaku v dutině formy jsem zvolil tlakové čidlo od společnosti Kistler, které jsem umístil do prostoru vložky tak, aby ústilo do prostoru dutiny formy v místě blízkém hybridnímu spoji. Typ čidla 6157 BA a průměr 4 mm. Formu jsem dále vybavil konektorem pro připojení čidel – typ 1708A. Pro měření teplot jsem vyvinul a zkonstruoval speciální přípravek pro fixaci drátového termočlánku typu K (GES900), který jinak slouží v praxi k měření teploty taveniny po odstříknutí z trysky. Tento přípravek zajišťuje zaploštění funkční části drátového termočlánku přímo do středu dutiny formy, a tím měření teploty taveniny efektivněji než při použití kombinovaného čidla. Výhodou je kontakt vyloženého termočlánku s taveninou uvnitř kavity, nikoliv na její stěně. Na toto řešení byl uplatněn užitečný vzor č. 27359. Výkresová dokumentace k měřicímu přípravku je v příloze 3 a 4.

Na obrázku 41 je znázorněno místo měření tlaku a teploty. Tlakové čidlo ústí do dutiny formy dírou vyvrtanou do tvarové dutiny a teplotní čidlo je přivedeno dírou v přípravku. Vlastní termočlánek včetně přípravku je zobrazen na obrázku 42. Přípravek je zakládán do formy ručně namísto dříku šroubováku. Fixaci v axiálním směru zajišťuje osazení přípravku a fixaci v radiálním směru zajišťuje uložení do zakládací vložky pro dřík.

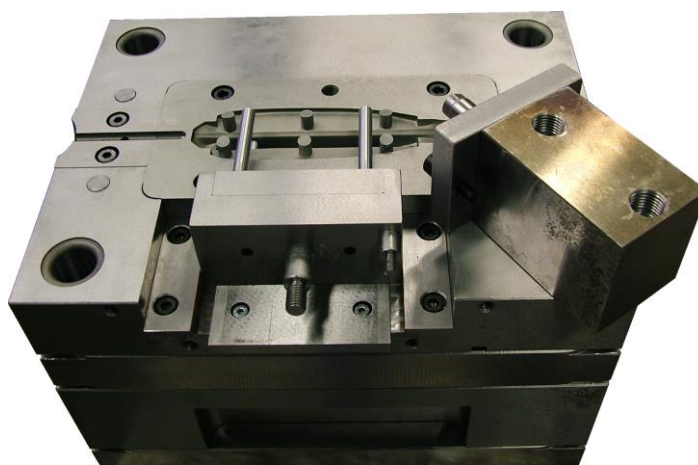


*Obr. 41 Schéma vložky a přípravku pro měření*



*Obr. 42 Fotografie měřícího přípravku včetně senzoru*

Po konstrukci nástroje a přípravku jsem vytvořil obráběcí programy pro všechny součásti a následovala výroba, konečná montáž a dolícování (obr. 43).



*Obr. 43 Montáž formy*

### 3.5 Parametry procesu

Během prvního vzorkování nově vyrobené formy je nutné zajistit optimální zaplnění dutiny formy plastem během fáze vstřiku a dostatečnou kompenzaci smrštění plastu správným nastavením výše a délky dotlaku. K určení správného okamžiku, kdy ukončit fázi vstřiku, je nutné nastavit tzv. bod přepnutí. Tento bod se v našem případě nastavil pomocí „dráhy šneku“, tedy bodu, určeném na základě aktuální pozice šneku. Dráha šneku je odečítána v mm, nebo ji lze také určit přepočtem na  $\text{cm}^3$  objemu taveniny před čelem šneku. Toto je praktičtější způsob vzhledem k tomu, že zohledňuje průměr šneku a více vypovídá o množství taveniny, která byla během fáze plnění dutiny formy vstříknuta. K určení optimální velikosti dávky a bodu přepnutí poslouží plnicí analýza, během které se po přiměřených krocích posouvá bod přepnutí směrem k nule při konstantní velikosti dávky a bez použití dotlaku. Vizualně se pak kontroluje, do jaké míry je dutina zaplněna a jaká je hodnota maximálního vstřikovacího tlaku. Na konci analýzy by měl být díl zcela, nebo téměř doplněn. Díl vstřikovaný bez dotlaku by měl mít zhruba 95% - 97% hmotnosti dílu finálního. Na obrázku 44 je znázorněna plnicí analýza pro různé časy plnění. Objem dávky bez dekomprese byl nastaven na  $50 \text{ cm}^3$ . Tabulka 7 ukazuje nárůst hmotnosti vstřikovaného plastu v závislosti na posunutí bodu přepnutí.

Pokud je díl naplněn, je třeba určit správnou velikost a délku dotlaku. Velikost dotlaku je většinou doporučena dodavatelem granulátu, eventuálně se uvažuje 60 až 80% hodnoty maximálního vstřikovacího tlaku. Doba dotlaku se určí postupným přidáváním jejího trvání až k hranici, kdy s přibývajícím časem neroste hmotnost dílu. Tabulka 7 ukazuje závislost hmotnosti výstřiku na čase dotlaku.

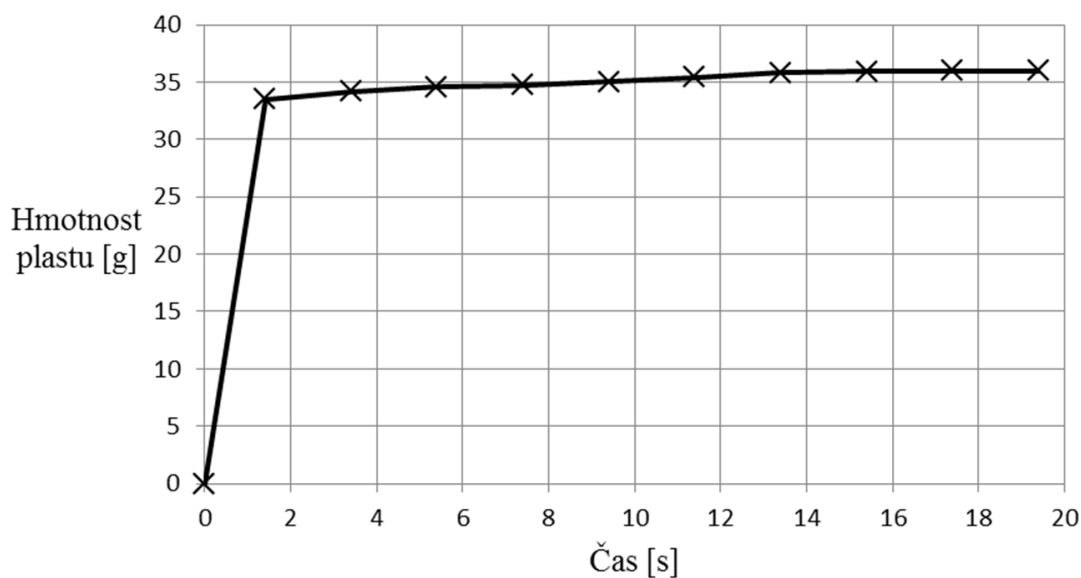
**Tab. 7** Přírůstek hmotnosti v závislosti na bodu přepnutí a délce dotlaku

Bod přepnutí	Hmotnost plastu	Čas dotlaku	Hmotnost plastu
25	20,82	2	34,21
21	24,29	4	34,57
17	27,93	6	34,77
13	30,79	8	35,05
9	33,53	10	35,44
		12	35,82
		14	35,94
		16	35,98
		18	35,98

Plnění i dotlak ve smyslu nárůstu hmotnosti dílu s časem zobrazuje graf v obrázku 45.



*Obr. 44 Plnění analýza*



*Obr. 45 Průběh hmotnosti plastu v čase (plnění, dotlak)*

Z grafu vyplývá, že optimální doba dotlaku je 16 s. Delší dotlak již není potřebný, protože nedochází k nárůstu hmotnosti dílu. Vtokové ústí, případně jiná část vtokové soustavy je již zatuhlá. Optimální délka dotlaku je tedy stanovena na 16 s. Pro účely experimentu byly zvoleny tři různé typy materiálů, finální nastavené technologické parametry pro všechny zvolené plasty obsahuje tabulka číslo 8. Parametry pro komponent SOFT byly nastaveny podobně a neuvádím je zde, protože teplota taveniny i tlaky a rychlosti byly voleny stejně jako pro komponent HARD PP.

Tab. 8 Nastavené vstřikovací parametry

VSTŘIKOVACÍ PARAMETRY		MATERIÁL			Jednotka
		PP	POM	PA6	
TEPLOTY VSTŘIKOVACÍHO VÁLCE	Teplota u násypky	40	40	40	°C
	Teplota vstupní zóny	220	190	230	°C
	Teplota zóna 1	225	195	235	°C
	Teplota zóna 2	225	200	240	°C
	Teplota zóna 3	230	205	245	°C
	Teplota u trysky	230	210	245	°C
TEMPEROVÁNÍ FORMY	Horní polovina	40	70	60	°C
	Spodní polovina	40	70	60	°C
DÁVKOVÁNÍ	Objem dávky	50			cm <sup>3</sup>
	Obvodová rychlost	20			m/min
	Protitlak	50			bar
	Dekompresní zdvih	5			cm <sup>3</sup>
VSTŘIK	Vstřikovací rychlost	30			cm <sup>3</sup> /s
	Max. vstřikovací tlak	954			bar
	Bod přepnutí	9			cm <sup>3</sup>
	Čas plnění	1,35			s
DOTLAK	1. stupeň dotlaku	650 - 550			bar
	Čas 1. stupně	15			s
	2. stupeň dotlaku	550 - 150			bar
	Čas 2. stupně	1			bar
	Celkový čas dotlaku	16			s
	Mat. polštář	5,49			cm <sup>3</sup>
CHLAZENÍ	Doba chlazení	48			s
CYKLUS	Délka cyklu (bez manipulačního času)	49,35			s

Na obrázku 46 je fotografie finálního výstřiku složeného z dříku, komponentu HARD a SOFT.





*Obr. 46 První vzorkování*

### 3.6 Analytické výpočty

Jedním z cílů této práce je analytický výpočet tlaků a teplot během vstřikování se záliskem, které budou následně ověřeny simulací vstřikovacího procesu a finálně měřením skutečného procesu. Cílem je ověření, zda se dají takové vztahy vůbec použít, a do jaké míry se shodují s realitou. V části věnované volbě vstřikovacího stroje byla již spočítána uzavírací síla ze vstřikovacího tlaku a průmětu dílu do dělicí roviny a v části věnované návrhu formy byly uvedeny výsledky tepelně-teplotních poměrů v rámci návrhu temperační soustavy. V následujících podkapitolách bude vypočtena pevnost hybridního spoje a tlak v místě hybridního spoje na mezifázovém rozhraní. Vzhledem k nutnému zjednodušení matematicko-fyzikálního modelu výstřiku pro tyto výpočty je vůči výsledkům simulace vstřikovacího procesu a samozřejmě přímému měření předpokládána odchylka. Jak velká bude, ukáží následující stránky.

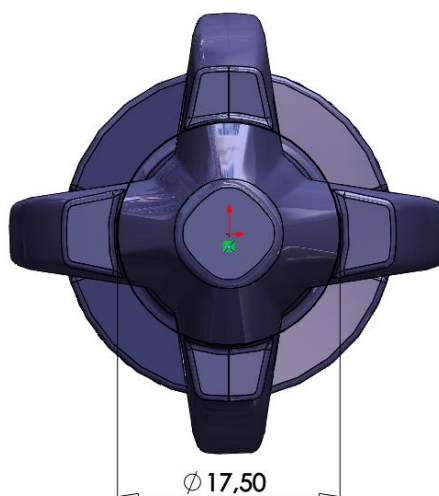
### 3.6.1 Výpočet pevnosti hybridního spoje

Pro výpočet pevnosti spoje mezi plastem a kovem na mezifázovém rozhraní byly použity vztahy z kapitoly 2.4 Originální ocelové dřívky jsou v části, která je zastrčíklá plastem, opatřeny křídélky. Na kruhových tyčích, které byly použity pro testy, však žádná křídélka nejsou, aby bylo možné teoretický výpočet aplikovat.

Tabulka 9 ukazuje všechny veličiny potřebné pro výpočet síly nutné pro vytažení dřívku z těla šroubováku a výslednou hodnotu vypočtené axiální síly. [51, 52] Výpočet jsem provedl pro tři plasty (PP, POM, PA6). Předpokládaný přesah spoje jsem spočítal pomocí lineárního smrštění, které určuje výsledný vnitřní průměr plastu  $D_2$  (teoretická hodnota v případě nepřítomnosti dřívku). Délka spoje je dána hloubkou, ve které je dřívík zapuštěn v plastu (voleno 45 mm). Hodnoty axiální síly jsou tedy přímo závislé na velikosti smrštění, modulu pružnosti  $E$  plastu, koeficientu tření  $f$  a délce spoje. Axiální síla klesá s rostoucím bezrozměrným koeficientem spoje  $C$  (dáno tloušťkou plastu okolo kovového zálistku – viz obrázek 47) a s rostoucí Poissonovou konstantou (materiálová konstanta). Pro ukázkou uvádím výpočet pro PP:

$$C = \frac{8^2 + 17,5^2}{17,5^2 - 8^2} = \underline{\underline{1,53}}$$

$$F_a = \pi \cdot 45 \cdot \frac{(8 - 7,888) \cdot 950}{1,53 + 0,4} \cdot 0,26 = \underline{\underline{2026N}}$$



*Obr. 47 Určení vnějšího průměru plastu*



**Tab. 9** Vypočtená axiální síla hybridního spoje

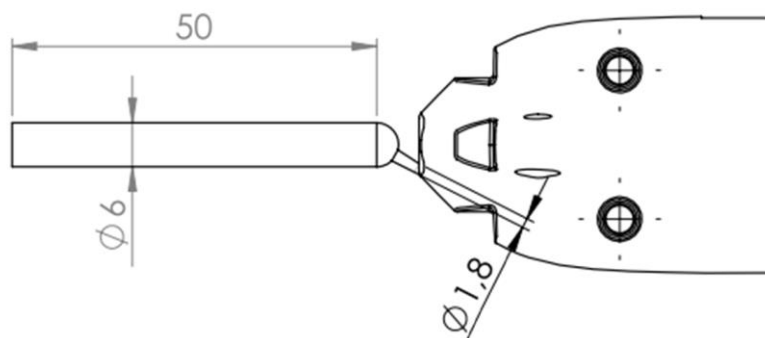
PLAST	E [MPa]	SMRŠTĚNÍ [%]	$\mu$ [-]	f [-]	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>2</sub> [mm]	DĚLKA SPOJE [mm]	PRŮMĚR PLASTU [mm]	C [-]	AXIÁLNÍ SÍLA [N]
PP	950	1,4	0,4	0,26	8	7,888	45	17,5	1,53	2026
POM	2900	1,8	0,35	0,2	8	7,856				6286
PA6	1500	0,8	0,39	0,22	8	7,936				1556

Nejvyšší axiální síla vytažení dřívku je očekávána u materiálu POM, který má nejvyšší smrštění a nejvyšší modul pružnosti. Nejnížší pak u materiálu PA6, který má nejmenší smrštění a proti POM relativně nízký modul pružnosti.

### 3.6.2 Výpočet tlaku taveniny v místě hybridního spoje

Tlak taveniny v místě hybridního spoje je jedním z určujících parametrů pro vlastnosti hybridního spoje. Výpočet tlaku lze provést jako rozdíl tlaku taveniny před čelem šneku a tlakové ztráty vzniklé důsledkem smykových sil během průtoku taveniny vtokovou soustavou a dutinou formy. Výpočet jsem provedl pro PP.

Vtok jsem volil kruhový s tunelovým ústím zakončeným do spodní poloviny formy (k odformování a odstřížení vtoku dojde při pohybu vyhazovačů vpřed). Konstrukci vtoku zachycuje obrázek 48.



**Obr. 48** Tunelový vtok

PP patří mezi středně viskózní plasty a pro objem komponentu HARD lze předpokládat dobu plnění 1 s. [42] Jelikož se jedná o tlustostěnný díl, volím ze zkušenosti o jednu třetinu vyšší hodnotu doby plnění, tj. 1.33 s, což odpovídá rychlosti plnění 30,15 cm<sup>3</sup>/s. Ze vztahu 6 pro výpočet smykové rychlosti plyne, že pro průměr 6 mm plnicího kanálu bude hodnota smykové rychlosti rovna:

$$\underline{D_1} = \frac{4 \cdot 30,15}{\pi \cdot 0,3^3} = \underline{\underline{1421,78 \text{ s}^{-1}}}$$

Smyková rychlost v ústí vtoku je pak rovna:

$$\underline{D}_2 = \frac{4 \cdot 30,15}{\pi \cdot 0,09^3} = \underline{\underline{52658,67 \text{ s}^{-1}}}$$

Kritická hodnota smykové rychlosti pro PP je  $100\,000 \text{ s}^{-1}$ . Ve vtokovém kanálu je hodnota smykové rychlosti výrazně menší. V nejužším místě (ve vtokovém ústí) se zvyšuje na  $52\,658,67 \text{ s}^{-1}$ . Tato hodnota je stále pod kritickou hodnotou. Tím pádem by během plnění dutiny formy nemělo docházet k problémům s degradací materiálu nebo jeho přehřívání vlivem poddimenzování vtoku.

Zbývá spočítat hodnotu smykové rychlosti v místě trysky stroje, která má průměr 4 mm na délce 20 mm.

$$\underline{D}_3 = \frac{4 \cdot 30,15}{\pi \cdot 0,2^3} = \underline{\underline{4798,52 \text{ s}^{-1}}}$$

Pro výpočet tlakových ztrát je třeba určit hodnoty smykového napětí. To lze určit například z tokové křivky, která je dostupná v parametrech polymerů v databázi programu Mold-flow. Pro jednotlivé hodnoty smykové rychlosti jsem odečetl následující hodnoty smykového napětí:

$$\tau_1 = 71\,248 \text{ Pa}$$

$$\tau_2 = 161\,650 \text{ Pa}$$

$$\tau_3 = 80\,270 \text{ Pa}$$

Tlakové ztráty ve vtoku a trysce stroje jsou po dosažení do vztahu 7 rovny:

$$\underline{\underline{\Sigma \Delta p_{ik}}} = 2 \cdot 71248 \cdot \frac{50}{3} + 2 \cdot 161650 \cdot \frac{2,5}{0,9} + 2 \cdot 80270 \cdot \frac{20}{2} = 4075688 \text{ Pa} = \underline{\underline{4,1 \text{ MPa}}}$$

Dalším postupem jsem vypočítal tlakovou ztrátu až k místu hybridního spoje a zároveň k poloze tlakového čidla pro následné porovnání teoretického předpokladu s výsledky mold-flow analýzy a skutečně naměřené hodnoty. Vzdálenost čidla od vtoku je 67,4 mm. Pro účely výpočtu použijeme zjednodušený model dutiny formy pro komponent HARD ve tvaru kříže viz obrázek 49.

Smyková rychlost v dutině vtoku se tedy spočítá ze vztahu 8:

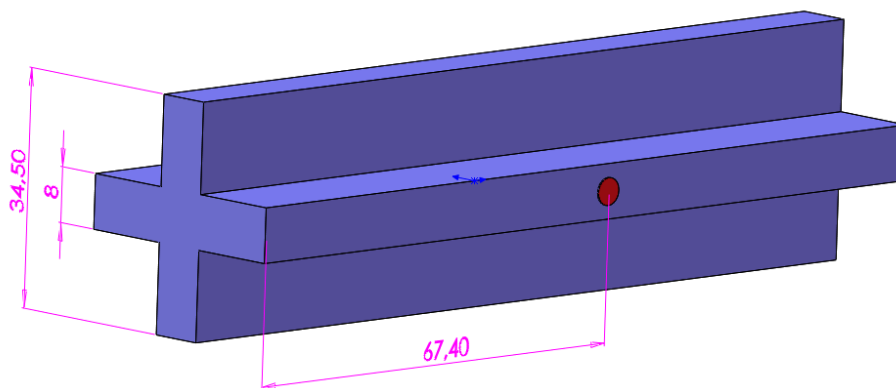
$$\underline{D}_4 = \frac{6 \cdot 30,15}{6,1 \cdot 0,8^2} = \underline{\underline{46 \text{ s}^{-1}}}$$

Z grafu tokových křivek:

$$\tau_4 = 16\,330 \text{ Pa}$$

Celková tlaková ztráta v dutině formy k místu měření čidlem je rovna:

$$\underline{\Delta p_{io}} = 2 \cdot 16330 \cdot \frac{67,4}{8} = 275160,5 \text{ Pa} = \underline{\underline{0,28 \text{ MPa}}}$$



**Obr. 49** Model pro výpočet tlakových ztrát v dutině formy

Předpoklad celkové tlakové ztráty, tj. rozdílu mezi tlakem specifickým (před čelem šneku) a tlakem naměřeným v místě čidla je:

$$\underline{\Delta p_{celk}} = \Sigma \Delta p_{ik} + \Delta p_{io} = \underline{\underline{4,38 \text{ MPa}}}$$

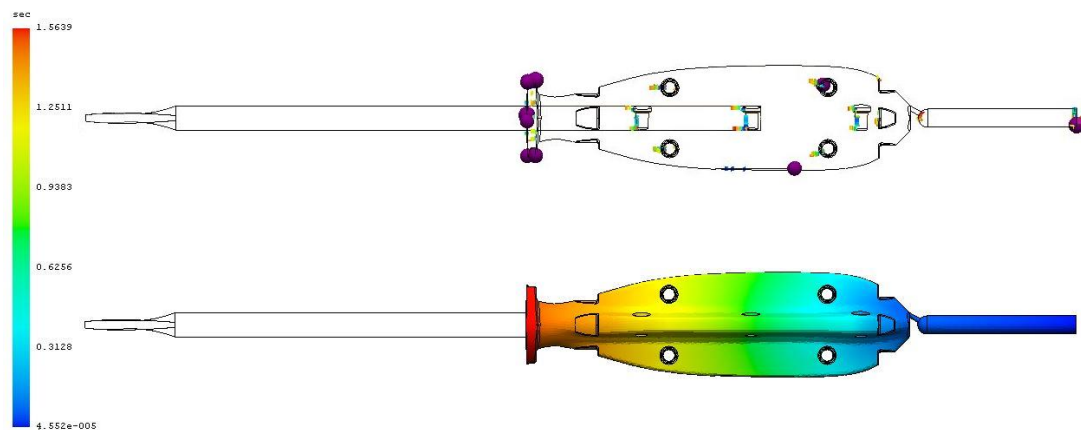
Tato hodnota odpovídá 43,8 bar, což je v porovnání s díly s tenkými stěnami a složitější vtokovou soustavou velmi nízká hodnota.

### 3.7 Simulace vstřikovacího procesu (Mold-flow analýza)

Simulaci vstřikovacího procesu dílu v navržené formě jsem provedl pomocí programů SolidWorks Plastics a Autodesk Simulation MoldFlow. Tyto programy umožnily provést výpočet a grafické zobrazení průběhů zejména plnění, teplot a tlaků. Velmi důležitým výstupem pro výzkum hybridního spoje byly průběhy teplot taveniny a zálisku v závislosti na čase. Na základě těchto výsledků se výrazně zpřesnila představa o pochodech doprovázejících vstřikování se záliskem.

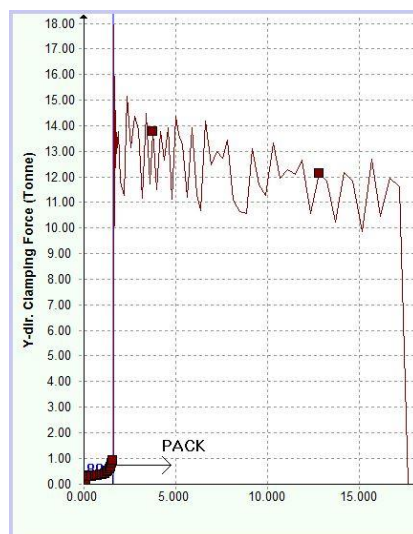
Vstupními parametry pro analýzy byla volba materiálu pro vstřikování PP a materiál dřívku – automatová ocel. Dále teplota taveniny a formy, vstřikovací čas, vstřikovací tlak a dotlak, jejich čas a velikost. Plnicí analýza je znázorněna na obrázku 50. Je zřejmé, že díl bude plněn postupně směrem od vtoku bez jakýchkoliv problémů. Při maximálním vstřikovacím tlaku 95,4 MPa vychází ze simulace vstřikovací čas 1,57 s. To je hodnota velmi blízká výpočtovému předpokladu i reálné

hodnotě během vstřikování. V horní části obrázku jsou naznačeny studené spoje okolo kruhových otvorů, které vznikají jako důsledek obtékání těchto otvorů taveninou. Studené spoje nejsou nijak výrazné. Dále jsou fialovými symboly naznačena místa, kde lze předpokládat uzavírání vzduchu. Tato jsou lokalizována zejména v místech, kam tavenina doteče naposledy. V těchto místech je forma opatřena výměnnými vložkami a odvzdušněním.



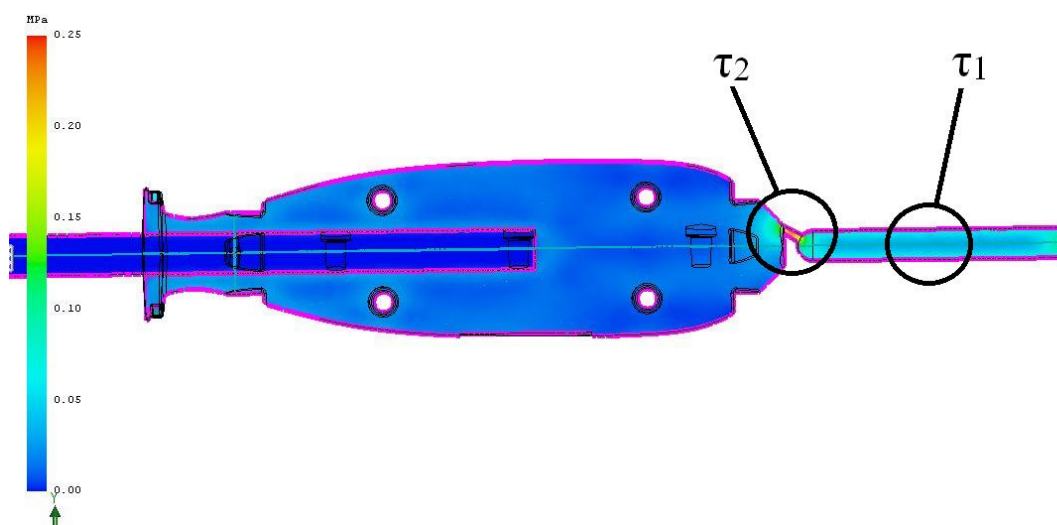
**Obr. 50** *Mold-flow - analýza plnění*

Dalším zajímavým výsledkem simulace je průběh potřebné uzavírací síly, odvozené od tlaku taveniny v dutině formy. Její analyticky předem vypočtená hodnota byla 181 KN. Tato hodnota byla počítána pro „tabulkový“ vnitřní vstřikovací tlak 50 MPa, simulace pracuje s hodnotami tlaku, které vyplývají ze složitých výpočtů v každém uzlu výpočtové sítě. Z grafu na obrázku 51, který je výstupem ze simulace vychází maximální hodnota ve špičce 18 tun (177 kN) – dobrá shoda výsledků.



**Obr. 51** *Mold-flow – uzavírací síla*

Součástí analytických výpočtů byl také výpočet smykových rychlostí, smykového napětí a tlakových ztrát ve vtoku, vtokovém ústí a výstřiku až k místu hybridního spoje. Toto bylo ověřeno i pomocí mold-flow analýzy. Výstupem je obrázek 52. Maximální hodnota smykového napětí je v místě ústí vtoku, kde je dosaženo i maximální smykové rychlosti. Hodnota maximálního smykového napětí se zde podle výsledků mold-flow analýzy pohybuje do maxima  $\tau_2 = 0,25$  MPa, tedy 250 000 Pa. Výpočtem byla určena hodnota  $\tau_2 = 161\ 650$  Pa. V případě mold-flow se však jedná o maximální hodnotu smykového napětí v místě ústí vtoku, nikoliv průměrnou napříč. V případě výsledků výpočtu smykového napětí ve vtokovém kanálu o průměru 6 mm byla výsledkem hodnota  $\tau_1 = 71\ 248$  Pa. V případě výsledků mold-flow analýzy je zřetelně vidět, že hodnota smykového napětí se napříč kanálem mění. Dle teoretického předpokladu je u středu kanálu nejnižší a na jeho okrajích nejvyšší. Hodnota se pohybuje v rozmezí od 30 000 Pa až po 75 000 Pa. Můžeme tedy konstatovat, že vypočtená hodnota spadá do intervalu, který prokázala mold-flow analýza, a dosahuje spíše vyšší hodnoty.

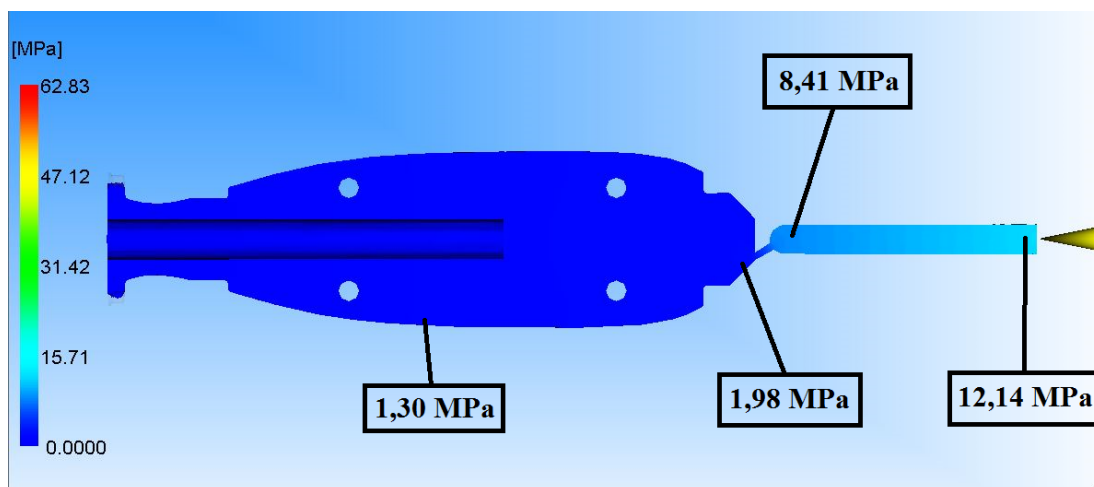


*Obr. 52 Mold-flow – smykové napětí*

Další oblastí, na kterou se zaměřoval analytický výpočet bylo určení tlakových ztrát taveniny v místě hybridního spoje během fáze vstřiku vlivem geometrie vtokové soustavy a velikosti smykového napětí. Zde vyšla hodnota tlakových ztrát  $\Delta p_{\text{celk}} = 4,38$  MPa.

Na obrázku 53 je zobrazen výstup z mold-flow analýzy - stav tlaků ve vtokové soustavě a v dutině formy na konci plnění. Jsou zde uvedeny tlaky ve vtokové

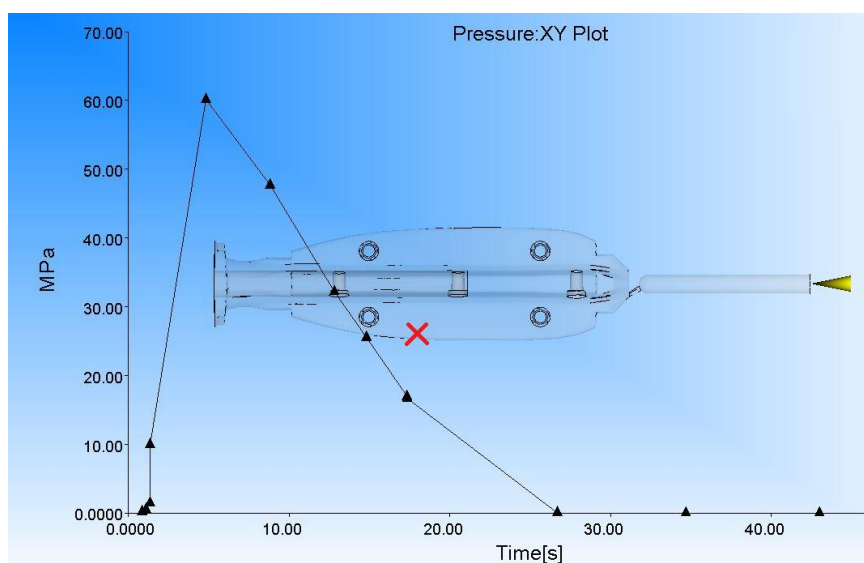
soustavě na začátku plnicího kanálu, na jeho konci, těsně za ústím vtoku a v předpokládaném místě budoucího měření tlaku během experimentu.



*Obr. 53 Mold-flow – tlaky na konci plnění*

Celková tlaková ztráta na konci plnění mezi počátkem vtoku a místem měření tlaku dle mold-flow analýzy činí 10,84 MPa. Zde je tedy vypočítaná hodnota s hodnotou z mold-flow analýzy v rozporu. Fáze plnění dutiny formy je velmi krátká a z tohoto důvodu mohou matematicko-fyzikální modely velmi problematicky zajistit správný výsledek.

Obrázek 54 je grafem závislosti tlaku na čase v místě tlakového čidla (opět výstup ze simulace vstřikovacího procesu). Maximální tlak je zde 62 MPa, přičemž maxima nabývá v čase 5,5 s.

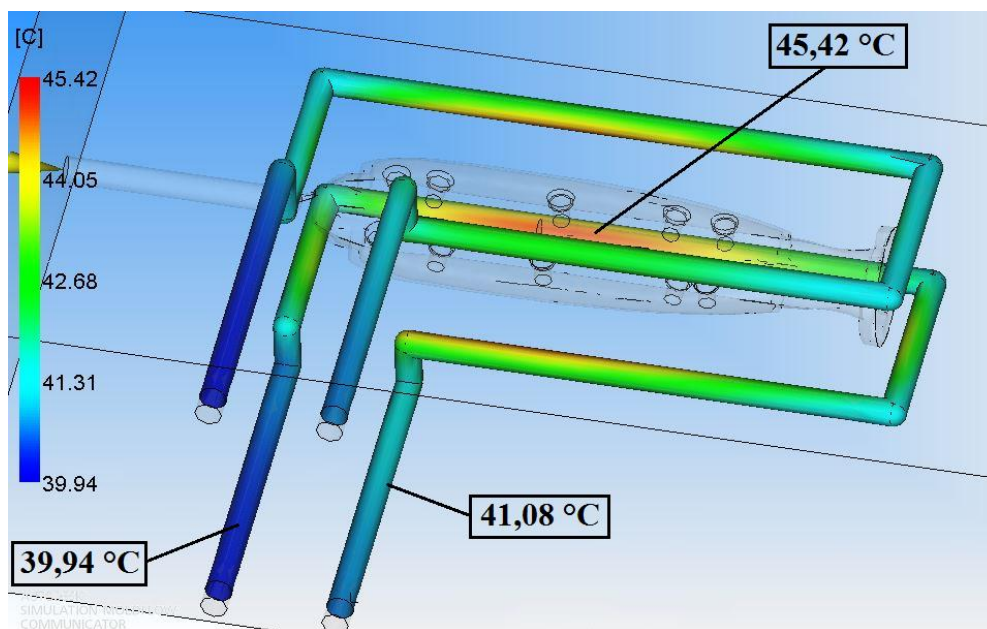


*Obr. 54 Mold-flow – průběh tlaku v místě tlakového čidla*



Pomocí programu Autodesk Simulation MoldFlow byly nasimulovány i teplotní poměry uvnitř dutiny a ve formě. Doplňujícím vstupem byla geometrie temperačních kanálů a teplota temperačního média. Program je schopen vypočítat a znázornit průběh teplot tuhnoucí taveniny, stěny formy a stěny temperačních kanálů. Některé zajímavé výsledky si ukážeme níže.

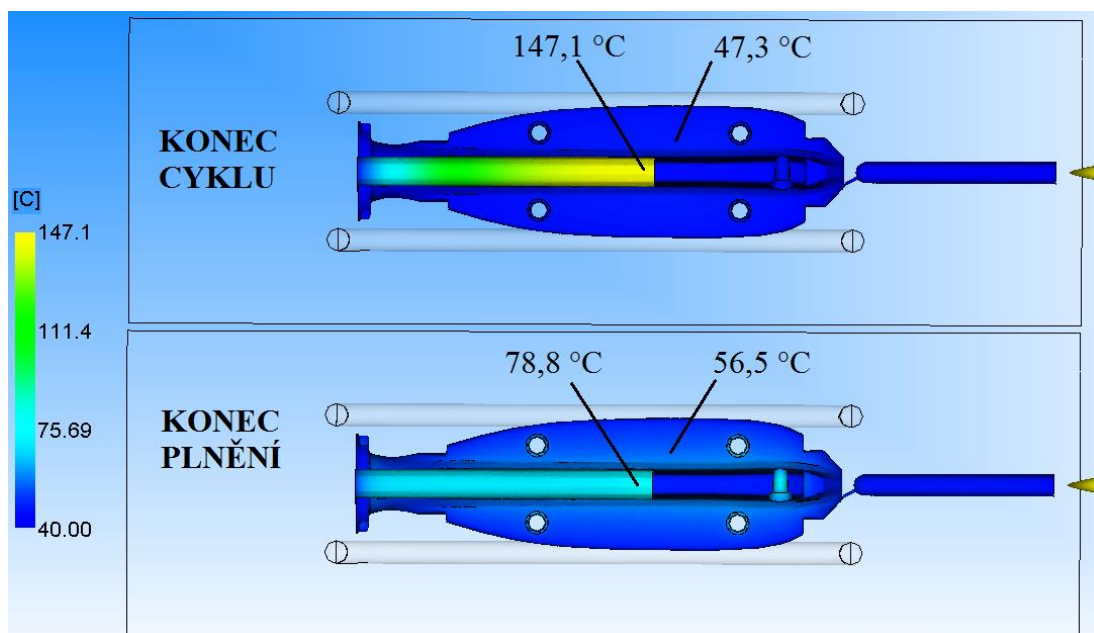
Součástí analytického výpočtu bylo stanovení teplot stěn temperačních kanálů a stěny dutiny formy. Na základě vstupních hodnot jako např. průměru kanálu, teploty temperačního média a teploty taveniny byl spočítán nutný průtok temperačního média, rozdíl teploty vody na vstupu a na výstupu, teplota stěny formy a teplota stěny temperačního kanálu. Na obrázku 55 je znázorněn výstup z mold-flow analýzy s předpokládaným rozložením teploty stěny temperačního kanálu v čase  $t = 35,6$  s, kdy je stěna kanálu nejteplejší. Maximální teplota stěny temperačního kanálu je  $45,42$  °C, ve výpočtové části vyšlo  $41,54$  °C. Jednalo se však o idealizovaný případ (není řešena závislost na čase a přesná geometrie výstřiku a temperačních kanálů). Obrázek 55 zobrazuje přímo místo, kde je přestup nejintenzivnější, v čase, kdy je kanál nejteplejší. Průměrná hodnota by byla nižší, blízká výpočtovému předpokladu.



**Obr. 55** Mold-flow – teplota stěny temperačního kanálu v čase  $t = 35,6$  s

Na obrázku 56 je zachycena teplota stěny formy a teplota stěny ocelového zálisku ve dvou okamžicích. Na konci plnění a na konci cyklu. Na konci plnění, tedy v okamžiku, kdy je dutina formy zcela zaplněna. Forma i se záliskem byla

namodelována a programem uvažována jako jeden monolitní blok. Výsledek predikuje vysoký nárůst teploty zálisku vlivem přestupu tepla z taveniny do zálisku už na konci plnění (1,63 s), a to 78,8 °C. Nejvyšší teploty dřík dosahuje na jeho konci uvnitř dutiny. Na konci cyklu je pak hodnota teploty v tomto místě rovna 147,1 °C. Při nastavení teploty temperace na 40 °C se maximální teplota stěny formy na konci plnění vyšplhá na 56,5 °C, na konci cyklu je teplota stěny formy nižší – 47,3 °C. Porovnáme-li teplotu zálisku s teplotou formy během cyklu, je zřejmé, že forma vykazuje mnohem stabilnější teplotu. Toto je dáno jednak temperací formy a také tím, že v případě zálisku je velmi obtížné sdílení tepla kvůli uzavření dříku uvnitř taveniny ve velké hloubce. Obecně lze říci, že tavenina je v případě styku se stěnou formy vystavena stabilní teplotě, zatímco v případě styku s masivním kovovým záliskem dochází ke styku s chladným kovem, který se během cyklu ohřívá na teplotu blízkou teplotě plastu. Za zmínku stojí i porovnání teploty stěny formy vypočítané – ta měla hodnotu 46,7 °C. Výsledek s mold-flow je těžko srovnatelný, neboť během cyklu se různé části stěny formy ohřívají a ochlazují různou rychlostí, a to ještě v závislosti na čase. Lze tedy pouze říci, že vypočítaná hodnota je velmi blízká teplotě stěny formy na konci cyklu podle mold-flow analýzy.

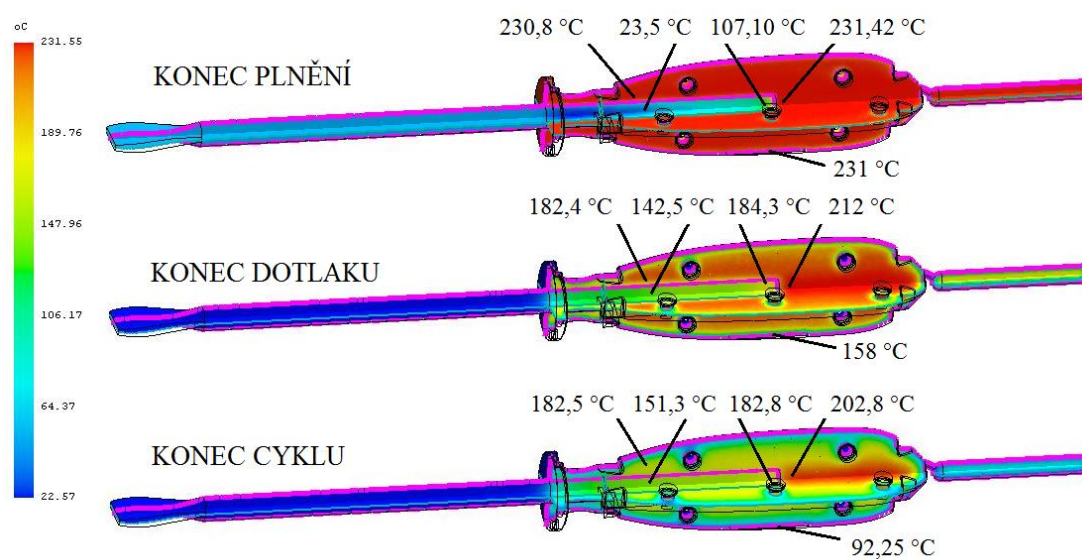


*Obr. 56 Mold-flow – teplota stěny formy a stěny zálisku*

Pro úplnost a porovnání výsledků uvádím ještě obrázek 57, který byl výstupem z analýzy v programu Solidworks Plastics. Zde je zachycen vývoj teploty



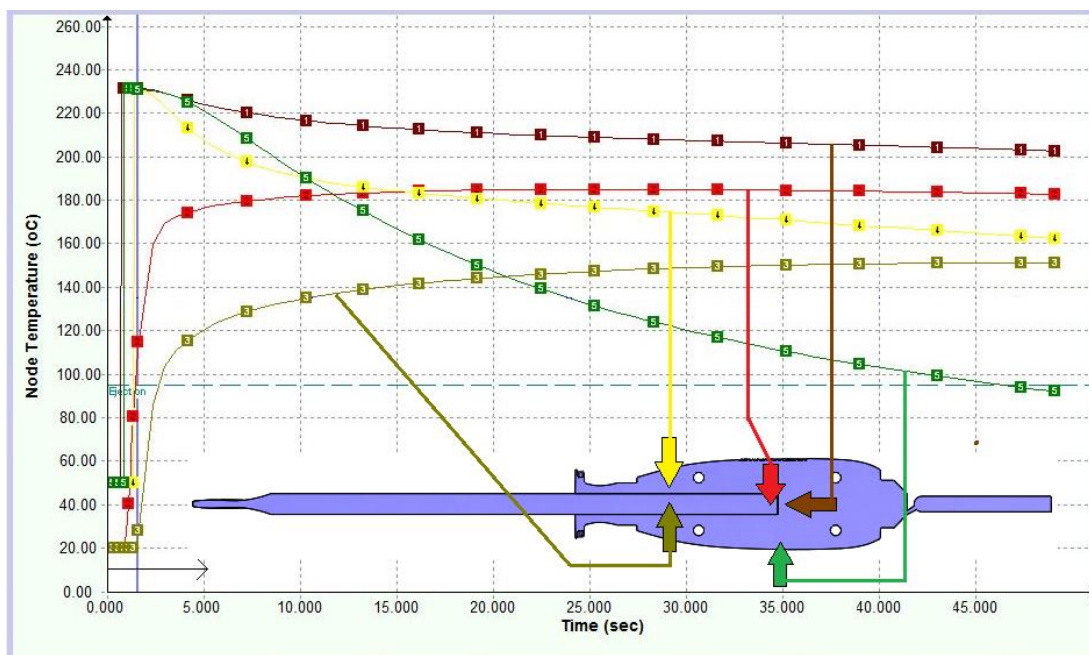
plastu a teploty kovového zálisku. Tentokrát byl již zálisek v programu identifikován jako skutečný vkládaný kus (insert) z ocelového materiálu s počáteční teplotou 20 °C. Výsledek analýzy je zobrazen v řezech, takže jsou viditelná místa od středu dílu až ke stěně formy. Na počátku vstřiku má tedy zálisek teplotu 20 °C, dutina je prázdná a forma je temperovaná na 40 °C. Po vstřiku taveniny se teplota zálisku prudce zvyšuje na 107 °C, což je více než předpokládá předchozí simulace v programu Autodesk MoldFlow Simulation. Na konci dotlaku je teplota zálisku v nejhlubším místě 184,3 °C a na konci cyklu je téměř shodná - 182,8 °C (zde už je rozpor s výsledky předchozí simulace výrazný). V průběhu cyklu se teplota taveniny začíná snižovat směrem od stěn formy, ale vlivem tlustostěnnosti dílu je v místě, kde je lokálně nejvíce materiálu, stále vysoká, a to až do konce cyklu, kdy nabývá hodnoty 202,8 °C. Je tedy jasné, že na konci cyklu v tomto místě tavenina není pod krystalizační teplotou (počátek krystalizace je podle konstant p-v-T diagramu, které počítačová simulace používá, na hranici 160 °C, reálný počátek, jak později vyplyne z analýzy DSC je cca 135 °C).



**Obr. 57** Mold-flow – teplota taveniny a zálisku

Dalším výstupem je grafické znázornění průběhu teplot ve sledovaných místech výstřiku a zálisku (obrázek 58). Tento výstup je logickým předpokladem chování plastu a kovu během vstřikování. Tavenina je vstřikována při teplotě 230 °C, její teplota ještě mírně vzroste vlivem smykového tření, a to zejména v místě vtoku. Teplota zálisku pak roste vlivem tepelné výměny s taveninou, z počátku s velkou

směrnicí, dále mírněji vlivem nižšího teplotního spádu a posléze klesá s klesající teplotou taveniny.



Obr. 58 Mold-flow – průběh teplot během vstřikovacího cyklu

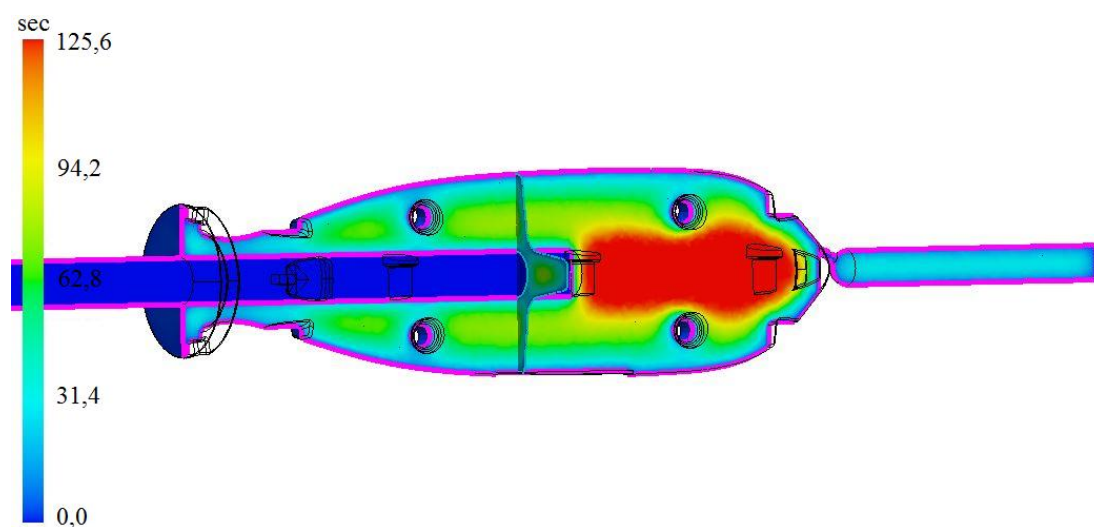
- 1) Teplota taveniny v blízkosti zálisku blíže vtoku.
- 2) Teplota zálisku na jeho okraji v blízkosti vtoku.
- 3) Teplota zálisku dále od vtoku.
- 4) Teplota taveniny v blízkosti zálisku dále od vtoku.
- 5) Teplota taveniny/plastu v místě předpokládaného měření.

Průběhy křivek 1 a 2 zachycují teploty taveniny a zálisku v místě blízkém vtoku, kde je zálisek nejhloběji umístěn v plastu a zároveň výstřik v tomto místě vykazuje v příčném řezu vysokou tlustostěnnost. Tyto faktory mají za důsledek velký nárůst teploty kovového zálisku vlivem špatného odvodu tepla (dlouhá dráha) mimo formu. Dále velmi pozvolný pokles teploty taveniny. Plasty jsou dobrými tepelnými izolanty a během tuhnutí vnější vrstvy plastu dochází k poklesu koeficientu prostupu tepla (tavenina – plast – ocel nástroje – voda).

Průběhy křivek 3 a 4 zachycují teploty tuhnoucí taveniny v místě s následující charakteristikou: místo leží dále od vtoku, místo je vzdáleno 40 mm hluboko v axiálním směru, tloušťka stěny je zde výrazně menší než v předchozím případě. Z těchto důvodů je pokles teploty taveniny v čase výraznější a nárůst teploty zálisku je méně strmý.

Jako poslední je podrobena analýze místo blízké předpokládanému měření tlaku, ležící 3 mm od stěny formy. Zde je již zřejmé, že tavenina bez problémů dosáhne pevného stavu během dotlaku a dále chladne během zbytkové doby chlazení. Křivka má výraznější klesající tendenci.

Výsledky mold-flow analýzy ukazují, že předpokládaná doba chlazení je vzhledem k velké tloušťce stěny dílu vysoká. Po 50 s dojde ke vzniku ztuhlé vrstvy směrem od stěn dutiny formy, ale uvnitř zůstane stále tekuté jádro. V místě hybridního spoje dojde blíže vtoku v první chvíli ke kontaktu horké taveniny se studeným kovem, vytvoří se tenká vrstva ztuhlého materiálu plastu, ale vlivem prudkého ohřátí zálisku dojde s časem opět k nárůstu její teploty. V místě vzdálenějším od vtoku a dále, kde je snadnější tepelná výměna zálisku s okolím a tenčí stěna výstřiku, není tento efekt tak výrazný. Poslední obrázek z mold-flow analýzy ukazuje předpokládanou dobu chlazení. Je nutné si uvědomit, že podélný řez je veden středem dílu = středem žebra. Hodnota v nejkritičtějších místě výstřiku, tedy u paty zálisku, činí 125,6 s (toto by vedlo teoreticky na více než dvouminutový cyklus stroje).



*Obr. 59 Mold-flow – předpokládaná doba chlazení*

### 3.8 Předehřev ocelových zálisků hybridního spoje

Kromě vlivu materiálu na kvalitu hybridního spoje, klade si tato práce za cíl posoudit vliv teploty zálisků. Celkem pro tři druhy materiálu jsem při testech použil tři teploty zálisků dle tabulky 10.

*Tab. 10 Kombinace materiálů a teploty předehřevu zálisku*

Materiál	PP			POM			PA6		
Teplota předehřevu zálisku [°C]	20	50	80	20	50	80	20	50	80

Zálisky jsem předehříval v klimakomoře od společnosti Weiss Umwelttechnik GmbH, typu WK 180/40 a přenášel s minimálním prodlením do vstřikovací formy, kde byly zastříkovány.

### 3.9 Měření stavových veličin v místě hybridního spoje

Pro účely ověření analytických výpočtů a výsledků mold-flow analýzy jsem snímal během vstřikovacího procesu teploty a tlaky taveniny uvnitř dutiny formy v místě co nejbližším hybridnímu spoji. Forma byla osazena tlakovým a teplotním čidlem. Výsledkem výstupu tlakového i teplotního čidla jsou křivky, které popisují stav polymeru uvnitř dutiny formy. Do úplné definice chybí už jen hustota či její převrácená hodnota – měrný objem. Ke zpracování výstupů z teplotního a tlakového čidla jsem použil zařízení COMO Injection typ 2869A. Toto zařízení je schopno číselně a graficky zpracovat signál z čidel a archivovat naměřená data. Na obrázku 60 je fotografie tohoto zařízení.

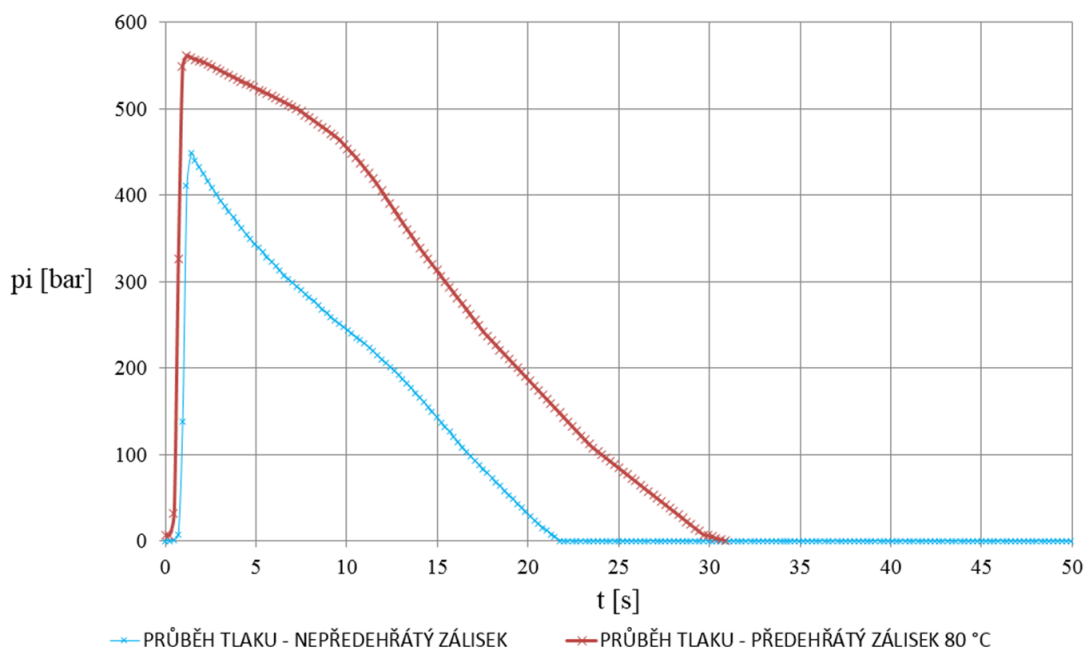


*Obr. 60 Zařízení COMO*

Schéma umístění čidel a typy použitých čidel byly popsány v kapitole 3.4. V této kapitole se budu zabývat výstupy a analyzovat je. Použité procesní parametry odpovídaly tabulce 8 (materiál PP). Měření začalo v momentě vstřiku a bylo ukončeno v momentě otevření formy.

### 3.9.1 Časové průběhy vnitřního tlaku

Tlak jsem měřil v místě blízkém kovovému dříku a v místě blízkém snímání teploty (viz obr. 41). Měření jsem provedl pro dvě teploty zálisků (20 °C a 80 °C), vždy 25 cyklů. Křivky měřených tlaků jsou znázorněny na obrázku 61. Jedná se o průměrnou křivku z 25 nasbíraných průběhů.



**Obr. 61** Průběh měřeného vnitřního tlaku  $p_i$

Modrá křivka znázorňuje průběh vnitřního tlaku v místě hybridního spoje pro případ nepředehřátého zálisku (20 °C) a červená pak průběh vnitřního tlaku pro teplotu předehřevu 80 °C. Rozdíly jsou jak ve velikosti maximální hodnoty vnitřního tlaku, tak v délce jeho působení.

Průměrná maximální hodnota tlaku byla při měření se studeným záliskem 447,9 bar (44,79 MPa). Maximum nastává v čase  $t = 1,43$  s od počátku vstřiku (tento bod odpovídá bodu přepnutí ze vstřikovací fáze na dotlak). Za tímto bodem křivka relativně rychle klesá až do času 21,97 s, kde již nabývá nulové hodnoty. Průměrná

maximální hodnota tlaku při měření s předeřtým záliskem byla 558,9 bar (55,89 MPa) v čase  $t = 1,38$  s (bod přepnutí) a za tímto bodem klesala až do času  $t = 31,1$  s.

Oba průběhy vnitřního tlaku jsou odlišné od průběhu tlaku před čelem šneku. Maximální vstřikovací tlak dosahoval hodnoty 954 bar (95,4 MPa) a dotlak jsem nastavil dle tabulky 8 - 650 bar (65 MPa) až 550 bar (55 MPa) pro prvních 15 s a dále 550 bar až 150 bar (15 MPa) pro čas 1 s. Tlakové čidlo jsem dle standardu a technických možností umístil do stěny žebra dutiny formy. V této oblasti již tedy vlivem tlakových ztrát taveniny a rychlého tuhnutí taveniny v dutině formy působí tlak nižší, účinek dotlaku je vlivem geometrie dílu redukován.

Porovnáme-li výsledek měřených tlakových průběhů s výsledkem mold-flow analýzy, je zde významný rozpor ve velikosti tlaku. Tlaková špička uvnitř dutiny formy dosáhla u simulace 62 MPa, to je o 38 % vyšší hodnota, než byla naměřena pro chladný zálisek. Maximální tlak je také posunutý z hlediska času, kdy nastává. U mold-flow analýzy je to 5,5 s, což je nesmyslná hodnota, maximální tlak nastává u vstřikovacího procesu (pokud není hrubě porušeno použití doporučených tlaků a dotlaků a není chybně nastaven bod přepnutí) velmi blízko bodu přepnutí. Zajímavým zjištěním je porovnání tvaru křivky z analýzy mold-flow (obr. 54) a skutečně změřených křivek (obr. 61). Rychlý nástup, špička a pak lineární pokles za koncový čas působení dotlaku je téměř identický.

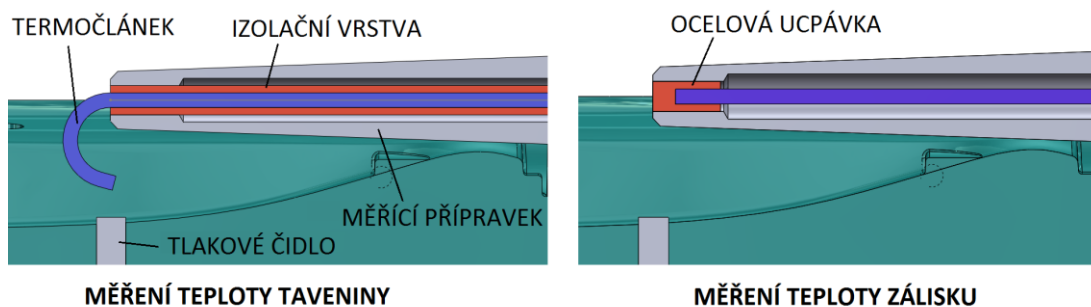
### 3.9.2 Časové průběhy teplot

Při měření teploty taveniny jsem byl nucen upravit polohu termočlánku v dutině formy. Termočlánek, který původně ústí do dutiny formy v místě čela zálisku, jsem více vyložil z přípravku a ohnul ho směrem k tlakovému čidlu blíže stěně formy tak, aby reflektoval hodnotu teploty taveniny ve vzdálenosti 4 mm od umístění tlakového čidla. Dále jsem mezi drát termočlánku a tělo vnitřního průměru měřícího přípravku vložil vrstvu izolačního materiálu pro maximální omezení přestupu tepla z přípravku do termočlánku (viz obrázek 62 vlevo).

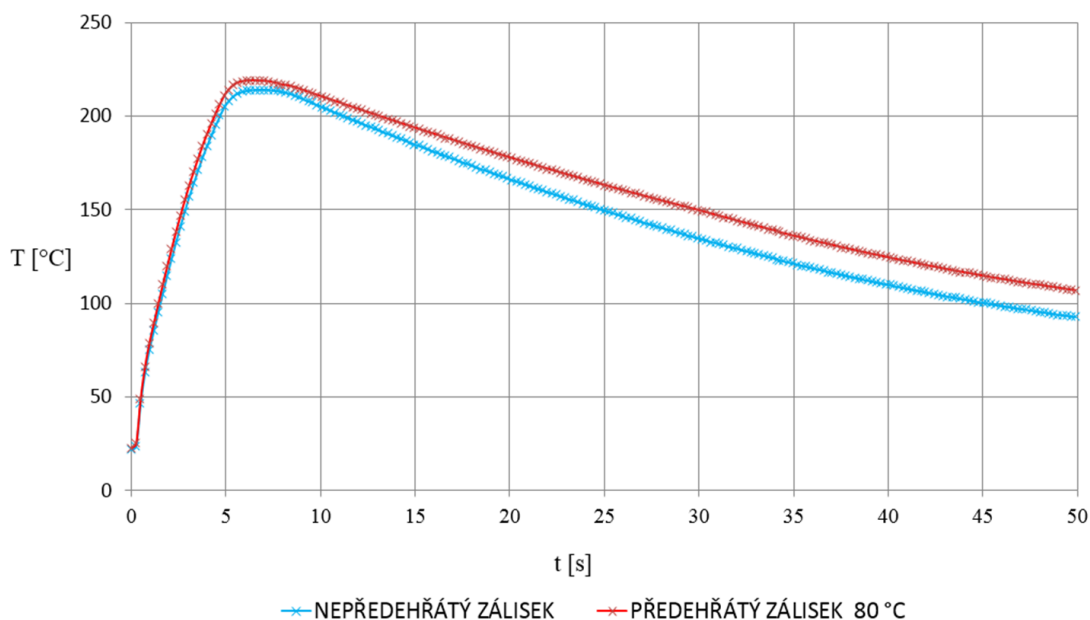
Původní plánované umístění se z hlediska měření neosvědčilo, neboť zachycovalo průběh teplot v přílišné blízkosti přípravku (přestup tepla z přípravku ovlivňoval negativně výsledek měření) a v přílišné vzdálenosti od tlakového senzoru. Nový způsob téměř sjednotil polohu čidel a tím se docílilo možné sloučení křivek tlaku a teploty do jednoho p-v-T diagramu. Zároveň se příliš nezměnila vzdálenost od



místa předpokládaného hybridního spoje. Výsledek měření teplotního průběhu je znázorněn na obrázku 63.



*Obr. 62* Konstrukční řešení měření teplot



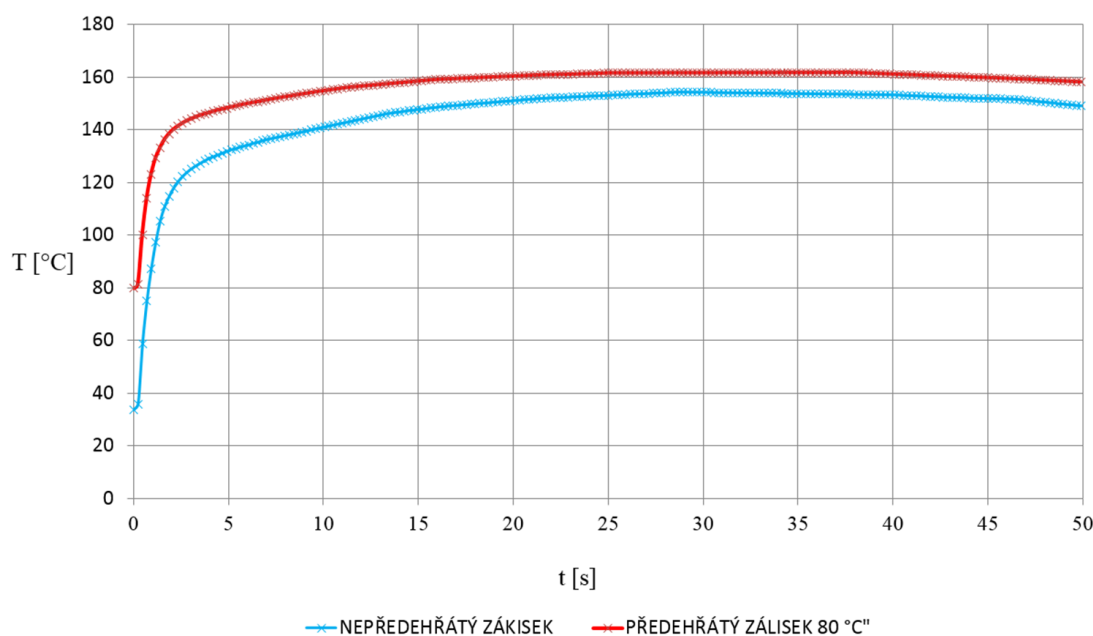
*Obr. 63* Průběh měřené teploty taveniny

Teplotu jsem měřil po dobu 50 s, což odpovídá délce vstřikovacího cyklu. Teplota měřicího přípravku suplovala teplotu vkládaného zálisku. Průběh teploty taveniny jsem hodnotil pro teplotu vloženého přípravku (zálisku 20 °C (bez předehřevu) a 80 °C (s předehřevem). Termočlánek vykazuje jisté prodlení v začátku měření. Jeho počáteční teplota byla 21,6 °C pro studený zálisek a 22,7 °C pro předehřátý zálisek – tedy téměř totožné hodnoty. Skutečný nástup teploty se pohybuje v blízkosti teploty taveniny, to znamená 230 °C. Naměřené maximum má hodnotu 214,4 °C v čase 6,8 s pro nepředehřátý zálisek a 219,1 °C v čase 6,3 s pro předehřátý zálisek. Od této chvíle lze již hodnoty považovat za reálné. Pokles obou křivek není

strmý, což odráží vliv tlustostěnnosti výstřiku a také blízkosti umístění zálisku, který se vlivem působení taveniny ohřívá, akumuluje teplo a není schopen teplo účinně odevzdat do okolí. Konečná teplota v místě měření činí 92,7 °C pro případ s nepředehřátým záliskem a 107 °C pro případ s předehřátým záliskem. Povrchová vrstva výstřiku má v tuto chvíli samozřejmě teplotu nižší, vrstvy bližší zálisku mají teplotu vyšší. Srovnáme-li naměřené hodnoty s hodnotami z mold-flow analýzy, křivky se nejvíce blíží té, která byla simulována v místě tlakového čidla.

Dalším postupem jsem ověřil závislost teploty nejhlubší části (čela) zálisku na čase. Termočlánek byl posunutý tak, aby nebyl v kontaktu s taveninou a jeho měřicí část se tedy dotýkala pouze vnitřního průměru otvoru přípravku opatřeného ucpávkou (měřicí přípravek nyní opět simuluje zálisek).

Obrázek 64 níže ukazuje nárůst teploty zálisku v čase způsobeném sdílením tepla s taveninou. Měření jsem opět provedl pro vstřikovací proces s nepředehřátým záliskem a pro proces se záliskem předehřátým na 80 °C. Počáteční teplota nepředehřátého zálisku byla 20 °C, teplota však vlivem tepelného působení od formy vzrostla na 33,4 °C. Po vstříknutí taveniny teplota narůstá a dosahuje maxima 154,3 °C v čase  $t = 34$  s. Od této chvíle začíná převládat ochlazovací účinek okolní taveniny a teplota začíná mírně klesat. Opět pro srovnání je zde předpoklad z mold-flow analýzy na obrázku 58, kde toto místo měření odpovídá průběhu červené křivky č 2.



**Obr. 64** Průběh měřené teploty zálisku



Podobný průběh vykazuje křivka teploty zálisku předehřátého na 80 °C. Ovšem v celém průběhu během vstřikovacího cyklu jsou hodnoty teploty vyšší. Také směrnice křivky v počáteční fázi ohřevu zálisku od taveniny je větší. Maximální teplota 161,73 °C nastává v čase  $t = 37,5$  s.

V obou výsledcích měření teplot (tavenina, zálisek) je zřejmá shoda v průběhu i velikosti teplot s mold-flow s výjimkou počáteční fáze měření teploty taveniny, kdy je rozpor způsoben tím, že termočlánek reaguje s určitým zpožděním. V případě teploty nepředehřátého zálisku je maximální teplota skutečně změřená cca o 30°C nižší než teplota z mold-flow. Každopádně je potvrzeno, že zálisek v nejhlubším místě v dutině se výrazně ohřívá, zatímco tavenina chladne, a to výrazněji u stěn formy.

### 3.9.3 Transformace procesu do p-v-T diagramu

Díky měření hodnot tlaků a teplot prakticky ve shodném místě je možné vytvořit p-v-T diagram. K tomu, aby bylo možné transformovat hodnoty teploty a tlaku do p-v-T diagramu bylo nutné znát konstanty pro dvouoborovou Taitovu rovnici. K tomu mně posloužila databáze plastů v programu Autodesk MoldFlow Simulation. Tato simulace využívá Taitovu rovnici ke svým výpočtům a já ji využiji k vyjádření stavových veličin. Základní tvar rovnice je popsán vztahy 11, 12 a 13. Tabulka 11 ukazuje hodnoty konstant pro Taitovu rovnici.

**Tab. 11** Konstanty dvouoborové Taitovy rovnice pro PP DAPLEN EE002AE

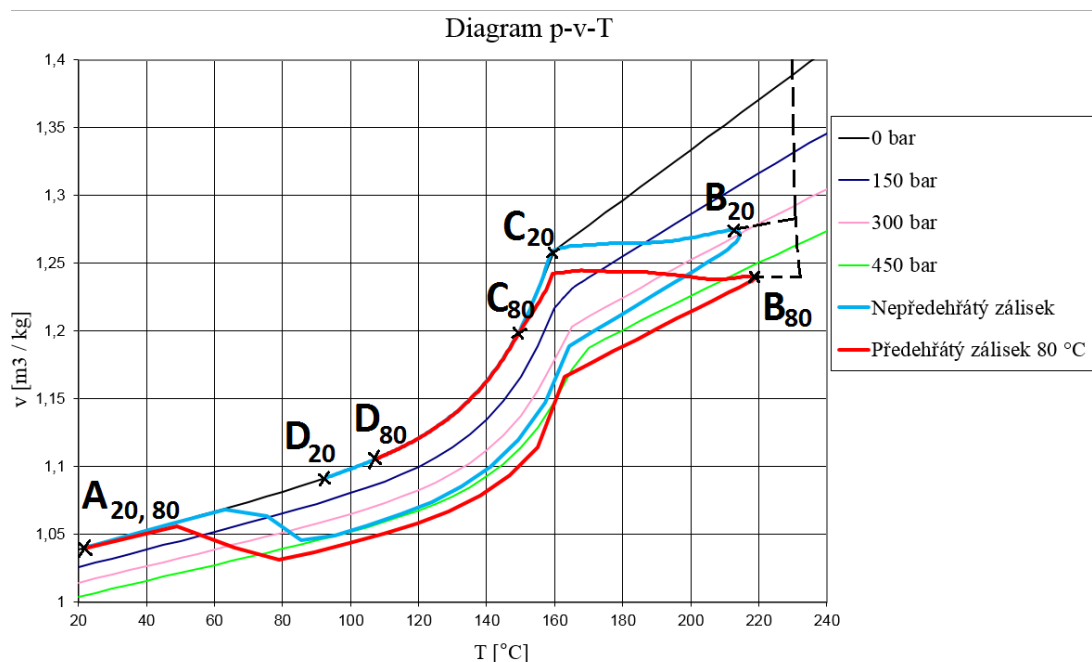
b5 [K]	b6 [K/Pa]	b1m [m <sup>3</sup> /kg]	b2m [m <sup>3</sup> /kg K]	b3m [Pa]	b4m [K <sup>-1</sup> ]	b1s [m <sup>3</sup> /kg]
432,15	1,76E-07	0,001258	1,85E-06	4,00E+07	6,47E-03	1,14E-03
b2s [m <sup>3</sup> /kg K]	b3s [Pa]	b4s [K <sup>-1</sup> ]	b7 [m <sup>3</sup> /kg]	b8 [K <sup>-1</sup> ]	b9 [Pa <sup>-1</sup> ]	C [-]
6,91E-07	6,71E+07	2,81E-03	1,23E-04	5,75E-02	1,56E-08	0,0894

Vstupy do p-v-T diagramu byly tedy hodnoty měřeného tlaku a teploty vždy ve stejný časový okamžik během celého cyklu. Transformovány byly křivky tlaku a teploty pro vstřikovací proces s nepředehřátým záliskem (20 °C) a se záliskem předehřátým na 80 °C. Křivky cyklu jsou uvedeny v soustavě isobar, které byly vytvořeny výpočtem z též rovnice při dosažení konstantního tlaku a proměnlivé teploty přes celý interval měření. Jednotlivé etapy jsou na obrázku 65 vyznačeny pomocí velkých písmen. Indexy 20 a 80 jsou rozlišeny teploty zálisku.

Etapa A – B: Zde dochází k ohřevu teplotního čidla a postupnému nárůstu tlaku na čidle tlakovém. Teplota tedy narůstá u nepředehřátého zálisku z hodnoty 21,6 °C na teplotu 214,4 °C přesně podle grafu, který zachycuje vývoj teplot. U předehřátého zálisku pak narůstá z hodnoty 22,7 °C na 219,1 °C. Tlak postupně narůstá až na hodnotu jeho měřeného maxima 447,9 bar u nepředehřátého zálisku a na hodnotu 558,9 bar u výlisku předehřátého, dále postupně klesá. Až do bodu B nejsou křivky synchronizované, neboť teplotní křivka nereaguje tak okamžitě jako tlaková, a tak je v podstatě úsek A – B nevypovídající. Jedná se o prvních několik sekund cyklu.

Etapa B – C: Tato část zachycuje fázi dotlaku a následného zbytkového působení tlaku v dutině formy. Není již zkruslena zpožděním měřicí soustavy.

Etapa C – D: Zde je již měřený tlak v dutině formy nulový. Dochází k isobarickému chladnutí.



*Obr. 65 Průběh křivky po transformaci do p-v-T diagramu*

Čárkovaně je naznačeno, jak by mohl vypadat průběh funkce, kdyby měřicí soustava pro teplotu nevykazovala zpoždění. V tomto případě by křivka vycházela z bodu, kde je teplota taveniny 230 °C, podle předpokladu mold-flow analýzy by došlo k mírnému ohřevu taveniny vlivem smykového tření ve vtoku a dutině formy (tendence ohybu křivky směrem k vyšší hodnotě teploty). Na hodnotě tlakového

maxima by došlo ke zlomu křivky a jejímu pokračování do bodu B, kde již předpokládám průběh reálný.

### **3.10 Diskuze výsledků výzkumu průběhu stavových veličin v místě mezifázového rozhraní**

Prvním krokem k posouzení kvality hybridního spoje byl důkladný výzkum vstřikovacího procesu se zálisky na konkrétním výstřiku. Tyto kroky zahrnovaly tři fáze. První fází byly analytické výpočty, které měly za úkol z hlediska procesu predikovat zejména průběh tlaku taveniny od vtoku až k místu hybridního spoje a teplotní děje během procesu vstřikování.

Další fází byla simulace vstřikovacího procesu (mold-flow analýza). Výsledky z mold-flow duplikují, ale hlavně rozšiřují teoretické výpočty, neboť zachycují proces vstřikování se záliskem v čase i prostoru, což výpočtové vzorce v první fázi buď zohledňují částečně, nebo nezohledňují vůbec. Výsledky mold-flow analýzy ukázaly následující: tečení materiálu ve fázi plnění dutiny formy, potřebnou uzavírací sílu, smyková napětí ve vtokové soustavě a v dílu během plnění, tlakové a teplotní poměry v místě hybridního spoje i mimo něj. Pro místo hybridního spoje jsem vynesl křivky průběhu tlaku taveniny v čase a teploty taveniny a ocelového zálisku, které simulace vygenerovala.

Následovalo skutečné měření tlaku a teploty taveniny v místě blízkém hybridnímu spoji včetně měření teploty kovového zálisku během vstřikovacího cyklu. Díky tomu, že měření probíhalo synchronně, bylo možné „spojit“ křivky (tlakovou a teplotní) v jednu a vynést je do p-v-T diagramu. Některé výsledky teoretických předpokladů, simulace a reálného měření se významně shodovaly, některé byly naopak odlišné a některé výsledky se objevily vzhledem k možnostem všech tří metod pouze u jedné či u dvou. Řada výsledků pak nebyla porovnatelná vzhledem k jejich odlišnému formátu výstupu. Porovnání jednotlivých výstupů bylo provedeno v rámci předchozích kapitol. Shrnu-li důležité výsledky výzkumu procesních veličin napříč všemi třemi etapami vychází z nich tabulka 12. Výsledky jsou uvedeny pro PP s teplotou zálisku 20 °C.

**Tab. 12** Porovnání výsledků z různých metod jejich určení

Veličina	Analytický výpočet	Simulace	Měření
Teplota stěny formy [°C]	46,7	40 až 56,5 (obr. 56)	-
Teplota stěny temperačního kanálu [°C]	41,54	40 až 45,42 (obr. 55)	
Tlakové ztráty taveniny do místa hybridního spoje [MPa]	4,38	10,84 (obr. 53)	-
Maximální hodnota vnitřního tlaku v místě hybridního spoje [MPa]	-	62 (obr. 54)	44,79 (obr. 61)
Maximální teplota taveniny v místě měření [°C]	-	231 (obr. 57, 58)	214,4 (obr. 63)
Teplota taveniny v místě měření na konci dotlaku [°C]	-	158 (obr. 57, 58)	181,6 (obr. 63)
Teplota taveniny v místě měření na konci cyklu [°C]		92,25 (obr. 57, 58)	92,7 (obr. 63)
Maximální teplota nepředeřátého zálisku [°C]	-	184,3 (obr. 57, 58)	154,3 (obr. 64)
Teplota nepředeřátého zálisku na konci cyklu [°C]	-	182,8 (obr. 57, 58)	149,1 (obr. 64)

- Výpočet teploty stěny temperačního kanálu a stěny formy z analytických vztahů je velmi zjednodušený. Naproti tomu mold-flow simulace hodnotí tyto parametry v čase a prostoru. Nicméně hodnoty teoretického výpočtu spadají do intervalu minima a maxima výstupu z mold-flow. Skutečné hodnoty nebyly mými měřicími prostředky měřitelné.
- Vypočítané a simulované tlakové ztráty jsou velmi nízké. Toto se projevuje i v rozporu simulovaného a skutečně změřeného maximálního tlaku v místě hybridního spoje. Je možné, že při dynamickém procesu plnění dutiny formy je platnost výsledků teoretických vzorců i simulace omezená. S reálnými tlakovými ztrátami během vstřikovacího procesu se nedají srovnat.
- Měření teploty taveniny v blízkosti hybridního spoje vykazuje jistou hysterezi, takže měřená maximální teplota není relevantní. Skutečný průběh teploty taveniny

vykazuje křivka z termočlánku s prodloužením jednotek vteřin. Na konci dotlaku se již výsledky měření a mold-flow liší o 23,6 °C a na konci cyklu je hodnota z čidla a ze simulace téměř totožná. Místo měření je velmi blízké hybridnímu spoji. Na konci vstřikovacího cyklu leží teplota taveniny pod krystalizační teplotou. Z výsledků mold-flow analýzy plyne, že rychlost poklesu teploty taveniny z počáteční hodnoty závisí na umístění měřicího bodu. Nejnižší rychlost poklesu je uvnitř výstřiku v místě paty zálisku, s posunem měřicího bodu podél zálisku ven z výstřiku strmost poklesu stoupá – teplo je lépe odváděno.

- U paty kovového zálisku, která je nejhluběji v plastu, stoupá významně teplota oceli. Měřená teplota je o 30 °C nižší než ta predikovaná mold-flow simulací. V tomto místě je nicméně teplota zálisku i na konci cyklu nad krystalizační teplotou polypropylenu (plyne z průběhů křivek). Z grafického průběhu teplot zálisku v závislosti na čase v různých místech uvedeném v kapitole 3.9 je zřejmé, že teplota zálisku směrem ven z plastu klesá. Během vstřikování pak bylo ověřeno, že na konci cyklu byly v téměř celé části ocelového zálisku všechny tři typy plastů ztuhlé, tedy pod krystalizační teplotou. Tvary křivek z mold-flow a reálného měření jsou velmi podobné, lze konstatovat, že mold-flow analýza a měření prokázaly dobrou shodu.

**Tab. 13** Výsledky reálného měření pro proces s nepředehřátým a předehřátým záliskem pro PP

Veličina	Nepředehřátý zálisek (20 °C)	Předehřátý zálisek (80 °C)
Maximální hodnota vnitřního tlaku v místě hybridního spoje [MPa] (obr. 61)	44,79	55,89
Maximální teplota taveniny v místě blízkém hybridnímu spoji [°C] (obr. 63)	214,4	219,1
Teplota taveniny v místě blízkém hybridnímu spoji na konci cyklu [°C] (obr. 63)	92,7	107
Maximální teplota zálisku [°C] (obr. 64)	154,3	161,73
Teplota zálisku na konci cyklu [°C] (obr. 64)	149,1	158,2

Pro odlišné teploty zálisku jsem získal průběh tlaku taveniny, teploty taveniny a teploty zálisku reálným měřením během vstřikovacího cyklu v místě blízkém

kovovému zálisku. Výsledkem byly závislosti graficky prezentované na obrázcích 61, 63 a 65. Shrnutí důležitých hodnot ukazuje tabulka 13.

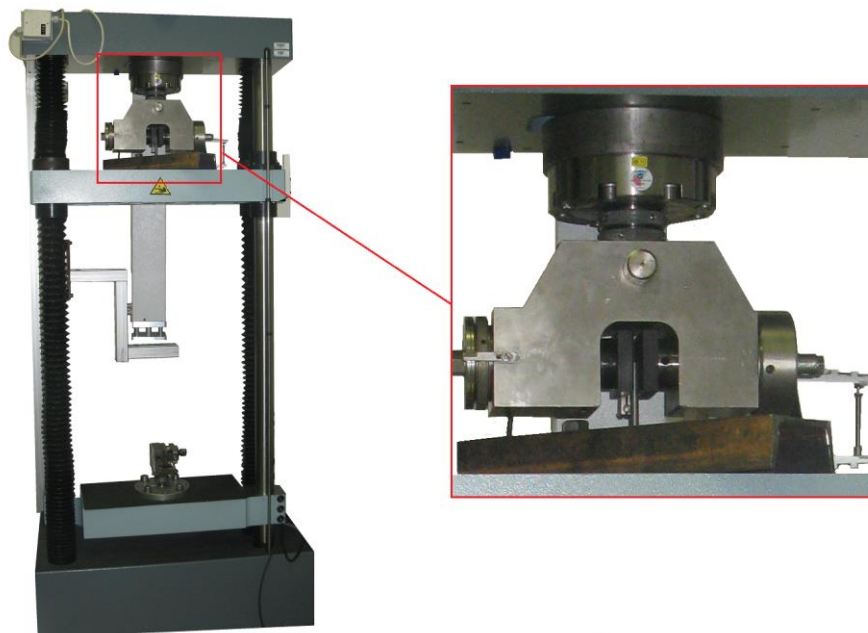
- Teplota zálisku ovlivňuje teplotu taveniny. Ta je v případě použití předehřátého zálisku vyšší v celém měřeném průběhu. Výsledný tlak taveniny v místě hybridního spoje s předehřátým záliskem tedy reflektuje snížení její viskozity vlivem vyšších teplot v celém průběhu.
- Graf reálně měřených teplot zálisku v nejhlubším místě pro nepředehřátý stav a stav předehřátý se liší opět v celém průběhu, kde se předehřátý zálisek dostává během vstřikovacího cyklu do oblasti vyšších teplot a z hlediska času dosahuje vyšší výdrže. V tomto ohledu ovlivňuje průkazně jak tlak, tak teplotu taveniny směrem k vyšším hodnotám.
- Plasty mají vysoký součinitel lineární teplotní roztažnosti a zároveň mají nízký koeficient vedení tepla. Vlivem zrychlené krystalizace na povrchu nepředehřátého zálisku je předpokládané smrštění menší než na stěně teplé. Plast ihned po styku se stěnou zálisku začne předávat do kovu teplo, které způsobuje ohřátí zálisku s jistou časovou prodlevou. Tento jev má za následek zpětné ovlivnění plastu teplem v zálisku, kdy povrchová vrstva plastu v místě hybridního spoje má vlivem teplotní roztažnosti větší průměr a zabraňuje tak ve smrštění přilehlým vnějším vrstvám taveniny krystalizující od stěny formy. Svoji déle trvající vyšší teplotou tak tvoří tato již zkrystalizovaná vrstva přilehlá k zálisku bariéru přirozenému smrštění. U předehřátého zálisku je krystalizace vrstvy taveniny přiléhající k zálisku pomalejší a smrštění vyšší, efekt působení teplotní roztažnosti je však vlivem zpětného působení teploty zálisku vyšší. Tyto dva efekty (smrštění a teplotní roztažnost plastu) jsou v opozici. Mechanismus daný průběhem teplot a ovlivněním rozměrů plastu teplotní roztažností v místě hybridního spoje může tedy popřít jednoduchou úvahu, že u nepředehřátého zálisku musí být zákonitě výrazně menší smrštění, a tím menší teoretický přesah mezi plastem a kovem.
- Z hodnot měření teploty a tlaku taveniny jsem vytvořil p-v-T diagram. Diagram spojuje stavové veličiny do jednoho grafu. Vlivem měření tlaku v místě stěny formy, a tím změření průběhu tlaku s ostrým vrcholem a následným strmým poklesem v diagramu p-v-T chybí isobarická část dotlaku, kterou by měl vykazovat podle teoretických předpokladů. Mně šlo především o ověření skutečnosti, zda je vytvoření p-v-T diagramu realizovatelné, což se potvrdilo.

Křivky pro vstřikovací proces s chladnými zálisky a se zálisky předehřátými na 80 °C vykazují zjevný rozdíl daný odlišným průběhem tlaků a teplot. Fáze dotlaku se u procesu s předehřátým dříkem pohybuje při nižším měrném objemu taveniny. To znamená, že tavenina je více stlačena. Měrný objem je pak na konci cyklu vlivem vyšší teploty plastu vyšší. Z křivek je také patrné, že dotlak u předehřátého zálisku působí déle a je účinný pod teplotou, kde začíná podle diagramu krystalizace.

Během této části výzkumu jsem se snažil co nejpodrobněji zjistit chování procesních veličin v místě hybridního spoje včetně možných následků pro průběh smrštění. Základní závislosti průběhu tlaků a teplot na čase v průběhu vstřikovacího cyklu jsou výchozími parametry pro následné vlastnosti tohoto spoje.

### 3.11 Měření axiální přídržné síly hybridního spoje

Jeden z parametrů k posouzení vlastností hybridního spoje je síla potřebná k vytažení zálisku z plastové objímky, v našem případě ocelového dříku z plastového zástříku. K měření bylo použito zařízení TIRAtest 2300 (obrázek 66).



*Obr. 66 Zařízení TIRAtest 2300 při zkoušce axiální přídržné síly*

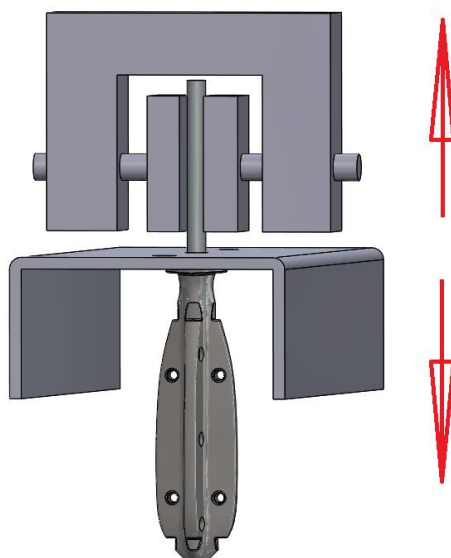


Díl byl zafixován pomocí přípravku, který je zachycen na obrázku 67. Přípravek byl upnut pomocí šroubů k rámu zařízení TIRAtest a plast byl zapřen o přípravek. Dřík byl upnut do čelistí zařízení a namáhán v tahu za následujících podmínek:

Rychlost posuvu 40 mm/min

Dráha příčnicku 90 mm

Při zkoušce byl průběh síly vyhodnocován pomocí softwaru LABnet TahTlak. Zkoušeno bylo vždy 15 vzorků příslušejících sérii vstříkované při použití jednoho ze tří materiálů a jedné ze tří teplot zálisku (viz tabulka 10).

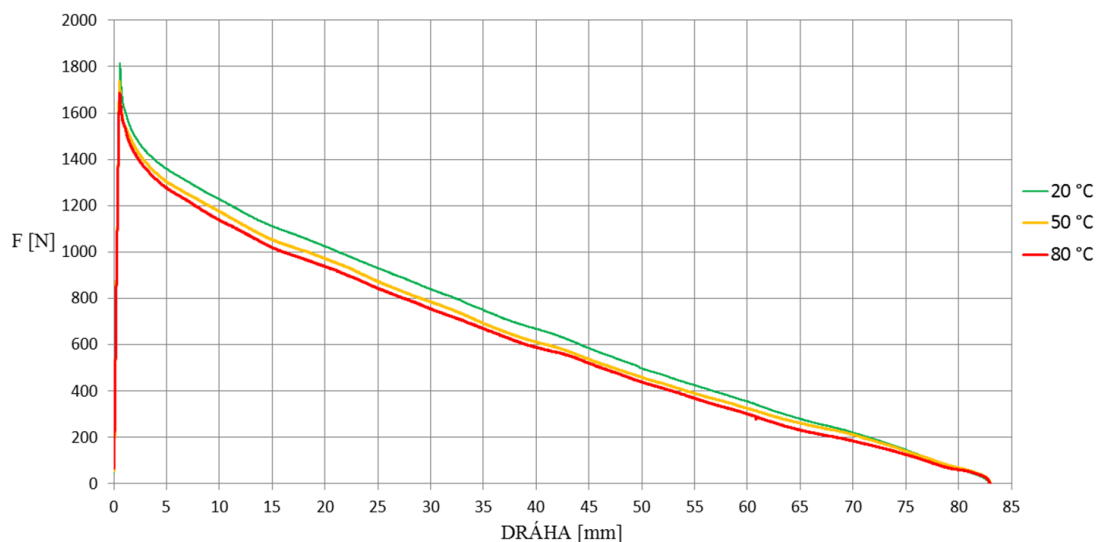


*Obr. 67 Obrázek přípravku pro zkoušku axiální síly*

### 3.11.1 Výsledky měření axiální síly

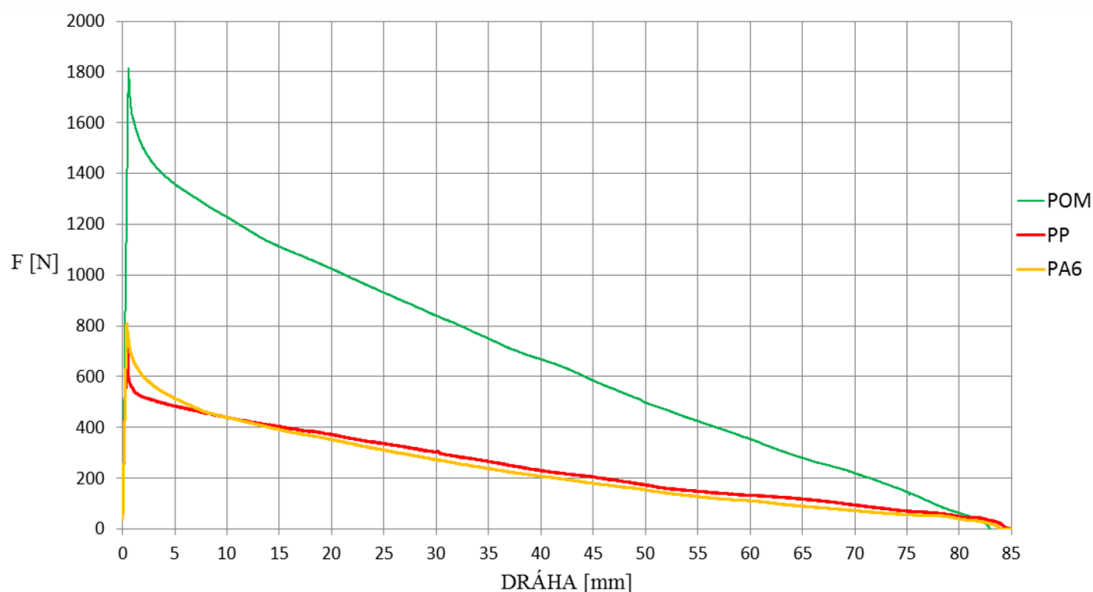
Naměřená přídržná axiální síla v závislosti na délce má následující průběh. Nejdříve prudký nárůst síly až do maxima, kde došlo k porušení vazeb mezi kovem a plastem. Tento jev doprovázel i specifický zvukový efekt. Po dosažení ostrého maxima křivky se postupně síla v závislosti na dráze zmenšuje a závislost se linearizuje. Lineární průběh byl již předpokládán ve výpočtové části, kdy velikost axiální síly ve vztahu 21 závisí přímo úměrně na délce spoje. Obrázek 68 je grafem závislosti přídržné síly vzorků z materiálu POM pro tři různé teploty zálisku. Na obrázku 69 je graf závislosti přídržné síly pro tři typy plastů při teplotě zálisku 20 °C.





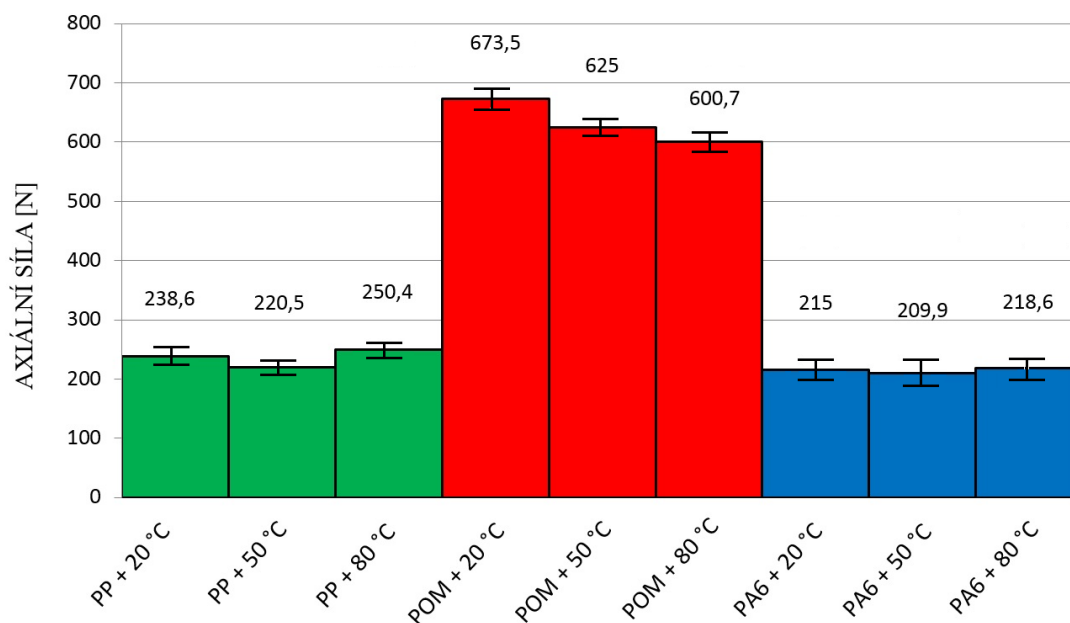
**Obr. 68** Srovnání průběhů axiální síly hybridního spoje při různých teplotách předehřevu zálisku pro materiál POM

Z obrázku 69 je patrné, že nejvyšší axiální přídržnou sílu vykazuje hybridní spoj POM/ocel. Průběhy síly pro hybridní spoj PP/ocel a PA6/ocel jsou co do velikosti mnohem níže položené a navzájem velmi podobné. Je zde však jeden zásadní rozdíl. Zatímco maximální přídržná síla v momentu odtržení plastu od kovu je vyšší u PA6, tak vyšší přídržná síla během posuvu plastu a kovu v lineární části přísluší PP. Tento jev je nesporně důsledkem nižšího koeficientu tření PA6/ocel, který se projevuje až po překonání maximální síly.



**Obr. 69** Srovnání průběhů axiální síly hybridního spoje pro různé typy polymerů pro teplotu předehřevu 20 °C

Naměřené průměrné hodnoty axiální síly v momentu včetně vyznačené velikosti +/- jedné směrodatné odchylky, kdy délka spoje odpovídá 45 mm, jsou porovnány ve sloupcovém diagramu na obrázku 70. Jednotlivé křivky průběhu axiální síly pro všechny kombinace materiálů plastového komponentu a teploty předeřevu zálisku jsou uvedeny v příloze 5.



**Obr. 70** Porovnání axiálních sil pro délku spoje 45 mm

### 3.11.2 Diskuze výsledků měření axiální síly

Shrnutí nejdůležitějších poznatků plynoucích ze zkoušky tahem je následující:

- Pevnost hybridního spoje, která byla teoreticky vypočtena, je mnohonásobně vyšší než ta, která byla změřena. Nepochybným důvodem je špatný odhad teoretického přesahu ze smrštění plastu. Smrštění plastu a velikost následného teoretického přesahu je ovlivněna jednak výše popsaným působením teplotní roztažnosti plastu v místě hybridního spoje a také vlastním záliskem, který působí jako mechanická zábrana proti smrštění. Je nutné si znovu uvědomit, že hovořím-li o přesahu, myslím tím rozdíl mezi průměrem zálisku a plastu po odstranění zálisku z plastového pouzdra a následném zmenšení vnitřního průměru plastu vlivem uvolnění tlakového napětí. Důvodem nižší reálné axiální přídržné síly může být relaxace napětí v plastu. Další příčinou může být nesprávné „tabulkové“ určení koeficientu tření, případně snaha plastu deformovat se v místě hybridního spoje do elipsy, nikoliv do pravidelného kruhu, čímž se mění výpočtový model na

tzv. svěrný spoj. V tabulce 14 jsou porovnány předpokládané a skutečně měřené hodnoty axiální síly hybridního spoje. Konfrontovány jsou také hodnoty teoretického přesahu, které byly ověřeny měřeními.

**Tab. 14** Porovnání výsledků výpočtu a měření axiální přídržné síly a teoretického přesahu

Metoda určení	Výpočet			Měřené hodnoty		
	PP	POM	PA6	PP	POM	PA6
Druh plastu						
Pevnost hybridního spoje [N]	2028	6286	1556	220,5	625	209,9
Přesah průměrů plast/kov [mm]	0,112	0,144	0,064	0,04	0,05	0,02

- Výsledky měření přídržné axiální síly zálsků ukázaly jednoznačnou závislost velikosti síly na materiálu. Parametry, které ovlivňují velikost síly, jsou modul pružnosti, přesah daný smrštěním plastu, koeficient tření a Poissonova konstanta. Výsledek velikosti přídržných axiálních sil korespondoval, co se týče pořadí polymerů, s výsledkem výpočtu. Je nutné zmínit, že měřeními byla ověřována hodnota axiální síly nikoliv v jejím maximu, ale na dráze, která odpovídala délce spoje 45 mm. Nejvyšší průměrnou přídržnou sílu vykázal POM, na druhém místě s velkým odstupem byl PP a nejmenší sílu PA6, který má sice modul pružnosti vyšší než PP, ale má menší smrštění a nižší koeficient tření.
- Rozdíl mezi maximální přídržnou silou a přídržnou silou v jejím lineárním průběhu je významný u všech tří plastů při všech teplotách předehřevu zálsku. Maximální přídržná síla je ovlivněna zejména zatečením plastu do nerovností povrchu kovového zálsku a vytvořením miniaturních „tvarových zámků“. Tento efekt je viditelný a rozpoznatelný například porovnáním křivek PP a PA6, kdy PA6 vykazuje vyšší „peak“ síly při odtržení zálsku z nulové pozice, ale v oblasti lineárního průběhu křivky je axiální přídržná síla nižší, než u PP. Projevuje se tak nižší koeficient tření PA6 oproti PP.
- Výraznější závislost přídržné síly na teplotě vkládaného zálsku dle předpokladu potvrdil POM. S rostoucí teplotou vkládaného zálsku klesala zřetelně velikost přídržné síly. Největší skok vykázal ve velikosti přídržné axiální síly mezi vzorky

s teplotou zálisku 20°C a 50°C. Rozdíl mezi vzorky s teplotou zálisku 50° a 80° již nebyl tak markantní. Změnu přídržné síly mohly ovlivnit některé z určujících parametrů teoretického vztahu. Modul pružnosti, přesah nebo koeficient tření (Poissonova konstanta má pro plasty velmi podobné hodnoty bez ohledu na typ plastu včetně jeho stupně krystalinity). Přesah spoje vyšel pro POM z měření neměnný v závislosti na teplotě zálisku, koeficient tření nebyl měřen. Modul pružnosti se u semikrystalických plastů zvyšuje se snižující se teplotou formy i zálisku, což bylo experimentálně zjištěno [8, 9]. Vzhledem k tomu, že přídržnou sílu určují zejména mechanické vlastnosti v tenké vrstvě v oblasti hybridního spoje, zdá se logické, že zvýšení modulu pružnosti v této oblasti vlivem klesající teploty kovového zálisku vede ke zvýšení přídržné síly. U vzorků z PP a PA6 je efekt odlišné teploty zálisku vzhledem k velikosti směrodatné odchylky neprokazatelný. U PP to lze vysvětlit příměsí minerálního plniva, které ovlivňuje krystalizaci. U PA6 je možným vysvětlením obecně nízký stupeň krystalinity a také nižší doporučená teplota stěny formy, tedy i stěny zálisku.

### 3.12 Výzkum stupně krystalinity v místě hybridního spoje

Pro hodnocení stupně krystalinity a dalších vlastností materiálů použitých pro zástřík kovového zálisku jsem využil metodu DSC. Bližší popis této metody předcházela v kapitole 2.1.3 této práce.

#### 3.12.1 Příprava vzorků pro DSC měření

Pro výzkum jsem volil místo odběru vzorků tak, aby byla vyhodnocena morfologie materiálu v místě hybridního spoje, což byla povrchová vrstva plastu ve styku s povrchem zálisku. Na obrázku 71 je znázorněno, ze kterého místa jsem odebral vzorky pro DSC.



*Obr. 71 Místa odběru vzorků pro analýzu DSC*

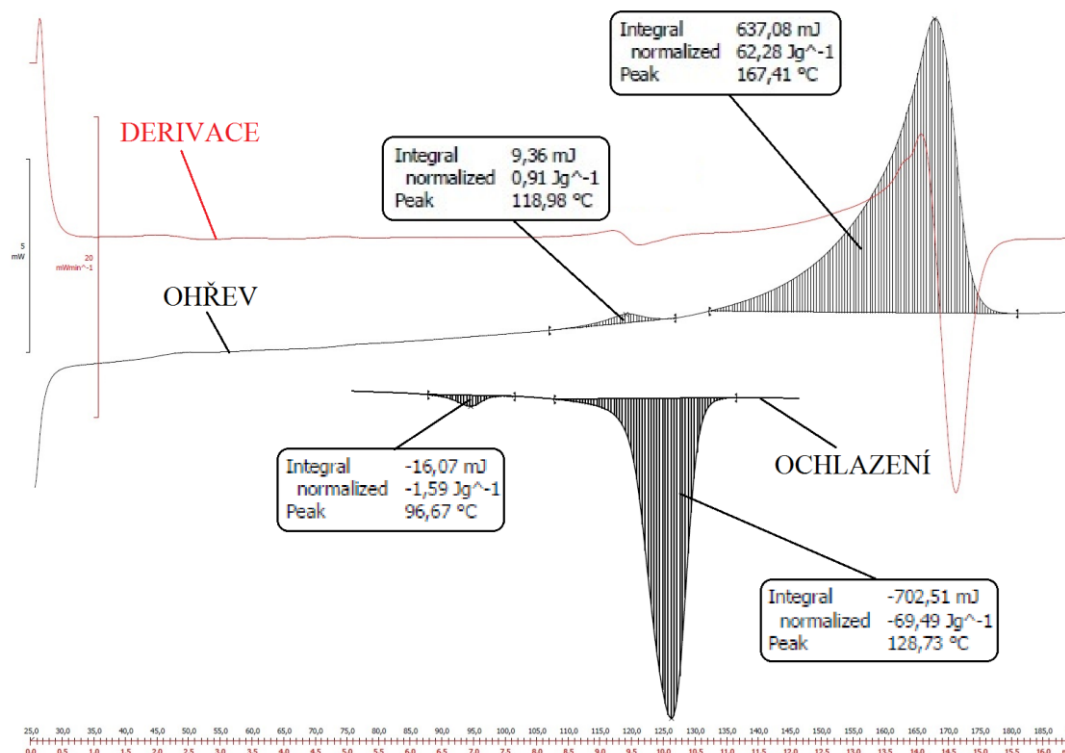
Vzorky byly odebírány podélnými řezy tak, aby byla obsažena pouze sledovaná vrstva. Vzorky jsem odebral pro tři různé druhy plastových materiálů v kombinaci se třemi různými teplotami předehřevu zálisku. Měření bylo provedeno na zařízení DSC 1 STAR SYSTEM od společnosti Mettler Toledo. Rychlost ohřevu a ochlazování byla volena 10 °C / min. Pro měření byl volen jeden cyklus, neboť právě ten odráží vlastnosti, které si s sebou nese vzorek z procesu vstřikování.



Obr. 72 Zařízení DSC 1 STAR SYSTÉM [53]

### 3.12.2 Výstup a vyhodnocení DSC měření

Na obrázku 73 je znázorněn graf závislosti tepelného toku na čase a teplotě vzorku pro materiál PP. Místo odběru – hybridní spoj. Teplota zálisku 50 °C.



Obr. 73 Průběh výstupu z DSC pro PP, odběr v místě hybridního spoje, zálisek 50 °C

Je zde uvedena jak křivka ohřevu, tak křivka chladnutí vzorku. Dále je zde zachycena první derivace topného výkonu podle času. Vzhledem k tomu, že tepelný tok je jednotkou výkonu, má první derivace jednotku podle výstupu z grafu W/min. Derivace pomáhá v orientaci v grafu, kdy v případě lineárního průběhu topného výkonu vykazuje konstantní průběh, v případě změny linearitě hlásí první derivace nárůst či pokles hodnoty. Maxima a minima jsou pak dány inflexními body derivace. V křivce 1. derivace se tudíž snáze hledají teploty (časy), při kterých dochází k nárůstu tepelného výkonu.

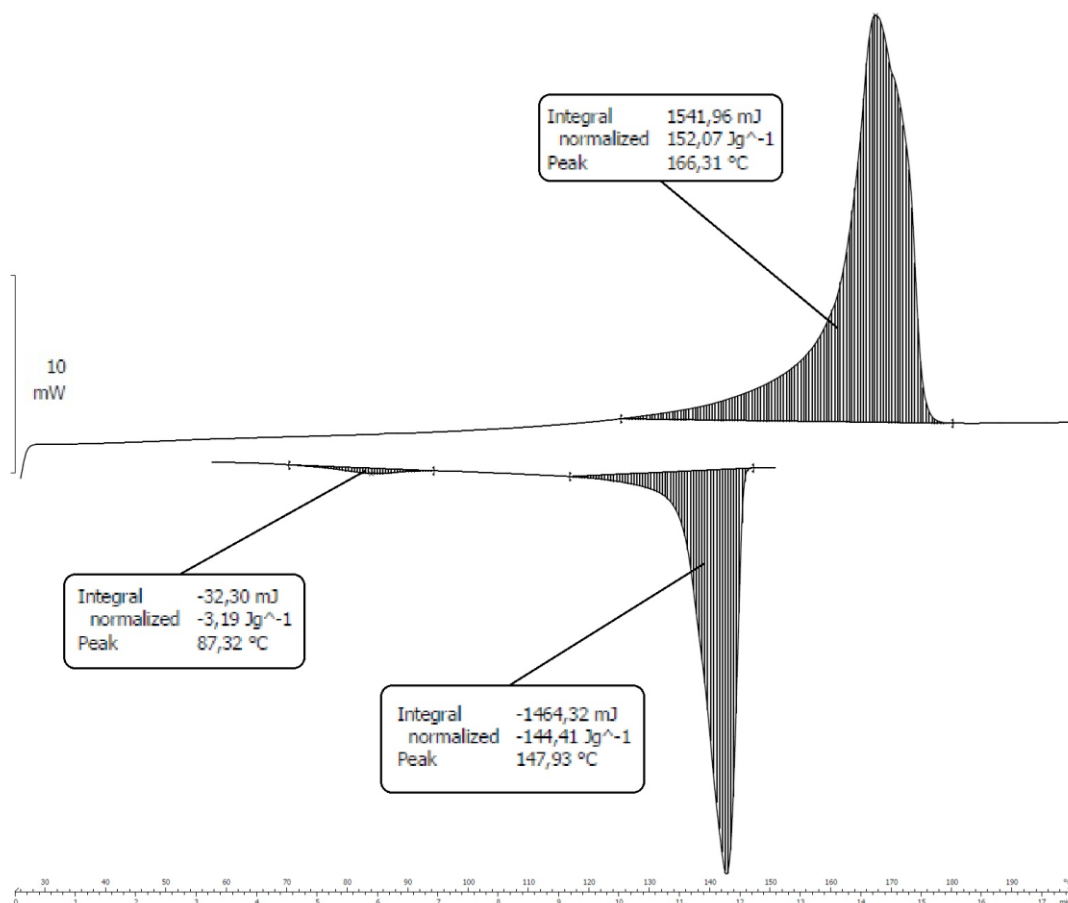
Při ohřevu vzorku PP je znatelný peak s maximem při teplotě 118,98 °C. Toto je tání složky, která je příměsí v polymeru PP. Nejspíše se jedná o příměsnou složku, použitý PP DAPLEN EE002AE není čistý polymer, obsahuje složku EPDM (5 %) a také minerální plnivo (15 %). Další peak zaznamenává tání polypropylenu. Jeho maximum nastává při teplotě 167,41 °C a hodnota změny entalpie je 637,08 mJ. Změna měrné entalpie, která je vztažena na gram a není tudíž ovlivněna hmotností vzorku, je 62,28 J/g. Během chladnutí vzorku lze určit teplotu krystalizace – odpovídá teplotě při minimu funkce = 128,73 °C. Stejně tak byla při chladnutí vzorku zachycena krystalizace doprovodné složky, a to při teplotě 96,67 °C.

Cílem DSC bylo především vyhodnocení stupně krystalinity. Pro tento vzorek tedy platí (při zohlednění obsahu minerálního plniva a složky elastomeru), že stupeň krystalinity je roven:

$$\underline{X_C} = 100 \cdot \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{100} \cdot w_p} = 100 \cdot \frac{62,28}{209 \cdot 0,8} = \underline{\underline{37,25\%}}$$

Dalším měřeným materiálem byl polyoxymetylen. Opět se detailněji zaměříme pouze na průběh grafu u vzorku odebraném v oblasti hybridního spoje s teplotou předeřevu zálisku na 50 °C. Již na první pohled jsou zde patrné odlišnosti od PP.

Odlišné teploty tání a krystalizace včetně rozdílných velikostí změn entalpie, které doprovází tyto teploty. Při ohřevu tedy můžeme vidět peak, charakterizující tání se svým maximem při 166,31 °C (velmi podobná teplota s PP). Velikost změny měrné entalpie při tomto ději činí 152,07 J/g. Během chladnutí vzorku z POM dochází ke krystalizaci s minimem peaku 147,93 °C a hodnotě změny měrné entalpie 144,41 J/g. Při teplotě 87,32 °C vykazuje křivka další propad, mohlo by jít o krystalizaci příměsí jiných polymerů, která se ovšem nijak neprojevila během tání.



**Obr. 74** Průběh výstupu z DSC pro POM, odběr v místě hybrid. spoje, dřík 50 °C

Po dosazení hodnot do vztahu pro výpočet stupně krystalinity bude výsledek:

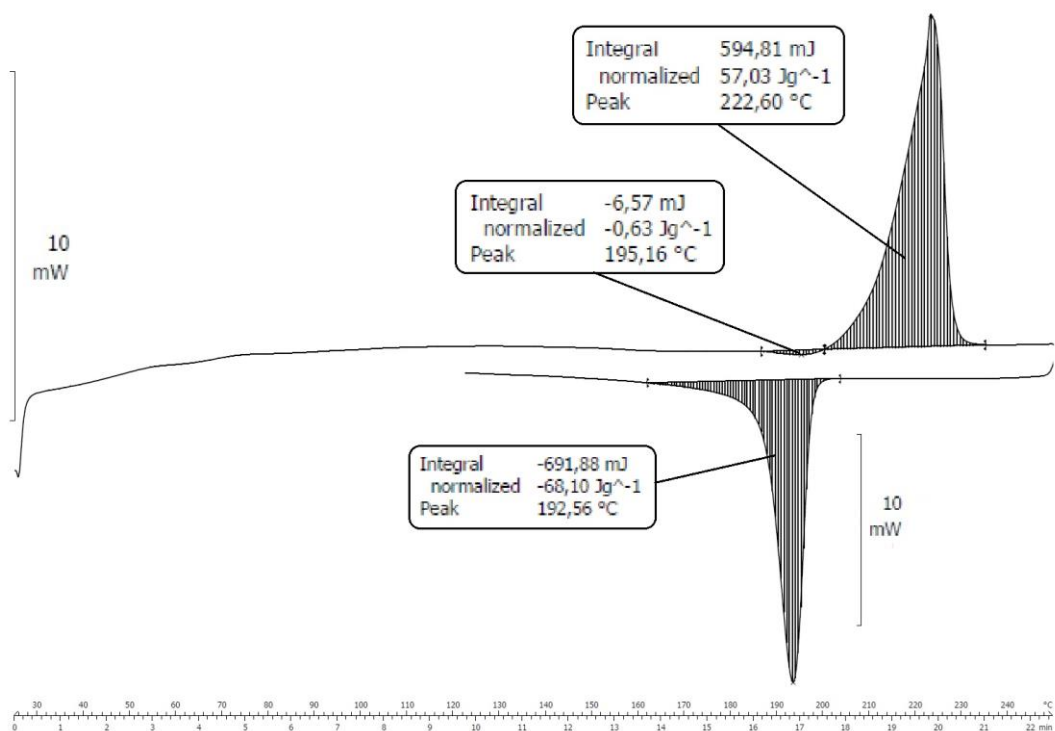
$$\underline{\underline{X_C}} = 100 \cdot \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{100} \cdot w_p} = 100 \cdot \frac{152,07}{186 \cdot 1} = \underline{\underline{81,76\%}}$$

To je mnohem více než hodnota, která vyšla u polypropylenu.

Posledním testovaným materiálem byl PA6. U vzorku z PA6 (opět zde detailně řeším pouze průběh z místa odběru hybridního spoje s teplotou zálisku 50 °C) se projevil pokles tepelného toku, který je zapříčiněn dokrystalizací. Minimum tohoto peaku bylo změřeno při 195,16 °C. To je hodnota velmi blízká krystalizační teplotě při chladnutí vzorku 192,58 °C. Hodnota změny měrné entalpie během tání vzorku je 57,03 J/g. To je hodnota nižší než u polypropylenu. Maximum peaku tání nastává při 222,60 °C. Nás ale zajímá hlavně hodnoty stupně krystalinity:

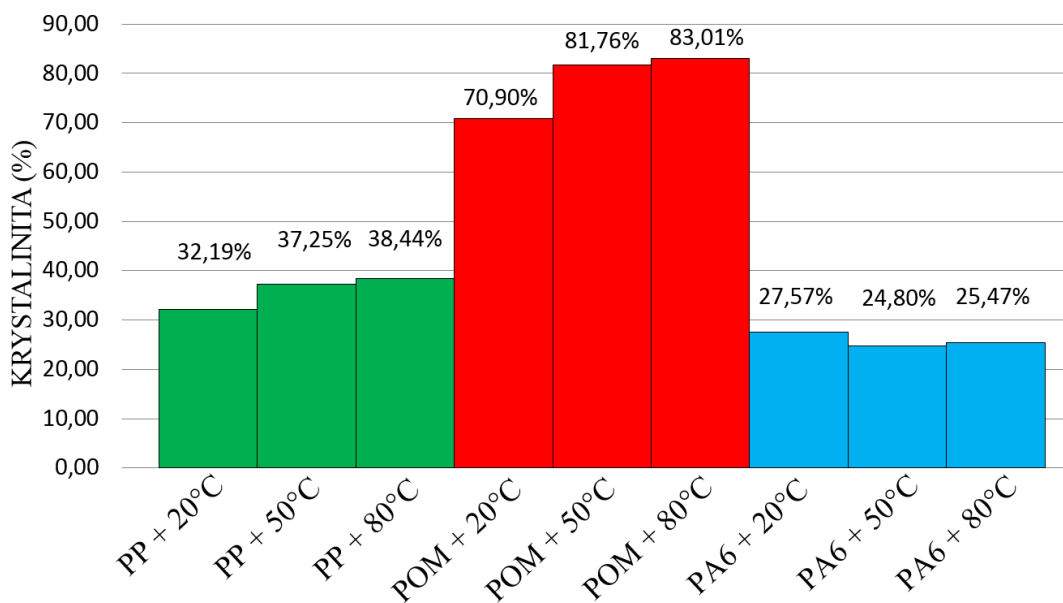
$$\underline{\underline{X_C}} = 100 \cdot \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{100} \cdot w_p} = 100 \cdot \frac{57,03}{230 \cdot 1} = \underline{\underline{24,80\%}}$$





**Obr. 75** Průběh výstupu z DSC pro PA6, odběr v místě hybrid. spoje, dřík 50 °C

Vyhodnotíme-li stupeň krystalinity v místě hybridního spoje pro přehlednost ve sloupcovém diagramu (obrázek 76), je patrné, že jednoznačný trend vykazují materiály PP a POM. Výsledky pro PA6 jsou z hlediska minimálních naměřených rozdílů z hlediska velikosti krystalinity neprůkazné.



**Obr. 76** Vliv teploty zálisku na stupeň krystalinity v místě hybr. spoje



V části přilehlé kovovému dřívku probíhá tedy krystalizace v závislosti na teplotě zálisku různými pochody, což má za výsledek změnu podílu krystalické fáze. Absolutní rozdíl je zřejmý zejména mezi vzorky s teplotou zálisku 20 °C a 50 °C u materiálu POM. Tato část výstřiku (skin) bude dále ještě podrobena polarizační mikroskopii, aby byl odhalen skutečný tvar a množství krystalických útvarů. V přílohách jsou uvedeny průběhy grafů z DSC pro všechny tři typy polymerů a tři teploty zálisku.

### 3.12.3 Diskuze výsledků výzkumu stupně krystalinity

Cílem analýzy DSC bylo určit vliv teploty předehřevu zálisků na stupeň krystalinity plastů v místě hybridního spoje. Pro přehlednost shrnu opět poznatky z výsledků DSC do následujících bodů.

- Nejvyšší stupeň krystalinity má POM. Maximální změřený stupeň krystalinity činil 83,01 %. Pro PP činil nejvyšší změřený stupeň krystalinity 38,44 % a pro PA6 to bylo 29,47 %.
- Nejviditelněji na změnu teploty vkládaného zálisku z hlediska změny stupně krystalinity plastu v místě hybridního spoje reagoval POM. S rostoucí teplotou zálisku stoupal stupeň krystalinity, což splnilo teoretický předpoklad. Nárůst byl nejvýznamější mezi teplotami zálisku 20 °C a 50 °C. Zřetelnou reakci měl také PP, u PA6 je výsledek neprůkazný. Pokud se omezíme pouze na výsledky vysoce krystalického materiálu POM, kde dochází k opravdu průkaznému trendu stupně krystalinity (celkový nárůst o 17,1 %), tento výsledek koresponduje s výstupem z měření přídržné síly, kde vlivem změny mechanických vlastností plastu způsobených změnou morfologie plastu došlo při poklesu teploty zálisku k jejímu zvýšení. Důvodem je nesporně efekt skin – core a změna modulu pružnosti v povrchové vrstvě.
- Výsledky DSC přinesly jako vedlejší výsledek hodnoty krystalizačních teplot jednotlivých polymerů. Pro PP je to  $t_{KR} = 128,73$  °C, pro POM  $t_{KR} = 147,93$  °C a pro PA6  $t_{KR} = 192,56$  °C.

### 3.13 Výzkum morfologie v místě hybridního spoje

V části věnované výstupu z DSC analýzy bylo prokázáno, že teplota zálisku má vliv na stupeň krystalinity polymeru v místě hybridního spoje. Pro výzkum

morfologie plastu v místě hybridního spoje včetně tvarů a velikostí uspořádání krystalických struktur jsem použil polarizační mikroskopii.

### 3.13.1 Polarizační mikroskopie

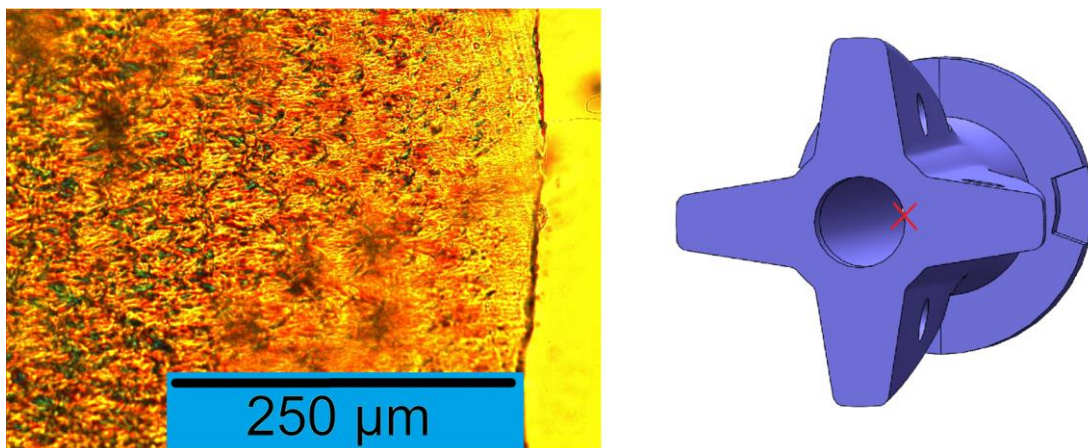
Příprava vzorků je zachycena na obrázku 77. Z přířezu odebraného ve vzdálenosti 45 mm od čela šroubováku (stejné místo, kde byl odebrán vzorek pro DSC) nejprve došlo k odříznutí jednoho z ramen kříže okolo zálisku. Pak následovala příprava mikrotomových řezů na zařízení Leica RM 2155 o tloušťce 16  $\mu\text{m}$ . Tenké vzorky byly vloženy mezi sklíčka do imerzního oleje a umístěny pod objektiv č. 20 světelného mikroskopu vybaveného polarizačním filtrem.



*Obr. 77 Příprava mikrotomových řezů na zařízení Leica RM 2155*

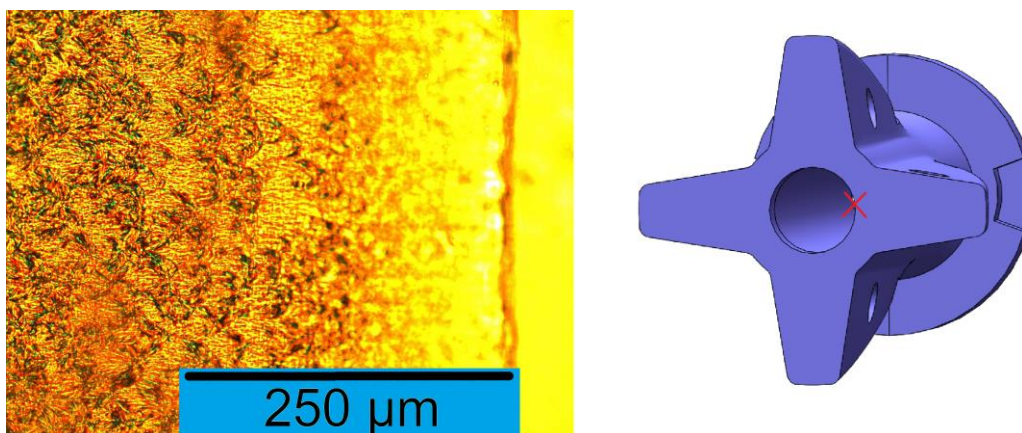
Cílem pozorování bylo vyhodnotit morfolologii polymerů v místě hybridního spojení, a tím potvrdit nebo vyvrátit teoretické předpoklady a výsledky DSC analýzy. Proto bylo pozorováno stejné místo vzorku, které bylo zkoumáno metodou DSC.

Na obrázku 78 je viditelná struktura v místě kontaktu se stěnou zálisku temperovaného na 80  $^{\circ}\text{C}$ . Na snímku je vidět náznak efektu skin-core. Od stěny zálisku je patrná směrnost krystalizace, tj. růst krystalitů ve směru teplotního gradientu vlivem chlazení taveniny. Zdánlivě amorfni vrstva není přítomna, ale transkrystalická struktura je patrná.



*Obr. 78 Snímek z polarizační mikroskopie – POM – zálisek 80 °C*

Při pozorování vrstvy těsně přiléhající k nepředehřátému zálisku je již zdánlivě amorfni vrstva jasně viditelná (obr. 79). Vzorek s teplotou zálisku 20 °C vykazuje směrem od stěny zálisku jak zdánlivě amorfni, tak přechodovou – transkrystalickou vrstvu. Je těžké odhadnout, jaký přesný typ struktury transkrystalická vrstva obsahuje, ale orientace krystalitů směrem od studeného zálisku je zřejmá. Sahá až do sférolitické oblasti.



*Obr. 79 Snímek z polarizační mikroskopie – POM – zálisek 20 °C*

### 3.13.2 Diskuze výsledků výzkumu morfologie

- Polarizační mikroskopie ukázala zřetelně morfologii plastu na vzorcích z materiálu POM. Vzorky vykazaly v místě hybridního spoje s nepředehřátým a předehřátým záliskem výrazný rozdíl v morfologii.
- Uvnitř stěny výstřiku byla zjištěna homogenní struktura se sférolitickými krystalickými útvary.

- V místě hybridního spoje (nepřehřátý zálisek s teplotou 20 °C) byla pozorována vrstva materiálu, která na první pohled nevykazovala žádné krystalické uspořádání – jednalo se tedy o tzv. zdánlivě amorfní fázi, kde dochází vlivem velkého podchlazení k obrovské rychlosti nukleace zárodků, které ovšem nemají možnost růst do pozorovatelných krystalických útvarů. Tato vrstva viditelně přecházela v tzv. transkrystalickou část se zřetelnými útvary orientovanými ve směru chladnutí směrem od zálisku až ke sférolitickému uspořádání.
- V místě hybridního spoje (přehřátý zálisek s teplotou 80 °C) je výrazně méně rozvinutá zdánlivě amorfní vrstva materiálu. Celkový rozsah skin-core efektu je minimální. Znatelná je pouze transkrystalická vrstva.

Tato pozorování potvrdila výsledky DSC analýzy i předpoklad, že u semikrystalického plastového materiálu je vrstva v místě hybridního spoje ovlivněna teplotou zálisku a tudíž lze předpokládat její odlišné fyzikální a mechanické vlastnosti.

## 4 ZÁVĚR

Požadavky aplikací zahrnujících kombinaci plastu a kovu v jednom výrobku jsou různé, podle toho, o jaký konkrétní účel výrobku se přesně jedná. Nejdůležitějšími kvalitativními znaky pro daný typ výrobku obsahujícího hybridní spojení může být pevnost spoje z hlediska tahu, krutu, ohybu, rázová houževnatost spoje, těsnost spoje, elektrické vlastnosti, estetický vzhled, rozebiratelnost atd. S přihlédnutím k prioritním kvalitativním znakům, které od výrobku požadujeme, je nutné zvolit správně technologii výroby včetně nastavení jejich parametrů. Zároveň je pro efektivitu produkce nezbytné v rámci těchto požadavků uzpůsobit proces tak, aby byly splněny kvalitativní požadavky s co nejnižšími náklady na výrobu. V této práci jsem řešil efekt vlivu předehřevu zálisků na kvalitu hybridního spoje a výsledky ukázaly řadu finálních vlastností, které jsou závislé na volbě materiálu plastu, teplotě vkládaného zálisku, ale také na návrhu dílu a nástroje. Výsledné hodnoty těchto vlastností je pak třeba individuálně posoudit pro určitou aplikaci, přiřadit jim kvalitativní hodnotu a rozhodnout se, jakým směrem jít z hlediska návrhu procesu. Volba výstřiku (šroubováku) pro tuto práci byla motivována jednak snahou objasnit procesy, ke kterým dochází obecně během vstřikovacího cyklu u výstřiků se záliskem (reologie, tlakové a teplotní poměry) a snahou získat výstupy hodnot mechanických, geometrických a morfologických vlastností výstřiků s hybridním spojením při různém stupni předehřevu zálisku.

Práce zahrnovala kompletní přípravu pro experiment - konstrukci výstřiku, konstrukci a výrobu formy a měřících doplňků, volbu materiálů pro zálisek a výstřik, nastavení technologických parametrů pro vlastní vstřikování a předehřev kovových zálisků. V rámci výzkumu bylo sledováno a analyzováno chování zálisku i polymerů ve výstřiku, byly k tomu použity jednak teoretické výpočty z analytických vztahů užívaných pro popis tečení, tlakových a teplotních poměrů i pevnosti zalisovaného spoje. Dále se uplatnily simulační programy mold-flow pro tytéž charakteristiky, a v rámci doplnění a ověření teoretických předpokladů následovalo skutečné měření stavových veličin v blízkosti hybridního spoje. Vzorky byly podrobeny zkoušce tahem pro ověření vlivu stupně předehřevu na mechanické vlastnosti spoje, dále byl zkoumán stupeň krystalinity metodou DSC a pozorována morfologie pomocí polarizační mikroskopie. Pro účely výzkumu jsem zvolil tři typy materiálu plastu: polypropylen s minerálním plnivem a příměsí termoplastického elastomeru



DAPLEN EE002AE, polyamid 6 ALTECH PA6 A 1000/209 a polyoxymetylen HOSTAFORM C 13021. Jako materiál kovového zálisku jsem zvolil automatovou ocel DIN 1.0715 v podobě kruhové tyče tvářené za tepla. Teploty předehřevu kovového zálisku byly 20 °C, 50 °C a 80 °C. Nejdůležitější výsledky zmíněných výzkumných metod lze závěrem shrnout do hlavních bodů:

- Simulacemi vstřikovacího cyklu a přímým měřením stavových veličin jsem ověřil, že během vstřikování se zálisky dochází k významnému přestupu tepla z taveniny do těla kovového zálisku. Toto teplo je záliskem akumulováno a velmi obtížně je předáváno do okolí. Teplota zálisku stoupá během vstřikovacího procesu významně směrem vzhůru a přibližuje se teplotě taveniny, po dosažení maxima relativně pomalu klesá. Tento efekt je vyšší v části zálisku, která jsou uvnitř výstřiku. Tavenina chladne primárně od stěny formy, vytváří izolační vrstvu a ochlazování zálisku včetně taveniny v místě hybridního spoje probíhá pomaleji. V místě styku se záliskem pak chladne výrazně pomaleji než například u stěny formy, která je na rozdíl od zálisku temperována.
- Předehřev zálisku ovlivňuje průběh teploty taveniny, teploty zálisku a tlaku taveniny v blízkosti hybridního spoje. Při použití předehřátých zálisků byl měřen během vstřikovacího cyklu vyšší vnitřní tlak v místě hybridního spoje a vyšší teploty taveniny i zálisku v celém časovém průběhu.
- Při zkouškách pevnosti hybridního spoje se jednoznačně projevil vliv mechanických vlastností jednotlivých druhů plastů. Nejvyšší roli hraje modul pružnosti, koeficient tření a smrštění plastu. Největší pevnost hybridního spoje proto vykazoval POM, mnohem nižší PP a nejnižší PA6.
- Teplotně tlakové pochody mají určující vliv na výslednou morfologii plastu, výsledné smrštění plastu a jeho mechanické vlastnosti. Významný efekt předehřevu zálisků na mechanické a morfologické vlastnosti v místě hybridního spoje se projevuje výrazněji u materiálů bez příměsí nukleačních činidel a s vysokým stupněm přirozené krystalinity. V případě měření to byl polyoxymetylen.
- Vlivem vyššího předehřevu zálisku stoupá hodnota stupně krystalinity v místě hybridního spoje u vysoce krystalických materiálů (zjištěno DSC analýzou) a zároveň klesá mechanická pevnost tohoto spoje (měření axiální přídržné síly). Morfologie vysoce krystalického plastu (POM) vykazuje v místě hybridního spoje

s nízkou teplotou zálisku charakter efektu skin-core, zdánlivě amorfní vrstvu s nedostatečně rozvinutými sférolity (výsledek polarizační mikroskopie), což je doprovázeno zvýšením modulu pružnosti, ale zároveň snížením houževnatosti a tažnosti. Z hlediska pevnosti hybridního spoje při namáhání klidnou silou dojde ke zlepšení. Předpokládám však, že pokud by měl plast okolo zálisku tenkou stěnu a díl byl namáhán rázy, situace by se obrátila.

### **Přínos pro vědu**

- Porovnání výstupů z teoretických vztahů pro výpočet reologie, tlaků a teplot, jejich porovnání s výsledky mold-flow simulace a ověření výsledků s výstupy měření skutečného procesu. Tento postup odhalil mnohé nedostatky a nepřesnosti, ale i téměř dokonalé shody teoretických předpokladů a výsledků měření. Analytické vztahy nezohledňují časový a prostorový průběh velikostí tlaků a teplot, numerické simulace ano, ale výsledek je ovlivněn nedokonalostí matematických modelů, které používají.
- Výzkum, návrh a použití metody měření tlaků v dutině formy spolu s měřením teploty taveniny pomocí speciálního přípravku a termočlánku zavedeného do dutiny formy. Tato metoda vede k mnohem přesnějším výsledkům, než metoda použití kombinovaných čidel. Přínosem této metody měření je například možnost vynesení křivek do p-v-T diagramu, a tím úplné popsání stavu taveniny uvnitř formy.
- Simulace a změření teplotního chování zálisku a taveniny v různých místech včetně místa hybridního spoje. Výzkum mechanismů přestupu a vedení tepla a popsání teplotních průběhů v závislosti na místě a na čase.
- Ověření a porovnání výstupů z DSC analýzy s polarizační mikroskopií a výsledky mechanické pevnosti hybridního spoje. Určení nepřímo úměrné závislosti mezi pevností spoje (modulem pružnosti) vysoce krystalických polymerů a stupněm krystalinity v místě hybridního spoje (změna je důsledkem skin-core efektu).

### **Přínos pro praxi**

Pro praxi jsou stěžejní tyto výstupy:

- Před vlastním použitím technologie předeřevu zálisků je třeba uvážit její nezbytnost. Jedná se o proces, kdy je třeba zajistit homogenní prohřátí celého zálisku a jeho rychlé přenesení do místa dutiny formy.



- Využití přehřevu zálisků bude mít významnější efekt pro materiály, které mají vysoký stupeň krystalinity a neobsahují nukleační činidla a dále pro materiály, u kterých z hlediska eliminace skin-core efektu dodavatel granulátu doporučuje použití vysokých teplot formy.
- Přehřev se vyplatí uvažovat v případě, kdy je použito vysoce objemných zálisků v kombinaci s tenkou stěnou výstřiku.
- Efektem přehřevu je dosažení homogennější morfologické struktury materiálu a zabránění skin- core efektu v místě hybridního spoje. Tím je dosaženo zejména vyšší houževnatosti materiálu.. Z hlediska vstřikovacího procesu je efektem přehřevu lepší zabíhavost plastu a možnost efektivnějšího působení dotlaku.
- Pokud je uvažováno o přehřevu z hlediska pevnosti spoje, je nutné si uvědomit, že vlivem nízké teploty zálisku může mít spoj paradoxně vyšší pevnost vlivem nárůstu modulu pružnosti v povrchové vrstvě plastu, ovšem houževnatost spoje se zhorší.

## **Další postupy**

Dalšími postupy, které by dovysvětlily a hlouběji prozkoumaly problematiku efektu přehřevu na kvalitu hybridního spoje jsou:

- Výzkum efektu přehřevu zálisků speciálně na více druzích vysoce krystalizujících polymerů, které mají vysoké nároky na teplotu stěny formy a kovového zálisku z hlediska jejich krystalizace.
- Výzkum stejné problematiky s ještě objemnějším kovovým záliskem tak, aby byl vliv přehřevu průkaznější a výsledky byly aplikovatelné na široké spektrum výstřiků s masivními zálisky.
- Výzkum tokových vlastností polymerů v závislosti na tloušťce stěny a teplotě zálisku.
- Zaměření se na vlastnosti těsnosti dílů v závislosti na teplotě zálisků a určení závislosti z toho plynoucích. Výzkum možných úniků například vzduchu nebo helia místem hybridního spoje.
- Zaměření se na rázové technologické zkoušky, které by potvrdily předpoklad nižší rázové houževnatosti u výstřiků s nepřehřátými zálisky.

## 5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zeman, L., Vstřikování plastů. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [2] Lucchetta, F., Aluminum sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer metal hybrid overmolding. CIRP Annals - Manufacturing Technolog, 01/2011.
- [3] Y.J. Mergler, Y.J., Material transfer of POM in sliding contact. Wear 256 (2004) 294–301.
- [4] Pogačnik, A., Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel. Wear 290–291 (2012) 140–148.
- [5] Grujicic, M., Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components. journal of materials processing technology 198 (2008) 300–312.
- [6] Rémond, Y., Measurement of local elastic properties of injection moulded polymer structures by analysis of flexural resonant frequencies. Applications in POM, PA66, filled PA 66. Polymer Testing 23 (2004) 267–274.
- [7] Meister, S., Influence of manufacturing conditions on measurement of mechanical material properties on thermoplastic micro tensile bars. Polymer Testing 32 (2013) 432–437.
- [8] Pavelová, P., Studium skin-core efektu u vstřikovaných dílů semikrystalických termoplastů. 2014:Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [9] Drummer, D. Characterization of Material Stiffness on Injection moulded Microspecimens Using different Test Methods. Hindawi Publishing Cooperation:10.7.2014.
- [10] Miklave, M., Fatigue strength of a hybrid joint formed between a PA6-GF60 polymer matrix and a S420MC steel insert. Materials and Design 51 (2013) 493–500.
- [11] Kříž, R. Tabulky materiálů pro strojírenství, 1. část kovové materiály – železné kovy. Montanex Ostrava: 1999. ISBN 80-85780-92-5.

- [12] Kříž, R. Tabulky materiálů pro strojírenství, 2. část kovové materiály – neželezné kovy. Montanex Ostrava: 2000. ISBN 80-7225-017-5.
- [13] Materiálový list firmy Aurubis, dostupný na: <http://www.aurubis-stolberg.com/wdb/band/eng/Technical%20Datasheet%20PNA282.pdf>.
- [14] Materiálový list firmy Aurubis, dostupný na: <http://www.aurubis-stolberg.com/wdb/band/ger/Technical%20Datasheet%20PNA243.pdf>
- [15] Meissner, B. Fyzika polymerů. Praha: SNTL, 1987.
- [16] Bischoff White, E., Extensional-flow-induced crystallization of polypropylene. University of Massachusetts, 2011.
- [17] Běhálek, L. Výzkum nekonvenčních způsobů chlazení tenkostěnných polypropylenových výstřiků. Technická univerzita v Liberci, 2014.
- [18] LEDNICKÝ, František. Mikroskopie a morfologie polymerů (Díl 2. Morfologie polymerů). Liberec: 2009. ISBN 978-80-7372-487-0.
- [19] Bobek, J., Aplikace tepelné trubice ve fázi chlazení procesu vstřikování polypropylenu. Technická univerzita v Liberci: 2007.
- [20] <http://biologie.upol.cz/mikroskopie/polarizacni%20mikroskopie.htm>
- [21] Gabbott, P., Principles and Applications of Thermal Analysis. Wiley-Blackwell, 2008. ISBN: 978-0-470-69812-9.
- [22] Reading, M., Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry. Springer: 2006. ISBN-10 1-4020-3749-X
- [23] Menczel, J., Thermal analyzes of polymers. John Wiley and sons, Canada: 2006. ISBN 978-0-471-76917-0.
- [24] Patnaik, R., Non-isothermal Crystallization Kinetics of Polypropylene (PP) and Polypropylene (PP)/Talc Nanocomposite. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2010. ISSN: 2010-0221
- [25] Siengchin, S., POM/PU/Carbon Nanofiber Composites Produced by Water-Mediated Melt Compounding: Structure, Thermomechanical and Dielectrical Properties. Published online 29 March 2010 in Wiley InterScience.
- [26] Blaine, R., THERMAL APPLICATIONS NOTE - Polymer Heats of Fusion. TA Instruments, USA.
- [27] Krebs, J.: Termoplasty v praxi. Copyright© by Dashofer Holding Ltd., 2004.
- [28] Paclt, R. Vliv řízení dotlaku a viskozity taveniny na kvalitu dílů z plastů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005.

- [29] Krebs, J., Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
- [30] campusplastics.com
- [31] Lenfeld, P. Technologie II – 2. část (Zpracování plastů). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-037-X.
- [32] Kazmer, D. O., Injection mold design engineering, Munich: Hanser, 2007. ISBN 978-3-446-41266-8.
- [33] Roseto, V. Injection Molding Handbook. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2000. ISBN 0-7923-8619-1.
- [34] Urbášek, J. Termomechanika a mechanika tekutin. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-943-0.
- [35] Malloy, R.A., Plastic Part Design for Injection. Molding. New York: Hanser, 1994. ISBN 1-56990-129-5.
- [36] <https://www.solidconcepts.com/resources/design-guidelines/injection-molding-design-guidelines/>
- [37] Gomes, M. Hybrid injection moulding: Overmoulding of metal inserts with PP. Sborník Semana de Engenharia. 11-15.10. 2010.
- [38] Kisin, S., Adhesion changes at metal-polymer interfaces. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2006. ISBN-10: 90-386-2699-1.
- [39] Beaumont, J., Successful Injection Molding. München: Carl Hanser Verlag, 2002. ISBN 3-446-19433-9.
- [40] Kaláb, K., Části a mechanismy strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN-8024818604.
- [41] <http://www.albis.com/en/products-solutions/products-brands/alfaterxl/>
- [42] Malý průvodce vstřikováním. Arburg spol. s.r.o.
- [43] Zoellner, O., Optimised mould temperature control, Leverkusen: ATI 1104 d(Application Technology Information), Plastic Business Group, Bayer AG, 1999.
- [44] Nožička, J. Sdílení tepla, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01599-8.
- [45] Olehla, J. Termomechanika (Sbírka příkladů s využitím počítače), Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1992. ISBN 80-7083-082-4.
- [46] <http://www.preciz.cz/>

- [47] <http://www.hascoshop.com/>
- [48] Kříž, R. Tabulky materiálů pro strojírenství I. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-85780-92-5.
- [49] Drastík, F. Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem. Ostrava: Montanex, 1996. ISBN 80-85780-18-6.
- [50] Drastík, F. Technické kreslení I. Ostrava: Montanex, 1996. ISBN 87-7225-195-3.
- [51] [www.plasticsintl.com/sortable\\_materials.php](http://www.plasticsintl.com/sortable_materials.php)
- [52] [www.professionalplastics.com/professionalplastics](http://www.professionalplastics.com/professionalplastics)
- [53] <http://www.prweb.com/releases/2007/10/prweb560344.htm>

## 6 SEZNAM PUBLIKACÍ

1. PACLT, R.: Construction of the moulds for 2K injection moulding. In: Sborník abstraktů mezinárodní konference „ERIN 2008“. Bratislava, duben 2008, SR, p. II-36, CD. ISBN 978-80-227-2849-2.
2. PACLT, R.- LENFELED, P. – KŮSA, P.: Design of the cooling / heating system for the injection moulds. In: Sborník abstraktů mezinárodní konference „PRO-TECH-MA 2008“. Herlany, 2008, ISSN 1335 - 2393
3. LENFELED, P. – KŮSA, P - PACLT, R.: Monitoring of extrusion blow moulding process. In: Sborník abstraktů mezinárodní konference „PRO-TECH-MA 2008“. Herlany, 2008, ISSN 1335 – 2393.
4. PACLT, R.: Possible problems with the usage of the pressure sensors in the plastic moulding process. In: Sborník abstraktů mezinárodní konference „SI 2008“. Bratislava, listopad 2008, ISBN 978-80-227-2987-1.
5. PACLT, R. – SEIDL, M. – TECHNIK, J.: Modern procedures in injection mould manufacturing. In: Recenzované CD abstraktů mezinárodní Bařovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2. dubna 2009, ISBN 978–80–7318–811 -5.
6. PACLT, R – SEIDL, M.: Technological trend in tool manufacturing. In: Sborník abstraktů „MITECH 2009, 26. – 27. 6. června 2009, ISBN 978-80-213-1931-8.
7. TECHNIK, J. – SEIDL, M. – PACLT, R.: Analyzing of cooling into real cover of headlamp. In: CD s recenzovanými příspěvky z Mezinárodní Bařovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2009. Zlín, duben 2009, ČR, ISBN 978-80-7318-812-2.
8. SEIDL, M. – LENFELD, P. – PACLT, R. – TECHNIK, J. : Influence of the temperature fields distribution on the morphology of plastic part by application of CO<sub>2</sub> for cooling, . In: Sborník abstraktů mezinárodní konference „ERIN 2009“. Ostrava, duben 2009, ČR, s. 104, ISBN 978-80-248-1982-2, CD.
9. PACLT, R – AUSPERGER, A. – TECHNIK, J.: Inserting technology in plastic injection moulding. In: Sborník abstraktů „TECHNOLÓGIA 2009, 9 – 10. 9. 2009, SR, Bratislava, s.70, ISBN 978-80-7318-812-2.

10. PACLT, R – AUSPERGER, A.: Signification of p-v-T diagram in plastic injection moulding. In: Sborník abstraktů (CD), NOVUS SCIENTIA 2009, 25.11. 2009, SR, Bratislava, ISBN 978-80-553-0305-5.
11. AUSPERGER, A. – BĚHÁLEK, L.-PACLT,R.: Possibility of back injection molding simulation. In: Advances in plastics technology APT'09 – 8<sup>th</sup> International scientific. Katowice, 3-5 November 2009. ISBN 978-83-9177693-9-3.
12. TECHNIK, J. – PACLT, R.: Balancing of runner systém fo car plastic grille. In : Sborník abstraktů „TECHNOLÓGIA 2009, 9 – 10. 9. 2009, SR, Bratislava, s.79, ISBN 978-80-7318-812-2ISBN.
13. PACLT, R.: Manufacturing of the tool for 2K injection moulding. In: Sborník abstraktů mezinárodní 4. konference „ERIN 2010“, 16. – 17.3. 2010, ČR, Plzeň, s. 61, ISBN 978-80-7043-866-4.
14. PACLT, R.: Experimental optimalization of runner system. In: Recenzované CD „Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky“, 15.4.2010, Zlín, ISBN 978-80-7318-922-8.
15. PACLT, R.: Elimination of plastic materiál porosity. In: Recenzované CD „13th International scientific conference Mechanical Engineering 2010“, 21.10.2010, Bratislava, ISBN 978-80-227-3304-5.
16. PACLT, R.: Dynamic effect of plastic melt on metal inserts. In: Recenzované CD „The 10th international conference Modern technologies in manufacturing“, 7.10.2010, Košice, ISBN 978-80-553-0560-8.
17. PACLT, R.: Venting of plastic injection mould. In: Recenzované CD „Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky“, 12.4.2011, Zlín, ISBN 978-80-7454-013-4.
18. PACLT, R.: Inserting technology in plastic injection moulding. In: In: Sborník abstraktů mezinárodní konference „ERIN 2011“. Bratislava, 13.4.2011, SR, CD. ISBN –978-80-89347-04-9.
19. PACLT, R.: Runner system of plastic injection mould. MTEM. In: Annals of MTeM for 2011. Cluj-Napoca 6.10.2011, Romania. ISBN 978-606-8372-02-0.



## 7 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1** Zástavbové rozměry vstřikovacího stroje Arburg 420 C vertical
- Příloha 2** Výkres sestavy vstřikovací formy
- Příloha 3** Fixační přípravek - držák
- Příloha 4** Fixační přípravek - svorka
- Příloha 5** Výsledky měření průběhu axiální přídržné síly hybridního spoje
- Příloha 6** Výsledky DSC analýzy

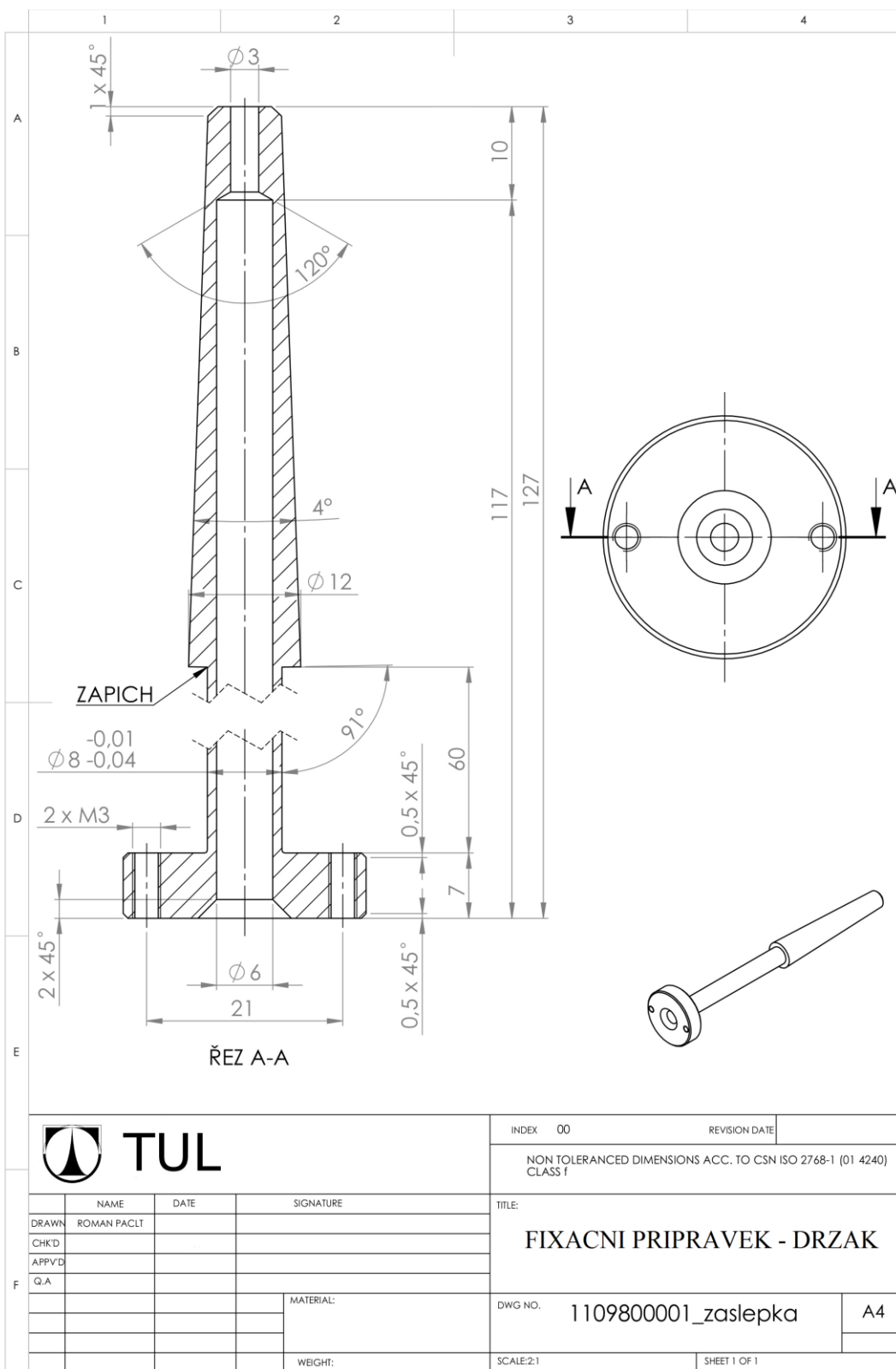


**Příloha 2 str. 1/1**

Sestava formy - pdf

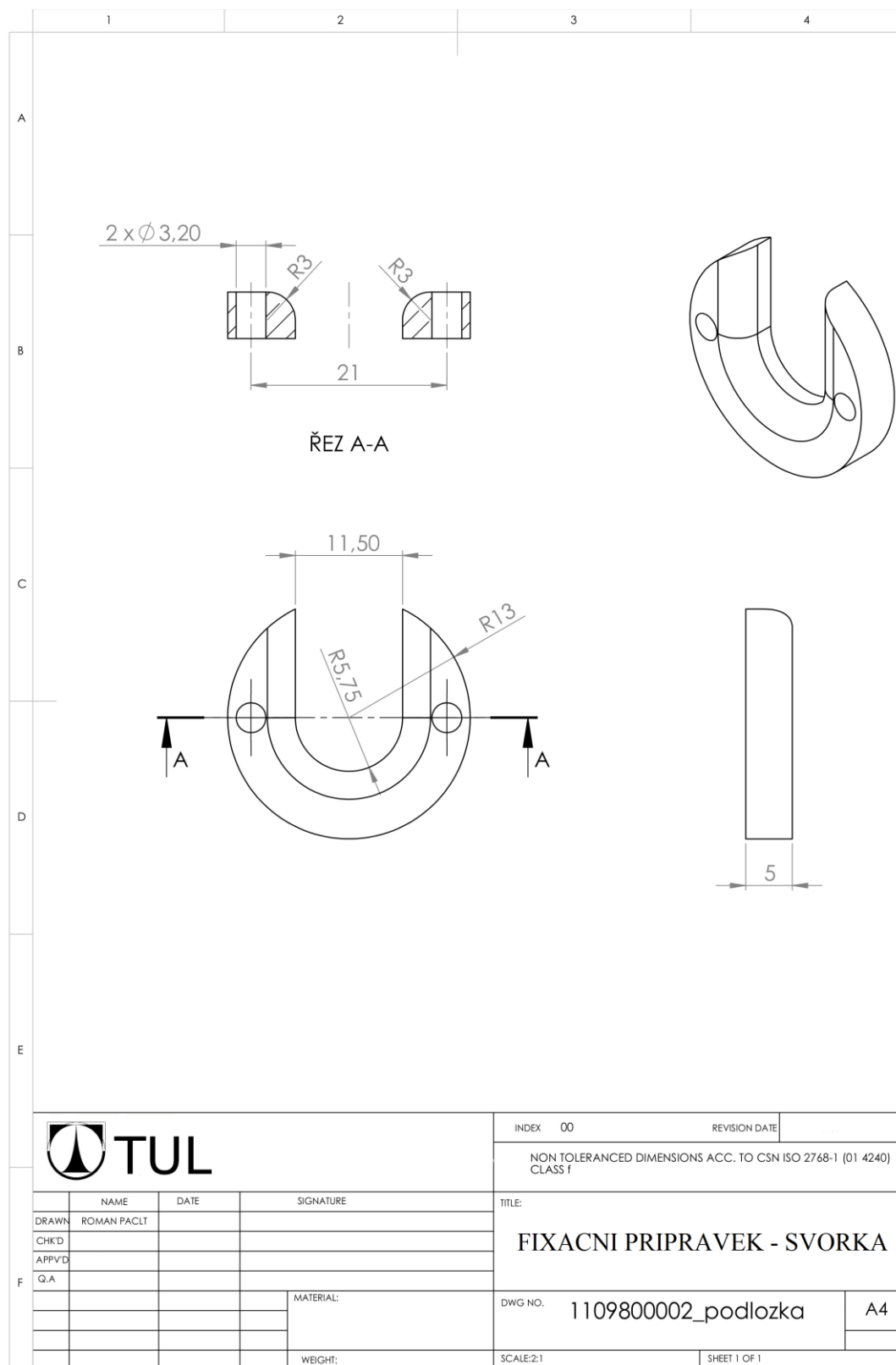
Příloha 3 str. 1/1

Fixační přípravek - držák



**Příloha 4 str. 1/1**

Fixační přípravek - svorka



INDEX 00 REVISION DATE  
NON TOLERANCED DIMENSIONS ACC. TO CSN ISO 2768-1 (01 4240)  
CLASS F

	NAME	DATE	SIGNATURE
DRAWN	ROMAN PACLT		
CHK'D			
APPV'D			
F Q.A			
			MATERIAL:
			WEIGHT:

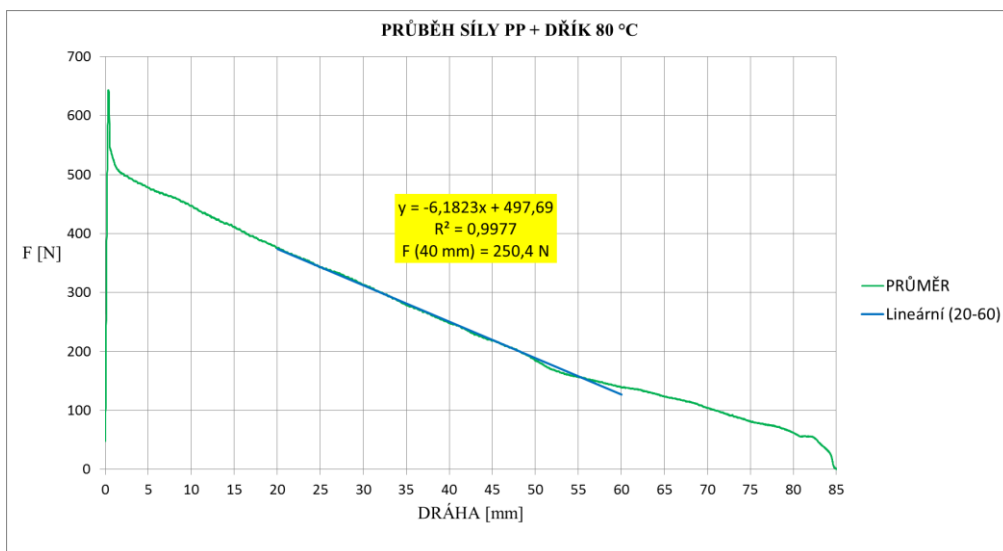
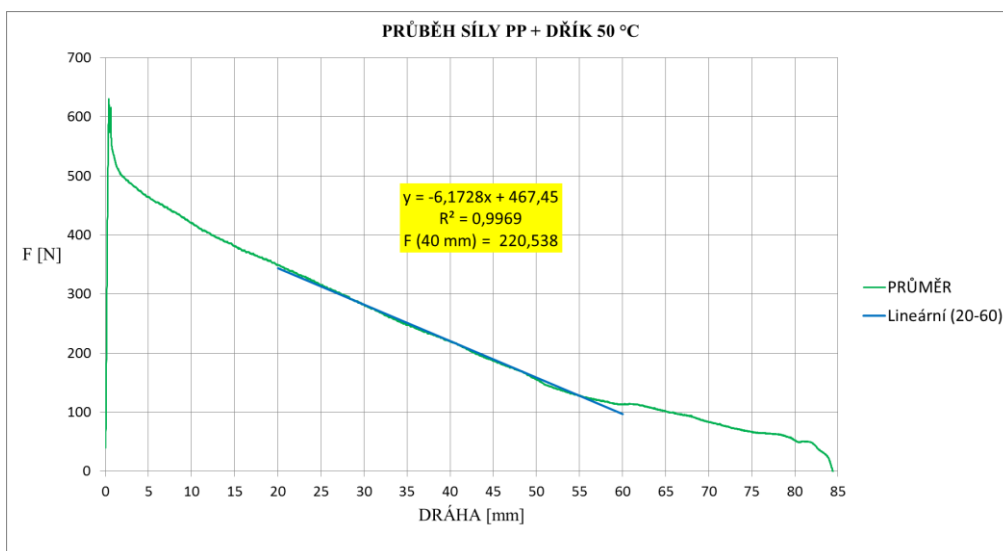
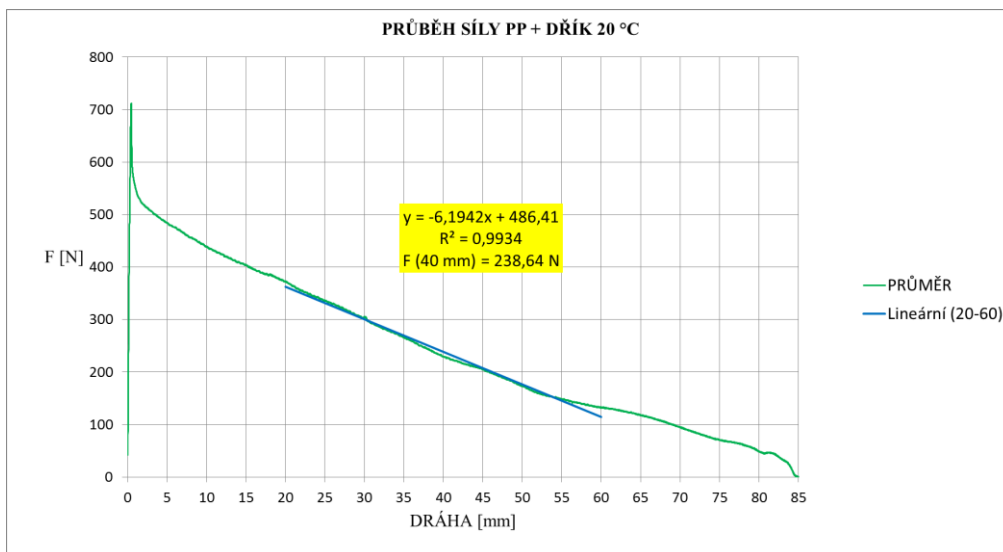
TITLE:  
**FIXACNI PRIPRAVEK - SVORKA**

DWG NO. 1109800002\_podlozka A4

SCALE:2:1 SHEET 1 OF 1

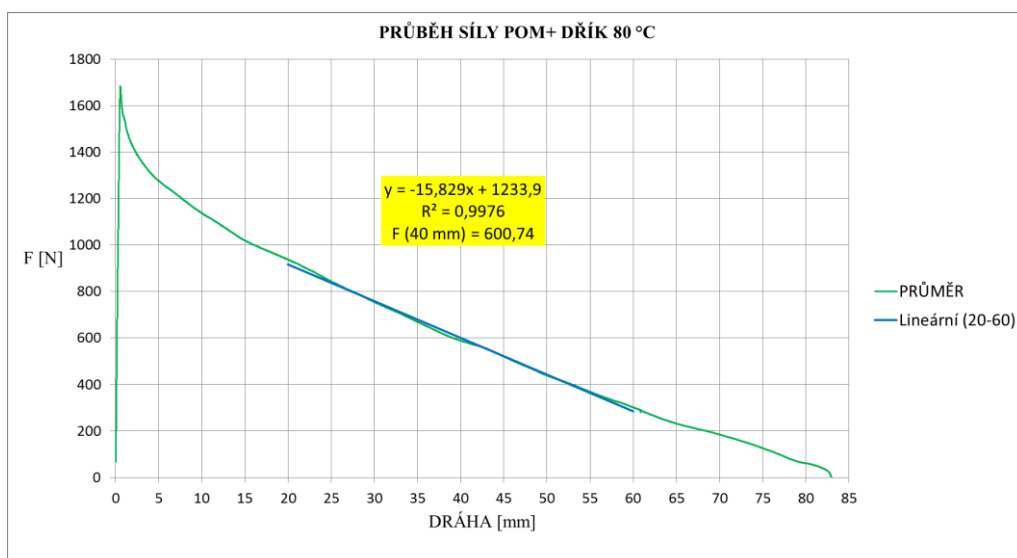
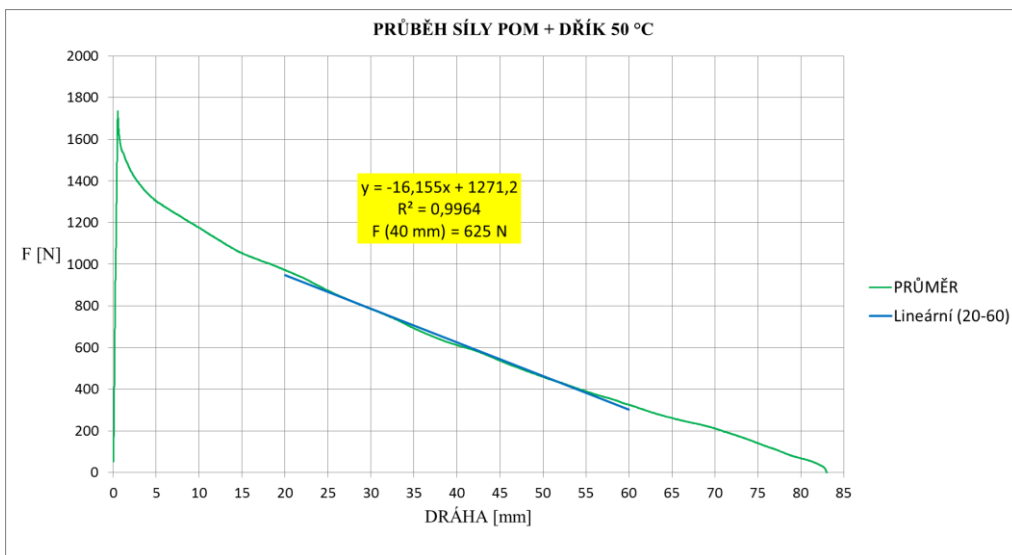
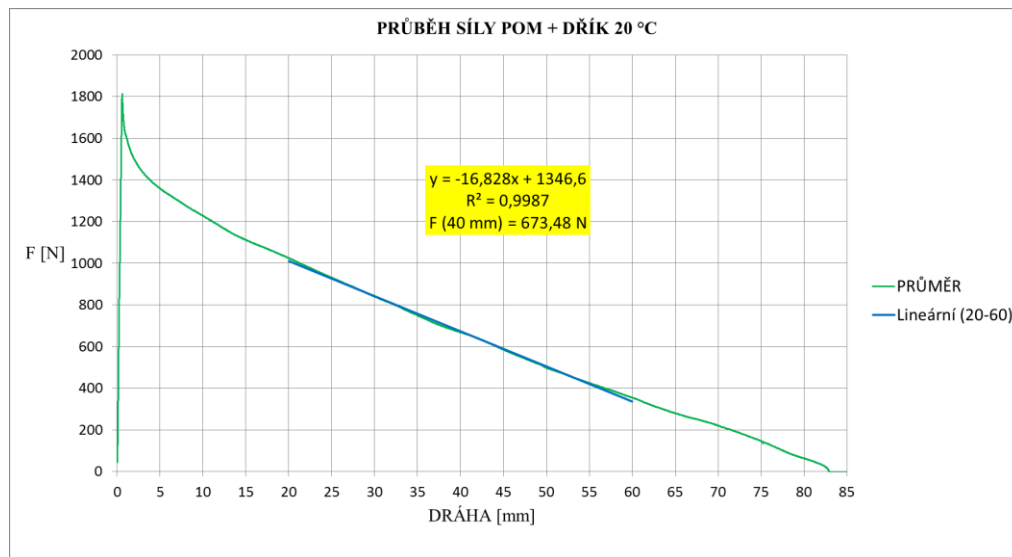
### Příloha 5 str. 1/3

Výsledky měření průběhu axiální přídržné síly hybridního spoje



### Příloha 5 str. 2/3

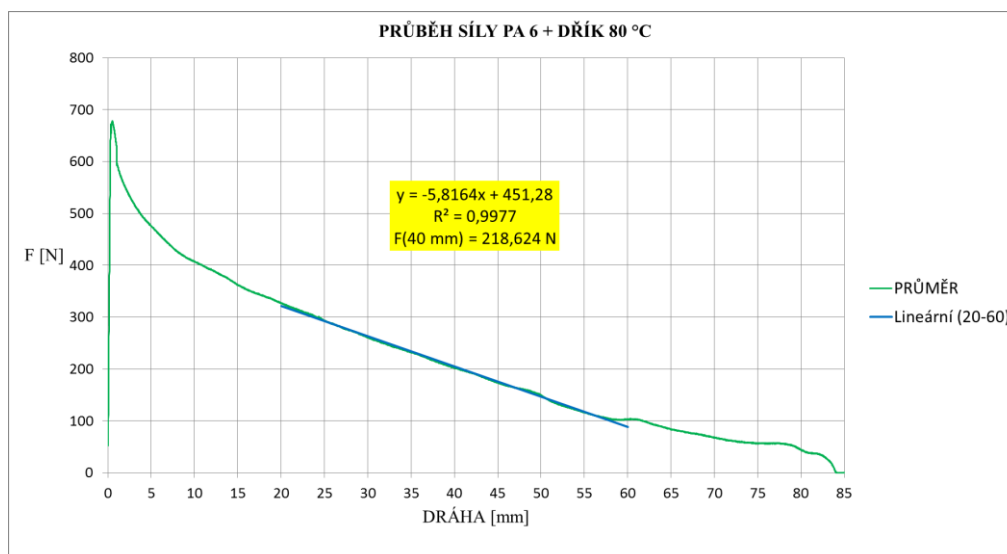
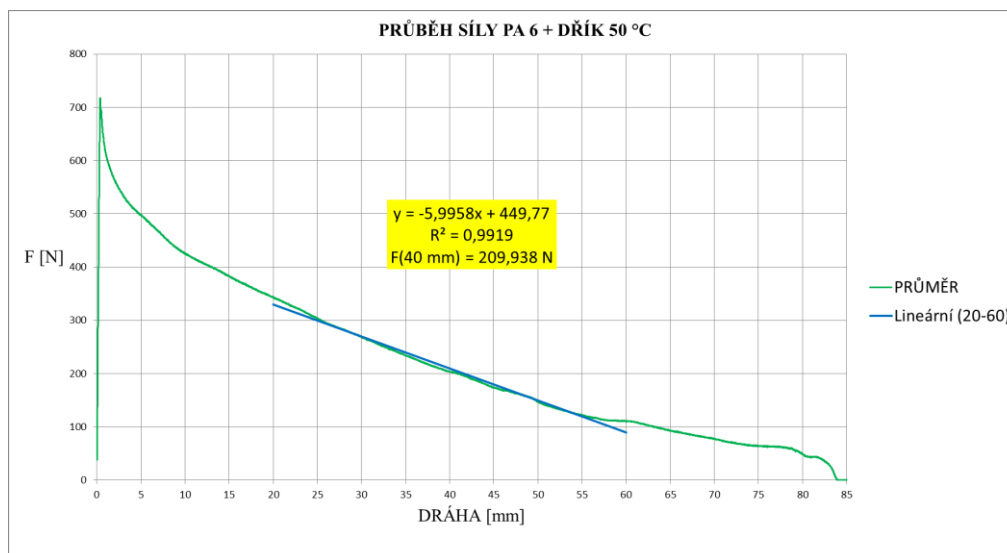
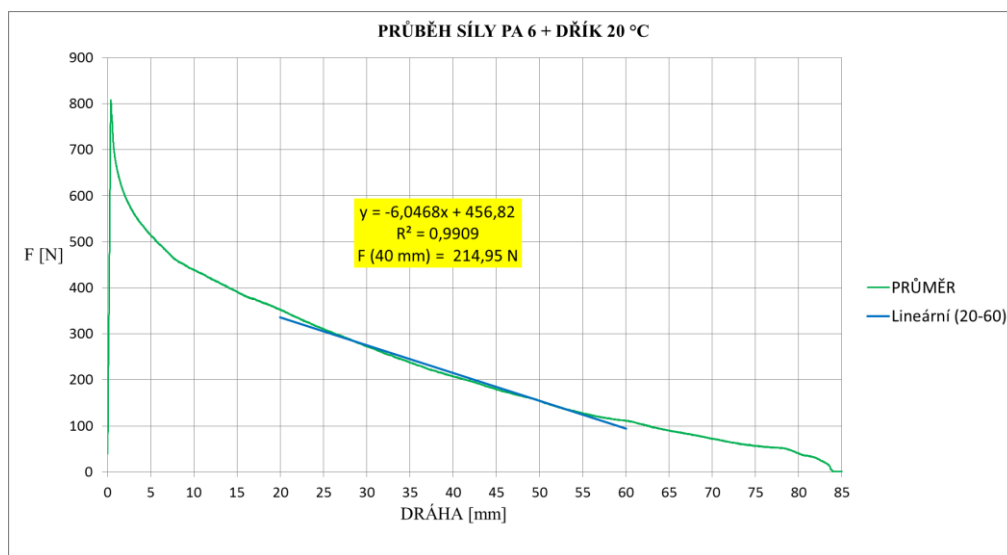
Výsledky měření průběhu axiální přídržné síly hybridního spoje



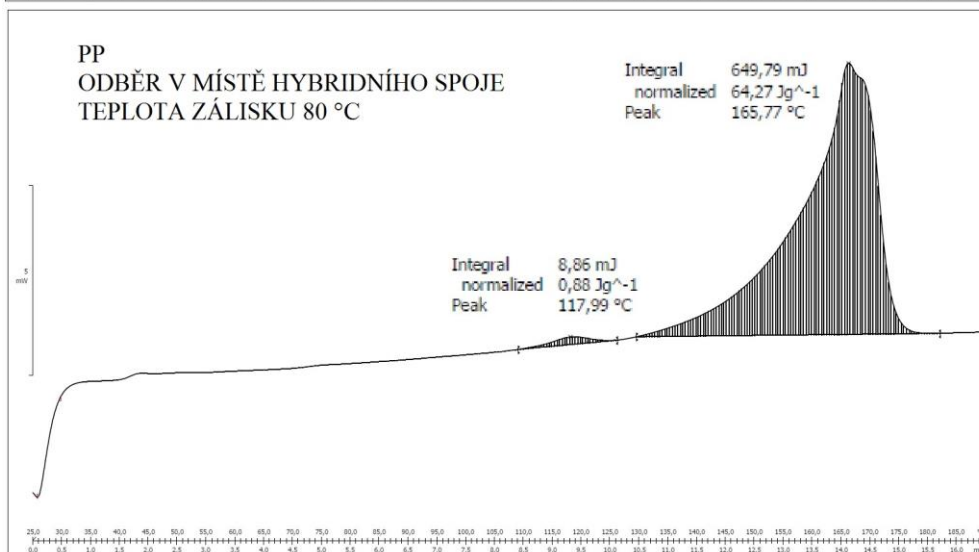
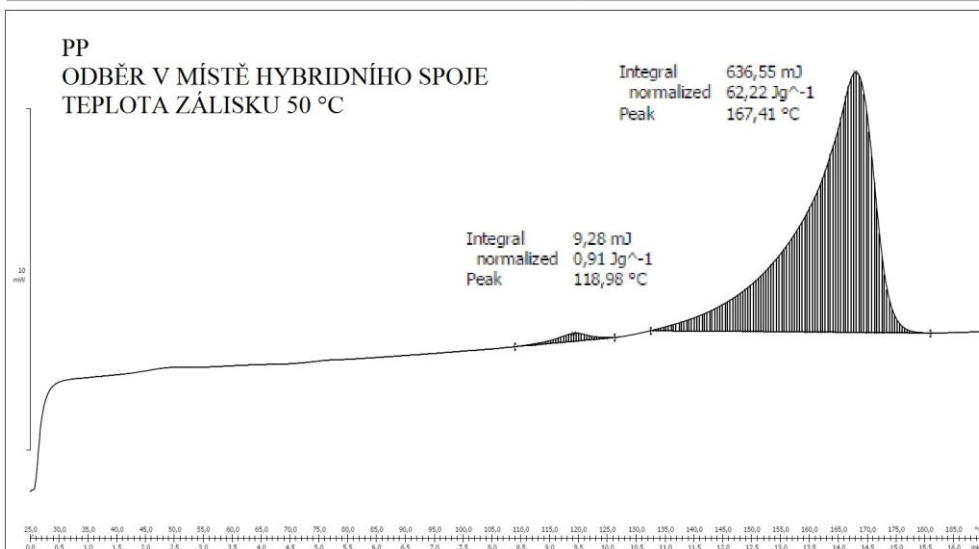
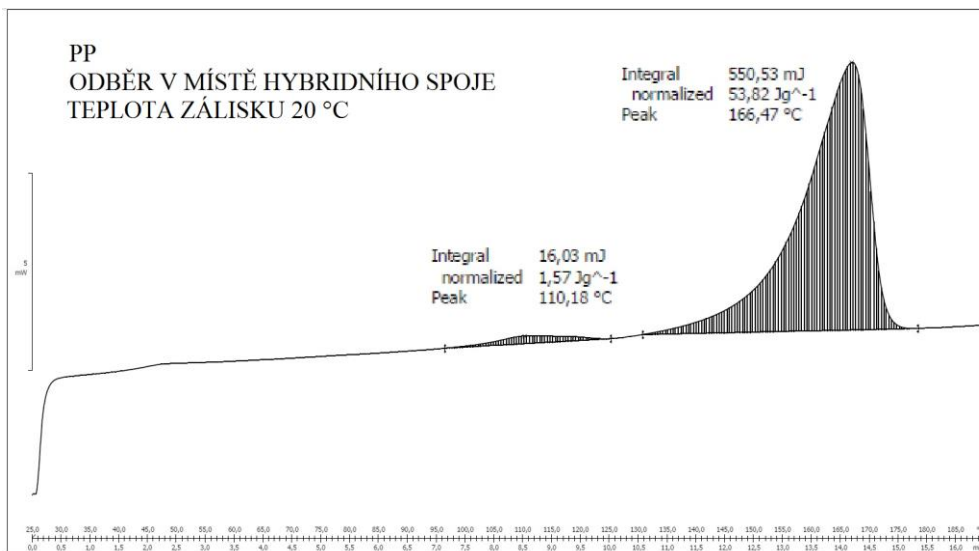


### Příloha 5 str. 3/3

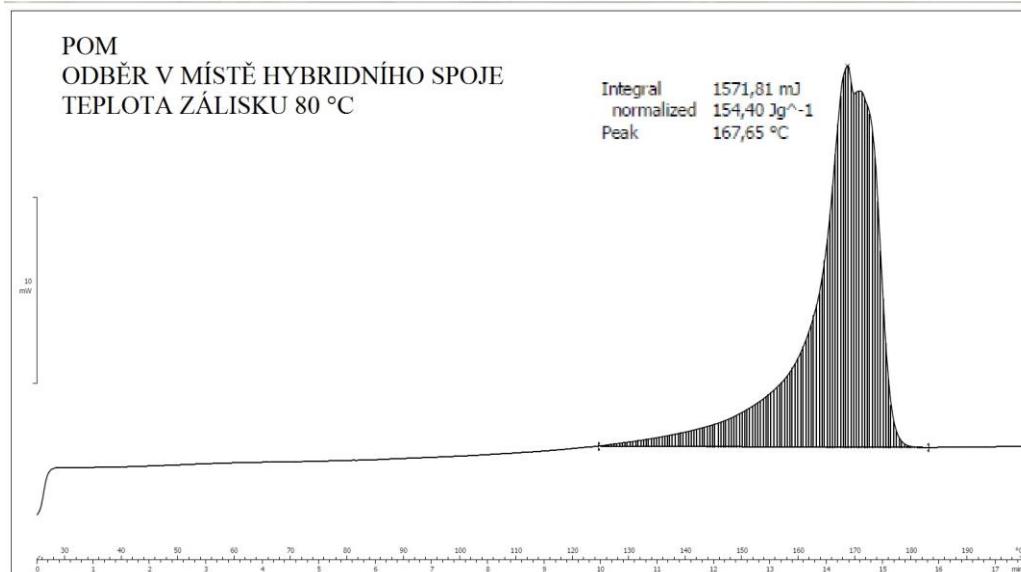
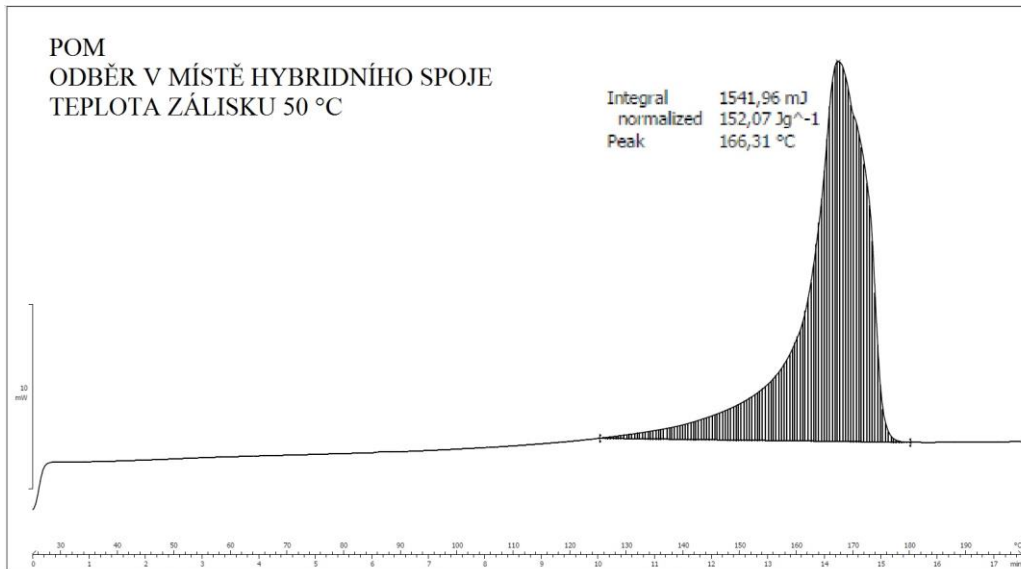
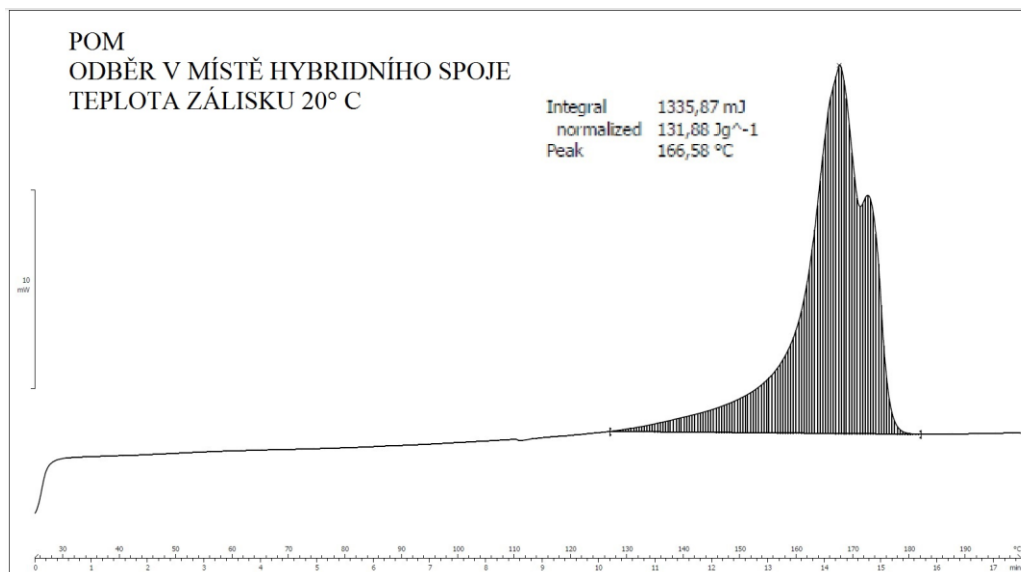
Výsledky měření průběhu axiální přídržné síly hybridního spoje



Příloha 6 str. 1/3



Příloha 6 str. 2/3



Příloha 6 str. 3/3

