

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



**ZVYŠOVÁNÍ KVALITY PLASTOVÝCH DÍLŮ
POMOCÍ MĚŘENÍ A SIMULACE**

***INCREASING OF PLASTIC PARTS QUALITY
BY MEANS OF MEASURING AND SIMULATION***

HABILITAČNÍ PRÁCE

Dr. Ing. Petr Lenfeld

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

obor 23 – 01T – strojní inženýrství

strojírenská technologie

zaměření tváření kovů a plastů

katedra strojírenské technologie

**ZVYŠOVÁNÍ KVALITY PLASTOVÝCH DÍLŮ
POMOCÍ MĚŘENÍ A SIMULACE**

**INCREASING OF PLASTIC PARTS QUALITY
BY MEANS OF MEASURING AND SIMULATION**

Dr. Ing. Petr Lenfeld

vedoucí katedry: Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.

Rozsah práce a příloh:

počet stran 254

počet obrázků 155

počet tabulek 27

počet výkresů 0

počet příloh 0

práce je 2x

U 338 / 2000 S

254 n.

OBSAH HABILITAČNÍ PRÁCE

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	6
1. ÚVOD HABILITAČNÍ PRÁCE	9
2. APLIKACE PLASTŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	15
2.1. NÁVRH A KONSTRUKCE TVARU VÝROBKŮ Z PLASTŮ	19
2.1.1. Zásady tvarového řešení výrobků z plastů	19
2.1.2. Pevnostní řešení	26
2.1.3. Přesnost rozměrů u výrobků z plastů a jejich změny	31
2.2. PLASTY, JEJICH VLASTNOSTI A POUŽITÍ PŘI VÝROBĚ OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ	35
2.2.1. Polyolefiny, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	39
2.2.2. Styrenové hmoty, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	42
2.2.3. Polyamidy, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	44
2.2.4. Polyimidy a ostatní polyamidy, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	47
2.2.5. Ostatní používané termoplasty, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	49
2.2.6. Polyuretany, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	51
2.2.7. Polyestery, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů	53
2.3. TECHNOLOGIE A TECHNOLOGICKÉ TRENDY POUŽÍVANÉ PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	55
2.3.1. Doprava, skladování a přípravné operace	56
2.3.2. Vstřikování plastů	59
2.3.2.1. <i>Vstřikování termoplastů</i>	59
2.3.2.2. <i>Vstřikování plněných termoplastů</i>	65
2.3.2.3. <i>Vstřikování reaktoplastů</i>	66
2.3.2.4. <i>Vstřikování strukturních pěn</i>	67
2.3.2.5. <i>Vstřikování sendvičů</i>	67
2.3.2.6. <i>GID – vstřikování s plynem</i>	68
2.3.2.7. <i>RIM – reaktivní vstřikování</i>	70
2.3.2.8. <i>Vícekomponentní vstřikování</i>	71
2.3.2.9. <i>Hybridní technologie na bázi vstřikování</i>	73
2.3.3. Lisování plastů	74
2.3.4. Vyfukování plastů	76
2.3.5. Tvarování plastů	77
2.4. STROJE PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ	78
2.4.1. Vstřikovací stroje	79
2.4.1.1. <i>Vstřikovací jednotka</i>	79
2.4.1.2. <i>Uzavírací jednotka</i>	85
2.4.1.3. <i>Energetická náročnost vstřikovacích</i>	86

<i>strojů</i>	
2.4.1.4. Řízení a regulace vstřikovacích strojů	88
2.4.2. Lisovací stroje	90
2.4.3. Vyfukovací stroje	91
2.4.4. Tvarovací stroje	92
2.5. NÁSTROJE PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ	92
2.5.1. Formy pro vstřikování termoplastů	94
2.5.1.1. Vtoková soustava vstřikovacích forem	96
2.5.1.2. Temperační systém vstřikovacích forem	101
2.5.1.3. Vyhazovací systém, odvzdušnění a povrch vstřikovacích forem	103
2.5.2. Nástroje pro lisování	105
2.5.3. Nástroje pro vyfukování	108
2.5.4. Tvarovací formy	109
2.6. KLASIFIKACE VAD, JEJICH FYZIKÁLNÍ PŘÍČINY A MOŽNOSTI JEJICH ODSTRANĚNÍ	110
2.6.1. Lesklé skvrny, rozdíly v lesku	110
2.6.2. Barevné šmouhy (barevná šlirovitost)	112
2.6.3. Neúplné výrobky	113
2.6.4. Bubliny	114
2.6.5. Vlákna u vtoků	115
2.6.6. Stříbření (šlirovitost vzduchem a vlhkostí)	115
2.6.7. Silné přetoky	117
2.6.8. Studené spoje	118
2.6.9. Vady z rozjždění	119
2.6.10. Poškrábaný povrch	119
2.6.11. Orientace makromolekul	119
2.6.12. Krystalizace	121
2.6.13. Vnitřní pnutí	121
2.7. POVRCHOVÉ ÚPRAVY VÝROBKŮ Z PLASTŮ	123
2.7.1. Lakování plastů	123
2.7.2. Pokovování plastů	125
2.7.3. Kaširování plastů	126
2.8. RECYKLACE AUTOMOBILOVÝCH DÍLŮ Z PLASTŮ	127
2.8.1. Rozdělení odpadů	127
2.8.2. Zpracování odpadů	128
3. SIMULACE TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PRO ZADNÍ NÁRAZNÍK ŠKODY FELICIE COMBI	130
3.1. SIMULAČNÍ PROGRAM STRIMFLOW	131
3.2. APLIKACE STRIMFLOW PŘI SIMULACI PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ PRO VYBRANÝ DÍL	131
3.2.1. Analýza plnění tvarové dutiny formy	135
3.2.2. Analýza chlazení naplněné tvarové dutiny formy	138
3.2.3. Strukturní analýza plastového dílu po vyhození ze vstřikovací formy	149
4. PROBLEMATIKA VÝROBY VYBRANÉHO DÍLU Z PLASTŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	151

4.1. PROBLEMATIKA ZMETKOVITOSTI PŘI VÝROBĚ NÁRAZNÍKŮ VE VZTAHU KE ZMĚNÁM PARAMETRŮ VYBRANÝCH ŠARŽÍ	152
4.1.1. Kontrola vlastností vstupního plastu – měření indexu toku taveniny, hustoty a obsahu minerálního plniva	153
4.1.2. Kontrola vlastností vstupního plastu s použitím zkoušky tahem	157
4.1.3. Sledování zmetkovitosti při výrobě zadního nárazníku pro <i>Škodu Felicii Combi</i> při použití jednotlivých šarží	164
4.2. PROBLEMATIKA TEMPERACE U VELKOPLOŠNÝCH VÝLISKŮ	170
4.2.1. Termovizní měření teplotních polí	172
4.2.2. Hodnocení účinků rozložení teplotních polí na mechanické vlastnosti	201
5. SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	234
5.1. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH Z HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ PLASTU, POUŽITÉHO PRO VSTŘIKOVÁNÍ	235
5.2. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH ZE SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ	237
5.3. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH Z TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ NA POVRCHU VÝROBKU	243
5.4. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH Z HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	248
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	253

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

rPE	nízkohustotní polyetylen
LDPE	nízkohustotní polyetylen
LPE	vysokohustotní polyetylen
HDPE	vysokohustotní polyetylen
ASA	akrylonitril-styrén-akrylát
ABS	akrylonitril-butadién-styrén
PS	polystyrén
PPS	polyfenylénsulfid
PPO	polyfenylénoxid
PSU	polysulfon
SAN	kopolymer styren-akrylonitril
SMA	kopolymer styren-maleinanhydrid
PA	polyamid
PI	polyimid
PEI	polyetherimid
PAI	polyamid-imid
PPA	polyftalamid
PAA	polyarylamid
PARA	polyaramid
PVC	polyvinylchlorid
PMMA	polymethylmetakrylát
PBI	polybenzimidazol
PBT	polybutyléntereftalát
PTFE	polytetrafluoretylén
PET	polyetyléntereftalátu
PPO	polyfenylénoxid
POM	polyoximetylén
PC	polykarbonát
PUR	polyuretan
EP	epoxidová pryskyřice
PF	fenolformaldehydová pryskyřice
UF	močovinoformaldehydová pryskyřice
UP	nenasycené polyestery
CAD	computer aided design
CAM	computer aided manufacturing
CAE	computer aided engineering
RIM	reaction injection moulding
RRIM	reinforce reaction injection moulding
SRIM	structural reaction injection moulding
GIT	gas injection technology
BMC	bulk moulding compound
SMC	sheet moulding compound
A	tažnost /%/
A ₁	rozměr formy /mm/
A ₂	rozměr ve formě po ohřevu na provozní teplotu /mm/
B ₁	rozměr výrobku po výrobním smrštění po 24 hod /mm/
B ₂	rozměr výstřiku po dodatečném smrštění /mm/

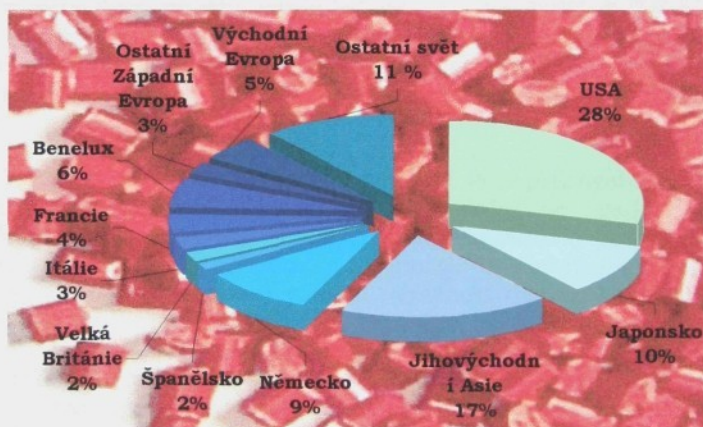
b	šířka stroje /mm/
C ₁	rozměr výstřiku po navlhnutí /mm/
C ₂	rozměr výstřiku po ohřátí na provozní teplotu /mm/
c	obsah vlhkosti /kg.kg ⁻¹ /
C _{krit}	kritický obsah vlhkosti /kg.kg ⁻¹ /
Cr	rovnovážná vlhkost /kg.kg ⁻¹ /
D	průměr šneku/mm/
D	průměr temperačního kanálu /mm/
E	modul pružnosti /MPa/
E _k	konstrukční (zdánlivý) modul pružnosti /MPa/
F	síla /N/
F _{max}	maximální síla /N/
F _R	síla při přetržení /N/
F _p	přisouvací síla /N/
F _u	uzavírací síla /N/
G	modul pružnosti ve smyku /MPa/
h	výška stroje /mm/
IT	stupeň přesnosti /-/
ITT	index toku taveniny /g.10min ⁻¹ /
Δl _{Fmax}	prodloužení při maximální síle /mm/
Δl _R	prodloužení při přetržení /mm/
l	délka stroje/mm/
L	délka šneku/mm/
M	hmotnost vytápěné části formy /kg/
MVR	objemový tavný index /cm ³ .10min ⁻¹ /
MFR	hmotnostní tavný index /g.10min ⁻¹ /
N	měrný příkon topných těles /W.kg ⁻¹ /
p	vnější tlak /MPa/
p _i	vnitřní tlak v dutině formy /MPa/
p _{vstr}	maximální vstřikovací tlak /MPa/
p _z	zbytkový tlak /MPa/
p ₁	vstřikovací tlak /MPa/
p ₂	tlak v dutině formy /MPa/
Q _v	vstřikovací kapacita /cm ³ /
Q _p	plastikační kapacita /kg.hod ⁻¹ /
R	rádius zaoblení /mm/
Re	mez kluzu /MPa/
R _m	mez pevnosti /MPa/
s	tloušťka stěny /mm/
s	dráha posuvu šneku vpřed při vstřiku /mm/
t	doba sušení /s/
t _{s1,2,3}	strojní čas /s/
t _v	doba vstřikování /s/
t _{ch}	doba chlazení /s/
t _d	doba dotlaku /s/
t _{pl}	doba plastikace /s/
t _k	čas odsunutí tavicí komory od formy /s/
t _{kp}	doba prodlevy komory v odsunuté poloze /s/
t _m	manipulační doba /s/

T	teplota /°C/
T _g	teplota zesklenní /°C/
T _f	teplota viskózního toku /°C/
T _m	teplota tání /°C/
T _F	teplota formy /°C/
U	rychlost sušení /kg.m ⁻² .hod ⁻¹ /
v	měrný objem /m ³ .kg ⁻¹ /
v	objemová vstřikovací rychlost /cm ³ .s ⁻¹ /
x	střední rozměr /mm/
α	délková teplotní roztažnost /K ⁻¹ .10 ⁻⁵ /
ε	deformace /-/
ε _{krit}	kritická deformace /-/
ε _{celk}	celková deformace /-/
ε _{celk1,2,3}	celková deformace ve třech hlavních směrech /-/
ε _{dov}	dovolená deformace /-/
ε ₁	ideálně elastická deformace /-/
ε ₂	viskoelastická deformace /-/
ε ₃	plastická deformace /-/
ε _B	deformace (tažnost) na mezi pevnosti /-/
γ	zkos /-/
μ	Poissonovo číslo /-/
ρ	hustota plastu /kg.m ⁻³ /
σ	normální napětí /MPa/
σ _{1,2,3}	normální napětí ve třech hlavních směrech /MPa/
σ _{dov}	dovolené napětí /MPa/
σ _{red}	redukované napětí /MPa/
σ _B	napětí na mezi pevnosti /MPa/
τ	smykové napětí /MPa/

1. ÚVOD HABILITAČNÍ PRÁCE

Přestože se plasty začaly vyrábět a zpracovávat již ve druhé polovině 19. století, hromadně se začaly využívat ve všech průmyslových odvětvích až v tomto století, a to zejména po druhé světové válce.

V současné době se ve světě produkuje asi 100 milionů tun plastů za rok (viz. obr. 1.1), přičemž roční spotřeba na jednoho obyvatele se pohybuje, podle hospodářské vyspělosti země, od 40 do 150 kg. Plasti je dnes obrovský sortiment, přičemž jednotlivé materiály se liší chemickým složením polymeru, molekulární a nadmolekulární strukturou, zpracovatelskými a užitnými vlastnostmi. Během následujících patnácti let bude nástup plastů ještě prudší, než-li do této doby, protože mnohem lépe vyhovují požadavkům budoucnosti – jsou lehčí, recyklovatelné, příp. biologicky rozložitelné a jejich výroba je velmi levná.



Obr. 1.1: Světová produkce plastů v roce 1999

Rozvoj jednotlivých druhů plastů, ale i blendů a kompozitů, je dán hlavně stále větším objemem rozdílných dílů a aplikací, ale i s rozvojem zpracovatelských technologií, které jsou mnohdy konstruovány a řešeny na míru pro zvolené odvětví průmyslu, zejména pro automobilový průmysl, který je v současné době nositelem v zavádění nových technologií a materiálů do výroby.

V blízké budoucnosti však bude vzhled aut zřejmě výrazně jiný, protože se budou používat nejenom jiné materiály, ale i odlišné technologie, které budou výrazně snižovat energetickou náročnost výroby a tedy ve svém důsledku i spotřebu paliva u automobilů. Již v této době se uvažuje o tvorbě materiálu na bázi polymerů s tvarovou pamětí pro aplikaci na karosérii vozu, která by po nárazu do překážky obnovila svůj původní tvar.

Při srovnání kovů a plastů je vidět, že mnohem výraznější roční přírůstek na trhu mají polymerní materiály s 9 % oproti 3 % pro materiály kovové. Roční světová spotřeba plastů, měřená objemem, je v současné době již stejná, ne-li vyšší, jako u kovů.

Jedním z hlavních důvodů prudkého rozvoje zpracování a použití plastů je, vedle jejich výhodných vlastností a malého podílu investičních nákladů na zavedení výroby, především levný a produktivní způsob zpracování, mezi které patří, kromě dále uvedených technologií, hlavně technologie vstřikování.

Rozvoj technologií pro zpracování plastů v blízké budoucnosti lze shrnout do tří hlavních směrů:

- ♦ zlepšení řízení, automatizace a optimalizace klasických technologických procesů, zaměřená na zvyšování produktivity a kvality plastových výrobků,

- ♦ modifikace stávajících zpracovatelských technologií, kterou si vyžaduje zpracování některých nových typů polymerů a nebo vývoj nových výrobků z plastů, pro něž je nezbytná úprava zpracovatelského zařízení nebo vývoj nového stroje,

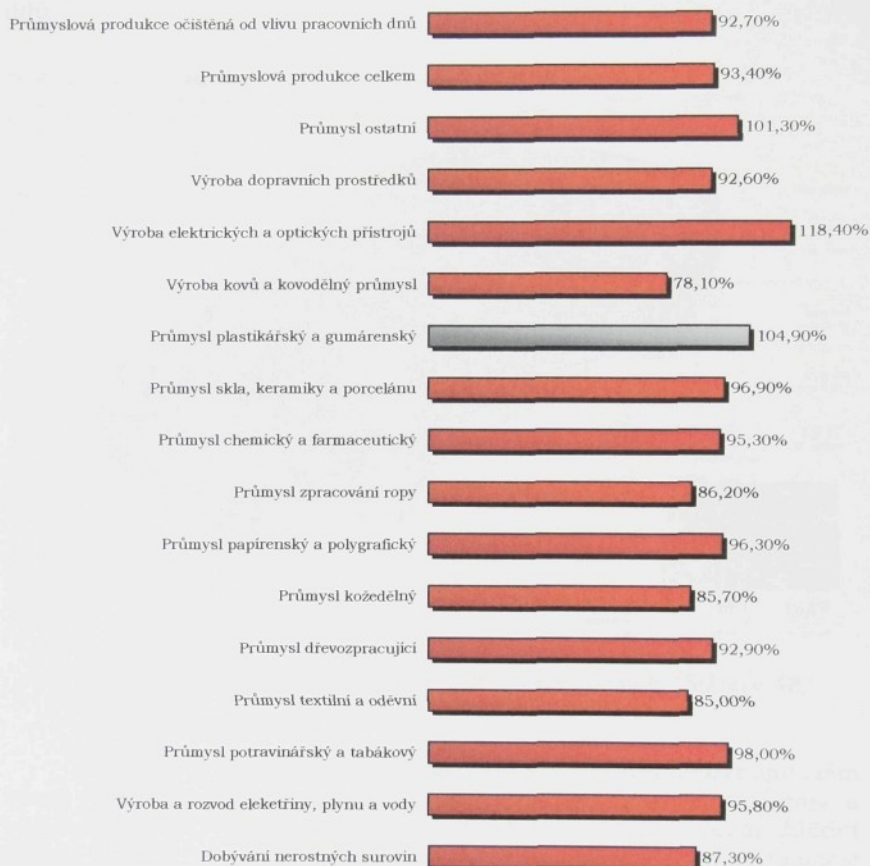
- ♦ snižování energetické náročnosti jak u strojů a zařízení, tak hlavně v oblasti přípravy plastu do formy granulátu pro následné zpracování.

V České republice byly výrazné změny v průmyslu zpracování plastů zaznamenány po roce 1989, kdy se velké podniky transformovaly a spojovaly se zahraničním kapitálem (např. *Pegufarm Bohemia a.s.*, *Strojplast Tachov*, ...) a rychle se rozvíjející plastikářský průmysl s přílivem kapitálu přinesl výraznou modernizaci strojového vybavení a nové výrobní programy, které se po vstupu fy *Volkswagen AG* do automobilového průmyslu začaly výrazně orientovat na subdodávky do *Škody Auto a. s.*, který však vyžadoval a vyžaduje vysokou kvalitu a užité vlastnosti vyráběných plastových dílů a také co nejkratší čas od záměru (návrhu) po realizaci a co nejvyšší produktivitu práce.

Počet firem a společností, zabývajících se zpracováním plastů, se za posledních pět let minimálně ztrojnásobil. A právě plastikářský průmysl je světlovou výjimkou celkového průmyslu České republiky, který svou výkonností zaostává za vyspělými zeměmi světa. Výkonnost průmyslu se od roku 1989 výrazně nezměnila a také průmyslová produkce ve většině odvětvích stále ještě nedosahuje produkce v roce 1989 (viz. obr. 1.2). To však nelze říci o průmyslu zpracování plastických hmot, který jako jeden z mála překonal hranici 100 % indexu průmyslové produkce v České republice v roce 1999.

Velký význam v procesu zvyšování technické úrovně výroby a tím i konkurenčního postavení našich podniků má oblast vědy a výzkumu a to jak základního, tak zejména aplikovaného výzkumu, zaměřeného na potřeby a problémy praxe. Míra účelnosti vědeckého výzkumu, který je zaměřen na potřeby praxe, je v konečném důsledku určována a hodnocena kritériem jeho praktické použitelnosti. Správný a

konkrétně zaměřený výzkum problémů přispívá významnou měrou k rozvoji a produktivitě výroby a k co nejnižšímu počtu zmetků.



Obr. 1.2: Index průmyslové produkce pro jednotlivá odvětví v České republice v roce 1999 /47/

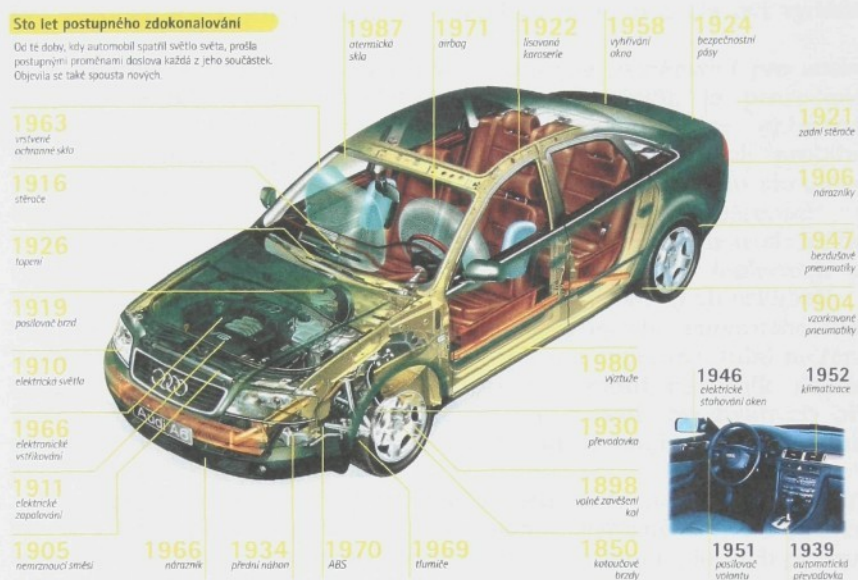
Z tohoto hlediska je skutečnost taková, že pozornost věnovaná výzkumu a vývoji je nedostatečná nejenom ze strany státu, ale i ze strany firem a společností. Tak např. ve strojírenství je ve vyspělých světových státech věnován na výzkum a vývoj podíl kolem 8 % z obrátu, kdežto u našich podniků je tento podíl pouze 1 max. 2 %.

Svět, ve kterém žijeme a který nás obklopuje, je v rostoucí míře spoluvytvářen lidskou činností, a to ať už z hlediska přínosu a nebo z hlediska škodlivosti. Tak např. jenom v oblasti automobilového

průmyslu a s tím spojených aplikací, během posledních sta let nastal tak bouřlivý rozvoj, který by nemohl nastat, nebýt vlivu nových materiálů a nových technologií výroby (viz. obr. 1.3) s co nejkvalitnějším řízením při současné produkci kvalitních plastových dílů.

Sto let postupného zdokonalování

Děle doby, kdy automobil spatřil světlo světa, prošla postupným proměňáním doslova každá z jeho součástí. Objevila se také spousta nových.



Obr. 1.3: Zdokonalování automobilů za posledních 150 let / 48/

Budoucí vývoj celé lidské společnosti je postaven na dynamickém vývoji všech lidských činností a je velmi nejisté předpovídat směr a rychlost tohoto vývoje. V budoucnu lze však očekávat a předpokládat hlavně pokrok ve třech oblastech, které jsou považovány za nositele zvyšování životní úrovně lidského společenství, mezi které patří informatika a informační technologie, biotechnologie a *materiály a jejich zpracování*. Do této třetí oblasti spadá i tato předložená habilitační práce, která je napsána na téma „Zvyšování kvality plastových dílů pomocí měření a simulace“ a svým obsahem je zaměřena do oblasti automobilového průmyslu.

Habilitační práce je rozčleněna do několika kapitol, ve kterých jsem si stanovil následující cíle:

♦ V kapitole 2., nazvané „Aplikace plastů v automobilovém průmyslu“, jsem chtěl, po jejím zpracování, ukázat postup plastikářské výroby v obecném hledisku v linii návrh tvaru a konstrukce výrobku → výběr materiálu → výběr technologie zpracování → výběr typu stroje → návrh a konstrukce nástroje pro vybranou technologii zpracování → příčiny vzniku vad a možnosti jejich odstranění → volba povrchové

úpravy pro plastové díly → recyklace. A to vše aplikované na automobilový průmysl současnosti a navíc směřované i pro nejbližší budoucnost (přibližně do roku 2003).

Dále tato kapitola měla přinést ve svém konečném důsledku „kuchařku“ pro konstruktéry a technology, kteří se zabývají řešením problémů při své každodenní práci a potřebují teoretickou podporu pro své výstupy, ale i pro studenty a v nejbližší době by měla být vydána knižně.

♦ V kapitole 3., nazvané „*Simulace technologie vstřikování pro zadní nárazník Škody Felicie Combi*“ (model roku 1998), je provedeno namodelování procesu vstřikování (fáze plnění, fáze chlazení, strukturní analýza) pro podmínky vstřikování, za kterých probíhá výroba daného dílu v a. s. *Peguform Bohemia*. Výsledky této simulace budou následně porovnány s experimentálním měřením s vyhodnocením rozdílu mezi experimentem a modelováním u složitého rozměrného dílu, a to nejenom z hlediska rozložení teplotních a napětových polí v jednotlivých časech, ale i z hlediska jejich velikosti.

♦ V kapitole 4., nazvané „*Problematika výroby vybraného dílu z plastů pro automobilový průmysl*“ je provedeno experimentální měření několika parametrů na vybraném výrobku (zadní nárazník *Felicie Combi*, model roku 1998), který je jednou z částí, používaných při stavbě vozu v automobilovém průmyslu a které mají výrazný vliv na kvalitu a užité hodnoty výrobku.

Experimentální měření se týkalo vstupních materiálových dat, které, i když jsou certifikovány, tak mohou výrazně ovlivnit proces zpracování a kvalitu výroby a dále se týkalo rozložení teplotních polí na povrchu výrobku od působení temperačního systému s vyhodnocením účinků temperačního systému na rovnoměrnost rozložení těchto polí a na hodnoty povrchových teplot v jednotlivých místech výrobku a v případě nerovnoměrnosti rozložení teplotních polí vyhodnotit vliv na mechanické hodnoty (napětové pole).

Celá předložená habilitační práce se svým obsahem dotýká oblasti pronikání plastů do technických aplikací dle požadavků trhu a s tím se samozřejmě dotýká i neustále rostoucích požadavků na kvalitu a jakost vyráběných dílů (a to hlavně v oblasti výroby osobních automobilů), které nespočívají pouze v konečné kvalitě vyrobeného dílu, ale spočívají i v řízení kvality během procesu zpracování. Nejedná se tedy např. jen o kvalitní vzhled, ale např. i o rozměrovou přesnost, shodnou kvalitu v celém objemu plastového výrobku, opakovatelnost vlastností, zaručení kvalitní výroby po celou dobu vývoje a zpracování, atd.

Při výrobě dílů z plastů se můžeme setkat z různými chybami, které následně vedou k výrobě zmetků.

Rozeznáváme následující kategorie chyb, které způsobují problémy při výrobě:

- ♦ vady, vznikající špatnou konstrukcí a návrhem výrobku,
- ♦ nevyhovující vlastnosti materiálu,
- ♦ konstrukční vady nástroje,

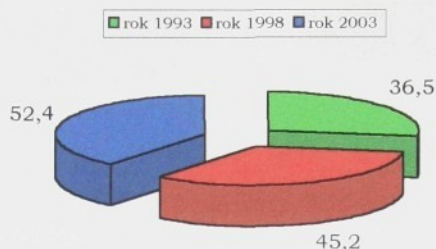
- technologické chyby a nedostatky,
- strojně technické chyby.

V normálním případě je velmi obtížné přiřadit vzniklé problémy k některé z uvedených kategorií, neboť se vzájemně překrývají, ale platí, že čím dříve chyba vznikne, tím více zmetků a špatných výrobků je v konečném stádiu vyrobeno. Proto se musí důsledně provádět kontrola kvality v jednotlivých oblastech zpracovatelského cyklu a v případě vzniku problémů je co nejrychleji odstranit. A proto bych chtěl také ukázat v této habilitační práci některé problémy

Vzhledem k požadavkům prodejního trhu na kvalitu výrobku nelze se v této habilitační práci zabývat všemi aspekty od návrhu výrobku až po volbu stroje, které mohou mít vliv na jakost a kvalitu dílu a proto jsem se ve své práci zaměřil na problémy, které vznikají při výrobě vybraného plastového dílu (zadní nárazník pro Škodu Felicii Combi, model roku 1998) a které ovlivňují konečné užité vlastnosti a konečnou kvalitu. Jednalo se o studium vlivu materiálu a vlivu formy na konečný produkt. Ostatní parametry, které by mohly ovlivňovat konečnou kvalitu a jakost vyráběného dílu jsem, vzhledem k jejich buď pevně daným okolnostem (design vozu a jeho rozměry, apod.) a nebo vzhledem k jejich dokonalosti v dnešní době (kvalita zpracovatelských zařízení a technologií včetně mikroprocesorového řízení, apod.), v experimentu této habilitační práce neuváděl. Nebo-li v dalších kapitolách habilitační práce není uvažován vliv konstrukce a tvaru výrobku, vliv použité výrobní technologie a vliv stroje na problémy, které vznikají při výrobě zadního nárazníku, ale pouze studium a sledování vlivu materiálu a vlivu konstrukce formy včetně procentuální úspěšnosti simulace na kvalitu hotového výrobku.

2. APLIKACE PLASTŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Výroba automobilů patří mezi významná průmyslová odvětví současnosti. O velikosti produkce nejlépe vypovídá každým rokem rostoucí prodej počtu vozů (viz obr. 2.1), přičemž instalovaná výrobní kapacita firem je až o 20 milionů vyšší, než-li je nynější prodej vozů na světě. V současné době jezdí po světových silnicích 590 milionů motorových vozidel, které spotřebují pohonné hmoty v objemu 18,7 % celosvětové spotřeby energie.



Obr. 2.1: Počet vyrobených automobilů na světě (v milionech kusů) s výhledem do roku 2003 /4/

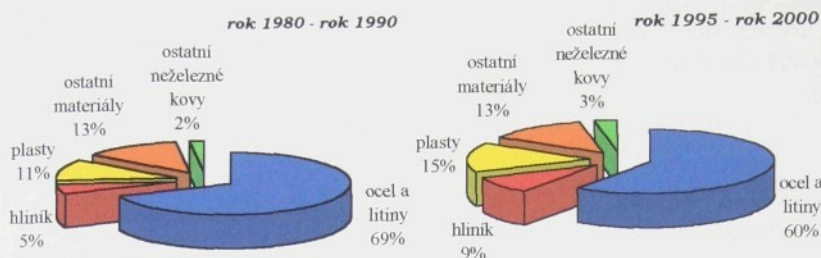
Na základě těchto čísel je zřejmé, že výroba a produkce automobilů vyvolává zájem nejenom u zpracovatelů materiálů a dodavatelů jednotlivých komponentů, ale v posledních letech se stává i součástí celosvětového zájmu o životní prostředí. Při výrobě automobilů tedy vystupuje do popředí nejenom energetická náročnost výroby a zpracování jednotlivých materiálů, ale i ekologická zátěž při výrobě materiálů (viz. tab. 2.1), používaných při stavbě vozů. Ta se stává hnacím činitelem, která bude rozhodovat o volbě materiálu při konstrukci vozů.

Tab. 2.1: Ekologická zátěž výroby vybraných materiálů /5,6/

Materiál	Měrná energie /MJ.kg ⁻¹ /	Vzduch /10 ³ .m ³ .kg ⁻¹ /	Voda /l.kg ⁻¹ /	Tuhý odpad /cm ³ .kg ⁻¹ /
Ocel	20	292	55	220
Hliník	129	2438	1136	1958
Plasty obecně	60 až 90	640 až 850	420 až 690	20 až 220
* polyetylén	79	688	439	37
* polyvinylchlorid	60	801	521	215

Výroba automobilů představuje pro producenty materiálů, mezi které patří výrobci oceli, hliníku, plastů, aj., výhodné odbytiště jejich

produktů. Výrobci polotovarů se snaží o zvýšení podílu „svého“ materiálu na trhu. To vede k omezování dominantního postavení oceli a ke zvyšování podílu hliníku a plastů, příp. ostatních materiálů při stavbě vozů (viz. obr. 2.2).



Obr. 2.2: Podíl vybraných materiálů na struktuře stavby osobního automobilu (Mercedes Benz) /5,6/

Na trh jsou postupně prosazovány vozy, ve kterých se jejich výrobci snaží o co nejvyšší procento objemu hliníku (*Ford Mercury Sable*, *Audi 8*) nebo plastů (*Renault Espace*), příp. se používají hybridní materiály na bázi hliníku a plastů (kompozitů), což bylo ověřeno u vozu *Renault Clio*.

Plasty i přes svou vysokou energetickou náročnost a ekologickou zátěž, ale na druhé straně s výhodným snižováním hmotnosti (viz. tab. 2.2), velmi dobrou korozní odolností, apod., začínají výrazně promlouvat do stavby a konstrukce automobilů.

Tab. 2.2: Porovnání a úspora hmotnosti u vybraných dílů v automobilu /6/

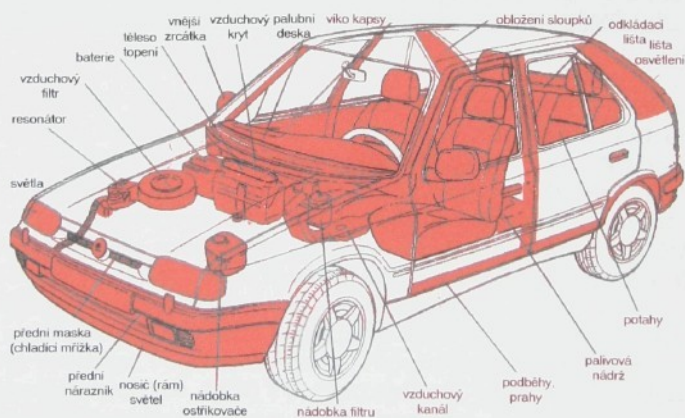
Vybraný díl automobilu	Materiál - hmotnost		
	ocel /kg/	plast /kg/	úspora hmotnosti /kg/ - /%/
víko zavazadlového prostoru	11,0	7,8	3,2 (29,0 %)
výplň dveří	5,6	3,1	2,5 (44,6 %)
kapota motoru	15,2	10,2	5,0 (32,9 %)
přední maska	18,6	3,6	15 (80,6 %)
blatník	5,3	2,5	2,8 (52,8 %)
palivová nádrž	6,7	3,4	3,3 (49,3 %)
nárazník	8,9	3,7	5,2 (58,4 %)
Celkem	71,3	34,3	37 (51,9 %)

V roce 1995 bylo zpracováno v automobilovém průmyslu 5 milionů tun plastů a odhad pro rok 2003 je více jak 7 milionů tun plastických hmot. Hmotnost dílů z plastů v automobilu průměrně vzroste z 95 kg (rok 1993) na 115 kg v roce 2003.

Při výrobě automobilů se uplatňuje velké množství dílů z plastů, které se liší nejen svým tvarem a konstrukcí, ale i použitou technologií a materiálem a v neposlední řadě i podmínkami zpracování a konstrukcí nástroje. Rozmach plastových dílů, používaných při výrobě aut, je především dán následujícími hledisky:

- ◆ snaha o co největší úsporu hmotnosti automobilu,
- ◆ nemožnost použití jiné technologie výroby,
- ◆ rozvoj povrchových technologií,
- ◆ stále větší možnosti recyklace,
- ◆ možnosti plastů „přizpůsobit“ se konstrukčním a designérským požadavkům,
- ◆ výroba plastů na „míru“,
- ◆ dojem lehkosti, elegance a estetického pocitu.

Hlavním odběratelem plastových dílů v České republice je, kromě společností, které dodávají komponenty do vozů jiných značek a typů, výrobce osobních automobilů *Škoda Auto a. a. s. Mladá Boleslav*. Ta montuje plastové díly do vozů značek *Felicie* a *Octavie*, nově i do vozu značky *Fabia*, včetně jejich variant. Na obr. 2.3 je schematicky ukázán počet, druh a umístění plastových dílů ve voze *Škoda Felicie*, model roku 1998.



Obr. 2.3: Díly z plastů v automobilu *Škoda Felicie*, model 1998 (recyklovatelné díly) / 51/

Příklady aplikace dílů z plastů včetně zvoleného materiálu a hmotnosti jednotlivých dílů jsou pro vůz *Škoda Felicie* a *Octavie* popsány v tab. 2.3.

Tab. 2.3: Porovnání hmotnosti vybraných dílů z plastů pro vůz Škoda Felicie a Octavie /51/

ŠKODA FELICIE			ŠKODA OCTAVIE		
Materiál	Příklad aplikace	Hmotnost /kg/	Materiál	Příklad aplikace	Hmotnost /kg/
PP+EPDM+T	nárazníky	7,5	PP+EPDM	podběh kola	1,0
PP+EPDM+T	přístrojová deska	4,0	PP+EPDM+T	nárazníky	8,0
PP/PE+T	obklady sloupků, prahů	11,0	PP/PE+T	obklady sloupků, prahů	15,0
PP/PE	přítahovače	1,0		přístrojová deska	
PP (ostatní)	výplně	2,0	PP/PE	přítahovače	2,0
PE	nádrž	3,0	PP (ostatní)	výplně	3,0
ABS	střední konzola, těleso světlíků, popelníky, ofukovače vnější zrcátka	3,0	PE	nádrž	3,0
			ABS	maska, ovládání topení, kryt tyče řízení, kryt elektrického pohonu	3,0
PA6	přítahovače, vnější kliky, madlo víka kapsy, příchytky	1,5	PA6	vnější kliky, příchytky	1,0
			PA66	příchytky, spojky kabelů	0,5
PA66	příchytky	0,5	PPO	štít přístrojů, ofukovače, mřížka rozmrazování	2,0
PC	stropní lampička, třetí brzdové světlo	0,8	ASA	listy osvětlení SPZ, maska, folie přední desky, vnější zrcátka	2,0
PPO	výztuha víka kapsy	1,0			
ASA	listy osvětlení SPZ, znaky	1,0	PC/ASA	výztuha víka kapsy	0,3
			PC/ABS	zadní lampy	0,4
PC/ASA	madlo 5. dveří	0,3	PC/ASA	výztuha víka kapsy	0,3

Největším dodavatelem plastových dílů pro automobilový průmysl je v České republice *a. s. Peguform Bohemia*, která se skládá ze závodů v Liberci, v Libáni a v Havlíčkově Brodě. Na výroby je v drtivé většině jako základní technologie použito technologie vstřikování, v omezené míře i technologie vyfukování, přímého lisování a přetlačování. Ke zpracování se používají tvářecí stroje od 500 kN až po 2700 kN uzavírací síly. Interiérové díly jsou upravovány metodou soft lakování (zvýšená odolnost proti poškrábání), tj. lakování čirým lakem a exteriérové díly jsou povrchově lakovány do barvy vozu.

Na výrobky, vyráběné v *a. s. Peguform Bohemia*, se např. v roce 1998 spotřebovalo asi 4800 t polypropylenu, 3000 t polyetylenu, 1700 t akrylonitrilbutadienstyrenu a v menším množství i polystyren, polyamid, polykarbonát a ostatní materiály.

V dalších kapitolách této habilitační práce bude popsána problematika výroby plastových dílů, a to jednak z hlediska návrhu a konstrukce výrobku a vstřikovací formy, tak i z hlediska volby materiálu a volby stroje, ale také i z hlediska technologie výroby, možných vad, povrchových úprav plastových dílů a recyklace.

2.1. NÁVRH A KONSTRUKCE TVARU VÝROBKŮ Z PLASTŮ

Výrobky z plastů se konstrukčně řeší z hlediska funkčního, ekonomického, technologického a estetického. Všechna tato hlediska by měla být splněna najednou u navrhovaného plastového dílu.

Funkčnost tvaru musí splňovat všechny funkce, které od výrobku požadujeme zvláště v dnešní době, kdy celosvětový vývoj směřuje k stále většímu použití integrovaných více funkčních součástí z plastů se současným výrazným snížením celkových výrobních nákladů a nákladů na montáž. Funkčnost součásti musí být zajištěna po celou dobu životnosti plastového dílu (asi 5 let podle druhu výrobku), neboť porušené plastové díly lze obtížně a nebo nelze vůbec opravit. K tomu ještě přistupuje působení povětrnostních vlivů a vliv slunečního záření, které v mnoha případech snižují životnost součástí. K zajištění správné funkce tvaru je potřeba provést pevnostní výpočty (viz. kap. 2.1.2) včetně řešení z hlediska silového toku.

Technologičnost tvaru znamená dodržovat zásadu co nejrychlejšího a nejplynulejšího naplnění dutiny formy taveninou, při kterém dochází k prudkým změnám tlaku a teploty. Je nutné vyvarovat se ostrých hran, přechodů, velkých změn průřezů atd., aby nedocházelo k vnitřnímu pnutí, k různým smrštěním, k víření proudu, orientaci makromolekul apod.

Estetické (design) řešení tvaru má být v souladu s funkcí výrobku, s prostředím, kde bude používán, s materiálem a technologií. Pro estetické řešení lze plně využít výhod tvárecích technologií, jako jsou oblé tvary, nepravidelné tvary, ale i dojem lehkosti a ladnosti.

Ekonomičnost řešení závisí na složitosti tvaru součásti a tím i na ceně formy a stroje, ale i na velikosti série.

Aby bylo možné navrhnout plastový díl s minimálními riziky, je nutné znát co nejvíce materiálových, technických a ekonomických informací a z těchto informací si následně udělat představu o funkci výrobku a z toho vyplývajících požadavků na mechanické, tepelné, elektrické a další vlastnosti materiálu. Souběžně je nutné řešit současné a budoucí požadavky ekonomické, např. cenu výrobku, náklady na výrobu formy, cenu materiálu, velikost série a dále otázky balení, dopravy a přitom mít stále na zřeteli dodržení technologičnosti výrobku.

Při celém tomto postupu je vysoce žádoucí týmová spolupráce mezi konstruktérem, technologem, designérem a ekonomem.

2.1.1. Zásady tvarového řešení výrobků z plastů

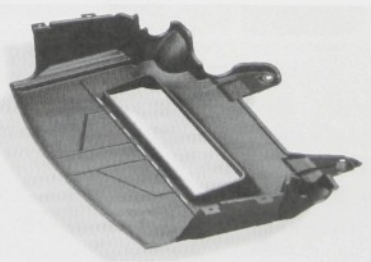
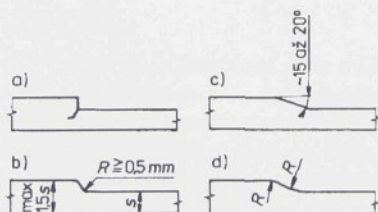
V této kapitole budou popsány pouze základní zásady navrhování výrobků z plastů pro udělání si představy zásad konstruování, neboť by tato kapitola byla velice obsáhná (existují i konkrétní zásady i pro spojované součásti, ale i zásady pro tvorbu a konstrukci závitů, písma atd.).

Tloušťka stěny výstřiku má být pokud možno minimální, aby se omezila možnost vzniku povrchových propadlin a vnitřních staženin (lunkrů), aby se zmenšil časový rozdíl mezi chladnutím povrchu a jádra stěny, aby se snížila spotřeba materiálu a aby se zkrátila doba chlazení ve formě. Minimální přípustná tloušťka stěny je určena požadovanou tuhostí, pevností a rozměrností výstřiku. Tloušťka stěny závisí na délce toku taveniny a doporučená tloušťka stěny pro jednotlivé druhy plastů je uvedena v tab. 2.4. U drobných výrobků je přípustná tenčí stěna, než-li u rozměrných.

Výrobek by měl mít, pokud je to možné provést, jednotnou tloušťku stěny. Obvyklá tloušťka stěny je v rozmezí 0,5 až 6 mm. Při různých tloušťkách stěn výstřiku by jejich poměr v přechodu neměl překročit 50 % a přechod by měl být pozvolný nebo zaoblený, aby nevznikaly ostré kouty s vrubovým účinkem (viz. obr. 2.4).

Tab. 2.4: Hodnoty tloušťky stěny pro vybrané druhy plastů / 1/

PLAST	min. tloušťka stěny /mm/	doporučená tloušťka stěny /mm/	max. tloušťka stěny /mm/
IPE	0,50	1,60	6,30
rPE	0,90	1,60	6,30
PP	0,60	2,00	7,60
PS	0,80	1,60	6,30
SAN	0,80	1,60	6,30
ABS	0,80	2,30	3,20
PA	0,40	1,60	3,20
PC	1,00	2,70	9,50
POM	0,80	2,00	9,50
PVC	1,00	2,40	9,50
PUR	0,60	12,70	38,00



Obr. 2.4: Přechody v tloušťce stěny včetně ukázky řešení (BMW)

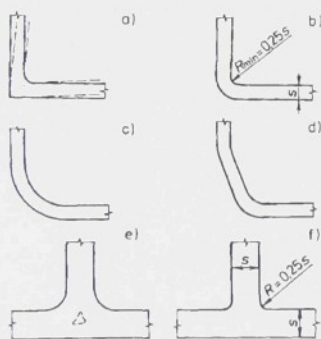
a) špatné – možnost trhlin na vnitřní ostré hraně, b) lepší řešení, c), d) dobré řešení / 13/

Rovnoměrnost tloušťky stěny je podmínkou pro stejnou a rovnoměrnou rychlost proudu taveniny ve formě, stejnou rychlost chlazení ve všech místech výstřiku, stejné smrštění a minimální vnitřní pnutí. U výstřiku s různou tloušťkou stěny vzniká víření taveniny, nerovnoměrná orientace makromolekul a větší vnitřní pnutí (tlustší stěny chladnou pomaleji, a mají proto větší procento smrštění než-li tenké stěny). Následkem tohoto rozdílného smrštění vzniká v místě styku obou stěn další vnitřní pnutí, případně deformace nebo praskání výrobku, někdy ihned po vystříknutí, jindy třeba po týdnech.

Hromadění materiálu v některých partiích výstřiku má stejný negativní vliv jako značně různá tloušťka stěny a je třeba se ho vystríhat.

Zaoblení. Oblé tvary jsou výhodné z hlediska snazšího proudění taveniny a v dnešní době se většina výrobků z plastů konstruuje jako oblé a nepravidelné tvary bez ostrých hran. Čím větší je rádius zaoblení, tím menší jsou hydraulické odpory proti průtoku materiálu a tím menší je koncentrace napětí v místě ohybu.

Vnější rádius zaoblení stěny bývá o tloušťku stěny větší, než-li vnitřní rádius, takže stěna je v celém průběhu zakřivení stejně tlustá. Minimální rádius zaoblení stěny má být asi jedna čtvrtina tloušťky stěny. Vhodné i nevhodné příklady řešení ukazuje obr. 2.5.



Obr. 2.5: Zaoblení stěn s ukázkou aplikace (PEUGEOT)

a) nevhodné – hromadění materiálu v rohu a následná změna tvaru vlivem nestejnoměrného smrštění (v důsledku rozdílného ochlazování, i když teplota stěn formy je shodná $T_{F1} = T_{F2}$, tak dochází k tvarovým odchýlkám a k tvorbě vnitřních propadlin), b) lepší řešení, c), d) dobré řešení, e) chybné řešení – velký rádius způsobí výskyt lunek, f) správný návrh / 13/

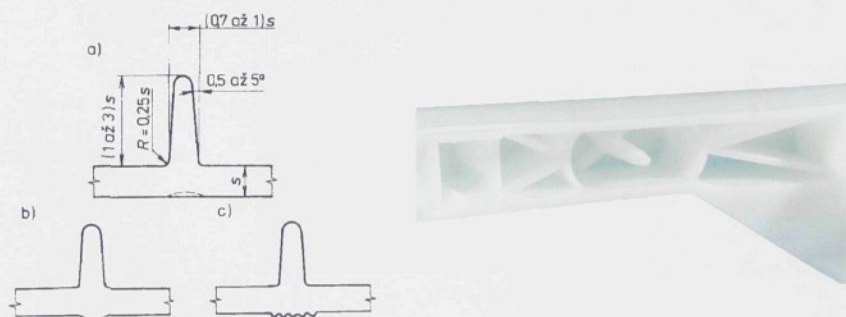
Úkosy. Pro snazší vyjímání z formy mají mít stěny výstřiku rovnoběžné se směrem otevírání formy úkosy. Doporučené minimální

úkosy jsou pro vnější stěny výstřiku 0,5 až 1°, pro vnitřní stěny 1 až 2°. Úkosy se také liší podle toho, zda bude mít výrobek povrchový dezén nebo nikoliv. Pro výrobky bez dezénu platí výše uvedené hodnoty, pro výrobky s povrchovým dezénem empiricky platí, že na každý 1° výrobního úkosu může být hloubka dezénu max. 0,02 mm.

Ostré hrany, vnější ostré hrany, se navrhuji tam, kde stěna výstřiku končí v dělicí rovině formy. V běžných případech bývá úhel hrany 90°. Ostatní vnější hrany mají být z bezpečnostních důvodů (nebezpečí říznutí) zaobleny rádiusem minimálně 0,3 mm. Vnitřní hrany se zaoblují vždy, a to rádiusem minimálně rovným jedné čtvrtině tloušťky stěny.

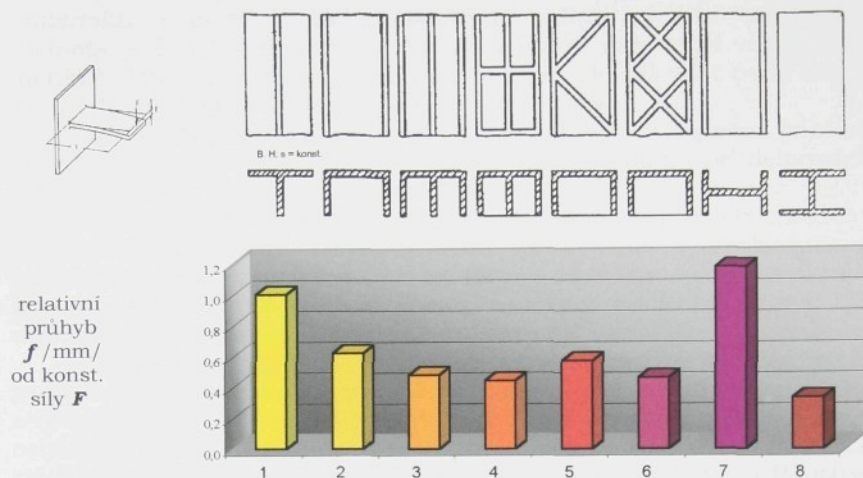
Žebra se používají velmi často k vyztužení výstřiků a umožňují tak použít tenké stěny a nebo se žebra používají k odstranění nežádoucích deformací po zchlazení výstřiku. Profil žebra musí mít určitý vztah k tloušťce stěny, aby nenastaly nežádoucí deformace. Optimální tvar výztužného žebra je na obr. 2.6. Při nedodržení zásad konstrukce žeber může dojít k tvorbě lunek, k rozměrovým změnám a na zadní stěně proti žeburu se obvykle objeví malá mělká rýha následkem nahromadění materiálu v místě připojení žebra ke stěně (propadlina). Tomuto vzhledovému porušení zadní stěny lze předejít úmyslným vytvořením drážky nebo výstupku nebo rýhováním.

Při konstrukci žeber je nutné dbát na to, aby byla žebra orientovaná ve směru toku taveniny. Nejčastější uspořádání je buď pomocí rovnoběžných jednosměrných žeber (zvyšují tuhost v ohybu v jednom směru), nebo pomocí diagonálních žeber (zvyšují tuhost v ohybu a v kroucení) a nebo pomocí křížových žeber (nejvyšší tuhost v ohybu a v kroucení), která mohou být rovnoběžná se stěnami nádob nebo diagonální. Průhyb žebrovaných profilů a krut žebrovaných profilů pod stejným zatížením je ukázán na obr. 2.7 a 2.8.

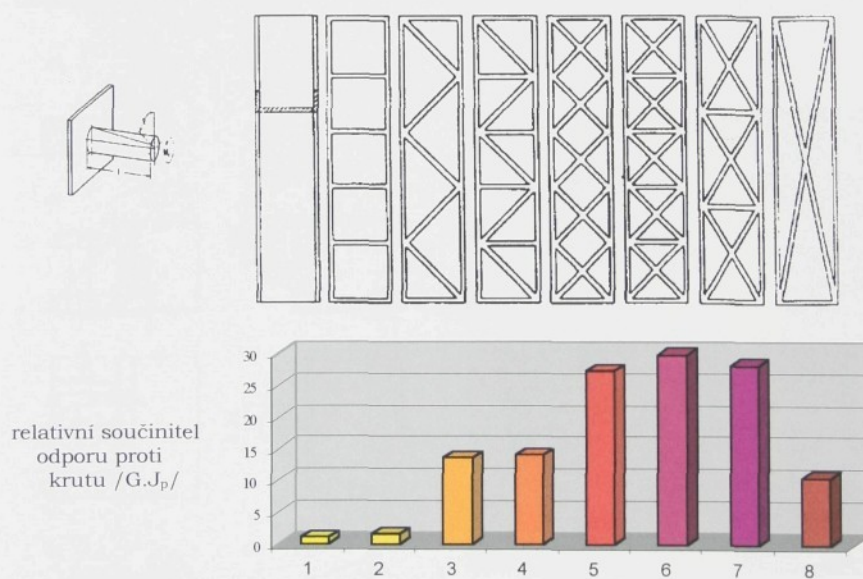


Obr. 2.6: Profil výztužného žebra s příkladem aplikace (OPEL)

a) optimální tvar (pro přehlednost je zde čárkovaně nakreslena propadlina, i když by zde nenastala), b), c) výstupek nebo rýhování na zadní stěně k zakrytí propadliny / 13/



Obr.2.7: Průhyb žebrovaných profilů / 3/



Obr. 2.8: Krut žebrovaných profilů / 3/

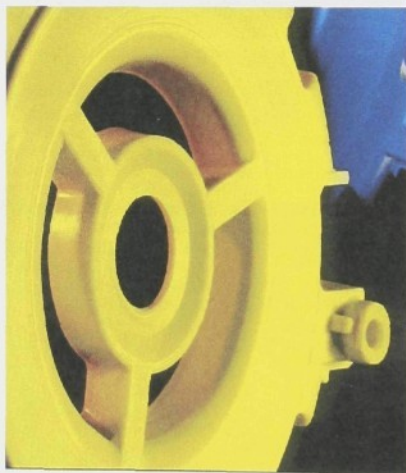
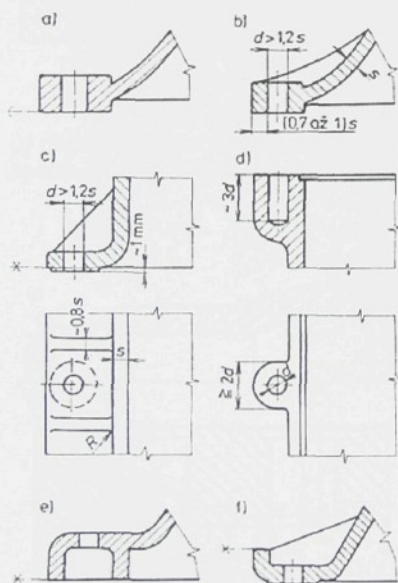
Výška a profil křížujících se žeber mají být kvůli vnitřnímu prnutí vždy stejné. Ve všech případech je nutno dbát na to, aby v místě křížování žeber a připojování žeber ke stěnám nenastalo hromadění

materiálu, a proto je třeba dodržovat rádiusy, jejichž minimální hodnota je čtvrtina tloušťky stěny. Zásadně je vždy lepší větší počet menších žebër, než malý počet větších žebër. Vzdálenost mezi žebry bývá 5-ti násobek až 10-ti násobek tloušťky stěny.

Dosedací plochy mají být malé, má jich být co nejméně (ideální dosednutí na 3 body) a mají být uspořádány tak, aby i při deformaci výrobku zajišťovaly přesnost a stabilitu dosednutí.

Okraje výrobků nemají být zesílené, aby se zamezilo hromadění materiálu, rozdílnému smrštění proti tenčí stěně a nevhodnému rozdělení proudů taveniny při plnění formy. Je-li nutné zesílení okraje z funkčních důvodů přece jen provést, nemá být zesílení větší než 1,2 násobek tloušťky okolní stěny.

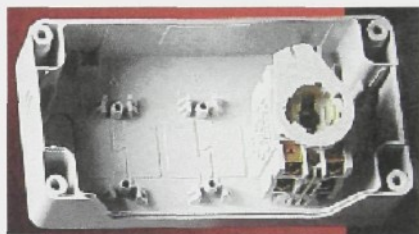
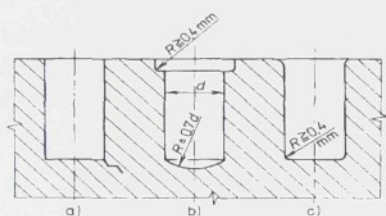
Upevňovací výstupky pro průchozí nebo závrtné šrouby, nýty, pružné zaskakovací kolíky, otočné osy apod. mají být provedeny tak, aby nevznikalo hromadění materiálu v těchto místech a aby nebylo nebezpečí ulomení upevňovacího výstupku od výrobku. Proto tloušťka stěny upevňovacího výstupku má být v určitém vztahu k tloušťce okolní stěny. K vyztužení a zpevnění výstupku se mají použít žebra, viz. obr. 2.9. Tloušťka žebër má být asi 0,8 mm tloušťky stěny. Vzdálenost mezi žebry závisí na tvaru výrobku, na jeho namáhání a požadavku tuhosti. Nejčastěji bývá 5-ti násobek až 10-ti násobek tloušťky stěny.



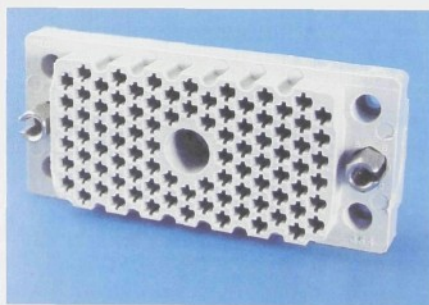
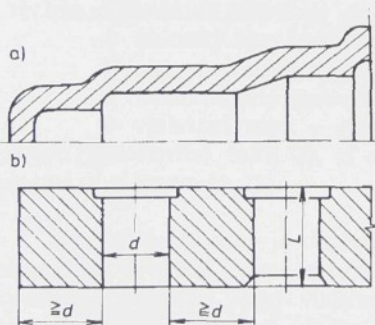
Obr. 2.9: Upevňovací výstupky s příkladem řešení (VW - AUDI)

a) nevhodné – hromadění materiálu, snadné zlomení, b) lepší řešení, c), d) dobré řešení, e) nevhodné – nebezpečí deformace nebo prasknutí stěny, f) dobré řešení / 13/

Otvory jsou vytvořeny částí formy zvané jádro a jsou slepé nebo průchozí. Při tuhnutí ve formě se materiál smršťuje na jádro, které má mít proto kvůli snadnějšímu vyhazování asi o 1° větší úkos než dutina v tvárnici. Vzhledem ke konstrukci formy se má otvor řešit tak, aby se jádra vytahovala ve směru otevírání formy. U hranatých otvorů se musí hrany zaoblit min. poloměrem zaoblení 1 mm. Podobně musí být zaoblena i dna neprůchozích otvorů (viz. obr. 2.10). Na následujících obrázcích (viz. obr. 2.11 a 2.12) jsou ukázány zásady pro odstupňování otvorů, vzdálenost mezi otvory a délka otvorů. Délka otvoru závisí na průměru otvoru. Neboli čím je otvor při stejném průměru delší, tím je potřeba mnohem větší síly k vytažení jádra. Neprůchozí otvory se navrhují v délce 3 až 4 násobku průměru, průchozí otvory mají přípustnou délku 6-ti až 8-mi násobku průměru. Pro oba dva případy ale platí, že zvětšením průměru otvoru v nefunkční části lze zvětšit délku (viz. obr. 2.12). Zásadně jsou dlouhá tenká jádra nežádoucí z hlediska pomalého odvodu tepla a poruchovosti nástroje.



Obr. 2.10: Neprůchozí otvory s ukázkou řešení (TOYOTA)
a) chybné řešení – ostrá vnější i vnitřní hrana, nebezpečí vzniku trhlin, b) správné řešení, c) správné, není-li horní plocha dosedací / 13/

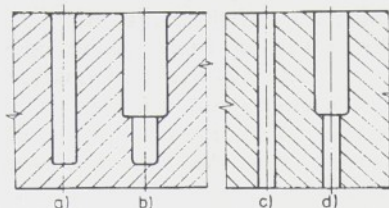


Obr. 2.11: Odstupňování a vzdálenosti otvorů s příkladem aplikace (SEAT)

a) vhodné odstupňování z hlediska rádiusů (min. 1 mm) a stejné tloušťky stěny, b) doporučené vzdálenosti otvorů od kraje výstřiku a mezi sebou / 13/

Jednoduché tvarování: Důstřednost

Hledání tvaru



Obr. 2.12: Délka otvorů s příkladem aplikace (RENAULT)

a) neprůchozí otvor, b) neprůchozí otvor vhodně rozšířený v nefunkční části, c) průchozí otvor, d) průchozí otvor s rozšířeným průměrem v nefunkční části / 13/

Otvory ve výstřiku se někdy provádějí také jen jako odlehčovací, buď pro úsporu materiálu nebo k zamezení hromadění materiálu. Je nutné je však volit obezřetně, poněvadž často zhoršují podmínky pro plnění formy.

2.1.2. Pevnostní řešení

Na udržení navrženého a vyrobeného tvaru a na mechanické vlastnosti plastů má výrazný vliv teplota. Při změnách teploty se chování plastů zásadně liší od chování kovů. Plasty mnohem více ovlivňuje působení teploty a pokles mechanických vlastností je mnohem výraznější. Spolu s teplotou se u plastů projevuje i křip, který ovlivňuje rozměry při konstantním zatížení. Plasty se mohou nacházet v těchto základních stavech:

- ◆ sklovitý stav (pod teplotou skelného přechodu T_g),
- ◆ oblast skelného přechodu (kolem teploty T_g),
- ◆ kaučukovitý stav (nad teplotou T_g),
- ◆ viskózní stav – pouze u termoplastů (u amorfních nad

teplotou viskózního toku T_f , u semikrystalických – krystalických nad teplotou tání krystalů T_m).

Pro sklovitý stav je charakteristická ideálně elastická deformace (okamžitě pružná), pro kaučukovitý stav viskoelastická deformace (zpožděně pružná), pro viskózní stav plastická deformace (trvalá). Protože deformační stav plastu je dán nejen teplotou, ale i velikostí a dobou působení mechanického zatížení, mohou se viskoelastická deformace a plastická deformace vyskytovat v malé míře také v kaučukovitém a nepatrně i ve sklovitém stavu. Jsou příčinou křipu (tečení) a relaxace napětí.

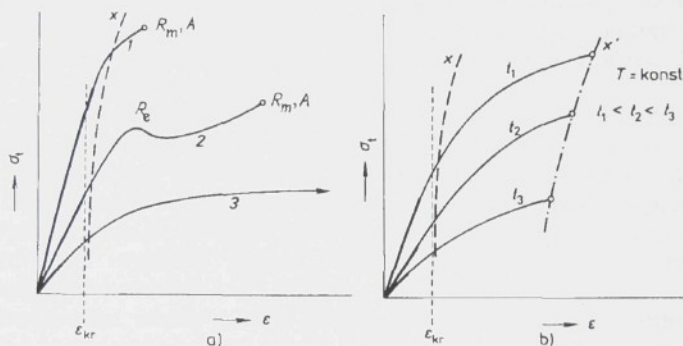
Oblast funkčního použití je u reaktoplastů a u amorfních termoplastů ve stavu sklovitém, u semikrystalických termoplastů ve

stavu kaučukovitém (kaučukovitý stav se zde týká jen jejich amorfních oblastí, v nichž jsou uloženy pevné krystalické útvary).

Ze specifického charakteru plastů vyplývají všechny další zvláštnosti, které je nutno vzít v úvahu při pevnostním řešení u navrženého tvaru výrobku.

Všechny dále uváděné úvahy a výpočty se vztahují na izotropní (homogenní, neplněné) polymery a s dostatečnou přesností i na quasiizotropní polymery (s prostorově neuspořádaným plnivem), které se v makroskopickém měřítku chovají izotropně.

Polymery jsou viskoelastické látky a jejich mechanické chování se matematicky vyjadřuje na základě analogie mezi teorií lineární pružnosti a teorií lineární viskoelastivity. Teorie lineární viskoelastivity platí pouze pro tu oblast zatěžování, kde modul pružnosti materiálu závisí pouze na teplotě a čase, nikoliv na velikosti působícího napětí. Je to oblast přímkového průběhu závislosti $\sigma - \varepsilon$ (viz obr. 2.13), která je omezena na velmi malé deformace $\varepsilon < 1\%$.



Obr. 2.13: Závislost napětí v tahu σ na měrném prodloužení ε u plastů (zesílená část křivek ukazuje přibližně přímkový průběh závislosti $\sigma - \varepsilon$)

a) pro různé druhy plastů, b) izochronní diagram pro konstantní teplotu T , kde označení je: R_e - mez kluzu, R_m - mez pevnosti, A - tažnost, ε_{krit} - kritická deformace, $x/$ - čára vzniku nevratných poškození materiálu (blíží se asymptoticky k hodnotě ε_{krit}), $x'/$ - čára lomů, 1 - křehký plast, 2 - houževnatý plast, 3 - měkký plast /3,13,14/

Podle zmíněné analogie provádíme pevnostní výpočty na základě vztahů teorie pružnosti a pevnosti jako při známých výpočtech kovových součástí, s tím rozdílem, že modul pružnosti E nepovažujeme za materiálovou konstantu, ale za funkci teploty a času.

Při větších deformacích závisí modul pružnosti také na velikosti působícího napětí a chování polymerů je nelineárně viskoelastické.

Obecně upravujeme tedy *Hookův zákon*, který nám umožní aplikovat výpočetní postupy z oboru pružnosti a pevnosti, takto:

$$\sigma = \varepsilon_{\text{celk}} \cdot E_k \quad (2.1)$$

kde σ je působící napětí /MPa/,

$\varepsilon_{\text{celk}}$ je celkové měrné prodloužení (celková deformace) /-/,

E_k je konstrukční (zdánlivý) modul pružnosti daného plastu /MPa/, závislý na teplotě plastu, na době působení napětí nebo na frekvenci zatěžování při dynamickém namáhání, a na velikosti působícího napětí.

Celková deformace je součet deformace ideálně elastické (ε_1), viskoelastické (ε_2) a plastické (ε_3) a platí:

$$\varepsilon_{\text{celk}} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.2)$$

Protože se při běžném zatěžování výrobků pohybujeme většinou v oblasti velmi malých deformací ($\varepsilon_{\text{celk}}$ bývá $< 1\%$), tj. v oblasti lineární viskoelasticity, platí zmíněná výpočtová analogie a úprava *Hookova zákona* s dostatečnou přesností.

Plastická deformace jako hlavní složka křípu je v oblasti lineární viskoelasticity zanedbatelně malá proti hodnotám ε_1 a ε_2 , takže i celkový krip je zde minimální. Týká se to všech plastů ve sklovitém stavu, amorfních termoplastů dosti hluboko pod teplotou T_g , semikrystalických termoplastů i v oblasti kolem teploty T_g nebo málo nad ní (při vyšším stupni krystalinity) a také reaktoplastů v kaučukovitém stavu.

Dosavadní úvahy platily pro normální napětí σ , jmenovitě pro tah. Pro smykové napětí platí obdobný vztah, který lze napsat v následujícím tvaru:

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (2.3)$$

kde τ je smykové napětí /MPa/,

γ je zkos /-/,

G je modul pružnosti ve smyku /MPa/.

Závislost mezi E a G je dána vztahem $E = 2 \cdot G \cdot (1 + \mu)$, v němž μ je *Poissonovo číslo*, které je u plastů v rozmezí 0,3 až 0,5. Při teplotě 20 °C je hodnota μ u tuhých plastů (např. PA, POM, PS, PVC, reaktoplasty) asi 0,3 až 0,35, u měkkých plastů (např. rPE, měkčený PVC, kaučukovité termoplasty) asi 0,45 až 0,5. *Poissonovo číslo* se u všech plastů zvětšuje s růstem teploty (v oblasti měknutí dosahuje své maximální možné hodnoty 0,5) a s velikostí a dobou působení napětí.

Dimenzování plastových součástí provádíme buď podle kritéria napětí, nebo podle kritéria deformace.

Kritérium napětí stanoví, že skutečné vypočtené napětí musí být menší než dovolené napětí. Dovolené napětí odvozujeme od meze kluzu R_e , jestliže daný plast má za uvažovaných provozních podmínek výraznou mez kluzu. Za běžných podmínek to bývají houževnaté termoplasty. Nemá-li plast výraznou mez kluzu, odvozujeme dovolené napětí od meze pevnosti R_m . Bývají to křehké termoplasty, termoplasty plněné skleněnými vlákny nebo práškovým minerálním plnivem a reaktoplasty. Pro jednoosé napětí při krátkodobém namáhání za normální teploty bereme dovolené napětí přibližně

$$\sigma_{dov} = 0,4 R_e \text{ u semikrystalických termoplastů nad } T_g, \\ \sigma_{dov} = 0,8 R_e \text{ nebo } 0,8 R_m \text{ u plastů pod } T_g.$$

Při vyšších teplotách nebo při dlouhodobém statickém zatížení nebo při dynamickém namáhání hodnoty R_e a R_m klesají, R_e někdy přestává být výrazné. Kromě toho jsou hodnoty R_e a R_m , a tím i σ_{dov} nepříznivě ovlivněny kolísáním provozní teploty a vlhkosti, při působení chemikálií, rozvozu aktivního prostředí, UV záření a vlivů povětrnosti, u zvlášť rozměrných výstřiků, u svařovaných a lepených součástí, při dynamickém namáhání apod. Přerušované zatěžování působí u některých plastů příznivě, u jiných naopak. Kvantitativní určení těchto vlivů předem je prakticky nemožné a je třeba při složitých provozních podmínkách doporučit laboratorní a zejména provozní zatěžovací zkoušky modelů a prototypů, aby se získaly průkaznější podklady pro konečné provedení.

U víceosé napjatosti určené hlavními napětími $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ se vypočítá redukované napětí σ_{red} podle všeobecně známých hypotéz. Při křehkém chování plastů, např. u krátkodobého zatěžování pod teplotou T_g , u zatěžování za současného působení tenzoaktivního prostředí, po dlouhodobém působení slunečního záření apod. (mez pevnosti v tlaku zde bývá větší, než-li v tahu) používáme jednoduché *Mohrovy hypotézy*. Při houževnatém chování plastů, např. u dlouhodobého zatížení, u namáhání nad teplotou T_g apod. (meze pevnosti v tlaku a v tahu jsou přibližně stejné) používáme hypotézu *HMH (Huber-Mises-Henckey)*, která dává dostatečně přesné výsledky nebo jednoduché *Guestovy hypotézy*, která dává výsledky s větší bezpečností.

Vypočtené redukované napětí pak musí být menší nebo rovné dovolenému napětí $\sigma_{red} \leq \sigma_{dov}$. Nevýhodou kritéria napětí je, že v mnoha případech neznáme silový tok v součásti, a tedy ani skutečná napětí, a že někdy nemůžeme dosti přesně stanovit dovolené napětí.

Kritérium deformace stanoví, že celková skutečná deformace ϵ_{celk} musí být menší nebo rovna dovolené deformaci ϵ_{dov} pro daný plast. Dovolená deformace se určuje experimentálně tak, aby v materiálu ještě nevznikly nevratné poruchy a trvalá poškození. Dovolená deformace je rovna kritické deformaci ϵ_{krit} (viz. obr. 2.13). Platí tedy vztah $\epsilon_{celk} \leq \epsilon_{dov} = \epsilon_{krit}$.

Při jednoosé napjatosti se ϵ_{celk} vypočítá z upraveného *Hookova zákona*, (viz. vztah 2.1). Při víceosé napjatosti, určené hlavními

napětími $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, se celková deformace určí postupně pro všechny tři směry od hlavních normálních napětí, tj. vypočte se ε_{celk1} , ε_{celk2} a ε_{celk3} podle analogie *Hookova zákona*. Největší z vypočtených hodnot ε_{celk1} , ε_{celk2} a ε_{celk3} musí potom být menší, než-li ε_{dov} . Výpočet ε_{celk} není nutný, je-li možné stanovit ji experimentálně, např. simulováním provozního zatěžování nebo přímo na modelu nebo prototypu výrobku.

Výhodou kritéria deformace je, že ε_{dov} nezávisí na teplotě, velikosti napětí, charakteru napjatosti (jednoosá, víceosá), druhu zatěžování (statické, dynamické, rázové), ani na době působení zatížení. To zvyšuje objektivitu výpočtu, protože se eliminuje riziko nesprávného určení potřebné mezní hodnoty, jak tomu může být u kritéria napětí. Nevýhodou je, že ε_{dov} jsou zatím stanovena jen pro některé druhy plastů.

Je třeba zdůraznit, že ani kritérium napětí ani kritérium deformace nepřihlízejí ke způsobu, jak bylo napěťového nebo deformačního stavu dosaženo, tj. nepostihují skutečný průběh zatěžování, který nemusí být vždy zanedbatelný, a nezachycují vlivy orientace makromolekul, nestability struktury a vnitřního pnutí, které byly do materiálu vneseny při zpracování. Může se stát, že vnitřní pnutí dosahuje v některém místě výstřiku tak vysokých hodnot, že při aplikaci již malého vnějšího napětí, jež zůstane hluboko pod mezí dovoleného napětí, se překročí mez pevnosti materiálu a dojde k porušení výrobku.

Pro výrobky z plastů, především houževnatých, je ve srovnání s kovovými výrobky typické, že v mnoha případech není omezujícím činitelem jejich funkce, pevnost materiálu a nebezpečí lomu, ale nedostatečná tuhost způsobená nízkým modulem pružnosti materiálu. Plasty mají totiž proti kovům modul pružnosti zhruba o 2 řády nižší, kdežto pevnost jen asi o 1 řád. Může tedy dojít k tomu, že při zatěžování plastového výrobku vzniknou tak velké deformace, které jsou nepřijatelné z hlediska funkce výrobku (prohnutí, netěsnost, odchlípení, zkroucení apod.), i když ještě nebyly překročeny dovolené hodnoty ε_{dov} nebo σ_{dov} . V takovém případě je pak omezujícím činitelem deformace, vycházející z přípustné změny tvaru a rozměrů podmíněné správnou funkcí výrobku.

Pro zjednodušení pevnostních výpočtů u tvarově složitějších výstřiků se navrhuje metoda výpočtu podle simulovaných modelů. Princip spočívá v tom, že se tvar konkrétního výrobku rozloží na tři základní geometrické útvary (deska, válec, koule), což je téměř vždy proveditelné. Pomocí diferenciálních rovnic kontinuity, impulsu a energie se pro jednotlivé základní tvary a potom tedy i pro celý výrobek určí optimální tvar z hlediska pevnosti, struktury a proudění taveniny.

V současné době se k těmto metodám přidaly simulační programy, které umí řešit nejenom pevnostní hodnoty (MARC, CATIA, ...), ale i systémy, které pro pevnostní výpočty používají data ze simulací vstřikování, tedy ze zadaných parametrů vstřikování, z parametrů stroje a z parametrů návrhu nástroje (STRIM, MOLDFLOW, CMOLD, ...). Výhodou je značná úspora času a nákladů při řešení nových plastových výrobků, poněvadž odpadá řada zkoušek na

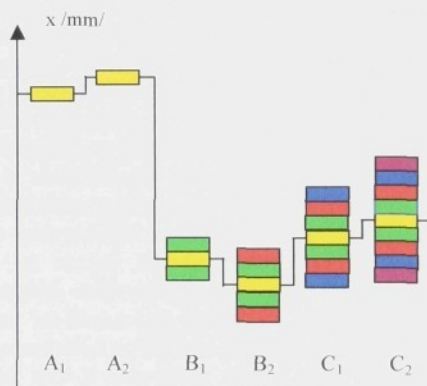
prototypech, velké množství omylů a oprav tvarů. Je všeobecně známé, že cena provedené simulace je srovnatelná s náklady na vzorkování formy.

Je nutné však říci, že i přes svoji vysokou dokonalost v přiblížení se skutečným poměrům nezachycují ani tyto systémy všechny vlivy náhodného utváření vířivých proudů taveniny a následný vznik celého spektra oblastí s různou orientací, krystalizací a vnitřním pnutím.

2.1.3. Přesnost rozměrů u výrobků z plastů a jejich změny

Pod pojmem přesnost rozměrů je zahrnuta výrobní přesnost (tj. dodržení předepsaných rozměrů a tolerancí při výrobě) a funkční přesnost (tj. zachování předepsaných rozměrů a tolerancí při funkci výrobku). Změny rozměrů, které nastávají jak při výrobě, tak i při funkci jsou vratné i nevratné.

Lineární změny rozměrů výstřiku z termoplastu při jeho výrobě a funkci jsou schematicky znázorněny na obr. 2.14. Schéma platí i pro výrobky z reaktoplastů.



Obr. 2.14: Schéma rozměrových změn a tolerancí u výrobků z plastů

x – střední rozměr, A_1 – rozměr ve formě (výrobní tolerance žlutě), A_2 – rozměr ve formě po ohřevu formy na provozní teplotu, B_1 – rozměr výrobku po výrobním smrštění po 24 h (tolerance zeleně), B_2 – rozměr výstřiku po dodatečném smrštění (tolerance červeně), C_1 – rozměr výstřiku po navlhnutí (tolerance modře), C_2 – rozměr výstřiku po ohřátí na provozní teplotu (tolerance fialově) / 13,14/

Výchozí rozměr A_1 . Jako výchozí rozměr stanovíme základní střední rozměr ve formě A_1 . Rozměr A_1 je zhotoven v určité toleranci, která je znázorněna černě vyplněným úzkým tolerančním polem symetricky umístěným kolem středního rozměru.

Ohřátí formy na provozní teplotu $A_1 - A_2$. Ohřevem na provozní teplotu zvětší forma svůj původní rozměr na hodnotu A_2 , přičemž nutno uvažovat i zмінěnou výrobní toleranci. V praxi se výrobní tolerance formy i teplotní roztažení formy většinou zanedbávají, poněvadž jsou zhruba o jeden řád menší než rozměrové změny výstřiků z plastů.

Smrštění výstřiku $A_2 - B_1$. Po vyjmutí z formy má výstřik rozměr B_1 , který je o hodnotu smrštění menší než rozměr formy A_2 . Protože toto smrštění (nevratné), nazývané též smrštění při vstřikování, neproběhne ihned, zjišťuje se měřením výstřiku až po 24 hodinách skladování při teplotě vzduchu 20 °C a 65 % relativní vlhkosti. Smrštění je ovlivňováno řadou technologických parametrů, z nichž nejvýznamnější jsou homogenita taveniny, tlak a doba jeho působení a teplota formy. Kromě technologických parametrů má velký vliv tvar výstřiku a konstrukce formy. Lze tedy konstatovat, že vyšší tlak a delší doba jeho působení značně snižuje smrštění a k mírnému zmenšení smrštění vede vyšší teplota taveniny a nižší teplota formy.

Smrštění při vstřikování u různých druhů plastů je v tab. 2.5 (amorfní polymery mají menší smrštění oproti krystalickým plastům, u kterých se zmenšení objemu zvyšuje krystalizací) a většinou je uváděno v určitém rozsahu. Tento rozsah neboli tolerance smrštění je na obr. 2.14 označen zeleným tolerančním polem, opět symetricky umístěným kolem středního rozměru, a zahrnuje v sobě rozdíly smrštění, způsobené různou tloušťkou stěny (tlustá stěna má vždy větší smrštění, než-li tenká), rozdílnými technologickými podmínkami (v běžných mezích) a anizotropií smrštění. Příčiny anizotropie smrštění jsou jednak vlivy struktury, jednak i vliv tvaru výstřiku.

Jednoduché tvary budou mít užší tolerance smrštění než tvary složité a členité, u nichž např. jádra, velké tenkostěnné plochy, výběžky, vybrání apod. zabráňují volnému rovnoměrnému smršťování a může docházet až ke kroucení výrobku. Nejméně zábran má smrštění tloušťky stěny u plochého výstřiku jednoduchého tvaru, a proto bude toto smrštění větší, než-li smrštění délky a šířky téhož výstřiku. Větší poměr délky tokové dráhy taveniny k tloušťce stěny výstřiku má vždy za následek menší smrštění (tzv. relativně tenkostěnný výstřik). Celková tolerance výstřiku je podle obr. 2.14 součet tolerance smrštění a výrobní tolerance formy.

Tab. 2.5: Hodnoty smrštění u vybraných druhů plastů / 1,3/

PLAST	rPE	IPE	PP	PS	ABS	SAN	ASA	PVC	PMMA
smrštění /%	1,5 až 3	2 až 4	1,5 až 2	0,2 až 0,5	0,4 až 0,7	0,4 až 0,6	0,4 až 0,7	0,2 až 0,5	0,3 až 0,8
PLAST	PA6	PA66	PA11	PA12	POM	PC	PBT	PUR	UP
smrštění /%	1 až 2,5	1 až 2	1 až 2	0,8 až 2	1 až 3,5	0,7 až 0,8	1,7 až 2,3	0,2 až 2	0,1 až 0,6

Dodatečné smrštění $B_1 - B_2$. Po další době po vyrobení probíhá nevratné dodatečné smrštění výstřiku, způsobené dezorientací, uvolňováním vnitřního pnutí a případně dodatečnou krystalizací, u reaktoplastů dodatečným vytvrzováním. Toto dodatečné smrštění bývá za normální teploty průměrně asi $1/10$ hodnoty smrštění při vstřikování. Při zvýšených teplotách se tato hodnota zvětšuje. Tolerance je na obr. 2.14 vyznačena červeně a opět rozšiřuje celkové toleranční pásmo rozměru výstřiku. Pro názornost je dodatečné smrštění zakresleno na obrázku hned za smrštěním, ale poněvadž se výrobek často dává do používání brzy po vyrobení, probíhá dodatečné smrštění většinou až souběžně s následujícími funkčními rozměrovými změnami.

Roztažení navlhnutím $B_2 - C_1$. Při zpracování je obsah vody v kterémkoliv plastu prakticky nulový. Výrobky z navlhavých plastů zvětšují potom své rozměry a hmotnost následkem absorpce vody z okolního prostředí podle tab. 2.6. Při ustálené vlhkosti prostředí se ustálí také obsah vody ve výstřiku a jeho rozměry na určité hodnotě, která je v rovnovážném stavu s relativní vlhkostí okolí. Při kolísání okolní vlhkosti kolísá opožděně také obsah vody ve výstřiku i jeho rozměry (hlavně u tenkostěnných výrobků), nebo se obsah vody a rozměry výstřiku ustálí na nějaké střední hodnotě (hlavně u tlustostěnných výstřiků). Protože je absorpce vody velmi pomalá (týdny až měsíce u tlustších stěn), bývá při změnách okolní vlhkosti obsah vody ve výstřiku nestejně rozložen. Následkem jsou pak i nerovnoměrné změny rozměrů. Opačně při snižování okolní vlhkosti se snižuje obsah vody ve výstřiku a jeho rozměry se zmenšují. Změny rozměrů následkem navlhání a vysušování výstřiků jsou změny vratné. Tolerance rozměrových změn je na obr. 2.14 znázorněna modře a zahrnuje jak vlivy struktury (např. u semikrystalických termoplastů mají krystalické oblasti nižší absorpci vody než amorfni oblasti), tak i vlivy kolísání okolní vlhkosti v běžných mezích.

Tab. 2.6: Absorpce vody u vybraných druhů plastů (dle DIN 53 495 - ponoření vzorku o průměru 50 mm a tloušťce 3 mm do vody o teplotě 23 °C po dobu 4 dnů) / 1,3/

PLAST	rPE	lPE	PP	PS	ABS	SAN	ASA	PVC	PMMA
přínástek hmotnosti /mg/	<0,01	<0,01	<0,01	3 až 4	20 až 70	12,0	20,0	3 až 20	35 až 45
PLAST	PA6	PA66	PA11	PA12	POM	PC	PBT	PUR	UP
přínástek hmotnosti /mg/	300 až 1000	100 až 500	40,0	30,0	20 až 30	10,0	18 až 20	60 až 130	50 až 200

Roztažení ohřevem $C_1 - C_2$. Jestliže je provozní teplota výrobku odlišná od teploty 20 °C, při níž byl rozměr výrobku měřen (rozměr B_1), změní se následkem teplotní roztažnosti plastů také rozměry. Tato změna je vratná, při ohřevu nastává roztahování, při ochlazení smršťování. Součinitel teplotní roztažnosti jednotlivých plastů je uveden v tab. 2.7.

Tab. 2.7: Délková teplotní roztažnost α ($K^{-1} \cdot 10^{-5}$) při 20 až 50 °C pro vybrané druhy plastů

PLAST	rPE	lPE	PP	PS	ABS	SAN	ASA	PVC	PMMA
Délková teplotní roztažnost α	14,0	23,0	18,0	6 až 8	5 až 10	7,0	9,0	7 až 8	7,0
PLAST	PA6	PA66	PA11	PA12	POM	PC	PBT	PUR	UP
Délková teplotní roztažnost α	7 až 12	7 až 10	11 až 12	8 až 10	10 až 14	6 až 7	6 až 9	13 až 20	2 až 5

Protože plasty mají proti oceli asi desetkrát větší součinitel teplotní roztažnosti, jsou změny rozměrů u plastů daleko výraznější. Často kolísání teploty způsobuje větší změny rozměrů než jsou změny rozměrů způsobené kolísáním technologických veličin při vstřikování. Při kolísání provozní teploty plastového výrobku se mění i jeho rozměry. Tolerance rozměrové změny způsobené teplotní roztažností je na obr. 2.14 znázorněna fialově a zahrnuje rozptyl způsobený nehomogenitou struktury, a tím i anizotropií teplotní roztažnosti (např. různé orientované oblasti, odlišné morfologie krystalické struktury) a nerovnoměrným rozdělením teplot v objemu výrobku. Je třeba upozornit na to, že při delším ohřevu výstřiků na vzduchu nad teploty asi 60 °C nastává vysušování výstřiků z navlhavých plastů, při teplotách 70 až 80 °C na vzduchu je obsah vody v plastu téměř nulový. To je třeba vzít v úvahu při výpočtu rozměrů těchto výstřiků.

Z obr. 2.14 vyplývá, že celková tolerance rozměrů výstřiků při jeho funkci je dána součtem tolerancí všech jeho rozměrových změn, výrobních i funkčních. Šířka tolerančních polí u jednotlivých změn (daleko nejvyšší je u smrštění a dodatečného smrštění) je ovlivněna také rozptylem technologických podmínek v jednotlivých výrobních cyklech. Čím je tento rozptyl menší, tím jsou menší odchylky ve struktuře jednotlivých výstřiků a tím je užší tolerance jejich rozměrů.

Kromě změn jednotlivých rozměrů existuje i rozdíl v těchto změnách mezi jednotlivými rozměry – anizotropie. Anizotropie neboli směrová rozdílnost rozměrových změn je způsobena především orientací makromolekul, případně i plniva u plastů plněných vláknitým plnivem a krystalických útvarů u semikrystalických termoplastů. Kromě orientace makromolekul má na směr a stupeň orientace velký vliv umístění vtoků, protože určuje směr a způsob proudění taveniny.

U homogenních termoplastů existuje vlivem orientace makromolekul rozdíl mezi smrštěním podélným (ve směru toku taveniny) a smrštěním příčným (ve směru kolmém k toku taveniny). Vzhledem k více spolupůsobícím vlivům a vlastnostem jednotlivých plastů bývá někdy větší smrštění podélné, jindy příčné. Rozdíly bývají menší u amorfních termoplastů (5 až 10 %), větší u krystalických plastů (10 až 25 %). U plastů plněných vláknitým plnivem (např. skleněná nebo textilní vlákna, aj.) je smrštění podélné (ve směru toku) vždy menší, než-li příčné smrštění, zhruba o 20 až 60 % podle obsahu plniva. Větší rozdíly jsou při použití vyšších vstřikovacích tlaků. U plastů plněných nevláknitým plnivem (např. kulíčky, prášek, apod.) se

rozdíl mezi příčným a podélným smrštěním zmenšuje, a při obsahu kolem 40 % plniva je smrštění již izotropické, tj. stejné v obou směrech.

Dodatečné smrštění u homogenních termoplastů je větší ve směru orientace makromolekul než kolmo k ní a je všeobecně větší než u plněných termoplastů. Za vyšších teplot je dodatečné smrštění větší. U reaktoplastů je dodatečné smrštění větší než u termoplastů, u fenolických hmot bývá asi 0,3 %, u melaminových hmot asi 1 %. Anizotropie smrštění se zde projevuje podobně jako u plněných termoplastů. Teplotní roztažnost je menší ve směru orientace makromolekul než ve směru kolmém.

Stupeň přesnosti (označovaný IT) zahrnuje pouze toleranci smrštění při vstřikování, která se zjišťuje měřením na výrobku uloženého 24 h na vzduchu o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %. Ostatní rozměrové změny (kromě nepatrného roztažení navlhnutím za 24 h uložení u navlhavých plastů) v tom nejsou zahrnuty.

Dosažitelná přesnost je při běžných technologických podmínkách následující:

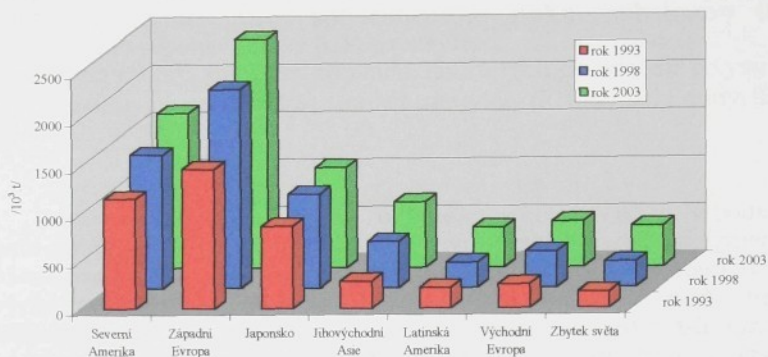
- ◆ IT 10 až IT 12 – u amorfních tuhých termoplastů (např. PS, SAN, PVC, PC) a u reaktoplastů,
- ◆ IT 11 až IT 13 – u semikrystalických tuhých termoplastů (např. IPE, PP, PA, POM, PBT),
- ◆ IT 14 až IT 16 – u měkkých termoplastů (např. rPE, EVA, měkčený PVC, kaučukovité termoplasty).

Větší přesnosti (nižší stupeň IT) se dosahuje vždy u menších rozměrů než u větších. Větší přesnost (asi o jeden stupeň IT) je vždy u rozměrů vázaných formou (kolmo ke směru otevírání formy) než u rozměrů nevázaných formou (ve směru otevírání formy). Důvod je ten, že ve směru otevírání formy může rozměry výrobku ovlivnit pružná deformace vstřikovací formy následkem náhlého vysokého vstřikovacího tlaku.

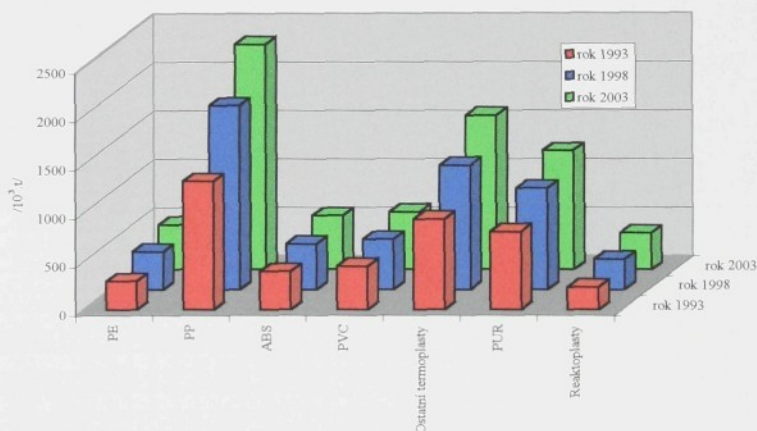
Na moderních vstřikovacích strojích s optimalizací vstřikovacího procesu a s optimálním tepelným režimem vstřikovací formy lze dosáhnout přesnosti rozměrů větší o jeden i dva stupně IT oproti běžným konvenčním vstřikovacím strojům.

2.2. PLASTY, JEJICH VLASTNOSTI A POUŽITÍ PŘI VÝROBĚ OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

V současné době existuje na trhu plastů několik tisíc různých druhů plastických hmot. V technické praxi však výrazné uplatnění má jen několik desítek druhů plastů. Z celkového objemu představuje skoro 80 % jen šest druhů plastů a 70 % výroby jen tři druhy, a to polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid. Podíl jednotlivých kontinentů na spotřebě plastů ukazuje obr. 2.15 a množství zpracovaných hmot v posledních letech je ukázáno na obr. 2.16.



Obr. 2.15: Spotřeba plastů při výrobě vozů v jednotlivých regionech světa (v tisících tun) s výhledem do roku 2003 / 4/



Obr. 2.16: Podíl vybraných druhů plastů při výrobě automobilů (v tisících tun) s výhledem do roku 2003 / 4/

Podle podílu, jimž jsou jednotlivé druhy v praxi zastoupeny a podle konstrukční složitosti vyráběných dílů, lze plasty rozdělit do následujících skupin:

♦ plasty pro široké použití, mezi které patří polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF),

♦ plasty pro inženýrské aplikace, kam lze zařadit polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximetylén (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), terpolymer ABS, polyfenilénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice,

♦ plasty pro špičkové aplikace, do kterých lze zařadit polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a další.

Sortiment termoplastů se neustále zvětšuje, a to v podstatě dvěma směry, kdy jednou cestou je výroba stále nových polymerů a druhou cestou je modifikace dosavadních polymerů. Možnosti tvorby nových materiálů se postupně snižují a proto roste podíl hmot, vyráběných tzv. „na míru“. Toto zvyšování počtu materiálů má své výhody pro konstrukci a výrobu dílů z plastů, aniž by došlo k výrazné změně ceny, na druhé straně to klade zvýšené nároky na znalosti konstruktérů (viz tab. 2.8).

Tab. 2.8: Ukázka volby druhu plastu pro vybrané aplikace v automobilech /4/



	držáky, klíčky	kostra palubní desky	palubní deska	součásti brzd	nárazník	systém chlazení	součástí karburátoru	přístrojová deska, prvky	vnější klíky	elektrické komponenty	palivová nádrž	přední maska	držák palivové nádrže	palivové potrubí	radici páka	mřížka	výplň sedáček	součásti zapalování	části potrubí	kryty přístrojů	vnitřní vybavení	světla a jeho součásti	okolí volantů	zpětná zrcátka	přístrojová deska	sedadla	zvuková izolace	volant	prvky pod kapotou	tesnění	části vodního čerpadla	podběhy blatníků	mechanismus ovládání oken	
ASA								*								*																	*	
ABS			*					*								*																		
PA		*					*		*	*			*	*		*		*			*			*		*				*		*		
PVC								*													*													
EP, PF				*																									*					
POM	*						*		*	*			*	*		*													*					*
PBT	*							*	*	*						*		*			*			*		*			*					
PC					*			*		*							*			*		*		*	*	*			*					
PEI							*										*								*									
PET								*	*	*									*		*			*	*	*			*					
PE								*	*	*														*	*	*			*					
PMMA							*											*		*	*	*	*	*	*			*						
PPS							*	*	*	*							*		*					*	*	*		*						
PPO							*	*	*	*						*								*	*	*		*						
PPA							*	*	*	*				*	*							*	*	*	*	*	*		*					*
PP		*	*	*	*		*	*	*	*						*				*	*	*	*	*	*	*	*		*					*
PTFE	*																									*	*							
PUR																									*	*								
PUR (pro RIM)		*	*	*	*	*	*	*	*	*						*										*	*	*						
UP		*	*	*	*						*					*												*		*				

Při volbě materiálu je třeba vedle vlastností a ceny hmoty vzít v úvahu i jeho zpracovatelnost, která výrazně ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti konečného výrobku, ale i technologické podmínky,

konstrukční řešení nástroje a volbu stroje. Vlastnosti a odolnost polymerů jsou v podstatě dány jejich chemickou a fyzikální strukturou, ale mohou být do značné míry ovlivněny i zpracovatelským procesem. Z hlediska zpracovatelnosti je potřeba, aby plastická hmota splňovala následující požadavky:

- v co nejkratším čase přejít ze stavu tuhého do stavu tekutého,
- mít dostatečnou zabíhavost (schopnost vyplnit složité a tenkostěnné tvarové dutiny),
- mít dostatečnou tepelnou stabilitu (nesmí podléhat degradaci),
- nesmí uvolňovat během procesu těkavé látky,
- mít dobrou sypanou hmotnost.

Plasty jsou makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší než 10000, které lze tvářet teplem nebo tlakem a podle působení teploty se dělí buď na *termoplasty* a nebo na *reaktoplasty*. Termoplasty zahříváním měknou a přecházejí do plastického stavu. Po ochlazení se vracejí do tuhého stavu. Nastávají zde pouze změny fyzikální povahy, ale chemická struktura plastu se nemění. Z tohoto důvodu lze proces plastikace a tuhnutí teoreticky opakovat do nekonečna. Teoreticky proto, protože ve skutečnosti za zvýšených teplot a vlivem působení vzdušného kyslíku dochází k degradaci polymeru.

Reaktoplasty v první fázi ohřevu také měknou, ale během dalšího ohřevu začne probíhat vytvrzování, jehož výsledkem je zesíťovaná struktura. Tento děj je nevratný a hmotu nelze zpětně opět roztavit. Dalším hlediskem pro rozdělování plastů je dělení podle nadmolekulární struktury nebo-li podle stupně uspořádanosti makromolekul. Podle tohoto hlediska se plasty dělí na *amorfní*, kde makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici a *krystalické*, které vykazují určitý stupeň uspořádanosti. Ten se označuje jako stupeň krystalinity (pohybuje se od 40 do 90 %) a vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními.

Z praktického hlediska je plasty možné dělit na *neplněné* a *plněné* hmoty. Neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice. Pokud plnivo bude ovlivňovat fyzikální a mechanické vlastnosti plastu, potom se už bude jednat o plněné hmoty.

V následujících kapitolách budou popsány charakteristiky jednotlivých plastů, které se nejvíce používají při výrobě automobilů a také využití a aplikace těchto hmot v automobilech jiných značek a jiných výrobců, aby si bylo možné provést srovnání při volbě materiálu i u ostatních výrobců osobních aut. Materiály, používané na plastové díly v a. a. s. Škoda Auto Mladá Boleslav byly již dříve popsány v kap. 2 (viz. tab. 2.3). Příklady jsou uvedeny pouze pro ilustraci a ani zde není možné poskytnout vyčerpávající seznam aplikací u jednotlivých materiálů.

2.2.1. Polyolefiny, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

Polyolefiny jsou semikrystalické termoplasty, vykazující relativně nižší pevnost a tuhost, ale velkou houževnatost. Nevýhodou je velký kříp (tj. změna rozměrů s časem). Elektrické a dielektrické vlastnosti jsou velmi dobré. Jsou hořlavé a mají nízkou odolnost proti povětrnosti. Nenavlhají a dobře odolávají kyselinám, zásadám a rozpouštědlům.

Polyetylén (PE) je polymerem etylénu a vyrábí se ve dvou základních typech, a to buď jako rozvětvený, označovaný také podle způsobu polymerace jako vysokotlaký nebo nízkohustotní (značí se rPE nebo LDPE) a dále lineární nebo nízkotlaký, příp. vysokohustotní (označení lPE nebo HDPE). Stupeň krystalinity u LDPE dosahuje kolem 60 %, u HDPE je stupeň krystalinity až 80 %. Oba typy jsou lehčí než voda, hustota polyethylénu je od 920 do 963 kg.m⁻³. Nepatří mezi konstrukční plasty, neboť pevnost v tahu je u LDPE pouze asi 15 MPa, u HDPE kolem 35 MPa. Moduly pružnosti leží podle stupně krystalinity v mezích od 150 do 1000 MPa. Odolnost proti rázu je však vynikající. Polyetylén vykazuje značný kříp. Je velmi měkký a jeho povrch se dá snadno porýpat. Teplota tání je u LDPE asi 110 až 115 °C, u HDPE je v rozsahu 130 až 135 °C. Tvarová stálost výrobků je do 80 °C, teplota zeskelnění je kolem -80 °C. Polyetylén má výborné elektroizolační a dielektrické vlastnosti, nezahřívá se ani ve vysokofrekvenčním poli. Je zcela nepolární, tj. nepřijímá vodu. Za normální teploty odolává kyselinám, zásadám a rozpouštědlům, po zapálení pomalu hoří. Odolnost proti povětrnosti je malá, proto se zvyšuje přidávkem sazí. Polyetylén je mléčně zkalený, na omak připomíná parafín.

Polyetylén se v automobilech zpravidla používá hlavně jako nízkotlaký polyetylén (HDPE) a v menší míře jako vysokotlaký polyetylén (LDPE). Dobře odolává působení chemických činidel, ale může oxidovat v prostředí intenzivního UV-záření, což vede k jeho odbarvení. Při pokojové teplotě je houževnatý, ale za studena je křehký. Je docela dobrý elektrický izolant a může být použitý pro nízkonapěťové elektrické vodiče. Dá se modifikovat velkou řadou přísad plnidly, omezovací šíření plamenů, kaučukem, činidly pro zesílení struktury a antioxidanty.

Polyetylén se dá zpracovávat vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním, upravovat do tvaru tenké vrstvy nebo pěny, nebo se dá použít pro rotační tváření. Všechny tyto postupy se používají v automobilových aplikacích, které zahrnují elektrické instalace, aplikace tenkých vrstev, plastový lem okraje blatníku a použití jako náhradu některých plechových částí. Důležité použití spočívá při výrobě palivových nádrží z HDPE.

Polypropylén (PP) se vlastnostmi značně blíží lineárnímu polyethylénu, i když asi obsahuje jen 50 % krystalické fáze. Je lehčí než polyetylén a jeho hustota a je vůbec nejlehčí polymer. Hustota polypropylenu je 910 kg.m⁻³. Pevností v tahu, která je až 38 MPa a modulem pružnosti (až 1600 MPa) předčí polyetylén. Snáší také vyšší

teploty, až kolem 120 °C, protože taje při teplotě 160 až 170 °C. Při standardní pokojové teplotě je jeho rázová a vrubová houževnatost přibližně stejná jako u HDPE, ale při teplotách nižších, nežli 0 °C se stává křehkým. Elektrické vlastnosti jsou jen nepatrně horší, než u nízkotlakého polyetylénu (HDPE), chemická odolnost je srovnatelná. Dobře odolává kyselinám, zásadám a za normální teploty i organickým rozpouštědly. Odolností proti korozi značně předčí HDPE. Účinkům povětrnosti neodolává, křehne. Výrobky se vyznačují větší průhledností, než polyetylén.

Přítomnost metylové skupiny v polypropylénu (PP) způsobuje, že polypropylén má vyšší bod tání a větší pevnost než PE. Obvykle se používá ve své izotaktické, vysoce krystalické formě.

Polypropylén se dá zpracovávat vstřikováním nebo vyfukováním nebo se dá upravovat do tvaru tenké vrstvy - všechny tyto postupy se používají v automobilových aplikacích. Homopolymery a kopolymery z PP se používají pro tváření tam, kde je více důležitý spíše dobrý vzhled a větší odolnost vůči trhlinám způsobeným okolním namáháním a tepelná odolnost je větší než mechanická pevnost. Aplikace v automobilech zahrnují konzoly přístrojových desek a výztuže u méně drahých řad, kryty světlometů, nárazové panely, substráty pro panely vnitřní strany dveří (nahrazují materiály na bázi styrénu, protože formy z PP vytvářejí při vibracích a nárazech méně hluku a snadněji se recyklují), loketní opěry, pedály akceleratoru a pouzdra automobilových akumulátorů. PP se ve velkém rozsahu používá na výrobu dílů karosérii v Japonsku, avšak v současnosti méně v Evropě a Severní Americe.

V posledních letech výrazně vzrostlo použití PP v automobilech, protože výrobci automobilů při konstrukcích dílů usilovali o nižší materiálové náklady a řešení pomocí jednoduchého polymeru.

Fiat ve svých modelech nyní používá průměrně 40 kg PP na vozidlo pro nárazníky, přístrojové desky a vnitřní lišty a rovněž pro pouzdro akumulátoru a pro kryty volantu.

Konzola podlahy vyrobená z PP byla použita pro *Chrysler Neon* z roku 1994. *Chrysler* prohlašuje, že se jednalo o první neplněnou konzolu z PP, která byla zkonstruována a vyrobena v Severní Americe. Není opatřena lakem a má menší hmotnost, má lepší akustické vlastnosti a je levnější, než jiné materiály pro konzoly podlahy.

Nové vozidlo *Mazda Lantis*, jehož výroba byla nedávno zahájena v Japonsku, má přední i zadní nárazníky vyrobené z PP pomocí procesu plynového vstřikování do formy.

Chrysler se chystá použít v budoucích verzích typů *Eagle Vision*, *Concorde* a *Dodge Intrepid* kolenní podkladovou desku z GMT na bázi PP. Vyrábí se jako jediný díl a nahradí konstrukci, která sestává z montáže čtyř plastických dílů. Zvolené kompozitní materiály jsou polypropylény firmy *Exxon*, které byly vybrány na základě toho, že splňují kritérium pro pohlcení kritické energie. Tento materiál byl rovněž použit pro základ sedadel v *Cherokee Jeep*. Firma *Exxon* rovněž zkoumá možnosti použití tohoto materiálu pro jiné užití v automobilech, včetně nosníků nárazníků.

Všechna nová vozidla *Volkswagen* nyní používají přední čela vozidla z GMT na bázi PP, včetně typů *Polo*, *Audi 80* z roku 1995 a nového malého vozidla *Audi A3*. Nový směr u platforem vozidel, kde jsou u vícero modelů používány stejné podlahy karosérie a mnoho dílů dílčích montáží šasi, povede u firmy *Volkswagen* zřejmě k dalšímu zvýšení používání předních čel vozidla z GMT.

U vozidel s vyšším objemem nyní evropští konstruktéři integrují do jedné formy masku chladiče, světlomety a ostatní funkční součásti. Jsou vytvořeny tak, že tvoří aerodynamickou část karosérie s nosníky nárazníku, zhotovenými z polypropylénu vyztuženého skelnými vlákny (GMT), jak tomu je u mnoha modelů *Volkswagen/Audi* a *Mercedes-Benz*. U krytů na bázi PP se za nimi obvykle už nenachází pěna, pohlcující energii.

Nosníky nárazníku zhotovené z GMT na bázi PP jsou vyráběny firmou *Mitras* pro vozy *Jaguar* od roku 1995. Ostatní výrobky z GMT produkované firmou *Mitras* zahrnují sedadla, přístrojové desky, nárazníky a vnitřní panely dveří.

Některé levnější vysokoobjemové japonské vozy, zejména modely *Nissan* (jako například *Micra* a následovník modelu *Bluebird*), nyní používají kopolymery polypropylénu s vyšším modulem pružnosti pro kryt nárazníku bez zesíleného nosníku (ačkoli vozidla určená pro severoamerické trhy obsahují hliníkový nosník). PP s vyšším modulem je možné rovněž použít jako kryt pro zesílený nosník, vyztužený kovovými nebo skleněnými vlákny, který srovnatelně odolává v nárazovém. A nebo se dá použít PP s nižší hodnotou modulu pružnosti a s pěnou pohlcující energii.

Firma *BASF* ve spojení s *Fordem* zkouší možnost použití pěnové sendvičové struktury pro automobilové víko zavazadlového prostoru a jako základ pro svůj výzkum používá víko zavazadlového prostoru u vozu *Ford Escort Cabriolet*. Tento tým používá pro vnější povrch karosérie minerálními materiály plněný a elastomerem modifikovaný PP, čímž se dostane povrch s velkou plochou pro náraz, který se dá lakovat. Skleněnými vlákny vyztužený a elastomerem modifikovaný PP, který byl použit pro pěnové jádro, poskytuje dobrou odolnost proti nárazu a má sníženou tepelnou roztažnost.

Polypropylén, který se zde používá, je recyklovatelným materiálem. Takto konstruovaná víka zavazadlového prostoru z PP mají hmotnost 7,1 kg ve srovnání s 8,8 kg vázícími víky zavazadlového prostoru z oceli, a mají velmi dobré chování při crash-testech, při nichž dávají dobře definovanou oblast mačkání a dobré pohlcování energie nárazu. Avšak zbývá vyřešit ještě některé problémy, zejména s ohledem na schopnost lakování a uchycení. Proto jako náhradní vhodné aplikace se dají tyto materiály použít pro zadní část zadních sedadel, podlahu zavazadlového prostoru a spodní stínění motoru, u kterých je mnohem důležitější mechanická pevnost a spojení dílů, než přesné uchycení a konečná úprava povrchu. PP byl také využit u vícerozměrného postupu licencovaného firmou *Excell Corp* (Japonsko), kde byl použit pro vedení vyčištěného vzduchu v *Subaru Alcyone* z roku 1994 pomocí lisování. Technika lisování rovněž umožňuje vylišování

rezonátoru – tradičně odděleného samostatného dílu. Nová jednotka umožňuje zhuštění v poměru 5:1 a 40 % snížení hmotnosti ve srovnání s podobným vedením, vyrobeným z pryže.

U některých aplikací je PP směšován s pryží EPDM, přičemž se běžně používá mastek jako plnidlo. Tato směs poskytuje lepší odolnost proti nárazům, zlepšuje „cit“ a má lepší vlastnosti při útlumu hluku. Zejména výkonnost týkající se útlumu hluku je lepší než u ABS. Směs PP/EPDM se používá pro výrobu nárazníků, pouzder svítidel, spoileru a volantu.

2.2.2. Styrenové hmoty, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

Styrenové hmoty jsou amorfni termoplasty, které jsou tvrdé, křehké s dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Jsou hořlavé, prach může způsobit výbušnou směs. Při hoření vzniká hustý dým s množstvím sazí. Odolává kyselinám zásadám a polárním rozpouštědlům.

Polystyrén (PS) je nepatrně těžší, než-li voda (hustota je kolem 1050 kg.m^{-3}) a má poměrně vysokou pevnost v tahu a modul pružnosti (50 až 60 MPa, 3500 MPa). Teplota zesklenní je kolem 80°C a polystyrén nevykazuje křep. Je to nepolární plast s vynikajícími elektrickými vlastnostmi. Poměrně dobře odolává povětrnosti.

Polystyrén se používá ve standardní formě a nebo jako pěnový. Krystalický PS je tvrdá, pevná, průhledná umělá hmota, která je levná a snadno se dá lisovat. Rovněž neabsorbuje vodu a je dobře odolná vůči chemikáliím (ačkoliv se rozpouští v některých uhlovodících). Odolnost proti nárazu není dobrá, ačkoliv i toto může být vylepšeno přidáním kaučuku, čímž se vytvoří PS s vysokou odolností vůči nárazům (označovaný jako houževnatý polystyrén), který má sedmkrát vyšší rázovou pevnost, než běžný PS, ale za cenu snížení pevnosti v tahu, tvrdosti a bodu měknutí. Ve vozidlech se PS používá pouze ve velmi malé míře. Obecně platí, že kdekoliv se může dát PS, tak se tam při přibližně stejných cenových nákladech mnohem lépe uplatní PP.

Materiál, který se začal používat teprve nedávno, je směs PS/modifikovaný PPO, který se nazývá „Cari“ a který byl použit firmou *Toyota* jako podkladová struktura pro přístrojovou desku z modifikovaného PPO.

PS je možno rovněž použít jako lehkou pěnovou hmotu (pěnový PS). Vyztužený skleněnými vlákny nebo tkaninou a pokryt ozdobnou oděvní textilií, se často používá pro obložení stropu kabiny a dveří.

Protože je standardní PS velice levný, tak výrobci provádějí velké množství výzkumů, aby vylepšili jeho fyzikální a rázové vlastnosti. Úspěch v této oblasti by mohl vést k většímu použití PS v automobilových aplikacích.

Terpolymer akrylonitril-butadién-styren (ABS) je vysoce ceněný konstrukční plast. Se stoupajícím obsahem kaučuku se zvyšuje houževnatost, ale klesá pevnost, tuhost a teplotní odolnost. Potom tedy

pevnost v tahu může být v rozmezí od 20 do 65 MPa, modul pružnosti od 2000 do 3000 MPa. Přítomnost akrylonitrilu je příčinou částečně polárního charakteru hmoty, což se projevuje horšími elektrickými a dielektrickými vlastnostmi a vyšší navlhavostí. Dobře odolává kyselinám, zásadám, olejům a uhlovodíkům, působením povětrnosti křehne.

Akrylonitril-butadien-styren je tedy terpolymer styrenu, monomeru akrylonitrilu a polybutadienového kaučuku. Velké množství materiálu ABS obsahuje tyto složky v různých poměrech. Mají vysokou rázovou pevnost, poněkud vyšší pod měknutí a dobrý povrchový vzhled. Dají se přidávat materiály, které omezují šíření plamenů, a dalšími přísadami se dá zvýšit teplota tepelné deformace.

Již několik let jsou dostupné směsi ABS a PC. Jejich mechanické vlastnosti, zejména vysoká rázová pevnost, z nich činí konkurenční materiál k dražším plastickým hmotám. ABS se rovněž mísí s PSU a PVC.

ABS se používá pro přístrojové desky, kryty dveří, kliky dveří, mřížky chladiče, součásti ventilačního systému, pouzdra ohříváče, upevnění bezpečnostních pásů, panely konzol, pouzdra reproduktorů, vnitřní panely dveří (v Evropě a Severní Americe, ačkoliv Japonsko stále používá lisovanou tkaninu) a ostatní vnitřní obložení.

Chrysler LH z roku 1993 má zabudovanou přední masku chladiče, která je vyrobena z ABS s vysokou rázovou pevností. Vylepšená konstrukce umožňuje přesunout mřížku do oblasti nárazu nárazníku, jak je požadováno US standardy pro nárazníky, aniž by bylo zapotřebí drahých vzpěr pro pohlcení zátěže.

V posledních letech se používání ABS ve vozidlech střetává se silnou konkurencí vysoce krystalického PP a směsí PP/EPDM (jako například u vnitřních panelů dveří). V Severní Americe rovněž existuje silný trend k používání vyztuženého polyuretanu. ABS nicméně zůstává jednou z předních plastických hmot používaných v konstrukcích automobilů.

ABS vlivem slunečního světla křehne, takže tento materiál vyžaduje vrstvu černé barvy, aby splňoval specifikace pro odolnost vůči UV záření. Akrylonitril-styrén-akrylát (ASA) tuto nevýhodu nemá a severoameričtí výrobci automobilů nyní začínají tento materiál používat pro vnější aplikace, jako jsou mřížky větracích otvorů pod předním sklem u *Jeep Grand Cherokee*, u subkompaktního *Chrysler Neon* a u některých modelů *Saturn*. Pouzdro dvojitých slunečních clon na výklopných zadních dveřích na posledním modelu *Land Rover discovery* je zhotovena ze směsí ASA/PC. ASA se rovněž používá pro dešťový žlábek vyrobený vstřikováním do formy, který je použit u vozidel *General Motors Buick LeSabre* a *Park Avenue*, *Pontiac Bonneville* a *Oldsmobile 88* a *98*, u kterých byl zvolen pro svou odolnost vůči povětrnostním podmínkám.

Kopolymer styren-akrylonitril (SAN) je prekurzorem ABS. Zabudováním akrylonitrilu do styrenového řetězce se značně zlepší mechanické vlastnosti. Modul pružnosti je kolem 3600 MPa, pevnost v tahu je 70 MPa, mírně se zlepší rázová a vrubová houževnatost. Také

teplotní odolnost je lepší oproti polystyrénu. Polární charakter akrylonitrilu se projevuje ve zhoršení dielektrických vlastností a ve vyšší absorpci vody. Naproti tomu odolnost proti nepolárním rozpouštědlům, odolnost proti korozi za napětí a odolnost proti povětrnosti je výrazně lepší.

Celkově má tedy trochu lepší vlastnosti než krystalický PS, ale jeho konstrukční vlastnosti jsou stále ještě špatné. Jeho aplikace v automobilech zahrnují měřidla na přístrojové desce a knoflíky. Verze s vyztužením pomocí skleněných vláken byla použita automobilkou Opel pro pouzdra světlometů.

Kopolymer styrén-maleinanhydrid (SMA) má lepší fyzikální a mechanické vlastnosti než PS a lepší teplotní odolnost, takže odolává teplotám v sušících pecích při sušení laků. V širokém měřítku se používá v Severní Americe, ale porovnatelně méně je dosud používán v Evropě. Avšak tato situace se může změnit, protože firma DSM aktuálně spolupracuje s dvěma německými výrobci automobilů na vývoji předního čela karosérie, zhotoveného z elastomeru vyztuženého skleněnými vlákny a modifikovaného styrén-maleinanhydridem (SMA). Tvrdí se, že tato přední čela karosérie mohou být až o 20 % levnější, než dosud stávající verze s termoplastických polymerů.

2.2.3. Polyamidy, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

Polyamidy obsahují v řetězcích kromě atomů uhlíku i atomy dusíku, které výrazně zvyšují pevnostní hodnoty, ale na druhé straně jsou příčinou vysoké navlhavosti materiálu.

Hlavními typy polyamidů (PA), které se používají ve vozidlech, jsou PA6, PA66, PA11, PA12 a ostatní. Všechny tyto polymery jsou vysoce hygroskopické. Vysoko krystalické PA absorbují vodu méně a více odolávají otěru. Stupeň krystalinity (je dán výrobními podmínkami) má rovněž vliv na elektrické a mechanické vlastnosti. Číslice za značkou označují počet atomů uhlíku ve strukturní jednotce makromolekuly.

Polyamidy se stále více používají v oblastech, kde je důležitá houževnatost, tuhost a odolnost proti otěru, proti působení uhlovodíků a proti teplu. Pohyblivé části z PA jsou samomazné a mají tichý chod. Používají se v převodovkách, vačkách, ložiscích, pouzdrech a sedlech ventilů.

Polyamid 6 (PA6) je houževnatý termoplast, tvořený lineárními makromolekulami s obsahem krystalického podílu v rozsahu 25 až 45 %. Pevnost v tahu se podle obsahu monomeru a vody mění v rozsahu 40 až 80 MPa, modul pružnosti od 900 do 1600 MPa. Vykazuje značný sklon ke křípu. Konstrukční vlastnosti lze zlepšit přidáním skleněných vláken. Teplota tání je vysoká a bývá v rozsahu 220 až 250 °C, teplota zesklenní je asi 40 °C. Přítomnost vody snižuje teplotu zesklenní pod 0 °C. PA6 má mimořádnou odolnost proti otěru a má nízký koeficient

tření. Elektrické vlastnosti jsou špatné v důsledku silné polarity hmoty a sluneční záření způsobuje silné zhoršování vlastností.

PA6 má v zásadě podobné vlastnosti jako PA66, avšak má nižší bod tání, absorbuje více vody (vede to k nižší přesnosti při výrobě) a má nižší odolnost vůči anorganickým kyselinám. Má rovněž mírně vyšší pevnost v tahu a rázovou houževnatost a menší poměrné prodloužení při přetržení.

Polyamid 66 (PA66) má úzkou oblast tání (teplota tání je kolem 250 °C) a oproti PA6 má asi o 20 % lepší mechanické vlastnosti. Má menší navlhavost a lepší teplotní odolnost.

PA66 má velmi vysoký bod tání a velmi vysokou pevnost a tuhost. PA66 se dá modifikovat skleněnými vlákny a pomocí nuklečních činidel, které způsobují rychlou krystalizaci. Odolává většině rozpouštědel, s výjimkou silných kyselin a oxidačních činidel. Vystavení venkovním podmínkám, pokud není PA66 stabilizován, způsobuje vyblednutí barev a křehnutí. PA66 vyztužený skleněnými vlákny je stejně houževnatý jako většina amorfních plastických hmot a odolává vzniku trhlin v důsledku namáhání a je odolný vůči rozpouštědlům. V automobilu *Peugeot 605* byl použit jako torzní stabilizátor, přičemž došlo jak k snížení hmotnosti, tak i hluku a vibraci.

PA6 a PA66 patří mezi nejvíce používané aplikace PA v automobilech. Poměr mezi PA6 a mezi PA66 závisí na typu aplikace a geografické oblasti. Pro aplikace v motorovém prostoru činí PA66 80% veškeré poptávky. V jiných oblastech vozidla – vnějších částech, v prostoru pro cestující a v elektrických aplikacích – je druh volby mnohem více otevřený. Z historických důvodů se PA6 častěji používá v Německu, zatímco PA66 se mnohem častěji používá ve Francii a ve Velké Británii.

V poslední době vyvinutý *polyamid 46* (PA46) se používá v podobných aplikacích, jako PA6 a PA66. Má vysokou krystalinitu a vysoký poměr nukleace, což poskytuje vyšší rázovou houževnatost než u PA66. Má rovněž vyšší pevnost v tahu a menší poměrné prodloužení při přetržení a je velmi tvrdý.

Polyamid 11 a **polyamid 12** (PA11, PA12) tvoří přechod k polyolefinům, protože mají z polyamidů nejnižší hustotu ($1040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a nejnižší navlhavost. Mechanické vlastnosti jsou však poměrně vysoké, zvláště rázová a vrubová houževnatost. PA6 a PA66 předčí elektrickými a dielektrickými vlastnostmi.

PA11 má dobrou odolnost proti UV záření a má dobré izolační vlastnosti. Absorbuje méně vody než PA 66 a je méně citlivý na změny vlhkosti. Má vysokou teplotu tepelné deformace a rázovou houževnatost při nízkých teplotách. Aplikace PA11 bez plnidel zahrnují palivové vedení a filtry, podtlakové vedení a upevňovače kabelů. PA11 vyztužený skleněnými vlákny má ještě několik dalších využití při konstrukcích automobilů.

PA12 má podobné vlastnosti jako PA11, i když PA11 má trochu vyšší pevnosti v tahu a rázovou houževnatost a menší poměrné prodloužení při přetržení. Aplikace bez plnidel zahrnují palivové vedení,

palivové filtry, podtlakové vedení a upevňovače kabelů. PA12 vyztužený skleněnými vlákny má ještě několik dalších využití při konstrukcích automobilů.

Na trhu se objevuje i velké množství kopolymerů PA různých typů (jako např. PA612), avšak tyto materiály jsou příliš drahé pro použití v automobilovém průmyslu. To stejné platí i pro amorfní PA (jako např. *Trogamid* od firmy *Hüls*).

Skleněnými vlákny vyztužené PA a směsi PA se používají pro panely karosérii. Firma *Bayer* používá PA6 vyztužený skleněnými vlákny pro nosič dveří automobilů a PA vyztužený skleněnými vlákny a ještě plněný kovem byl použit pro 8 - válcový model BMW roku 1992 pro utlumení hluku. Dvousedadlový *Ethos* firmy *Pininfarina* má karosérii lisovanou ze směsi PPO/PA. V poslední době vzrůstá zájem o reakční hmoty na bázi PA.

Tvary sacího potrubí se stávají stále komplikovanější. První aplikace, která zahrnovala PA vyztužený 30 % až 35 % skleněných vláken byla uskutečněna v čtyřválcovém 16 - ventilovém modelu *Zeta* z roku 1988 od firmy *Ford*. Firma *Ford* prohlašovala, že díly založené na PA vyztuženém skleněnými vlákny byly o 3,5 kg lehčí a měly lepší výkon, krouticí moment a výkonnost při teplém startu. Byla rovněž požadována nepřetržitá tepelná odolnost do 120 °C a krátkodobá odolnost do 200 °C spolu s odolností proti vibrační únavě materiálů. Tato inovace byla důležitá v tom, že ukázala cestu nejen pro další používání skleněnými vlákny vyztuženého PA pro sací potrubí ve vozidlech *Ford*, *BMW* (modely 520i a 525i), *PSA* (*Citroen ZX Vulcane*) a *Porsche*, ale také pro další použití v oblasti motoru, kde jsou součásti vystaveny vysoké teplotě.

Samomazností PA a odolností vůči vysokým teplotám bylo využito k výrobě vodicích pouzder zdvihátek ventilů v mnoha severoamerických modelech vozidel. Tvrdí se, že se jedná o první použití plastické hmoty uvnitř bloku motoru.

PA66 vyztužený skleněnými vlákny k výrobě integrované chladicí jednotky byl použit v posledním modelu *Renault Safrane*. V jednotce jsou kombinovány veškeré chladicí funkce do jedné kompaktní jednotky, která se dá namontovat pomocí jednoduché operace, čímž se vyhneme cenově náročným pomocným montážním operacím.

Rover použil PA66 vyztužený 35 % skleněných vláken pro trubku rozvodu paliva ve svých motorech typu *T16* a *K16* a očekává se, že vývoj povede k dalšímu rozšíření aplikací.

PA66 vyztužený dlouhými skleněnými vlákny byl použit firmou *Globe Motors* (USA) k výrobě krytu, který chrání převodovku motoru vozidel, určených pro provoz mimo silnice.

Nový *Neon* firmy *Chrysler* má zabudovaná vylepšená dvířka plnicího hrdla a pouzdro, které jsou zhotoveny z PA66 *Zytel* a *Minlon*, které jsou vyztuženy minerálními materiály.

Porsche používá PA vyztužený vlákny jako náhradu hliníku v napínací vačkového řetězu ve svých modelech řady *911*, čímž se dosahuje 30 % snížení hmotnosti a podstatné snížení hluku spolu se

sníženými výrobními náklady, které vzniknou při vyloučení obráběcích operací a následných postupů pro detekci trhlin a dutin.

PA má celkem dobré elektrické izolační vlastnosti a těchto vlastností se využívá stále více. Spínače startéru se nyní zhotovují z PA, avšak je velice obtížné udržet jejich samomaznost, protože jsou vyztuženy skleněnými vlákny. Byly vyvinuty speciální složení jako například speciální kompozit PA66 vyztužený aramidovými vlákny a s obsahem 10 % PTFE (pro *Mercedes - Benz*).

PA 46 vyztužený 30 % skleněných vláken byl vybrán firmou *Volkswagen* pro spínače automatických převodovek. Tato firma požadovala materiál, který by byl dlouhodobě odolný teplotám 150 °C s 15 minutovými špičkami při 180 °C a současně odolný vůči převodovým olejům. Byl zvolen PA, protože testy ukázaly, že účinek brzdové kapaliny silně ovlivňuje vlastnosti stávajícího materiálu po 1500 h při 120 °C a nebo po 200 h při 160 °C.

PA66 se dále používá pro piezoelektrické snímače klepání motoru, snímače horní úvratě, snímače airbagu a snímače chladicí kapaliny motoru, protože jsou odolné vůči teplotě a mají vhodné vlastnosti tečení materiálu při zpracování.

V součástech pro seřízení motoru v zrcadlovém úhlu (*mirror-angle adjusting motor*) tvoří plastické hmoty i nadále konkurenci kovům, zpracovávaným tlakovým litím. Firma *Kiebert Industrie* vyvinula proces montáže automobilových hadic. Hadice z elastomeru jsou připevněny k tuhým spojovacím kusům, vyrobeným z polymeru vyztuženého skleněnými vlákny. Tyto jsou umístěny do vstřikovacího lisu a PA je zastríknut kolem hadice a spojovacího kusu. Tento systém byl poprvé použit pro montáž hadic chladicího a topného systému ve voze *Renault Clio*.

V oblasti výroby automobilů se stále více používá PA, odhady tvrdí, že jeho podíl činí 50 % evropského trhu. Různá složení, včetně vyztužení pomocí dlouhých vláken, byla aplikována u různých evropských výrobců automobilů. Spotřeba polyamidu se odhadovala v roce 1996 na přibližně 6 000 tun, v roce 1997 dosáhla 10.000 tun a v roce 1998 skoro 17 000 tun.

2.2.4. Polyimidy a ostatní polyamidy, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

Polyimid (PI) je materiál, který je odolný vůči teple, rozpouštědlům, plamenům a vůči otěru a má vynikající elektrické vlastnosti. Vykazuje stálou odolnost až do 290 °C a špičkovou odolnost až do 480 °C, avšak je obtížně zpracovatelný a podléhá hydrolýze, takže díly z PI mohou ve vřící vodě nebo v páře prasknout.

Aplikace v automobilech zahrnují těsnicí kroužky, axiální podložky, těsnění, plochá těsnění, sedla ventilů, zdvihátka ventilů a pístní kroužky, součásti pro motorky čelních skel a elektrických zvedaců oken. Používá se pro elektronické díly a pro podložky obvodů pružných plošných spojů.

Polyetherimid (PEI) je polyimid s éterickými můstky. Po zpracování si uchovává mnoho z požadovaných vlastností PI. Vykazuje velmi vysokou pevnost v tahu a tepelnou odolnost a velmi malé množství emisí dýmů. PEI nemá sklon k hydrolyze a má velmi široký rozsah teplot zpracování. Pomalu se ho ve velké míře začíná používat v aplikacích v motorovém prostoru, zejména jako součásti systému zapalování a v karburátoru.

Polyamid-imid (PAI) je kopolymer PA a PI, má vysoký modul pevnosti a odolnost proti tečení a odolává většině kyselin a uhlovodíků, ale neodolává alkáliím. Dá se formovat pomocí vytlačování nebo vstřikování. PAI je uváděn na trh firmou *Amoco* pod názvem *Torion*. Nová řada PAI je nyní vyráběna firmou *Rohm and Hass* pro automobilový trh Severní Ameriky.

PAI byl určen v roce 1990 pro střešní okna sportovních vozidel u *Chevrolet Corvette* a *Camaro* a pro *Pontiac Firebird*. Výhody PAI zahrnují úsporu hmotnosti (střešní okna z PAI mají pouze polovinu hmotnosti skleněných střešních oken) a snadnost barevného tónování. PAI byl vyvíjen „velkou trojkou“ v Severní Americe a japonskými firmami *Honda* a *Mazda* pro použití jako střešní okna, pevná zadní okna a větrací okénka.

Polyftalamid (PPA) je semiaromatický polyamid, který je při vytuzování schopen odolávat teplotám do 185 °C, má vysokou pevnost a tuhost, chemickou odolnost a ohnivzdornost a rozměrovou stálost. Podobá se PA66, ale má menší index toku a absorbuje mnohem méně vody, čímž se tento materiál stává vhodným pro použití v motorech a pro konektory snímačů.

Je velmi vhodný pro zpracování a dají se z něj vytvořit velmi tenké vrstvy. Použití zahrnuje mechanismy spouštěče, díly chladicího systému, bezpečnostní ventily palivové nádrže, turbokompresory, termostaty chladiců vzduchu a pouzdra multiplexerů, čističe motorů, součásti turbokompresorů, kryty vahadel ventilů, axiální podložky a součásti převodovky. Další výhledové aplikace jsou v použití ve snímačích, konektorech, reflektorech a součástech palivového systému.

PPA nahradí PA ve snímačích hřídele v řadě sedanů firmy *Chrysler* v roce 1993, protože má lepší stabilitu rozměrů než PA12. *Chrysler* rovněž používá PPA vytuzovaný 33 % skleněných vláken pro výstupní otvor vody v motorech 1 x OHC a 2 x OHC ve vozidlech *Neon* třídy subcompact od roku 1994. Tento materiál byl zvolen pro jeho vysokou tepelnou a chemickou odolnost.

Polyarylamid (PAA) je založen na aromatických sloučeninách (na rozdíl od PA, který je založen na alifatických sloučeninách). Jeho prekurzory jsou mnohem stabilnější než prekurzory ostatních polyamidů.

Polyarylamid se dá tvářet do forem při vyšších teplotách než PA6 nebo PA66. Výlisky mají vysokou rázovou odolnost a tepelnou odolnost až do 150 °C. V důsledku jeho tuhosti a malého koeficientu tepelné roztažnosti jsou některé kompozity se skleněnými vlákny nebo s uhlíkovými vlákny konkurenceschopné se slitinami kovů

zpracovávaných tlakovým litím, např. pro tělesa palivových čerpadel, kryty vahadel ventilů, spojkové tyče, řemenice, hřídele, převodovky a kliky dveří.

Polyaramid (PARA) – často nazývaný „Kevlar“, což je obchodní název firmy *DuPont* – je další formou aromatických polyamidů, obvykle používanou ve formě vláken, které mají výjimečnou pevnost v tahu.

Vlákna z PARA, které byly původně vyvinuty pro kord pneumatiky, používá většina evropských výrobců pro vyztužení brzdových destiček. Jedná se o bezpečnou a účinnou náhradu za azbestová vlákna. Vlákna z PARA se rovněž používají pro vyztužení v různých kompozitech.

Polybenzimidazol (PBI) je tepelně odolný až do 450 °C, čímž je tento materiál vhodný pro aplikace v motorech, avšak doposud trvají velké problémy s jeho zpracováním. Firma *Hoechst* provádí modifikaci PBI, kterou se tento materiál stává vhodným pro vstřikování do formy, s cílem nabídnout jej pro automobilový trh. Možné použití tohoto materiálu je pro pístní kroužky a v současnosti probíhá jeho testování v závodních vozidlech. Předběžné výsledky ukazují na podstatné snížení tření ve srovnání s kovovými díly. Konstrukteři jsou přesvědčeni, že snížená hmotnost dílů zlepší zrychlení vozidla.

2.2.5. Ostatní používané termoplasty, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

Kromě dříve popsaných druhů plastů, které zaujímají největší objem při výrobě plastových dílů pro automobilový průmysl, se v mnohem menší míře používají i následující termoplasty. Jejich základní vlastnosti a možné oblasti použití jsou popsány v následujících odstavcích.

Polymethylmetakrylát (PMMA) má především výborné optické vlastnosti, jeho výroba se však omezuje, protože je zdoluhavá a tím i nákladná. PMMA je amorfni polymer vyznačující se dokonalou číroostí. Patří ke konstrukčním plastům, protože má vysokou pevnost v tahu (70 až 80 MPa) a také vysoký modul pružnosti (3000 až 3300 MPa). Křep téměř nevykazuje, ale nevýhodou je malá odolnost proti rázovému namáhání. Tažnost je nepatrná (5 až 6 %). Teplota zesklenní je 80 °C a trvalá teplotní odolnost je 65 až 75 °C. Přítomnost kyslíku v molekule se projevuje zhoršením elektroizolačních vlastností, ale zvláště dielektrických vlastností. Dielektrické ztráty jsou vysoké. Polární charakter je příčinou částečné navlhavosti. Absorbovaná vlhkost sice neovlivňuje mechanické vlastnosti, ale působí potíže při zpracování. Proto musí být polymer, stejně jako jiné navlhavé plasty, předem dobře vysušen, PMMA odolává alkáliím a roztokům solí, silné kyseliny a četná rozpouštědla jej však porušují. Dobře se lepí chloroformem. Páry některých rozpouštědel vyvolávají vznik drobných trhlinek na povrchu, tzv. stříbření, což nepříznivě ovlivňuje transparentnost výrobku. Dokonalá číroost a průhlednost je totiž jednou z nejvíce ceněných

vlastnosti PMMA. Po zapálení pomalu hoří, hlavně na hranách. Velmi dobře odolává povětrnosti a UV záření.

Polymethylmetakrylát se používá jako krytů přístrojů, jako krytů světlometů a ostatních světél. Dále je PMMA možno použít pro stropní okna.

Polykarbonáty (PC) výhodně spojují houževnatost s dobrou teplotní odolností fenoplastů. Jsou to amorfní termoplasty, které se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi. Pevnost v tahu bývá až 70 MPa, modul pružnosti až 2500 MPa a houževnatost je tak vysoká, že ani při prudkém nárazu těleso nepraskne. Kříp je malý. Teplota zesklenní je 140 až 170 °C, ale teprve nad teplotou 225 °C přechází do stavu velmi viskózní kapaliny. Tvarově stálý za tepla je do 125 °C, trvale teplotně odolný do 100 °C. Protože elektroizolační vlastnosti jsou velmi dobré a dielektrické ztráty nízké, je ceněným plastem v elektrotechnice. Částečně polární charakter je příčinou navlhavosti, která sice neovlivňuje mechanické vlastnosti polymeru, ale při teplotě zpracování způsobuje jeho degradaci a rychlé zhoršení vlastností. Vcelku dobře odolává kyselinám, avšak nikoliv zásadám. Rozpouští se i v řadě rozpouštědel, např. v chlorovaných uhlovodících. Odolnost proti korozi za napětí, stejně jako proti UV záření a povětrnosti je na střední úrovni. PC lze obtížně zapálit a hoří pomalu. Patří k samozhášivým plastům.

Polykarbonáty se na díly s vysokou rázovou odolností, jako jsou panely karosérii, střešní lampy a dveřní osvětlení, zadní brzdová světla, aj. Ke speciálním typům patří PC plněné krátkými skleněnými vlákny v množství až 40%. Tím se zvýší modul pružnosti až na 10000 MPa, a pevnost v tahu až na 120 MPa a ještě se sníží sklon ke křípu. Na druhé straně klesá houževnatost a zhoršuje se zpracovatelnost.

Zajímavé vlastnosti vykazují také polymerní směsi PC s ABS nebo s PBT, které nacházejí použití na díly karosérii a nárazníky automobilů.

Polyvinylchlorid (PVC) se v praxi používá jako neměkčený (tvrdý) a nebo jako měkčený typ, který však nemá výrazné uplatnění při výrobě automobilů, proto zde není uveden.

Neměkčený PVC neobsahuje buď vůbec změkčovadla nebo jen malé množství, asi do 10 %, kvůli zlepšení zpracovatelnosti. Je to amorfní polymer s poměrně vysokou hustotou (1380 kg.m⁻³). Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi (mez pevnosti v tahu je 45 až 65 MPa, modul pružnosti je 3500 MPa). Tažnost při standardní teplotě je vyhovující (20 až 100 %), snižuje se však s klesající teplotou a pod 0 °C je již křehký. Jeho rázová a vrubová houževnatost je nízká, sklon ke křípu je malý. Patří ke konstrukčním plastům střední jakosti. Teplota zesklenní je 83 °C, takže výrobky lze trvale používat jen asi do 60 °C. Vlivem polárních atomů chlóru v molekule jsou dielektrické vlastnosti horší než u PE, elektroizolační jsou však dobré. Chemická odolnost je však srovnatelná s PE. Odolává kyselinám a zásadám, roztokům solí a mnoha organickým rozpouštědlům. Není navlhavý. Působením slunečního záření tmavne a křehne.

Zpracovatelnost je poměrně obtížná vzhledem k nízké tekutosti taveniny a náchylnosti PVC k tepelné degradaci.

Používá se na obložení dveří a stropu, na kryty přístrojů a na vnitřní části, odolávající chemikáliím.

Polybutylentereftalát (PBT) je semikrystalický termoplast, který se svými vlastnostmi podobá polyethylentereftalátu (PET). Od něj se liší nižší tuhostí (modul pružnosti je 2000 až 2700 MPa) a mezi kluzu (50 až 58 MPa) i nižší tvarovou stálostí za tepla (50 až 70 °C). Předčí jej však lepší zpracovatelností, vstřikuje se při nižší teplotě a v širším teplotním pásmu do formy teplé 30 až 90 °C. Jeho použití je na malé komponenty, jako jsou klíčky dveří, součásti elektropřístrojů a komponenty přístrojů.

PBT plněné až 50 % skleněných vláken se vyznačují mimořádně vysokým modulem pružnosti, až 18000 MPa a pevností až 195 MPa. Tvarová stálost za tepla dosahuje až 210 °C.

Polyfenylénoxid (PPO) se většinou kvůli lepší zpracovatelnosti používá jako modifikovaný polystyrénem (PPO/PS). Je to amorfní termoplast se střední tuhostí (modul pružnosti je 2500 MPa), pevností (pevnost v tahu je 55 MPa) i vrubovou houževnatostí (15 kJ.m⁻²). Má však vysokou tvarovou stálost, až do 130 °C, trvale odolává až do teploty 110 °C. Elektrické vlastnosti jsou velmi dobré, navlhavost je nepatrná. Odolává křípu. Je odolný proti kyselinám, zásadám, alifatickým uhlovodíkům, olejům a tukům, neodolává aromatickým a chlorovaným uhlovodíkům, kterými se dá lepit. Také odolnost proti povětrnosti a UV záření je dobrá. Je neprůhledný.

Používá se na tepelně namáhané díly automobilů, např. na mřížky topení, držáky kabelů, ofukovače apod.

Polyoximetylén (POM) patří k vysoce krystalickým polymerům, svými mechanickými vlastnostmi je vhodný pro konstrukční aplikace. Pevnost v tahu činí až 70 MPa a modul pružnosti je 2800 MPa až 3500 MPa. Dobře odolává křípu i nárazům, má dobrou mez únavy. Koeficient tření i za sucha je nízký a rovněž oteruvzdornost je velmi dobrá. Teplota tání je 175 °C, takže výrobky jsou krátkodobě použitelné do 120 °C, trvale do 95 °C. Elektrické vlastnosti odpovídají slabě polárním polymerům a leží mezi PE a PVC. Nepatrně absorbuje vodu. Poměrně dobře odolává rozpouštědlům, silné kyseliny a zásady však způsobují jeho rozklad. Účinkům povětrnosti neodolává. Po zapálení hoří zvolna a málo svítivým plamenem.

Polyoximetylén se používá na výrobu malých součástí s vysokou pevností, jako jsou příchytky, klíčky, aj.

2.2.6. Polyuretany, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

V konstrukcích vozidel se používá několik různých forem *polyuretanů* (PUR), které se liší chemickým složením.

Pružné polyuretanové pěny (lehčené hmoty) jsou velmi rozšířené. Vyrábějí se zpěňováním PUR polyoly, isokyanáty a ostatními

aditiv. Efektu zpěnění se dosáhne pomocí oxidu uhličitého, který vzniká v průběhu chemické reakce. Pružný pěnový PUR se používá ve většině vozidel jako materiál pro výplň sedadla. V poslední době byla vypracována technologie, která umožňuje pro různá místa sedadla vyrobit různě tuhou pěnu.

Systémy s pružnými pěnovými PUR kombinované s těžkými vrstvami (jako například barytem plněné PE) se rovněž široce používají pro tlumení zvuku. Distribuce poměru hmotnost/tloušťka se dá přizpůsobit na příslušný individuální hluk vozidla. Pěnový PUR byl vyvinut tak, aby poskytoval pružnou strukturu s otevřenými buňkami, která poskytuje dobrou absorpci hluku a vibrací.

Polyuretany pro reakční vstřikování. Mnoho aplikačních součástí vyžaduje neporézní povrch s dobrou povrchovou úpravou tak, aby bylo současně vyrobeno buněčné jádro a kožovitý povrch. Toho se dosahuje pomocí reakčního vstřikování do formy (RIM), při němž dochází k turbulentnímu míšení reakčních komponent v reakční komoře v sousedství dutiny formy. Tato směs je tlakem vpravena do dutiny formy. Obměnou tohoto procesu je postup RRIM, ve kterém jsou do struktury zabudovávána skleněná vlákna, aj.

Tyto postupy byly vyvinuty pro automobilový průmysl a používají se pro výrobu nárazníků, předních a zadních částí vozidel, přístrojových desek, pouzder přístrojů, panelů karosérie, prahů dveří, upevnění oken a řady dalších součástí. Systém RRIM PUR používá firma *BTR Permali* pro výrobu nárazníků pro vozidla *Lotus Esprit* ve Velké Británii.

V Severní Americe existuje silný tlak na použití vyztuženého PU pro vnitřní panely. Tento materiál poskytuje dostatečnou volnost při konstrukci tvaru a pružnost při výrobě, nízké výrobní náklady a vhodnou technologii pro potažení vrchní textilií.

Integrované polotuhé polyuretanové pěny s povrchovou vrstvou se vyrábějí podobným postupem, který je použit v případě výroby pružných pěn a tuhých pěn, avšak používají se složky v jiných poměrech a s jinými aditivami. Tyto pěny jsou používány ve vozech *Ford* a *Nissan* v nárazových podložkách a přístrojových deskách a rovněž se používají pro vnitřní panely. Důležitou aplikací je obložení stropu kabiny, kde má pěna výhodu v tom, že je samonosná (jeden z hlavních konkurenčních materiálů, tj. pěna z PE, má sklon k prověšování).

Automobily *Mustang*, *Thunderbird* a *Cougar* z roku 1994 firmy *Ford* používaly polotuhou pěnu PU pro postranní, energii pohlcující, protinárazové polštáře sedadla. V roce 1995 byly tyto polštáře rovněž použity v modelech *Taurus*, *Sable* a *Escort*. Pěna je izotropní, takže úhel dopadu energie nárazu nehraje roli pro schopnost materiálu pohlcovat energii.

Polyuretanové pěny pohlcující energii. Jedná se o pěny ve tvaru lemu (korálků), které se používají jako součást dílů pohlcujících energii v náraznících automobilů *Mercedes - Benz*, *BMW* a některých dalších modelů vozidel. Někteří pozorovatelé usuzují, že používání této pěny může být nahrazeno jiným materiálem.

Tenké vrstvy z polyuretanu. Systémy s tenkou vrstvou PU pro výrobu samonosných krytů pro airbagy byly vyvinuty firmou *Elastogran* (Německo). Tento systém má výhody v tom, že je odolný proti únavě materiálu a že je velmi elastický a tyto vlastnosti si podržuje v širokém rozsahu teplot, a rovněž odolává stárnutí při působení vlhka za vysokých teplot. Tento systém se vyrábí pro některá vozidla firem *Mercedes - Benz* a *Opel* a uvažují o něm i další evropské výrobci.

Polyuretan lisovaný s povrchovým materiálem. Desky PUR lisované spolu s povrchovým materiálem jsou podobné technologii lisování plochých vrstev (GMT) na bázi PP, avšak jako matrice používají PUR. Používají se pro některé panely vnitřních částí dveří, protože mají vysokou tuhost, malou hmotnost, dobrou rázovou odolnost a dobré vlastnosti, jako např. zvukově izolační materiály. Pro tyto polyuretany byla vypracována technologie, která spočívá v současném vstřikování měkké pěny do lokalizovaných oblastí mezi podložku z tuhé pěny a povrchovou vrstvu („kůži“).

Příležitostně se můžeme setkat s materiály vyrobenými vstřikováním PUR do formy, ale ty jsou obecně příliš drahé pro použití v automobilovém průmyslu.

2.2.7. Polyestery, charakteristika a aplikace při výrobě automobilů

Při výrobě plastových součástí jako komponentů při montáži aut se kromě termoplastů a polyuretanů používají i reaktoplasty, a to hlavně polyestery. Ostatní reaktoplasty (epoxidové, fenolitické, melaminové aj. pryskyřice) se při výrobě uplatňují velmi malým objemem. Proti termoplastům se vyznačují vysokou tuhostí a tvrdostí, teplotní odolností, tvarovou stálostí za tepla, odolností proti povětrnosti a proti korozi za napětí. Nevýhodou je malá tažnost a houževnatost.

Nenasycené polyestery (UP) sami o sobě nenacházejí výraznější uplatnění a proto se vyztužují skleněnými vlákny. Mechanické hodnoty potom závisí na druhu výztuže, na jejich vzájemném poměru a na uložení vláken v matrici. Např. pevnost v tahu se pohybuje v rozsahu 130 až 550 MPa a modul pružnosti od 12000 do 35000 MPa. Optimální objem skleněné výztuže je 60 až 70 %. Teplota použitelnosti je 100 °C, ale může být až 200 °C. UP odolávají jen slabým kyselinám, alkoholům a olejům, neodolávají alkáliím a chlorovaným uhlovodíkům. Pokud není porušen povrch, voda na polyestery nepůsobí. Elektrické vlastnosti jsou středně dobré. Mají však velkou odolnost proti povětrnosti.

K přednostem kompozitů patří vysoká pevnost při nízké hustotě, vysoká rázová odolnost a odolnost proti povětrnosti a poměrně jednoduchá výroba i tvarově členitých výrobků.

Polyestery jsou hlavní skupinou reaktoplastů, používanou v automobilech obvykle ve formě kompozitů buď ve tvaru „plechu“ –

plošné kompozity (*sheet moulding compound* – SMC) nebo objemových kompozitů (BMC).

SMC má dobré mechanické a fyzikální vlastnosti a vykazuje přijatelnou tvrdost a schopnost povrchové úpravy lakováním. Avšak jeho výroba je pracná a pro vytvrzení je zapotřebí vysokých tlaků a teplot v autoklávu. Rovněž pro zajištění dobré povrchové úpravy je obsah skleněných vláken omezen hodnotou 30 %, takže vnější části jsou méně tuhé. V předchozích letech se provádělo vyztužení SMC pomocí neorientovaných chomáčů surových skleněných vláken s obsahem 30 až 50 % (normální koncentrace odpovídala spodní hranici tohoto rozmezí), což omezuje zátěžovou pevnost. Používání nepřerušovaného jednosměrně orientovaného vlákna a náhodně orientovaných vláken pro výrobu součástí s vysokou výkonností, které musí odolávat vysokým zátěžím, bylo zavedeno firmou *Menzolit*, kdy se obsah vlákna se pohybuje mezi 50 až 60 %.

V automobilovém průmyslu se tento materiál používá pro karosérie sportovních automobilů a mnoho dalších součástí, například pro nárazníky, mřížky chladiče, hlavní světlomety, rámy okenních skel a panely, rámy střešních oken, spoilery, kryty hlavy válců, stínění hluku motorů a víka rozdělovačů.

V roce 1993 bylo při výrobě vozů použito materiálu SMC s vysokými mechanickými vlastnostmi jako pohlcovače energie pro oblast nohou cestujících ve vnitřní části vozidla. Materiál, který byl vyvinut firmami *DSM* a *Renault* v rámci programu *Mosaic*, pohlcoval v případě srážek při vysoké rychlosti až třikrát více energie než kov.

Materiály BMC mají pouze 60 % pevnosti v porovnání se SMC a nemají tak kvalitní povrch. Na druhé straně však umožňují zalisování poměrně velkých a tuhých částic, což umožňuje využití odpadů ze SMC nebo jiných termosetů.

Jak SMC, tak i BMC mohou být vyztuženy souvislou tkanou nebo pletenou předběžně impregnovanou textilií, známou jako „prepreg“ (předimpregnovaný laminát). Tímto způsobem získáme mnohem vyšší mechanické hodnoty než po vyztužení pomocí rozsekaných vláken nebo hrubého přástu a dále tato technologie umožňuje přesné umístění vláken a přesné řízení poměru vyztužovacího materiálu k matici – obojí je velmi důležité pro řízení kvality výroby zdokonalených součástí. Prepreg se dá použít s termoplasty i reaktoplasty.

Na použití materiálů při výrobě plastových dílů pro automobily je důležitá i znalost dalších zpracovatelských postupů při kompletaci vozu. Jedná se hlavně o teploty vypalování a teploty v autoklávech. Vypalovací postupy mají tedy výrazný vliv na volbu materiálů. Čím vyšší je teplota vypalování, tím omezenější je výběr:

● tam, kde jsou namontovány díly z plastických hmot na začátku montážní linky a v průběhu antikoroziho elektrického nanášení primárního laku prochází přes vypalovací pec zahřátou na teploty 180 až 200 °C, tak tam se dají v současnosti použít pouze

systémy SMC, BMC, kompozity PC/PET, skleněnými vlákny vyztužený PBT a minerálními materiály plněný PA,

- pokud jsou díly z plastických hmot montovány až po elektrickém nanášení primárního laku, avšak před aplikací primárních tmelů (150 až 170 °C), tak tam se dají použít skleněnými vlákny vyztužený PBT a PA a nevyztužené směsi PPO/PA,

- pokud jsou tyto díly montovány až po aplikaci tmelů, ale před vrchním nátěrem (130 až 140 °C), tak tam se dají použít vysokoteplotní PC, PPO a odolný kompozit PC/PBT,

- pokud jsou panely lakovány mimo linku nebo na lince při nižších vypalovacích teplotách, tak tam se dají použít materiály na bázi PU a směsi PC/ABS.

V současné době a v nejbližším výhledu bude vzrůstající podíl vozidel pravděpodobně nadále kombinovat ocelové a plastové panely karosérie, přičemž plastové panely budou zabudovávány do skořepinových konstrukcí zhotovených hlavně z ocelových plechů. Zavazadlové prostory, kapoty motorů, palubní desky a nárazníky z plastů se ještě více rozšíří, nežli je jejich současné použití, plastové dveře se pravděpodobně rovněž budou používat v mnohem větší míře.

Když to shrneme, tak plasty budou pokračovat v „podnikání nájездů“ na ocel. SMC bude mít stále svou důležitost, zvláště v Severní Americe, avšak bude pravděpodobně trpět v důsledku své omezené recyklovatelnosti. Plasty, které budou útočit na materiály SMC, budou PU, kompozity PC/PBT, PC/ABS, modifikované směsi PPO/PA, PA, ale mohou se objevit i jiné systémy.

Je velmi obtížné posoudit další vývoj v situaci, kdy žádný z materiálů nemá jasnou vedoucí pozici. Celkově se zdá, že používání ABS bude pravděpodobně klesat a že bude nadále stoupat použití PP. Možnosti budoucnosti jsou velmi otevřené a nic nebrání tomu, aby byly vyvinuty jiné, nové, materiály.

2.3. TECHNOLOGIE A TECHNOLOGICKÉ TRENDY POUŽÍVANÉ PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Tato část poskytuje přehled nejdůležitějších metod zpracování, které se používají při výrobě automobilových dílů. Příklady technologií jsou uvedeny pouze ve stručné podobě, protože není možné v rámci této habilitační práce uvést vyčerpávající seznam aplikací. Nejčastěji používanou technologií pro výrobu plastových dílů pro automobilový průmysl je technologie vstřikování, které zde bude věnována největší pozornost.

2.3.1. Doprava, skladování a přípravné operace

Přípravné operace jsou činnosti, které probíhají před vlastním zpracováním daného materiálu vybranou technologií a slouží k úpravě vlastností hmoty. Mezi přípravné operace patří sušení plastů, barvení plastů, ale i granulace po předchozí recyklaci, nebo tabletování. Materiál přichází z chemických závodů již připravený pro zpracování a to buď ve formě granulí, nebo prášku, pasty.

Do výrobních závodů se pro další zpracování plast (výchozí surovina) dodává buď v pytlích, vážících 25 nebo 30 kg a nebo v cisternách. V prvním případě se jedná o menší firmy, které nezpracovávají tak velké množství plastu a nebo nemají k dispozici skladové prostory a pneumatické podávání. Pytle jsou skladovány na paletách a pokud možno by měly být uloženy v suchém prostředí.

Vlastní manipulace s materiálem je manuálně jednoduchá a vyndávání materiálu nemá vliv na kvalitu plastu. Obsluha musí hlídat doplňování materiálu a také možnost vniknutí části pytle do výrobního cyklu, což představuje jediné nebezpečí u pytlovaných plastů.

Velké zpracovatelské společnosti mají k dispozici zásobníky materiálu (sila) o objemu kolem 20 t, které se plní přímo z železničních nebo automobilových cisteren (viz. obr. 2.17) a z kterých je materiál pneumaticky dodáván buď přímo ke strojům a nebo do sušáren a odtud po provedeném sušení následně ke vstřikovacím strojům. Tímto způsobem se doprava výrazně zlevní, lze ji automatizovat, zabrání se znečištění suroviny a navíc odpadnou finanční ztráty, vyplývající z nenávratnosti plastů. Proti vniknutí cizích předmětů jsou na vstupu sil umístěna síta. Zásobníky jsou vybaveny zařízením pro kontrolu množství materiálu a zařízením pro vyprazdňování zbytkového materiálu.



Obr. 2.17: Doprava materiálu do a. s. Peguform Bohemia pomocí cisteren

K pneumatické dopravě se používají buď vakuové nebo tlakové systémy. Vakuový systém je možno použít do vzdálenosti 100 m, zatímco přetlakový systém, pracující s větším tlakem vzduchu, lze použít až do vzdálenosti 200 m. Je zde však mnohem větší opotřebení potrubí a nebo zvýšené tření může způsobit měknutí granulí, příp. jejich drcení.

Volba dopravního zařízení závisí na:

- ◆ typu materiálu (granule, prášek, ...),
- ◆ množství dopravovaného materiálu,
- ◆ vertikální a horizontální vzdálenosti dopravy,
- ◆ dalších požadavcích na úpravu granulátu (barvení, sušení, přidávání regenerátu, apod.).

Hydroskopické plasty je nutno před zpracováním zbavit absorbované vlhkosti, neboť přítomnost vody se projevuje zhoršováním kvality povrchu výrobků i poklesem mechanických vlastností, zejména u plastů, u nichž voda při zvýšené teplotě způsobuje štěpení makromolekul. Se sušením, jako technologickou operací, se musí počítat v případech, kdy hmota přišla v předchozí operaci do styku s vodou, jako je tomu u suspenzí nebo emulzní polymerace anebo při granulaci hmoty, kdy vytlačovaný profil prochází vodní chladicí lázní. Existují ještě i jiné aplikace sušení, např. při výrobě předmětů z lehčeného polystyrénu nebo při impregnaci plniv v podobě pásů pro výrobu vrstvených hmot. Také před svařováním některých druhů plastů (PA 6) je nutno hmotu vysušit, protože jinak se snižuje pevnost svaru. Nejčastějším případem je v praxi ovšem sušení granulované hmoty.

Průběh sušení tuhých hmot závisí na charakteru spojení vlhkosti s materiálem. Voda může být vázána buď přilnavostí a jedná se o vlhkost povrchovou anebo kapilárními silami, kdy se nachází v mikrokapilárách v celém objemu hmoty. V tomto případě je odpařování ztíženo, protože voda v kapilárách je jakoby pod vyšším tlakem a při sušení se musí použít vyšší teploty, než je bod varu při daném tlaku okolí.

Má-li docházet k sušení, je nutné, aby tlak páry, který se ustaví těsně nad povrchem vlhkého materiálu, byl větší než parciální tlak páry v okolním prostředí. Sušení může probíhat jen do vyrovnání těchto tlaků. Materiál je tedy možno vysušit jen do určité vlhkosti, zvané rovnovážná vlhkost, která závisí na okolních podmínkách, a to na teplotě okolí a na relativní vlhkosti (viz tab. 2.9). Jestliže se vysušený materiál vloží do prostředí s vyšší vlhkostí, než-li odpovídá rovnovážnému stavu, dojde naopak k navlhání.

Obsah vlhkosti v materiálu se obvykle vyjadřuje v hmotnostních procentech, udávajících počet dílů vody ve 100 dílech vlhkého materiálu. Tato hodnota se však pro řešení problémů sušení výpočty nehodí. Pro tyto účely se vlhkost c udává v kg vody připadající na jeden kg absolutně suché látky neboli sušiny. Toto značení má tu výhodu, že obsah sušiny je v celém procesu sušení konstantní.

Tab. 2.9: Hodnoty obsahu vlhkosti vzduchu v závislosti na ročním období / 1,3/

Vzduch	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhlost vzduchu [%]	Obsah vlhkosti vzduchu [g.m ⁻³]
vlhký letní	25	80	19,00
normální letní	25	60	14,00
jaro/podzim	10	70	6,70
zima	0	80	3,90

Z technologického hlediska je nejdůležitější určení doby sušení t (viz. tab. 2.10), nutné k dosažení požadované hodnoty vlhkosti. K tomu je nutno znát rychlost sušení U .

Tab. 2.10: Doporučená doba sušení pro vybrané materiály / 1,3/

PLAST	PE	PP	PS	AES	SAN, ASA	PAG	PAG6	PA11, PA12	PMMA	PC	PCM	PBI	PPO	PU
teplota sušení [°C]	*50-70	*80	80	80	80	80	60-70	100	70-80	120-130	120-130	120	95-100	80
doba sušení /hod/	*0,5 až 1	*0,5 až 1	3	3	3	7	6	3 až 6	2 až 4	4 až 20	4	2 až 4	1 až 2	3

Pozn.: Podmínky pro sušení v této tabulce jsou zpracovány z materiálových norem, prospektů, doporučení výrobců.

Hodnoty označené „*“ udávají teploty a doby sušení při nevhodném skladování, jinak se polyolefiny nemusí sušit.

Rychlost sušení lze považovat za konstantní jen při odpařování z volného povrchu, nikoliv však u kapilárně vázané vlhkosti, kdy se zmenšuje s klesajícím obsahem vlhkosti. Závislost se znázorňuje křivkou sušení, kterou je nutno pro konkrétní podmínky stanovit experimentálně. U kapilárně vázané vlhkosti křivku sušení tvoří dvě větve, jejich průsečík odpovídá kritické vlhkosti c_{krit} . V prvním úseku probíhá sušení konstantní rychlostí, v druhém úseku se rychlost zmenšuje přibližně lineárně s klesající vlhkostí c , až při dosažení rovnovážné vlhkosti c_r je rovna nule (té lze teoreticky dosáhnout až po nekonečně dlouhé době).

Vlivem odpařování vlhkosti s povrchu materiálu se vytváří rozdílná koncentrace vlhkosti mezi povrchem a vnitřkem a má-li odpařování pokračovat, musí být povrch zásobován vlhkostí z vnitřku materiálu. Ta se k povrchu dostává difúzí. Pokud je rychlost difúze tak velká, že je povrch vodou dostatečně zásobován, probíhá sušení konstantní rychlostí (první úsek), není-li tomu tak, jako při sušení granulátu plastu, rychlost sušení se zmenšuje. Rozhodujícím faktorem se pak stává rychlost difúze. Na rychlost sušení má tedy hlavně vliv

tloušťka sušeného materiálu, jeho konkrétní obsah vlhkosti (koncentrační spád) a teplota.

Sušení a navlhání jsou vratné děje a vysušený materiál je nutno chránit před vlhkostí v ovzduší. Do násypky zpracovatelských strojů se může dát jen takové množství materiálu, které se zpracuje asi do 30 minut. Násypky některých strojů jsou vyhřívány a teplota materiálu se udržuje na potřebné výši proudem teplého vzduchu.

2.3.2. Vstřikování plastů

Vstřikování je způsob tváření plastů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu z pomocné tlakové komory vstříknuta do dutiny formy. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje a zásoba vstřikovaného materiálu se v ní stále doplňuje během cyklu. Vstřikování patří k nejrozšířenějším a nejdůležitějším technologiím zpracování termoplastů. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Jejich tvar může být velice jednoduchý, ale stejně tak i značně složitý a jejich hmotnost může činit třeba jen zlomky gramu, zatímco nejtěžší výrobky váží až několik desítek kilogramů.

Vstřikovací proces probíhá na moderních strojích většinou plně automaticky, takže se dosahuje vysoké produktivity práce. K přednostem vstřikování rovněž patří vysoké využití zpracovávaného materiálu, které se často blíží 100 %. Tím se splňují požadavky kladené na bezodpadovou technologii. Pořizovací cena strojního zařízení i vstřikovací formy je však značně vysoká. Technologie je proto vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu.

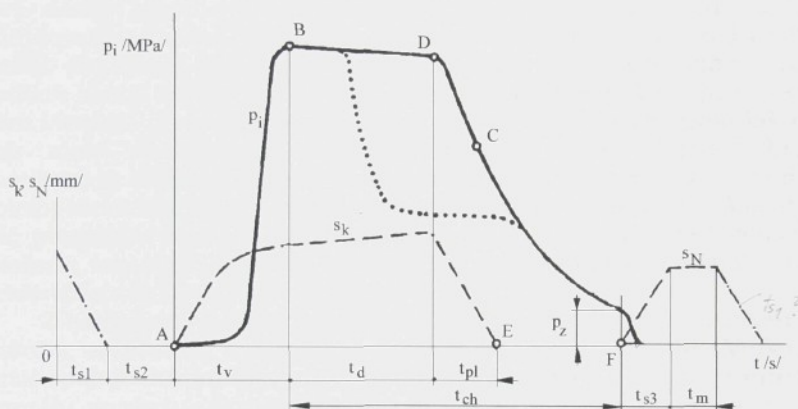
Vstřikováním se vyrábějí rozmanité druhy dílů pro automobilů průmysl, jako např. nárazníky, mřížky chladiče, vnější panely karosérie, vnitřní panely, mnoho položek vnitřního obložení, elektronické součásti, díly v motorovém prostoru, aj.

2.3.2.1. Vstřikování termoplastů

Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. V omezené míře se vstřikují i některé reaktoplasty a kaučukové směsi. K nejčastěji vstřikovaným termoplastům patří polyolefiny (PE, PP), styrenové plasty (PS, SB, SAN, ABS) a dále PA, PC, POM, PPO, PET a další. PVC vyžaduje pro vstřikování speciálně upravené složení.

Vstřikování je dějem cyklickým. Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně specifikovaných úkonů, charakterizovaných jednak stejnými hodnotami termodynamických veličin vstřikovaného plastu, jednak stejnou dobou trvání jednotlivých úkonů. Jedná se o proces neizotermický, během něhož plast prochází teplotním cyklem.

Při popisu vstřikovacího cyklu je nutno jednoznačně definovat jeho počátek. S výhodou lze za počátek cyklu považovat okamžik odpovídající impulsu k uzavření formy. Vstřikovací cyklus však můžeme posuzovat i z hlediska zpracovávaného plastu a s výhodou jej vyjádřit jako závislost tlaku v dutině formy na době. Tento tlak se nazývá *vnitřní tlak* a značí se p_i . Kromě vnitřního tlaku existuje i *vnější tlak*, označovaný p , kterým se myslí tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku. Závislost vnitřního tlaku na čase se označuje jako tlakový cyklus a je uveden na obr. 2.18. Plná čára na obrázku znázorňuje průběh tlaku v dutině formy během vstřikovacího cyklu, přerušovaná čára pohyb šneku a čerchovaná čára pohyb formy.



Obr. 2.18: Průběh vnitřního tlaku p_i v dutině formy během procesu vstřikování / 26/

Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu. V časovém úseku t_{s1} se pohyblivá část formy přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne. Tyto činnosti je nutné odlišit, protože na přisouvání formy se musí vynaložit jen malá přisouvací síla F_p , zatímco na uzamknutí je nutno vynaložit značně vyšší uzavírací sílu F_u (až třikrát vyšší), neboť musí být zaručeno, že se forma vlivem tlaku taveniny při vstřikování neotevře. V časovém úseku t_{s2} se k formě přisune tavicí komora. Úseky t_{s1} a t_{s2} představují tzv. *doby činnosti stroje*. V okamžiku A se dává do pohybu šnek v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty do dutiny vstřikovací formy. V této fázi šnek vykonává pouze axiální pohyb, neotáčí se a vlastně plní funkci pístu.

Doba, během níž probíhá plnění dutiny formy se nazývá *doba plnění* nebo *doba vstřikování* a značí se t_v . Po naplnění formy je tavenina v dutině ještě stlačena a tlak dosáhne maximální hodnoty.

Tento děj je ukončen v bodě *B*. Jakmile tavenina vstoupí do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne.

Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku a tato doba se nazývá *doba chlazení* a je označena t_{ch} . V praxi se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a při klesajícím tlaku. Během chladnutí se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem a aby se na výstřiku netvořily staženiny, je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Tento úsek cyklu se nazývá *doba dotlaku* a značí se t_d . Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak nebo se může po několika sekundách snížit a další chladnutí probíhá při sníženém tlaku. Doba dotlaku končí v bodě *D*, kdy začíná *doba plastikace* t_{pl} nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulovanou hmotu, plastikuje ji a vtláčuje do prostoru před čelem šneku. Současně ustupuje dozadu, přičemž musí překonávat tzv. *protitlak* neboli zpětný tlak. Výška protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětení roztaveného plastu. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu. Ohřev plastu během plastikace se děje jednak převodem tepla ze stěn válce, jednak frikčním teplem, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku a dále přeměnou hnětací práce šneku v teplo. Jestliže je tavicí komora opatřena samouzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat i při otevřené formě.

Z hlediska vlastností výstřiku je důležitý bod *C*, označující okamžik zatuhnutí roztavené hmoty ve vtokovém kanálu. Vtokový kanál spojuje dutinu formy s dutinou tavicí komory a dokud je hmota v kanálu ve stavu tekutém, může vstřikovací jednotka ve fázi dotlaku ovlivňovat tlakové poměry v dutině formy. Zatuhnutím hmoty se však spojení mezi tavicí komorou a dutinou formy přeruší a další prodlužování dotlaku se stane bezúčelné. Doba dotlaku tedy skončí nejpozději v bodě *C*, kdy body *D* a *C* splynou v jediný, anebo může skončit ještě před úplným zatuhnutím vtoku. To má potom za následek rychlejší pokles tlaku ve formě, protože nepatrné množství taveniny může vlivem přetlaku v dutině formy vytéci zpět kanálem do tavicí komory. Plastikace je skončena v bodě *E* a dále může a nebo nemusí následovat odsunutí tavicí komory od formy, označené jako t_k . Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku p_z , což je tlak, pod nímž se hmota, pochopitelně již ztuhlá, nachází ve formě těsně před jejím otevřením. V ideálním případě by měl být zbytkový tlak rovný nule, ale to je možné dosáhnout jen u strojů, u nichž je vstřikovací cyklus řízen mikroprocesorem. U strojů bez mikroprocesoru je nutno se pojistit a počítat s malým zbytkovým tlakem, protože jinak je nebezpečí vzniku propadlin a deformací výstřiků. Příliš vysoký zbytkový tlak je ovšem příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výstřicích, které u křehkých hmot mohou způsobovat až samovolné praskání výstřiku. Zbytkový tlak lze snížit buď zkrácením doby dotlaku anebo moderněji programovaným průběhem tlaku během dotlaku, jak je na obr. 2.18 znázorněno tečkovanou čarou.

Po dokonalém zchladnutí výstřiku se forma otevře (bod F) a výstřik se vyhodí z formy. Na tuto operaci je potřeba *strojní doba* t_{s3} . Je-li výstřik vyjímán z formy manipulátorem, je k tomu navíc vymezena *manipulační doba* t_m . Ta je určena i k případné další činnosti, např. ke vkládání kovových zálsků do formy, k očištění formy apod.

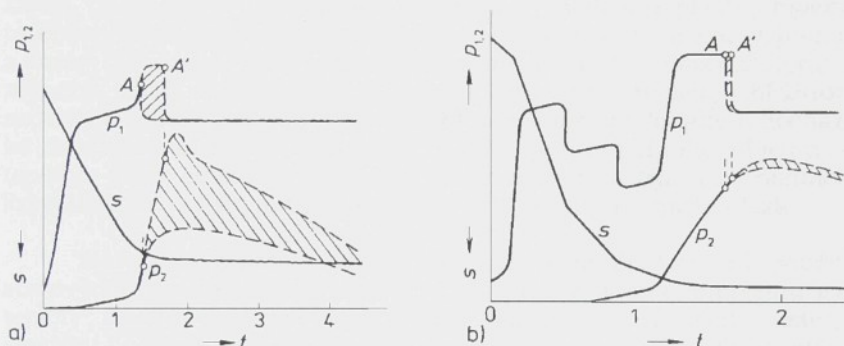
Jednotlivé úseky vstřikovacího cyklu trvají různě dlouho a jsou mimo jiné ovlivněny např. geometrií výstřiku a technologickými podmínkami vstřikování. *Strojní časy* na zavření formy t_{s1} a na otevření formy t_{s3} závisí na rychlosti pohybující se formy a na dráze, kterou musí forma urazit. Dráha otevření formy je dána rozměrem výstřiku ve směru otevírání formy a musí být tak velká, aby bylo možno výrobek z formy vyjmout, případně aby bylo dost prostoru pro činnost manipulátoru ve formě. Je snaha zkrátit strojní časy na minimum. Toho se dá dosáhnout zvýšením rychlosti pohybující se formy. U moderních strojů není tato rychlost po celé dráze stejná, nýbrž při zavírání se forma z počátku pohybuje velkou rychlostí, avšak těsně před dosednutím formy se rychlost snižuje, aby obě části formy na sebe dovedly měkce a forma se nárazem nepoškodila. Podobně i při otevírání formy je nejprve její rychlost vysoká a před dojezdem formy na doraz se rychlost snižuje, aby vyhození výrobku z formy probíhalo pomalu.

Celková doba strojních časů t_{s1} , t_{s2} , t_{s3} nepřesahuje u strojů střední velikosti několik málo sekund. Kromě strojních časů, jež jsou součástí vstřikovacího cyklu, jsou další strojní doby překryty dobou chlazení. Jedná se o *dobu na odsunutí tavicí komory* od formy t_k a příp. i o *dobu prodlevy komory v odsunuté poloze* (t_{kp}). V této pozici komora zůstává až do opětovného zavření formy, tj. do skončení času t_{s1} , kdy je vstřikovací jednotka opět přisunuta k formě.

Doba plnění dutiny formy t_v závisí na rychlosti vstřikování, tj. na rychlosti pohybu šneku vpřed, která závisí na technologických podmínkách, zejména na teplotě taveniny a na vstřikovacím tlaku. Vliv však má i teplota formy, objem výstřiku a jeho geometrický tvar, dále řešení vtokové soustavy a druh plastu. Je však nutné si uvědomit, že k určité hodnotě vstřikovací rychlosti patří určitá hodnota vstřikovacího tlaku, nebo-li nelze nastavovat velkou vstřikovací rychlost při nízkém tlaku. U složitých výrobků a u výrobků s vysokými požadavky na kvalitu povrchu a přesnost výroby je možné programovat průběh rychlosti vstřikování (viz. obr. 2.19). Vysoká vstřikovací rychlost má příznivý vliv na orientaci makromolekul, ale je zde i nebezpečí přehřátí a degradace materiálu. Plnění dutiny formy je provázáno rychlými změnami tlaku, teploty a viskozity taveniny a tyto změny jsou tím větší, čím složitější je tvar výrobku. Doba plnění se pohybuje od zlomku sekundy do několika málo sekund u výstřiků s velkou hmotností. Doba plnění má být co nejkratší, protože vstřikovaná tavenina se stykem s chlazenou formou ochlazuje a ztrácí tekutost, takže při dlouhé době by nezaplnila celou dutinu a vznikl by nedostříknutý zmetek.

Po naplnění tvarové dutiny formy nastane *stlačování hmoty*, kdy tlak prudce stoupne a rychlost náhle klesne. Pokud by tlak zůstal na původní hodnotě, došlo by ke vzniku tlakové špičky, ke zvětšení

hmotnosti a rozměrů výstřiku a k vysokému namáhání formy, které by mohlo vést k pružnému prohnutí formy, tzv. dýchnutí. Aby se zamezilo těmto jevům je nutné v určité době snížit vstřikovací tlak, tzn. přepnout na dotlak. Je-li přepnutí opožděné (viz. obr. 2.19 - bod A') stoupne tlak příliš vysoko a dojde k výše popsaným jevům. Při předčasném přepnutí (bod A) dochází k opačným jevům a je zde až možnost nedostříknutého výrobku. K přepnutí na dotlak může dojít buď podle dráhy šneku, nebo podle vstřikovacího času, nebo podle tlaku ve formě a nebo podle tlaku v hydraulice. U moderních vstřikovacích strojů je přepnutí odvozeno buď podle dráhy šneku nebo podle tlaku ve formě nebo v hydraulice (viz. obr. 2.19.b). Technicky nejlepší, ale i nejnákladnější je přepínání podle tlaku ve formě.



Obr. 2.19: Průběh tlaků při vstřikování termoplastů (dotlak je zobrazen pouze ve své počáteční fázi) / 1,13/

a) u konvenčních vstřikovacích strojů, b) u moderních vstřikovacích strojů s optimalizací procesu, (p_1 – vstřikovací tlak, p_2 – tlak v dutině formy, s – dráha posuvu šneku vpřed při vstřiku, A – A' rozptyl po přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak)

obr. 2.18 ✓
Doba dotlaku t_d představuje nutnou prodlevu mezi ukončením plnění dutiny a počátkem plastikace. Její trvání závisí hlavně na průřezu vtokového kanálu a zpravidla činí několik sekund až desítky sekund. Účelem je dodávání materiálu do formy a tím tedy kompenzování smrštění během chlazení, aby nevznikly propadliny a staženiny. Časově se překrývá s dobou chlazení a končí v okamžiku zatuhnutí vtoku. U strojů s optimalizací procesu lze průběh dotlaku optimalizovat. V první fázi je dotlak vyšší, aby se využilo vysoké tekutosti taveniny a ke konci se dotlak sníží, aby se omezila orientace v okolí vtoku. Po skončení dotlaku se hodnota tlaku sníží na hodnotu zpětného tlaku, při které probíhá plastikace.

Doba plastikace t_{pl} je čas, který je potřebný k tomu, aby došlo k zplastikování dávky plastu a k jejímu rovnoměrnému zhomogenizování a umístění dávky před čelo šneku, tzv. polštáře.

Velikost zplastikované dávky musí zabezpečit naplnění tvarové dutiny formy a vtokového systému, ale i kompenzovat změnu objemu, vyvolanou smrštěním. Teplo, potřebné k roztavení jedné dávky, je asi z jedné třetiny dodáváno z elektrického odporového topení a asi ze dvou třetin z tření hmoty při hnětení. Je nutné dodržovat teplotu taveniny, protože tato teplota ovlivňuje viskozitu plastu, velikost a průběh tlaku ve formě, dobu chlazení, aj. Při měření teploty taveniny se buď měří teplota stěny tavicí komory, což není zrovna ideální, a nebo se programově řídí protitlak (zpětný tlak). Je však nutné si uvědomit, že se posuvem šneku vzad snižuje účinná délka šneku a proto musí být zpětný tlak zvyšován. *obr. 2.18.*

Doba chlazení t_{ch} představuje největší část cyklu a pohybuje se od několika sekund u tenkostěnných výstřiků do několika málo minut. Závisí na určující tloušťce stěny výstřiku, na druhu plastu, teplotě taveniny, teplotě formy a na teplotě výstřiku v okamžiku vyjímání z formy. Je snaha ji zkrátit na minimum účinným chlazením formy, zejména těch míst, v nichž hmota chladne nejpomaleji. Chladnutí začíná již během fáze vstřikování a pokračuje během dotlaku a dochází ke značným změnám stavových veličin, tlaku, měrného objemu a teploty. Fáze chladnutí ovlivňuje nejenom strukturu, tj. orientaci, krystalizaci a vnitřní pnutí, ale také kvalitu povrchu, zejména lesk.

Teoreticky můžeme vstřikovací proces analyzovat při použití stavových termodynamických veličin, tj. tlaku p , měrného objemu v a teploty hmoty T . Průběh stavových veličin je v různých místech výstřiku odlišný a je ovlivněn tvarem výrobku, tloušťkou stěn, vstřikovacím tlakem a dotlakem, vstřikovací rychlostí, teplotou taveniny a teplotním polem formy. Změny stavových veličin potom přímo určují vznik struktury a ovlivňují hmotnost a rozměry výstřiku. Vzhledem k rychlým časovým změnám tlaku, teploty a měrného objemu zůstává většina oblastí ve stavu nerovnovážném a nelze se tomu vyhnout.

Můžeme se však snažit, aby tyto jevy byly v přijatelných mezích a aby byly co možná nejpřesněji reprodukovány v každém cyklu. Řízení vstřikovacího cyklu pomocí diagramu $p - v - T$ patří k moderním metodám zpracování termoplastů a je aplikován u současných strojů, řízených mikroprocesory.

Výhody injekčního vstřikování zahrnují krátký čas jednoho cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou (viz. obr. 2.20), ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Tato technologie umožňuje plnou automatizaci a je přístupná počítačovému řízení. Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů jsou vysoké investiční náklady, dlouhé doby nutné pro výrobu forem a potřeba používat strojní zařízení, které je neúměrně velké v porovnání s vyráběným dílem.



Obr. 2.20: Příklad vstřikovaného dílu (přední nárazník fa FORD)

2.3.2.2. Vstřikování plněných termoplastů

Termoplasty, plněné minerálními plnivý, mají díky netavitelnému podílu anorganického materiálu v plastickém stavu větší vnitřní tření taveniny, než-li neplněné plasty. Ke vstřikování jsou nezbytné teploty nejméně o 10 °C vyšší. Rovněž tlaky, teplota formy a rychlost vstřikování jsou doporučovány vyšší, neboť taveniny plněných termoplastů rychle tuhnou a nedoporučuje se vyrábět díly s tloušťkou menší než 2 mm.

V současné době se v automobilovém průmyslu začínají prosazovat plněné plasty s dlouhými vlákny, což výrazně zvyšuje tuhost vyráběných dílů a s tím spojené i ostatní výhody, které přináší delší vlákna. Granulát obsahuje 10 mm dlouhá vlákna a k uchování této délky se musí plastikace provádět velmi šetrně speciálně provedeným šnekem, který se otáčí oběma směry. Je zde nutné podotknout, že i přesto, že dojde k rozlámání vláken, tak i potom jsou tato vlákna až desetkrát delší, než-li plasty s krátkými minerálními plnivý.

Výrobky, vyrobené nejenom pro automobilový průmysl (viz. obr. 2.21), které byly získány touto technologií, mají zvýšenou tuhost, vysokou rázovou pevnost, rozměrovou stabilitu, dobrou konečnou úpravu povrchu a zvýšenou chemickou odolnost a tyto vlastnosti si podržuje i při extrémních teplotách.



Obr. 2.21: Přední díl automobilu VW POLO, vyztužený dlouhými vlákny

2.3.2.3. Vstřikování reaktoplastů

Kromě vstřikování termoplastů se mohou vstřikovat i reaktoplasty. V současné době se zpracovává asi 30 % reaktoplastů vstřikováním. Vstřikováním lze prakticky zpracovávat veškeré druhy reaktoplastů.

Oproti lisování reaktoplastů má vstřikování pryskyřic tyto výhody:

- ◆ předeřev hmoty, dávkování, plastikace a vstřikování se uskutečňuje v jedné jednotce,
- ◆ použití mnohem kratších vytvrzovacích časů,
- ◆ není zde technologický odpad,
- ◆ proces lze automatizovat.

Hlavní rozdíl mezi zpracováním termoplastů a reaktoplastů spočívá jednak v rozdílné závislosti viskozity na teplotě a jednak, že místo doby chlazení je zde doba vytvrzování.

Forma se nechladí, ale je vyhřívána na vytvrzovací teplotu (dle druhu reaktoplastu na 150 °C až 190 °C) a doba cyklu je v podstatě dána dobou vytvrzování, kdy hmoty s lepší tekutostí potřebují delší vytvrzovací časy. Kromě těchto rozdílů se liší hlavně šnek, který má potlačenu kompresní část, aby nedošlo k přílišnému smykovému namáhání a tím k předčasnému vytvrzení a stroje musí vyvinout vyšší krouticí momenty a vyšší vstřikovací časy. Ostatní činnosti jsou obdobné, jako u vstřikování termoplastů.

2.3.2.4. Vstřikování strukturních pěn

Výrobky ze strukturních pěn mají kompaktní povrchovou vrstvu a napěněné jádro. Plasty pro výrobu strukturních pěn jsou nadouvány přídavkem 0,7 až 3 % chemického nadouvadla nebo fyzikálně přídavkem uhlovodíků a výrobky jsou ve fázi plnění dutiny formy asi o 10 % vypěněny. Objemem přidaného nadouvadla lze získat buď lehký nebo těžký výstřik. Byla vyvinuta výplň polštářů sedadel s rozdílnou tvrdostí pěny, která se nyní těší širokému použití. Kromě toho se vylepšila tato technologie tak, že dle nového způsobu se při použití vhodné konstrukce formy vstřikuje tvrdá pěna do měkké pěny, čímž se dosáhne různého složení na místech, kde je to potřeba. Polštáře sedadel automobilů (viz. obr. 2.22) se dají vyrobit s měkkou střední částí a s pevnějším zesílením okrajů. Tento postup vedle toho, že poskytuje vylepšenou opěru, rovněž umožňuje produktivnější a zjednodušenou konstrukci rámu sedadla.



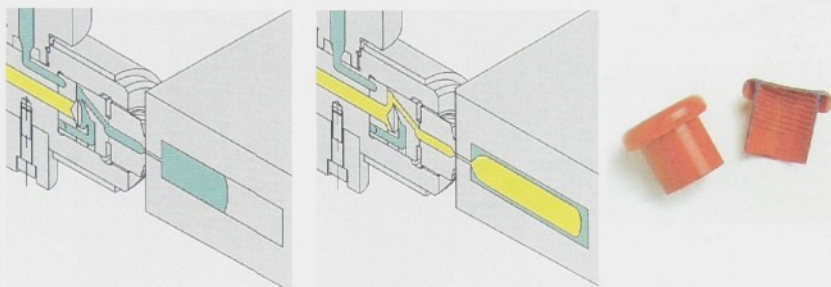
Obr. 2.22: Příklad aplikace strukturních pěn v sedačkách automobilu (Škoda Fabia)

Strukturní pěny lze zpracovávat na běžných vstřikovacích strojích s dostatečnou vstřikovací rychlostí. Oproti vstřikování termoplastů jsou v tomto případě chladicí časy mnohem delší v důsledku špatného přenosu tepla pěnou.

2.3.2.5. Vstřikování sendvičů

Při vstřikování sendvičů se využívá laminárního proudění taveniny v dutině formy (technologie laminárního toku). Do formy je nejdříve vstříknuta hmota, která tvoří povrchovou vrstvu výstřiku a vzápětí je vstříknuta hmota, tvořící jádro výrobku (viz. obr. 2.23).

Sendvičové vstřikování je velmi úspornou technologií a stále více se dostává do pozornosti výrobců dílů, protože pro jádro výrobku je možné použít levný plast a nebo recyklát a pouze na povrch výrobku kvalitní materiál a i přesto lze dosáhnout přijatelných konstrukčních vlastností. Příklad použití technologie je na obr. 2.23.



Obr. 2.23: Princip výroby sendvičů včetně příkladu použití technologie / 52/

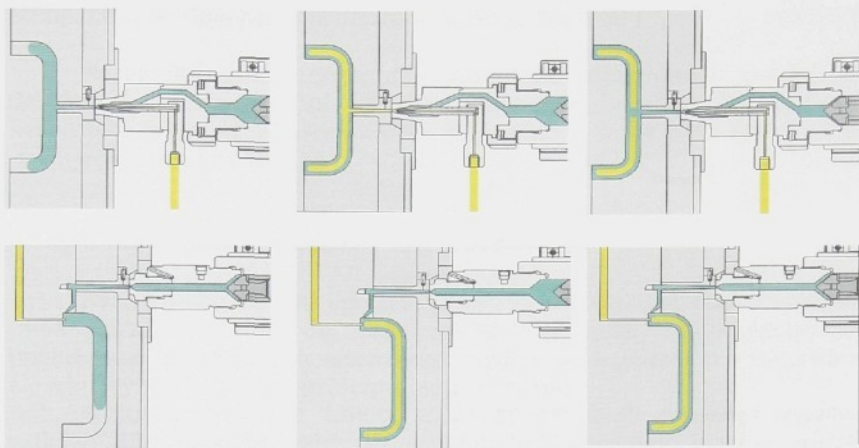
2.3.2.6. GIT - vstřikování s plynem

Jedná se o ekvivalent vstřikování termoplastů, kdy se do určitých míst výstřiku (expanzi vnitřního jádra nebo pro vytvoření dutiny) přivádí plyn, většinou dusík, čímž se vytvoří výlisek o zdánlivě velkém průřezu, přičemž odpadne nutnost chladit velké množství roztavené plastické hmoty. Výhodou GIT (*gas injection technology*) je snížení uzavíracích sil, snížení smrštění, délky cyklu, hmotnosti výrobku, nízká deformace ploch výrobků a zachování požadovaných mechanických vlastností. Princip vstřikování s plynem je ukázán na obr. 2.24 a příklad použití je na obr. 2.25.

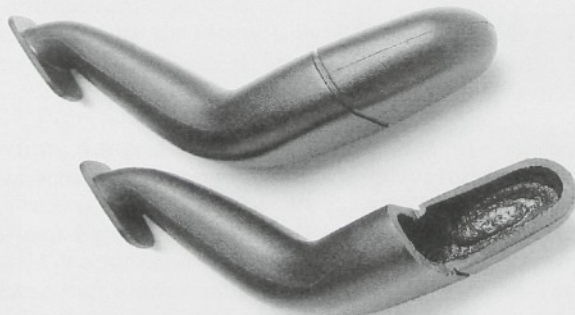
S tímto zařízením (viz. obr. 2.24) je možné udržovat vysoké tlaky plynu po dlouhou dobu, kdy tlak plynu přebírá funkci dotlaku a jednak zamezuje u tlustých stěn vzniku propadlin. Je však velmi důležité kontrolovat směr pohybu plynu, ale i jeho rozdělení. Z počátku se plyn dodává pod nižším tlakem, aby nedošlo ke vzniku povrchových vad a po naplnění formy taveninou se tlak zvýší, aby došlo ke konečnému vytvarování výrobku. Při vstřikování je nejprve vstříknut plast a potom teprve plyn. Současné vstřikování plastu a plynu není možné, protože by se plyn dostal na povrch výrobku. U tlustostěnných výstřiků dochází při použití plynu k redukci hmotnosti až o 50 % a ke zkrácení doby cyklu (doby chlazení) také až o 50 %.

Tento postup vstřikování se např. používá pro rámy sedadel, palubní desky, příruční schránky a ostatní části s proměnnými průřezy. Příkladem jsou přední a zadní nárazníky z PP v automobilech *Mazda*, vyrobené pomocí technologie vstřikování s plynem (*CINPRES*), která byla vyvinuta firmou *Mitsubishi Gas Chemical*. Je zde použita

technika tzv. *full-shot*, při které se plyn vstříkává do dutiny formy až po té, co polymer úplně vyplní tvarovou dutinu.



Obr. 2.24: Princip vstřikování s plynem (rozdílný princip přívodu plynu: tryskou – nahoře, formou – dole) / 52/



Obr. 2.25: Ukázka použití metody GID v automobilovém průmyslu (fa VW)

Pokud srovnáme klasické vstřikování nárazníků a technologii GID, tak vstřikování s plynem má několik výhod, mezi které patří:

- větší strukturní pevnost a tuhost vlivem vytvoření dutin do nebezpečných průřezů,
- vytvoření tlusté stěny se dá dosáhnout pomocí mnohem nižšího tlaku,

- ♦ vytvořené dutiny snižují stupeň smrštění v žebrech a v částech s větší tloušťkou,

- ♦ mohou být vyrobeny nárazníky s celkově menší tloušťkou stěny, čímž se dosáhne úspory hmotnosti a materiálu.

Nárazníky zhotovené touto technologií se snadněji montují a demontují, jejich výrobní náklady jsou nižší, dochází ke snížení hmotnosti (až o 37 % u předního nárazníku a o 24 % u zadního) a snižuje se potřebný tlak až o 74 %.

2.3.2.7. RIM - reaktivní vstřikování

Reakční vstřikování spočívá ve vstřiknutí kapalné reakční směsi (monomerní stádium) do uzavřené dutiny formy, kde proběhne polymerace materiálu (exotermická reakce a expanze s vytvrzením složek). Výhodou tohoto principu jsou zejména:

- ♦ nízká viskozita hmoty a z toho plynoucí možnost výroby velkých dílů nízkými tlaky při nízkých investicích do výroby (nízká cena forem),

- ♦ díly bez vnitřního pnutí, dodatečných deformací a propadlin i pro rozdílné tloušťky stěny,

- ♦ vlastnosti materiálu (mechanické vlastnosti, tečení, vytvrzovací doba) lze ovlivnit dle požadavků výroby,

- ♦ vstřik hmoty v monomerním stavu, čímž nedochází k deformaci polymerních řetězců a tedy k deformacím výrobků a k velkým smrštěním,

- ♦ vstřik hmoty do formy o vyšší teplotě, než-li je teplota hmoty, v důsledku čehož nedochází ke zvyšování viskozity hmoty během procesu.

Hlavním materiálem, který se používá pro reakční vstřikování (*reaction injection moulding* - RIM), je polyuretan (PUR), ale např. i polyamid nebo různé směsi PUR, protože jejich vysokoteplotní vlastnosti jsou lepší, než vlastnosti samotného PUR. PA byl používán i v minulosti a v současné době byly vyvinuty nové postupy zpracování PA. Rovněž se dají komercializovat nová složení na bázi epoxidů.

V technologii reakčního vstřikování jsou hmoty připravovány odděleně a k jejich smíchání dojde před vstřikováním do vyhřáté formy. Tlak vstřikování je velice malý (okolo 0,35 MPa), takže uzavírací síly jsou mnohem menší a formy jsou obvykle mnohem lehčí a levnější, než formy pro „klasické“ vstřikování. Polymer je buď vytvrzen ve formě a nebo je částečně vytvrzován ve formě a následně dovytvřzování proběhne na odděleném netlakovém upínacím přípravku, zatímco pokračuje nový další cyklus. Typický cyklus je 50 % pro vytvrzování ve formě a 50 % pro vytvrzování na vzduchu.

Kromě technologie RIM se používá i technologie reakčního vstřikování s vyztužením (RRIM), která se liší v tom, že jsou před vstřikováním na jedné straně přívodu monomeru přidávány do hmoty

tuhé vyztužující částice (skleněná vlákna, minerální plnidla, aj.), aby se zlepšila pevnost a tuhost, zmenšilo se poměrné prodloužení a nebo, aby se vylepšila tepelná odolnost. RRIM na bázi PUR je jeden z nejdůležitějších postupů používaných pro výrobu panelů karosérie, nárazníků, aj. z plastických hmot.

Polyuretan v technologii RRIM se dále ve stále větší míře používá pro přední blatníky, prodloužené panely a zadní boční panely karosérie. Tento postup je pro tyto aplikace velmi vhodný, zejména pro přední blatníky, v důsledku velmi dobré konečné úpravy povrchu, dobré rázové odolnosti a rozměrové stability. Pro výrobu předních blatníků a zadních bočních panelů karosérie sportovního vozidla *BMW Z1* byla použita moderní směs PC/PBT. Technologie RRIM může být v budoucnosti v mnohem větší míře používána pro panely dveří, kde je potřeba zabudovat postranní protinárazové tyče. Tato potřeba způsobila, že konstrukce dveří je čím dál tím více složitější a technologie RRIM poskytuje více svobody při navrhování a konstrukci dílu.

Dalším zlepšením technologie RIM je strukturní reakční vstřikování (SRIM), kde je jako výztuhy použita obalová látka nebo preforma vložená do formy. Tento postup byl použit pro výrobu nosníku nárazníku již v roce 1993 (viz. obr. 2.26), kdy se snížil počet 27 kovových dílů na pouhé dva díly, zhotovené technologií SRIM.



Obr. 2.26: Nosník nárazníku vyrobený technologií RIM (fa BMW)

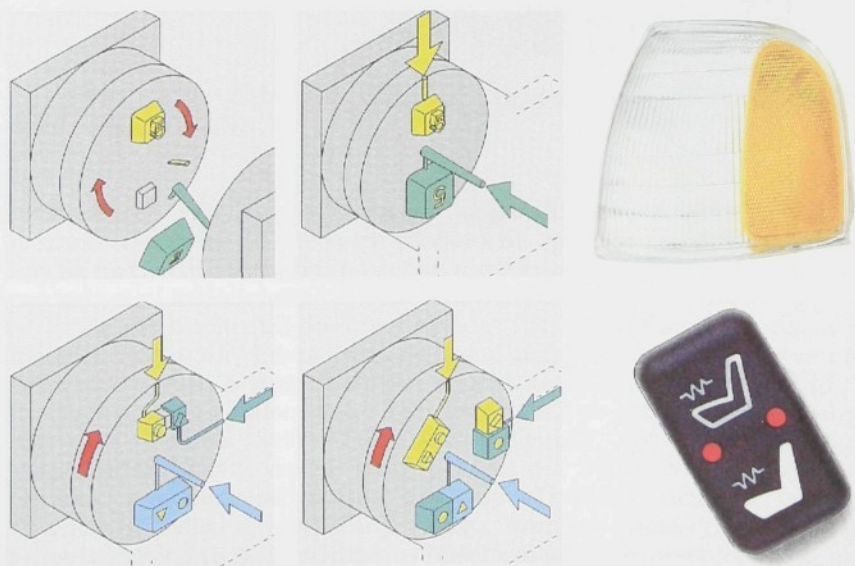
RIM (reakční vstřikování do formy) a jeho varianty se v široké míře používají pro přístrojové desky, blatníky, kapoty motorů, panely dveří, víka zavazadlových prostorů, zadní páté dveře a mnoho dalších dílů. Zařízení je levnější než v případě vstřikování, protože se pracuje s nižšími tlaky. Náklady na nástroje jsou nižší, protože se dají použít levné, snadno tvarovatelné materiály, což tyto postupy činí přitažlivé pro výrobu dílů v malých sériích. U všech výše popsaných technologických postupů je výhodou dobrá kvalita povrchu, ale náklady na pracovní síly jsou větší. Avšak nevýhodou těchto technologických postupů jsou někdy poměrně dlouhé doby cyklů a

obtíže při dosažení kvalitního povrchu po aplikaci laků. Používání těchto metod se bude pravděpodobně zvyšovat, protože nabízejí jak nízké cenové náklady, tak i vysokou kvalitu.

2.3.2.8. Vícekomponentní vstřikování

Technologie vícekomponentního vstřikování se liší od vstřikování tím, že k jedné uzavírací jednotce jsou přiřazeny dvě (dvoukomponentní vstřikování) nebo tři (tříkomponentní) vstřikovací jednotky. Vstřikovací jednotky mají samostatné ovládání nejenom vytápění, ale i dávkování a technologických parametrů. Na pohyblivé části vstřikovacího stroje jsou potom umístěny pohyblivé části vstřikovací formy, které se natáčí k jednotlivým vstřikovacím jednotkám. Po vstříknutí prvního (menšího) výstřiku se forma otevře, je vyhozen vtok a následuje pootočení formy spolu s výstřikem k další vstřikovací jednotce. Tam je výstřik znovu uzavřen do nepohyblivé části formy a je dostříknut do konečného tvaru (viz. obr. 2.27 nahoře). U tříkomponentního vstřikování se výstřik natáčí buď o 120° nebo o 180° (viz. obr. 2.27 dole).

Touto technologií se vyrábějí např. přední a koncová světla, ovládací prvky na palubní desce a v okolí volantu, vícebarevné aplikace, apod.



Obr. 2.27: Princip dvoukomponentního a tříkomponentního vstřikování (dole) s ukázkou vybraných aplikací / 52/

2.3.2.9. Hybridní technologie na bázi vstřikování

Principem hybridních technologií je ta skutečnost, že tavenina plastu je nastříknuta na jiný materiál (kov, textilie, aj.) a dojde ke spojení těchto dvou materiálů a ke vzniku jednoho výrobku s lepšími vlastnostmi. Zároveň dojde k úspoře hmotnosti materiálu, k zlepšení korozní odolnosti apod.

Příkladem je postup vyvinutý firmou BAYER, kdy se na předem natvarovaný a děrovaný plech nastříkne tavenina plastu, která proniká otvory a dojde k vytvoření vysoce zatížitelného spojení mezi oběma komponenty, plastem a plechem (viz. obr. 2.28).



Obr. 2.28: Čelní díl karosérie automobilu, vyrobený hybridní technologií (fa AUDI)

Velkou výhodou je možnost použití hlubokotažných plechů a možnost vytvoření dodatečných modulů na výrobku pro další montáž, kdy se na plechu vytvoří a následně zastříknou plastem např. pouzdra pro uchycení ložisek motoru, uchycení světlometů a klimatizace, atd.

Kromě plechu lze do formy vkládat i textilie a tkaniny z různých materiálů. Protože vlákna jsou do formy umístěna předem, tak se dá velice dobře řídit orientace vláken a jejich hustota ve výsledném dílu. Procentový obsah vláken musí být vysoký, aby se zabránilo tomu, aby polymer odplavil vyztužující vlákna mimo původní umístění. Vstříknutím plastu změní svou polohu asi 30 % vláken. Výroba probíhá v současnosti dvěma způsoby. Prvním z nich je použití rozsekaných vláken v kapalném pojivu, které se nanášejí na povrch formy a následně se zastříknou plastem a nebo se plast vstříkne na souvislou tkaninu. Prvním technologickým postupem se dají dosáhnout složitější tvary, avšak je zde menší možnost řízení orientace vláken a tento postup je velice pracný, zatímco druhý postup je mnohem lépe automatizovatelný, ale může vést k nepříjemným změnám hustoty v různých místech vyráběného dílu.

Hybridní technologie přitahují pozornost výrobců, protože se dá použít pro výrobu velmi velkých dílů, jako jsou například vložky zavazadlového prostoru, kde jeden velký výlisek nahrazuje montáž velkého počtu kovových součástí.

2.3.3. Lisování plastů

Pro zpracování plastů se kromě technologie vstřikování používají i jiné postupy, kterými lze vyrobit plastové díly. Nejsou tak rozšířené, jako vstřikování, ale svůj podíl na celkovém objemu vyrobených dílů mají. Jedním z nich je i technologie lisování, která patří k nejstarším technologiím zpracování plastů.

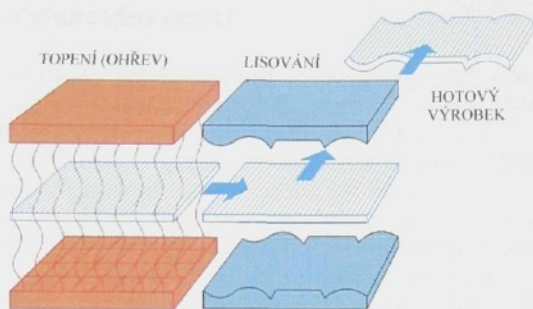
Výhody lisování oproti vstřikování lze shrnout do těchto bodů:

- vnitřní pnutí ve výliscích je minimální,
- nedochází k lámání vláken při zpracování,
- lze vyrábět tenkostěnné výlisky bez nebezpečí deformací,
- levnější formy a stroje.

Cyklus lisování je obdobný jako u vstřikování pouze s tím rozdílem, že při lisování reaktoplastů musí dojít k vytvrzení a tedy doba chlazení je nahrazena dobou vytvrzování, která výrazně ovlivňuje celkový cyklus výroby. Platí asi tato experimentální závislost, že na každý milimetr tloušťky stěny výlisku je podle teploty zpracování a podle použité hmoty potřeba 15 až 60 s. Dalšími rozdíly jsou, že hmota se dávákuje do formy o větším objemu, než-li je objem dutiny formy a tato přebytná hmota je na výrobku ve formě přetoku a po skončení cyklu musí dojít k očištění nástroje. Důležitým parametrem je však teplota formy, která musí být pro obě poloviny nástroje stejná.

Hlavní oblastí použití technologie lisování je výroba dílů plněných vyztužujícími plnivy, a to buď plošných výlisků (SMC) nebo objemových výlisků (BMC) – viz. kap. 2.2.7. Výhodou je vysoká produktivita práce, nevýhodou je vyšší cena oproti klasickému lisování a také poměrně velký odpad.

Materiály SMC se dodávají jako pásové role materiálů, kde je každá vrstva (jedna vrstva krátkých minerálních vláken je mezi dvěma vrstvami pryskyřice) udržována odděleně od sousedních vrstev tak, že je mezi tyto vrstvy vložena oddělovací fólie, obvykle z PE. Materiál SMC nebo BMC (polotovary) je potom vložen do nástroje na vysokotlakém lisu, horká forma se následně uzavře a aplikuje se dostatečný tlak a teplota na to, aby došlo k toku plastu do zbylé části formy a aby došlo k takovému stupni vytvrzení, aby měl výlisek dostatečnou pevnost na to, aby se s ním dalo manipulovat po otevření formy (viz. obr. 2.29). Tímto způsobem se např. vyrábějí kapoty motoru při stejnoměrné tloušťce kapoty 2 - 3 mm pomocí nástrojů, které mohou mít délku až 2,4 m.



Obr. 2.29: Princip lisování z polotovarů SMC (resp. BMC) / 23/

Doba jednoho výrobního cyklu v současnosti poklesla na hodnotu 60 – 90 s, což odpovídá rychlosti linky pro montáž automobilů. Lisy pro výrobu automobilových dílů mají obvykle lisovací tlak 2 0000 kg, zatímco větší lisy se používají pro výrobu kapot motorů nebo pro jiné velké díly. Pokud jsou díly pro automobilový průmysl ještě ve formě pokryty povrchovou vrstvou pro vylepšení konečného povrchu, tak potom se provede zpětný chod formy o 0,4 – 0,8 mm a do formy se vstříkne polymer, který zajistí vzhledovou stranu výrobku. Forma se potom opět uzavře a tenká povrchová vrstva se nechá vytvrdit. Druhou možností je, že se polymer s malou viskozitou do formy vstříkne pomocí vyššího tlaku, než je tlak lisování, aniž dojde k otevření nástroje.

Hlavní použití technologie lisování je pro vnější panely karosérie, kapoty motoru, nárazníky, přední strany vozidel (viz. obr. 2.30), podlahy nákladového prostoru, podlahy zavazadlového prostoru, kryty rezervních kol, kryty ventilů a opěradla sedadel. Tak např. *Peugeot 405* má nyní přední část vozidla z materiálu vyztuženého skleněnými vlákny, která nahradila dřívější montáž složenou z několika dílů. Přední část vozu váží pouze 7 kg a slouží k podpoře dílů, které váží 20 až 35 kg.

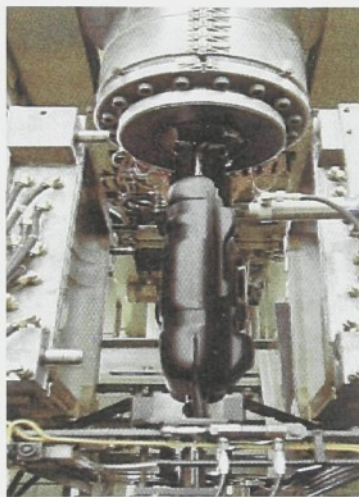


Obr. 2.30: Příklad lisovaného dílu – přední masky vozu (RENAULT)

2.3.4. Vyfukování plastů

Vyfukování je technologický postup výroby dutých předmětů rotačních, ale i nepravidelných tvarů. Mezi hlavní aplikace v automobilovém průmyslu patří palivové nádrže, láhve a nádrže pro rozličné kapaliny, apod. Vyfukování plastů se podle druhu výroby dělí na vytlačovací vyfukování a vstřikovací vyfukování.

Vytlačovací vyfukování se v současné době používá pro více jak 90 % vyrobených dutých těles z plastů a nejčastěji se touto technologií zpracovávají polyolefiny (PE, PP), které zaujímají skoro 80 % spotřebovaného materiálu k výrobě dutých těles. Princip výroby spočívá ve vytlačení trubky (tzv. parizonu) z vytlačovacího stroje, která je stále ještě v plastickém stavu uzavřena do vyfukovací formy a tlakem vzduchu vyfouknuta do požadovaného tvaru. Po ochlazení je výrobek vyjmut (viz. obr. 2.31), začištěn a tlakově zkoušen. Vzduch je do vyfukovací formy přiváděn buď horem nebo spodem, příp. bokem. Přivádí se buď trnem nebo jehlou.



Obr. 2.31: Pohled do vyfukovací formy pro výrobu palivové nádrže

Nejdelší částí vyfukování je chlazení výrobku po vyfouknutí a doba chlazení určuje výkonnost celého zařízení. Zkrácení doby chlazení vyžaduje především účinné chlazení formy a k tomu i rychlé a efektivní vnitřní chlazení. Současně používané chlazení vzduchem, popř. vodní mlhou nepřináší očekávané zkrácení doby cyklu, tak se přistupuje k nastříkávání kapalného dusíku nebo oxidu uhličitého, které zkracuje chladicí dobu skoro o 30 %.

V současnosti se na nádrže automobilů kladou stále větší požadavky (lesk, odolnost proti nárazu, pevnost, malou propustnost pro plyny a páry, tvarovou stálost, atd.), kterým nemůže vyhovovat

jeden polymer a proto se vyrábějí kompozitní (vícevrstvé) výrobky, které jsou složeny ze dvou (PE/PP, PE/PA, ...) nebo tří materiálů (nosný materiál, spojovací materiál, bariérová vrstva), které splňují dané požadavky. Polymery jsou samostatně zpracovávány a teprve potom vstupují do společné vtačovací hlavy.

Nevýhodou vytlačovacího vyfukování je poměrně malá přesnost výrobků, poměrně velký odpad, svar v místech uzavření parizonu a poměrně velké množství dodatečných operací. Tak např. při výrobě palivové nádrže je odpad skoro 40 % hmotnosti parizonu a k vyfouknutému tělesu se ještě musí dodatečně po opracování přivařit hrdla a vypíchnout otvor pro palivoměr.

Vstřikovací vyfukování na rozdíl od vytlačovacího vyfukování je cenově náročnější, protože jsou potřeba dvě formy, vstřikovací a vyfukovací. Na druhé straně předlisek má mnohem vyšší přesnost tvarových částí a navíc lze vyrábět dutá tělesa s rovnoměrnou nebo proměnnou tloušťkou stěny. Výrobky mají lepší vzhled, tuhost, mnohem nižší propustnost a nemají svar. Nevýhodou je poměrná složitost a omezená velikost výrobku.

2.3.5. Tvarování plastů

Ve všech dříve uvedených operacích byl plast zpracováván v plastickém stavu. To znamená, že prášek či granule plastu byly převedeny do taveniny a tavenina byla tvářena (lisováním, vstřikováním, apod.) do konečné podoby výrobku. Při tvarování za tepla je postup zpracování odlišný. Plast ve formě polotovaru (folie, desky) je předeheřt na teplotu odpovídající kaučukovitému stavu, pak je vhodným způsobem tvarován a po dosažení definitivního tvaru je ochlazen.

V dnešní době se tvarováním zpracovávají desky do tloušťky 10 mm a folie od tloušťky 0,1 mm. Typická je výroba velkoplošných výlisků.

Tvarování za tepla se provádí různými způsoby. Zásadně rozeznáváme pozitivní tvarování a negativní tvarování. Častěji používané negativní tvarování umožňuje širší variabilitu procesu tvarování uplatněním vakua, tlakového vzduchu, předtvarování tvárníkem či stlačeným vzduchem atd. Při prostém tvarování se dosahuje stupně tvarování cca 40 % průměru formy, zatímco při použití předtvarování se dosahuje 100 až 250 %, v extrémních případech 400 až 500 %.

Při tvarování za tepla probíhají tyto operace: ohřev, tvarování, ochlazení a vyjmutí a začištění výlisku. Na ohřev jsou při tvarování kladeny poměrně velké požadavky. Musí umožnit rovnoměrné ohřátí desek co největší rychlostí, ale bez poškození desek nadměrným tepelným namáháním. Rychlost ohřevu je závislá na fyzikálních konstantách polymeru, jako je tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, teplota tání a při ohřevu infračerveným zářením i na jeho absorpčním spektru. Deska plastu je uchycena do upínacího rámu a

její ohřev probíhá v cirkulačních sušárnách nebo častěji keramickými zdroji infračerveného záření. Desky do tloušťky 2,5 mm jsou ohřívány jednostranně, zatímco tlustší desky jsou ohřívány oboustranně. Většina plastů vyžaduje při oboustranném ohřevu dobu cca 10 s na 1 mm tloušťky. Polypropylen vyžaduje čas o 50 % delší a vysokohustotní polyetylén o 100 % delší dobu ohřevu. Moderní tvarovací stroje mají vytápění plošně regulovatelné, čímž je umožněno různé předeheřtí jednotlivých míst desky, a tím i jejich různé protažení.

Nejdelší operací tvarovacího cyklu v dnešní době, kdy je používán předeheř s velkým příkonem, je chlazení. Dobrých výsledků lze dosáhnout při použití kovových forem s chladicími kanálky. Účinnost chlazení se dále zvětšuje ofukováním povrchu výlisku stlačeným vzduchem (o 20 %), popř. vodní mlhou (o 70 %).

Výrobky získané tvarováním za tepla je nutno vyjmout z formy a zbavit je okrajů, za které byly upnuty v upínacím rámu. Děje se tak většinou okružními nebo pásovými pilami, padacími nůžkami, popř. při velkosériové výrobě i tvarovými vysekávacími noži. Nože bývají ohřívány, čímž se vysekávání usnadňuje.

Aplikace tepelného tváření zahrnují panely vnitřního obložení, přístrojové desky, kryty protinárazových podložek a přístrojové panely.

Výhody technologie tvarování zahrnují nízké náklady na nástroje a ekonomickou malovýrobu, zatímco nevýhody zahrnují dlouhé doby cyklu a špatnou rozměrovou přesnost. Při porovnání s technologií vstřikování lze uvést tyto závěry:

- tvarování umožňuje oproti vstřikování (omezení přidržovací silou) vyrobit výrobky až o ploše 15 m²,
- vstřikované výrobky jsou omezeny tloušťkou stěny,
- tvarování neumožňuje vyrábět díly s rozdílnou tloušťkou stěny,
- cena polotovaru je u technologie tvarování až dvakrát větší, než-li u technologie vstřikování a další nevýhodou je také poměrně velký odpad (až 50 %).

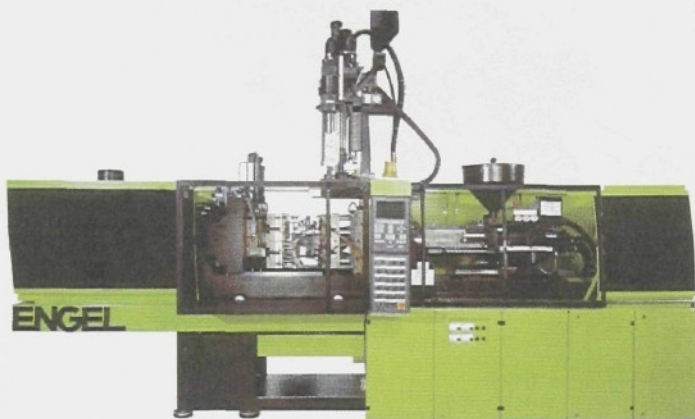
Kromě výše popsaných technologií existují i další, které se podílejí na výrobě automobilových dílů, ale není účelem této práce popsat všechny používané technologie. Patří sem vstřikování kaučuků a elastomerů, válcování, vytlačování, pultruse, rotační natavování, aj.

2.4. STROJE PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ

Princip stroje pro zpracování plastů byl objeven již v roce 1872 a od té doby prošly stroje prudkým vývojem a v současné době jsou schopny přesně, rychle a spolehlivě vyrábět nejenom malé, ale i velkoplošné výrobky a díly jednoduchých i složitých tvarů s pomocí rozdílných technologií. Řízení strojů pro zpracování plastů je pomocí mikroprocesorů. Nejrozšířenější jsou vstřikovací stroje, kterým bude také v této kapitole věnována největší pozornost.

2.4.1. Vstřikovací stroje

Vstřikovací stroj se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a z řízení a regulace. Mezi základní parametry vstřikovacího stroje patří jeho rozměry (délka l – šířka b – výška h) /mm/ a energetická náročnost (příkon topení /kW/ a příkon hydrogenerátoru /kW/). V dnešní době je na světě cca 400 výrobců, kteří vyrábějí ročně téměř 40 000 tisíc vstřikovacích strojů. Ukázka vstřikovacího stroje současné produkce je na obr. 2.32.



Obr. 2.32: Vstřikovací stroj ENGEL ES 330H/200V/125 HL-2F s robotem pro odběr výrobků včetně vtokových zbytků / 52/

Každý výrobce vstřikovacích strojů je schopen vybavit vstřikovací stroj tak, aby plnil funkci částečně nebo plně automatizovaného pracoviště, tj. dovybavit stroj manipulátory, roboty, temperačním zařízením, dávkovacím a mísícím zařízením, sušárnami, dopravníky pro výrobky a vtokové zbytky, recyklačním zařízením, atd.

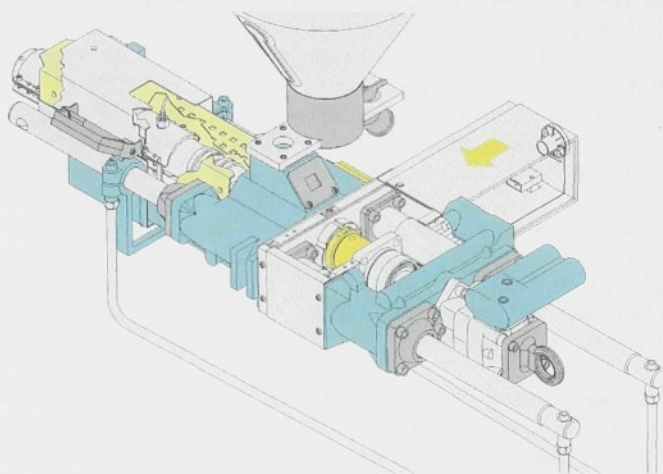
2.4.1.1. Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka (viz. obr. 2.33) plní dva hlavní úkoly:

- ♦ přeměňuje granulát plastu na homogenní taveninu o dané viskozitě,
- ♦ vstřikuje taveninu plastu velkou rychlostí a velkým tlakem do dutiny uzavřené formy.

První vstřikovací jednotky, které byly použity pro vstřikování plastů již na konci minulého století, byly jednotky *pístové*. Jejich princip byl převzat z lití roztavených kovů pod tlakem. Udržely se až do

poloviny 20. století, kdy byly postupně zcela vytlačeny jednotkami šnekovými. Dnes se používají jen výjimečně.



Obr. 2.33: Schéma vstřikovací jednotky (stroj ARBURG) / 52/

Rozdíl obou typů strojů je dán konstrukcí tavicí komory. Jejím úkolem je převést do plastického stavu v co nejkratší době co největší množství hmoty a zajistit maximální teplotní homogenitu taveniny. Pohyb plastu v komoře je u pístových strojů zajišťován pístem, u šnekových šnekem. Protože význam pístových vstřikovacích jednotek je v současnosti zanedbatelný, bude se další text týkat hlavně vstřikovacích jednotek se šnekem.

Konstrukcí šnekových vstřikovacích strojů byly s úspěchem vyřešeny všechny hlavní nedostatky pístových strojů. Mezi největší přednosti patří:

- spolehlivá plastikace a následující dobrá homogenizace roztaveného plastu,
- zabráňují přehřívání materiálu v tavicí komoře,
- vysoký plastikační výkon i velký zdvihový objem, takže velikost výstřiku lze teoreticky libovolně zvyšovat,
- odpadají potíže při čištění komory při výměně materiálu,
- zaručené přesné dávkování hmoty,
- nízké ztráty tlaku během pohybu hmoty v pohodě,
- je možno aktivněji zasahovat do vstřikovacího procesu, např. řízením dotlaku.

Činnost šnekového stroje je následující: Při plastikaci se šnek otáčí a v hrdle násypky nabírá granulovaný plast, který stlačuje a dopravuje jej do vytápěných částí tavicí komory, kde materiál taje a

jako tavenina se hromadí před čelem šneku. Aby bylo pro taveninu před čelem šneku dost prostoru, šnek během otáčení ustupuje dozadu. Objem takto vzniklého zásobního prostoru lze nastavovat podle velikosti výstřiku až k určitému maximu daného velikostí stroje. Po zplastikování potřebného množství plastu se otáčivý pohyb šneku zastaví a šnek se bez otáčení pohybuje dopředu jako píst a vstřikuje taveninu do dutiny formy. Jelikož plastikace nové dávky plastu může probíhat ještě ve fázi chlazení výstřiku ve formě, je výrobní cyklus kratší oproti pístovým strojům. K dalším přednostem patří jednoduché dávkování, možnost hmotu dodatečně barvit a plnit plnivem nebo přidávat další přísady až při zpracování.

Vstřikovací jednotka se šnekovou plastikací je charakterizována těmito parametry: průměrem D /mm/ a délkou L /mm/ šneku, vstřikovací kapacitou Q_v /cm³/, plastikační kapacitou Q_p /kg.hod⁻¹/, max. vstřikovacím tlakem $p_{vstř}$ /MPa/, objemovou vstřikovací rychlostí v /cm³.s⁻¹/ a tím, zda je stroj vybaven universálním a nebo speciálním šnekem.

Vstřikovací jednotka stroje je charakterizována vstřikovací kapacitou a plastikační kapacitou. *Vstřikovací kapacita* Q_v nazývaná také maximální zdvihový výkon představuje maximální objem taveniny v mililitrech /cm³/, kterou lze na daném stroji vystříknout z tavicí komory do volného prostoru při jednom pracovním zdvihu šneku nebo pístu. Je to vlastně objem zásobního prostoru v komoře po odsunutí šneku do jeho zadní krajní polohy. To je ovšem kapacita teoretická. Skutečně využitelná musí být menší s ohledem na určitou rezervu, která se nechává 10 až 30 %. Nejmenší vstřikovací stroje mají vstřikovací kapacitu jen asi 10 cm³, velké např. 7700 cm³ a absolutně největší asi 35000 cm³.

Podle vstřikovací kapacity se vstřikovací stroje dělí na:

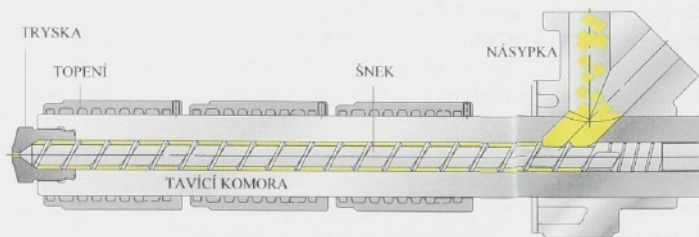
- ◆ malogramážní pro výrobky s objemem do 300 cm³,
- ◆ středogramážní pro výrobky s objemem od 300 do 1000 cm³,
- ◆ velkogramážní pro výrobky nad 1000 cm³.

Pozn.: V praxi se často vstřikovací kapacita udává v gramech, při čemž se pro jednoduchost předpokládá, že 1 cm³ hmoty odpovídá jednomu gramu (vztaženo pro polystyrén).

Plastikační kapacita stroje Q_p /kg.hod⁻¹/ udává maximální množství taveniny v kilogramech, kterou je stroj schopen za jednu hodinu přivést do plastického stavu. Představuje to množství hmoty, které bylo zahřáté na teplotu vstřikování a bylo u ní dosaženo požadované teplotní homogenity. Tento údaj se také označuje jako tavicí výkon stroje. Ten je maximální v případě, že se šnek otáčí nepřetržitě celou hodinu. Ve skutečnosti je však šnek v činnosti během vstřikovacího cyklu jen po určitou dobu a dosažený výkon je úměrný době jeho činnosti.

Nejdůležitější částí vstřikovací jednotky je *tavicí komora* (viz. obr. 2.34) včetně dalšího příslušenství. Jejím úkolem je zajistit pokud možno přesné dávkování granulátu, jeho plastikaci, vstříknutí roztavené hmoty do dutiny formy včetně zajištění optimálního dotlaku

a dále zajistit veškeré mechanické pohyby související s těmito činnostmi. Jedná se o rotační i axiální pohyb šneku a přisunutí a odsunutí tavicí komory k formě a od ní. Posuv šneku i celé jednotky se provádí pomocí hydraulického systému stroje (viz. obr. 2.37). Výška vstřikovacího tlaku, tj. tlaku na čele šneku, který se označuje jako vnější vstřikovací tlak, a dopředná rychlost posuvu šneku při vstřikování se regulují množstvím a tlakem přiváděné hydraulické kapaliny.



Obr. 2.34: Řez vstřikovací jednotkou (kompresní poměr 1) / 52/

Další hlavní částí je vstřikovací jednotky je šnek (viz. obr. 2.34). Šnek při otáčení odebírá z hrdla násypky granulovaný materiál, dopravuje jej do vytápěných částí komory, kde plast taje a dále je hněten a homogenizován. Šnek se může nejen otáčet kolem své osy, ale může se i podélně v komoře posunovat. K tomuto axiálnímu pohybu dochází jednak při plastikaci, kdy šnek během otáčení současně ustupuje dozadu směrem od trysky a jednak při vstřikování taveniny do formy. Těmito činnostem, tj. dávkování a dopravě materiálu, jeho plastikaci, hnětení a vstřiknutí do formy je přizpůsobena konstrukce šneku. Granulát padá samospádem z násypky do komory a plní drážku šneku správně nazývanou šnekový profil, kterou postupuje směrem k trysce. Aby však byla hmota šnekem dopravována, musí na ni boční stěny závitu působit větší silou, než-li je odpor vzniklý jejím třením v drážce. To je splněno tehdy, je-li povrch šneku či přesněji povrch šnekového profilu zcela hladký, aby tření bylo co nejmenší. Stěna válcové dutiny v pracovním válci má být však drsnější, protože mezi ní a materiálem je pro zajištění jeho postupného pohybu v drážce naopak určité tření nutné.

Vývojem vstřikování se dospělo od *obyčejného* šneku k *diferenciálnímu* šneku, pro který je typický *kompresní poměr*. Je definován jako poměr objemu šnekového profilu pro jedno stoupání závitu pod násypkou k objemu profilu v části šneku před tryskou. Kompresní poměr bývá v mezích od 1,5 do 4,5. Zjednodušeně lze také říci, že kompresní poměr je dán poměrem hloubek šnekového profilu pod násypkou, to je v jeho vstupním pásmu, a hloubky šnekového profilu na konci šneku, tedy ve výstupním pásmu. Kompresního

poměru lze dosáhnout buď změnou úhlu stoupání závitu, což se však vzhledem k obtížnější výrobě používá málo, nebo změnou průměru jádra šneku, tedy změnou hloubky drážky, zatímco úhel stoupání je konstantní.

Na šneku je možno rozlišit tři funkční pásma. Pod násypkou je šnekový kanál (nazývaný také drážka šneku) nejhlubší a průměr jádra šneku nejmenší. Hloubka je konstantní. Toto pásmo se nazývá vstupní nebo také dopravní, někdy i dávkovací. Zpracovávaný materiál je v něm hlavně stlačován, čímž se vytěsňuje vzduch z prostoru mezi granulemi, a ohříván a teprve na konci této části může začít i tát. Ve druhém, prostředním pásmu, se průměr jádra šneku směrem k trysce zvětšuje a hloubka šnekového kanálu se zmenšuje. Důsledkem toho dochází ke značnému stlačování materiálu, a proto se této části říká pásmo kompresní nebo přechodové. V ní dochází k nejintenzivnějšímu tání granulátu. Vzniklá tavenina je však zatím teplotně nehomogenní. Homogenizace je úkolem posledního pásma šneku u trysky. Toto pásmo se proto jmenuje hnětací neboli homogenizační anebo výstupní. Hloubka šnekového kanálu je po celé délce výstupního pásma opět konstantní, ale je menší než-li ve vstupním pásmu. Šneky, ať už obvyčejné nebo diferenciální, mohou existovat v různém provedení. Nejpoužívanější jsou šneky s normálně dlouhým kompresním pásmem, protože se hodí pro většinu termoplastů. Jeho délka bývá 3 až 4 D . Šneky s krátkou kompresní částí, rovnající se jednonásobku průměru šneku, jsou vhodné pro hmoty s úzkým intervalem teploty tání, jako jsou krystalické polymery typu polyethylénu nebo polyamidů. Šnek s nevýraznou kompresní částí má jádro kónické po celé délce a používá se u hmot se špatnou tekutostí nebo u hmot, u nichž je nebezpečí degradace v důsledku příliš rychlého ohřevu, např. PVC. Aby šnek plnil požadovanou funkci, musí být délka jednotlivých částí v optimálním poměru. Nejkratší je část kompresní, nejdelší je část výstupní čili homogenizační.

Délka šneku se však nevyjadřuje v jednotkách délky, ale jako poměr délky šneku a jeho průměru, tedy L / D . Délkou se rozumí tzv. účinná část šneku, která se počítá od konce šneku před tryskou k ose hrdla násypky. Čím je tento poměr vyšší, tím je dávkovací i plastikační schopnost šneku lepší. Existují však určitá konstrukční omezení. Kdyby se zvolil poměr L / D příliš velký, je nebezpečí, že se šnek bude ohýbat a tím se bude vydírat pouzdro v tavicí komoře a dále by mohlo dojít k tak velkému vývinu přídavného tepla třením, že by to mohlo vést až k degradaci polymeru. Délka šneku u vstřikovacích strojů na termoplasty bývá obvykle 15 až 20 D . Od průměru šneku D se odvozují i jiné konstrukční hodnoty, např. úhel stoupání závitu (šroubovice). Bývá 1 D , což odpovídá $17^{\circ} 40'$.

Důležitou částí šneku je jeho zakončení, které hraje úlohu při plastifikaci materiálu a při vstřikování taveniny do formy. Vstřikování se děje axiálním posuvem šneku vpřed. Tím se tavenina v prostoru mezi šnekem a tryskou stlačuje značnou silou a při tom má snahu téci šnekovým kanálem zpět směrem k násypce. Tato tendence je tím větší, čím má hmota vyšší tekutost. Tím se ovšem ztrácí část vstřikovací

kapacity. Proto se zakončení šneku konstruuje tak, aby se tomuto jevu zabránilo. Existují různá řešení, jako je tupé zakončení šneku nebo prodloužené zakončení špičky šneku, ale nejspolehlivější je zakončení se zpětným uzávěrem (se zpětným ventilem). Ten je řešen tak, že tavenina může během plastikace uzávěrem protékat do zásobního prostoru, ale při axiálním pohybu šneku dopředu se kanálek ve ventilu uzavře a tím je znemožněn zpětný tok taveniny.

Otáčivý pohyb šneku je vyvozen přes převodovku. Pohon umožňuje změnu rychlosti otáčení šneku kupř. variátorem, regulačním elektromotorem nebo hydromotorem. Axiální pohyb šneku vpřed je ovládán hydraulickým válcem a příslušná síla se vyvodí tlakem hydraulické kapaliny. Axiální pohyb se dá programově měnit. Šnek se dopředu pohybuje tak dlouho, až najede na přední koncový spínač, který přepne na dotlak. Po jeho skončení buď začne plastikace nové dávky hmoty a nebo se tavicí komora odsune od formy a teprve pak začne plastikace. V tomto případě však musí být tavicí komora osazena uzavíratelnou tryskou.

Teple potřebné k zahřátí a roztavení dostává zpracovávaný plast jednak z *odporových topných pásů* (viz. obr. 2.34), jednak přeměnou mechanické práce šneku, při čemž se ve vstupním pásmu jedná o teplo vzniklé třením a ve výstupním pásmu o teplo z hnětací práce. Poměr množství tepla závisí na konstrukci šneku, na počtu otáček šneku a na druhu plastu. Tavicí komora je pro účely vytápění obvykle rozdělena nejméně do tří zón (topných pásem) samostatně vytápěných a se samostatnou regulací teploty. Nejnižší teplota se nastavuje v pásmu u násypky nejvyšší u trysky. Tryska u větších strojů je vyhřívána a regulována navíc. Teplota pásma u násypky, nesmí být příliš vysoká, aby nedošlo k předčasnému natavení a následnému spečení granulí, protože by to mělo za následek vytvoření zátky ve šnekovém profilu. Ten by se ucpal a tím by se zamezilo přísunu dalšího materiálu do kompresní části šneku. Proto se chladí ta část tavicí komory, která přiléhá k násypce. Možnost výskytu závady také závisí na konstrukci šneku (u šneků delších než 15 D je pravděpodobnost závady malá).

Materiál pohybující se na šneku je úplně roztaven asi v polovině kompresního pásma. Stupeň teplotní homogenizace závisí na množství měrné hnětací práce. Množství práce se nastavuje protitlakem, který také bývá nazýván zpětný tlak. Výše protitlaku se nastavuje ventilem v hydraulickém obvodu. Nesmí být však příliš vysoký, protože příliš tepla vzniklého třením a hnětením by mohlo způsobit rozklad materiálu. Obvykle se volí do 10 MPa. Zvyšování protitlaku má také za následek prodloužení doby plastikace, což v některých případech vede k prodloužení pracovního cyklu. U moderních strojů je průběh protitlaku naprogramován.

Tavicí komora je zakončena *vstřikovací tryskou* (viz. obr. 2.34). Ta zajišťuje spojení mezi komorou a formou, protože přivádí taveninu do vtokových kanálů ve formě. Tryska musí správně zapadnout do sedla ve formě, aby v tomto místě nedocházelo k úniku taveniny. K tomu je nutno dodržet tyto zásady:

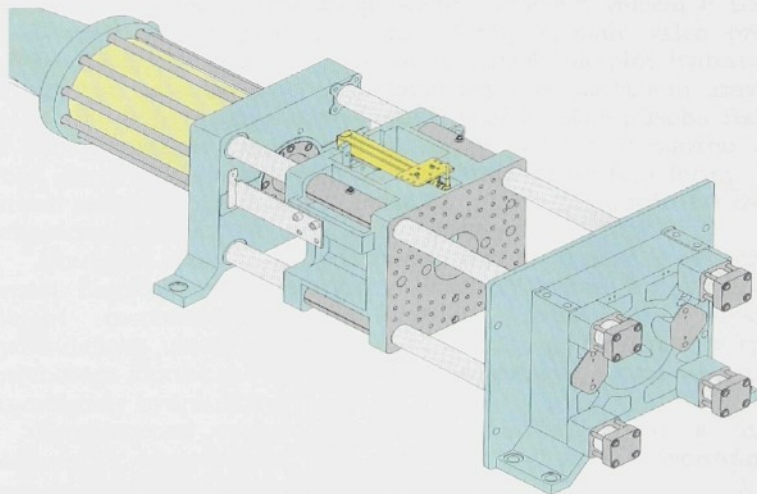
- otvory v trysce i ve vtokové vložce formy musí být sousedé,

- poloměr kulové plochy trysky musí být menší, než-li poloměr kulového sedla ve vtokové vložce,
- průměr otvoru ve vložce má být větší než průměr otvoru v trysce.

Protože tryska musí odolávat vysokým tlakům, musí být vyrobena z tvrdé kvalitní oceli anebo se musí použít speciální konstrukce dosedací plochy. Trysky se konstruují buď jako otevřené (vysoce viskózní materiály) s otvorem o průměru 3 až 8 mm, nebo jako uzavíratelné, které se otevrou pouze při dosedu vstřikovací jednotky na formu.

2.4.1.2. Uzavírací jednotka

Úkolem uzavírací jednotky (viz. obr. 2.35) je zavírat a otevírat formu dle procesu vstřikování a zajistit uzavření formy takovou silou, aby se při vstříknutí tlakem taveniny forma nepootevřela. Při činnosti formy je nutno rozlišovat *silu přisouvací* F_p , vynaloženou na vlastní pohyb formy a *silu uzavírací* F_u , která drží formu v zavřeném stavu během vstřikování. Uzavírací síla musí být větší, než-li síla vyvolaná tlakem taveniny na tzv. „projekční plochu“ výstřiku a vtokové soustavy do dělicí roviny formy. Jinak by během plnění formy v důsledku jejího pootvření vznikaly v dělicí rovině přetoky.



Obr. 2.35: Schéma uzavírací jednotky (stroj ARBURG) / 52/

Uzavírací jednotka se skládá z těchto hlavních částí:

- opěrné desky pevně spojené s ložem stroje,

- ◆ pohyblivé desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy,
- ◆ upínací desky s otvorem pro trysku stroje, na kterou se připevní nepohyblivá část vstřikovací formy,
- ◆ vodicích sloupů,
- ◆ z uzavíracího a přidržovacího mechanismu

a je charakterizována těmito parametry: uzavírací silou F_u /kN/, přisouvací silou F_p /kN/, vertikálním a horizontálním průchodem mezi sloupky /mm/, max. a min. výškou formy /mm/, prostorem pro práci s výrobky /mm/ a typem uzavíracího systému. Současné moderní stroje mají programovatelnou rychlost a sílu uzavírání vstřikovací formy.

V praxi se používají tyto uzavírací systémy:

Hydraulický uzávěr, který je nejjednodušší. Přisouvací i uzavírací síla jsou vyvolány tlakem hydraulické kapaliny ve válci s pístem. Dnes se již používá málo, jednak kvůli malé přisouvací rychlosti, ale hlavně kvůli nebezpečí pootevření formy při tlakových rázech. Také umístění hydraulického válce v ose vstřikovací jednotky ztěžuje centrální vyhazování výstřiků z formy.

Hydraulický uzávěr s dvojím ovládním a závorováním urychluje zavírání formy. Dosahuje se toho kombinací dvou hydraulických válců a pístů s malým a velkým průměrem. Hydraulická kapalina se přivádí od čerpadla do válce s malým průměrem. Tento válec vyvozuje jen sílu potřebnou k překonání odporů při pohybu formy. Když se válec plní, pohybuje se upínací deska stroje spolu s hlavním válcem a pístem rychle vpřed. Těsně před uzavřením formy se malý válec propojí s velkým. Tím se rychlost dovírání formy zmenší, ale plný hydraulický tlak působící na celou plochu hlavního pístu vyvolá velkou uzavírací sílu, kterou se forma uzamkne. Předtím, než-li začne působit tlak na píst hlavního válce, zasune se do vybrání pístní tyče malého válce závora, která jako mechanický uzávěr brání pootevření formy. Toto opatření se nazývá „závorování hlavního pístu“. Závorování se ovládá mechanicky, pneumaticky nebo hydraulicky.

Kloubové uzávěry se používají zejména u strojů se střední gramáží. Zaručují velkou rychlost zavírání a otevírání formy i dobrou odolnost mechanismu proti otevření formy. Ve srovnání s hydraulickým uzávěrem mají menší hmotnost, nevýhodou je rychlé opotřebování kloubů a vyšší náročnost na seřizování formy. Nejčastěji jsou ovládány hydraulicky.

Kombinovaný uzávěr se podobá hydraulickému s dvojím ovládním a závorováním, ale rychlého zavírání a závorování se dosahuje kloubovým mechanismem.

Vstřikovací a uzavírací jednotky mají vůči sobě určité umístění, polohu. Nejčastější uspořádání je horizontální poloha vstřikovací i uzavírací jednotky, tedy vstřikování kolmo na dělicí rovinu formy. V některých případech (reologické chování taveniny, dvoukomponentní vstřikování, apod.) však může dojít k jiné vzájemné

poloze. Sedm různých poloh mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou je na obr. 2.36.



Obr. 2.36: Vzájemná poloha mezi vstřikovací a uzavírací jednotkou (stroj ARBURG) / 52/

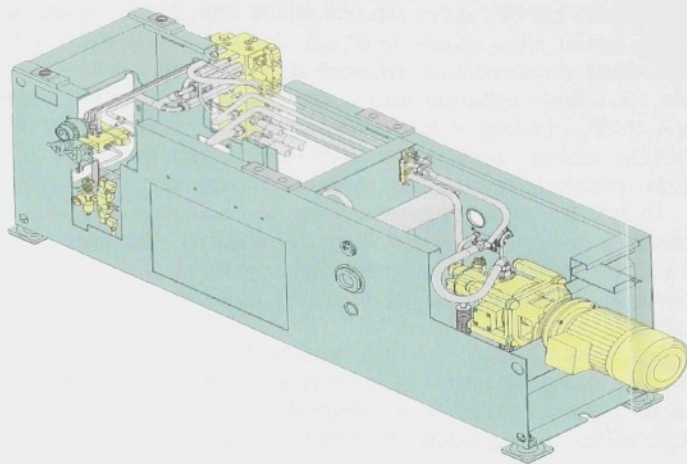
Vstřikovací kapacita Q_v a maximální uzavírací síla F_u jsou důležitými charakteristikami každého stroje, a proto se uvádějí v označení typu stroje. Tak např. stroj s označením BT 7700 / 2x1200 je vstřikovací stroj od firmy *Battenfeld* se vstřikovací kapacitou 7700 cm³ a uzavírací silou 2 x 12000 kN, tedy celkem 24000 kN.

2.4.1.3. Energetická náročnost vstřikovacích strojů

Pohyblivé části vstřikovací a uzavírací jednotky uvádí do pohybu elektromotor buď přímo nebo přes mechanické převody anebo přes čerpadlo kapaliny, kde se k vyvození sil použije tlaková kapalina. Umístění těchto energetických jednotek na rámu stroje je ukázáno na obr. 2.37.

Jako hydraulická kapalina dnes slouží téměř výhradně olej, který má dobré mazací vlastnosti a chrání části stroje před korozí. Zdrojem tlaku v hydraulickém obvodu jsou čerpadla. Nejrozšířenější jsou čerpadla rotační. Mají malé rozměry a vysoký výkon, který se vyjadřuje množstvím čerpané kapaliny za minutu a dosažitelným tlakem.

Mezi čerpadlo a hydraulický válec se zařazuje zásobník tlakové kapaliny - akumulátor. Většinou se jedná o akumulátory pneumatické, u nichž je tlak na zásobní kapalinu, tj. olej, vyvolán polštářem stlačeného plynu. U oleje to musí být z bezpečnostních důvodů dusík. Akumulátor zabezpečuje plynulou dodávku hydraulického média i plynulý chod stroje bez pulzací. V hydraulickém obvodu také může být zařazen multiplikátor, kterým se zvyšuje tlak.



Obr. 2.37: Schéma umístění pohonných jednotek na rámu stroje (stroj ARBURG) / 52/

Součásti hydraulického systému jsou dále ventily, které mají za úkol regulovat tlak a určovat objem a směr toku média. Olejové filtry zachycují nečistoty vzniklé např. opotřebením pohyblivých částí. Hydraulický válec s axiálně se pohybujícím pístem zprostředkovává i přenos síly na funkční části vstřikovacího stroje.

Teplu potřebné k roztavení plastu se získává zčásti z vnějších tepelných zdrojů a zčásti přeměnou mechanické práce v teplo. K ohřevu termoplastů se používá výhradně elektrické odporové topení. Tavicí komora a případně tryska se vyhřívají topnými pásy. Ty mají uvnitř odporovou spirálu chráněnou izolační hmotou. Těsně obepínají vnější povrch komory, čímž je zajištěn dobrý přestup tepla. Ztráty tepla sáláním do okolí se snižují vhodnou izolací na povrchu pásů. U většiny strojů je komora rozdělena nejméně na tři pásma a k tomu ještě může být vyhřívána tryska. V každé zóně je teplota regulována samostatně. K regulaci teploty se nejlépe hodí kompenzační regulátory.

Mezi charakteristiky pohonné, ovládací a regulační techniky patří příkon hydrogenerátoru /kW/, příkon topení /kW/, typ hydraulického systému (konstantní, regulační, frekvenční, DFE), typ provozní kapaliny.

2.4.1.4. Řízení a regulace vstřikovacích strojů

Řídicí a regulační jednotka řídí poloautomatický nebo plně automatický provoz stroje a zajišťuje samočinné dodržování nastavených technologických parametrů, ke kterým patří teplota roztavené hmoty, vstřikovací tlak, rychlost vstřikování, dotlak, teplota

formy a časové rozčlenění vstřikovacího cyklu. Řídící část je umístěna v samostatné ovládací skříni. Moderní stroje jsou běžně vybavovány počítači. Ty zaručují přesné dodržování nastavených technologických parametrů, které jsou zárukou minimálního kolísání vlastností výstřiků, vyrobených v různých vstřikovacích cyklech. Řízení a regulaci je nutné považovat za neoddělitelnou součást funkce vstřikovacího stroje. Rozumí se tím tedy nastavení, snímání a sledování strojních a technologických parametrů a jejich následnou regulaci, jestliže odchylky překročí přípustnou toleranci. Strojní parametry jsou nastavovány přímo na stroji a jedná se o teplotu jednotlivých zón tavicí komory, teplotu formy, tlak hydraulické kapaliny při vstřikování a při dotlaku nebo při protitlaku, jednotlivé časové úseky pracovního cyklu, vstřikovací rychlost, rychlost zavírání a otevírání formy apod. Pod technologickými parametry se rozumí ty, které se týkají stavu plastu. Jsou to teplota taveniny v komoře a v dutině formy, tlak hmoty v komoře a ve formě, viskozita taveniny, doba plnění, doba chlazení a rychlost proudění ve formě.

Řízením vstřikovacího procesu se rozumí ruční nebo automatické nastavení strojních parametrů bez zpětného hlášení o skutečných hodnotách strojních a technologických veličin. Regulací procesu se rozumí nastavení strojních parametrů, avšak se zpětným hlášením skutečných hodnot strojních nebo technologických veličin. Tyto hodnoty se porovnávají s nastavenými a jestliže se odchylují nad přípustnou toleranci pak se automaticky provede jejich korekce. Je snaha, aby vstřikovací proces probíhal automaticky, tedy bez zásahu člověka.

Automatizace může existovat v různých stupních. U tzv. konvenčních vstřikovacích strojů je zajištěn automatický sled jednotlivých operací, tj. zavření formy, vstřikování, dotlak, chlazení výstřiku atd., v nastavených časových úsecích. Nastavování strojních parametrů se u těchto strojů provádí buď ručně, nebo naprogramováním části procesu, např. vstřikovací rychlosti nebo dotlaku. Při současném vývoji řídicí a regulační techniky má velký význam dodržování reprodukovatelnosti nastavených strojních parametrů. Pak se dosahuje stejnoměrné a vysoké kvality výrobků, minimální zmetkovitosti a vysoké produktivity.

Ovládání moderních vstřikovacích strojů se dnes děje elektronicky s využitím mikroprocesorů. Mikroprocesorový systém je základem centrální ovládací jednotky a obsahuje paměť, která řídí činnost stroje na základě vloženého programu. Systém usnadňuje tyto funkce:

- ◆ jednoduché a rychlé nastavení režimu činnosti stroje a jeho změnu,
- ◆ kontrolu funkce stroje, hlášení poruch a jejich příčin (diagnostický systém),
- ◆ řízení a regulaci procesu pomocí hydraulických ovládacích prvků, např. rychlosti vstřikování, dotlaku a zpětného tlaku,
- ◆ připojení dlouhodobé paměti pro záznam optimálního programu a dat pro případ opakované výroby,

- ♦ možnost připojení na centrální počítač pro řízení skupiny strojů nebo sledování výrobních dat (počet výrobků, množství zmetků, ztrátové časy atd.),

- ♦ připojení informačního systému na obrazovku, která ukazuje v textové nebo grafické úpravě nastavené a skutečné hodnoty a dovolené horní a dolní odchylky.

Vstřikovací stroje tohoto typu umožňují adaptivní regulaci vstřikovacího procesu podle diagramu $p - v - T$. Mikroprocesorový systém seřizuje proces vstřikování na základě programu vycházejícího z diagramu $p - v - T$ daného plastu, optimalizuje jeho průběh a udržuje nastavené parametry. Přitom je schopen potlačovat rušivé vlivy, způsobené kolísáním technologických parametrů, např. teploty taveniny. To je výhodné u tvarově složitých výstřiků s různou tloušťkou stěn nebo u výstřiků s vysokými požadavky na kvalitu povrchu. Vychází se ze sledování buď tlaku, času nebo dráhy vstřikování. Úprava umožňuje přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak při dosažení určité úrovně vstřikovacího tlaku. Tím se zabrání přeplnění formy a omezi se kolísání rozměrů.

Moderní stroje dovolují zvládnout výrobu i technicky náročných výstřiků a to s velkou přesností, což podporují a zlepšují i výsledky ze simulačních programů při optimalizacích technologie vstřikování. Podmínkou využití těchto investičně náročných strojů jsou dostatečně široké znalosti o vstřikovacím procesu a jeho vztahu k vlastnostem výstřiků.

2.4.2. Lisovací stroje

Lisy pro zpracování plastů (reaktoplastů) pracují buď v neautomatickém, nebo poloautomatickém a nebo v plně automatickém provozu v závislosti na čase a dráze podle stupně vybavení lisu řídicími a regulačními orgány. Lisovací síla působí u většiny lisů vertikálně. Výhodou automatických lisů je naprosto rovnoměrná kvalita výlisků a asi o 25 % vyšší výkonnost proti poloautomatům. Nedostatkem vertikálních lisů je ta skutečnost, že po dobu vytvrzování je většina zařízení lisu nevyužita. Řešení tohoto problému přináší *rotační lisy*, kdy jsou jednotlivé lisy uspořádány do kruhu a pouze plnicí zařízení a čerpadlo je společné.

Lisy se podle konstrukce dělí na *stojanové* (stůl je přístupný ze tří stran) a nebo sloupové, příp. *rámové* lisy (stůl je přístupný pouze zepředu a zezadu). Stojan je buď odlit z litiny a nebo je svařen z plechů. Podle způsobu vyvození lisovací síly lze rozdělit lisy na *mechanické*, kdy je pohyb beranu (pohyb po prizmatickém vedení na rámu stroje) ovládán vřetenem, kloubovým nebo výstředníkovým mechanismem a na *hydraulické* lisy (nejčastější použití), kdy se beran pohybuje vlivem působení hydraulického pracovního pístu. Pro zpracování plastů se tedy nejčastěji používají hydraulické lisy, kde jsou

pro zpracování nezbytné lisovací síly nad 1 MN. Jejich velkou výhodou je ta skutečnost, že maximální lisovací síly lze dosáhnout v libovolném místě dráhy beranu, takže lze použít formu o různé výšce. Síla hydraulických lisů je pružná, tzn., že lisovací rychlost se přizpůsobí průběhu lisovacího cyklu ve formě. Maximální lisovací síla může být až 250 MN.

Lisy pro lisování výlisků z reaktoplastů jsou stavěny buď jako *hornotlaké* (píst je v horní části) nebo *dolnotlaké*. Mohou ještě obsahovat doplňkový malý píst pro vyhazování výlisků z formy. Lisy většinou pracují s dvojtlakým systémem, tzn., že při nepracovních pohybech (uzavírání a otevírání lisu, apod.) se používá nízký tlak kapaliny (0,5 až 2 MPa) a vysoký tlak se potom používá při vlastním lisování. Toto řešení je jednak mnohem levnější, protože vysokotlaká kapalina je až 20krát dražší, než-li nízkotlaká a jednak se zrychlí činnost lisu, protože nízkotlaká kapalina je k dispozici ve velkém objemu. Nízkotlakou kapalinu dodávají zubová čerpadla nebo pneumatické akumulátory, vysokotlakou kapalinu dodávají pístová nebo rotační čerpadla.

Lisy pro lisování plněných desek (skelné rohože, textilie, apod.) z reaktoplastů mají většinou rámovou konstrukci a uzavírací a lisovací síla je vyvozována hydraulicky. Plocha lisovacího stolu je až 50 m². Lisovací tlaky jsou podstatně nižší, než-li tlaky pro při klasickém lisování.

Zvláštní skupinou jsou *etážové* lisy, které nemají pouze dvě topné desky, ale pro zvýšení produkce se do prostoru lisu umísťují další topné desky. Lisy jsou stavěny jako hydraulické, většinou dolnotlaké. Vytápění desek je většinou parou a jako formy jsou zde použity zrcadlově leštěné plochy. Plocha lisovacího stolu je kolem 20 m² a lisovací síla kolem 200 MN a jsou postaveny lisy až se čtyřiceti etážemi.

2.4.3. Vyfukovací stroje

Při technologii vyfukování se používají jednak *stroje pro přípravu taveniny* plastu a jednak *stroje pro vlastní vyfukování*. Pro přípravu taveniny plastu se používají pomaloběžné vytlačovací stroje o průměru šneku 30 až 250 mm a délce šneku 20 až 25 D, zakončené příčnou vytlačovací hlavou. Při výrobě větších nádob se používá kombinace šnekového vytlačovacího stroje se zásobníkem zplastikované dávky (pro nádoby o objemu větším jak 50 l).

Moderní vyfukovací stroje umožňují i u vytlačovacího vyfukování regulaci tloušťky stěny parizonu. To dovoluje jednak udržovat konstantní tloušťku stěny výrobku i při změně tokových vlastností plastu, jednak vyfouknout výrobek nepravidelného tvaru o konstantní tloušťce stěny. Ve vytlačovací hlavě je mikroprocesorem ovládán axiální trn buď hydraulicky nebo pneumaticky. K této axiální regulaci je možné použít i radiální regulaci, která spočívá v prohýbání

deformovatelného kruhu hubice, což umožňuje výrobu i tvarově velmi složitých dílů.

Vyfukovací stroje se liší podle toho, jak se pohybuje forma (vertikální nebo horizontální pohyb) a podle počtu forem (stroje pracující s jednou nebo dvěma vyfukovacími formami). Ukázka vyfukovacího stroje včetně formy a výrobku je na obr. 2.31.

K vyfukovacím strojům se dále používají různé manipulátory a mechanizační nebo automatizační prvky, které ukládají výrobky do palet, ořezávají přetoky, zpracovávají odpad a vrací ho zpět do procesu, apod.

2.4.4. Tvarovací stroje

Stroje pro tvarování desek z termoplastů jsou poměrně nenáročné konstrukce, a proto jsou i levné. Buď se jedná o stroje *jednoučelové* nebo *víceúčelové*. U moderních strojů probíhá celý tvarovací cyklus plně automaticky, některé jsou vybaveny i ořezávacím zařízením. Vrcholem jsou automaty, které fólii nebo desku vytvarují do požadovaného tvaru a hotový výrobek oříznou.

Velikost stroje se udává maximálními dosažitelnými rozměry výtažku, to je jeho plochou a hloubkou, např. plocha 1500 × 1000 mm a hloubka 600 mm.

Podle počtu pracovních míst bývají stroje *jednomístné* a nebo *dvoumístné*. Ohřívací zařízení je pak buď společné pro obě místa a pracuje střídavě na jedné či na druhé straně, anebo je pro každé tvarovací místo samostatné, což je důležité při požadovaném vyšším výkonu. Dále se stroje dělí podle způsobu ohřevu na stroje s *jednostranným* a stroje s *dvoustranným* ohřevem.

V praxi se používají dva typy strojů, a to stroje pro *tvarování malých výtažků* a *velkoplošné tvarovací stroje*. Stroje pro tvarování malých výlisků mají maximální plochu tvarovacího stolu 800 × 500 mm a hloubku tažení do 150 mm. Velkoplošné tvarovací stroje mají stolovou konstrukci. Ve svařovaném stojanu je umístěna deska stolu, na níž je umístěna forma. V desce stolu jsou otvory, které slouží k připojení formy k odsávacímu zařízení. Deska stolu se může pohybovat ve vertikálním směru. Pohyb je většinou ovládán hydraulicky, méně často mechanicky nebo pneumaticky. Největší tvarovací stroje umožňují tvarovat desky s rozměry až 3000 × 9000 mm a s hloubkou až 2000 mm.

Pro výrobu výtažků ve velkých sériích se konstruují kontinuálně pracující *bubnové stroje*, které na obvodu mají několik vícenásobných forem. Výtažky se ořezávají přímo na stroji.

2.5. NÁSTROJE PRO ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ

Nástroje (formy) jsou velmi důležitou částí strojů, protože jejich funkcí je dát tavenině plastu konečný tvar výrobku a tento tvar „uložit

do paměti“ hmoty, aby nedošlo k deformaci výrobku po otevření formy. Formy se podle použitých technologií dělí na vstřikovací (bude jim věnována největší pozornost), lisovací, tvarovací, vyfukovací, apod.

Formy pro zpracování plastů jsou komplikovaná zařízení, která musí odolávat vysokým tlakům, musí poskytovat výrobky o přesných rozměrech, musí umožnit snadné vyjmutí výrobku a musí pracovat automaticky po celou dobu své životnosti. Jejich konstrukce a výroba je náročná na odborné znalosti, ale i na finanční náklady. Formy se navrhují buď podle zkušeností konstruktéra a nebo na základě simulačních programů (*STRIM*, *MOLDFLOW*, *C-MOLD*, atd.). V současné době se stále více technických dílů předem simuluje, takže dochází k úsporám nákladů u ekonomicky náročných forem při odstraňování nedostatků a závad, protože tyto nedostatky lze zjistit ještě před vyrobením nástroje. Podkladem pro návrh vstřikovací formy je buď model nebo výkres výrobku, a to ať už reálný nebo počítačový, který musí odpovídat zásadám konstrukce tvaru (viz. kap. 2.1).

Materiály, doporučené pro výrobu forem, které jsou vyráběny v České republice, uvádí tab. 2.11. Důležitým faktorem životnosti formy je provedené tepelné zpracování na tvarových částech nástroje.

Tab. 2.11: Doporučené druhy ocelí na formy pro plasty /3/

SKUPINA OCELÍ	Základní řada	Doplňková řada	Náhradní řada
oceli k použití v přírodním stavu	11 523 12 060		11 373 11 600
oceli k cementování	19 015 19 487	14 220	12 010 12 020 19 486 14 221
oceli k zúšlechťení a nitridaci	19 550 14 340	19 552	19 495 15 340
uhlíkové oceli s malou prokalitelností	19 083	19 191	12 060 19 192
legované oceli ke kalení a popouštění se zvýšenou prokalitelností	19 312	19 314 19 421 19 452 19 732	19 313 15 260 14 260
legované oceli ke kalení a popouštění s velkou prokalitelností	19 550 19 662		19 552 19 663
legované oceli ke kalení a popouštění s velkou prokalitelností a otěruvzdorností		19 437 19 572 19 573	19 436 19 574
korozivzdorné oceli		19 435	17 024 17 029
spec. martenziticky vytvrditelné oceli		19 901	19 902

Volba materiálu závisí na druhu zpracovávaného plastu, na použité technologii, na velikosti výrobku a jeho složitosti, na velikosti série, na tepelné odolnosti a odolnosti proti opotřebení a korozi, na ceně, apod.

Dalším důležitým úkolem při konstrukci forem je stanovení rozměrů a výrobních tolerancí tvarových částí. Pro určení a výpočet těchto rozměrů jsou rozhodující smrštění, tolerance jednotlivých rozměrů vylisku a opotřebení činných částí nástroje. Nejdůležitější je však smrštění zpracovávaného materiálu a při návrhu formy se většinou vychází ze středních hodnot. Pro přesnější výpočet se hodnota smrštění ve směru toku zvyšuje o 20 % a ve směru kolmém se naopak o 20 % hodnota smrštění snižuje.

Zpracovávaný plast ovlivňuje nejenom rozměry tvarové dutiny, ale i drsnost povrchu tvarových částí, teplotu, na kterou bude vstřikovací forma temperována, volbu a provedení vyhazovacího systému, přesnost slicování, apod.

Nástroje se vyrábějí rozličnými technologiemi a výrobními postupy mezi které patří obrábění, tváření, ale i speciální technologie jako vyjiskřování, galvanoplastika, stereolitografie, rapid prototype, apod.

Formy se na stroje upínají na upínací desky, které jsou opatřeny buď upínacími závitky nebo upínacími drážkami, avšak rozměry i rozmístění upínacích míst je velmi různorodé, zvláště u starých typů strojů, což je příčinou nejrůznějších problémů a potíží. V dnešní době jsou upínací desky na strojích totožné a výrobci normalizovaných rámců a součástí forem (*HASCO*, *EOC*, aj.) se problémy upínání nezajímají, protože obvodové rozměry rámců forem upravili podle rozměrů hutních polotovarů oceli a pro upnutí na stroj dodávají několik typů upínek, které se liší podle typu stroje. Současné moderní vstřikovny používají, zvláště pro velké formy, dopravníky, které přesně nastředí formu a usnadní upnutí nástroje a připojení temperačních nebo jiných médií. Na kvalitním upnutí závisí správná činnost formy a je vyloučeno nebezpečí zničení tvarových částí při posunu nástroje u nedostatečně a nebo nekvalitně upnutých částí formy.

2.5.1. Formy pro vstřikování termoplastů

Vstřikovací formy jsou konstrukčně velmi rozmanité a lze je rozdělit do následujících skupin:

- ♦ podle násobnosti na *jednonásobné* a *vícenásobné*,
- ♦ podle způsobu zaformování a konstrukčního řešení na *dvoudeskové*, *třídeskové*, *etážové*, *čelistové*, *vytáčeční*, apod.,
- ♦ podle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se *vstřikem kolmo na dělicí rovinu* a na formy se *vstřikem do dělicí roviny*.

Násobnost vstřikovacích forem je velmi důležitým faktorem hospodárnosti a produktivity výroby. Při volbě násobnosti se musí vzít v úvahu následující technologické a ekonomické parametry:

- ◆ náklady na výrobu jednonásobné a vícenásobné formy,
- ◆ celkový počet výstřiků a čas na jejich výrobu,
- ◆ vstřikovací kapacitu, plastikační kapacitu a přidržovací sílu stroje, který je k dispozici,
- ◆ provozní náklady stroje s menší a větší vstřikovací kapacitou,
- ◆ dobu vstřikovacího cyklu menšího stroje pro jednonásobnou formu a většího stroje pro vícenásobnou formu.

Při konečném určení násobnosti formy je nutné sledovat i kritéria ekonomická, kdy je potřeba vzít v úvahu např. životnost formy, členitost výrobku, apod. Maximální násobnost formy je potom určena minimální hodnotou, vypočtenou ze všech vztahů pro násobnost. Pokud bude vstřikovací forma vícenásobná, tak umístění tvarových dutin je možné dvěma možnými způsoby: buď do hvězdy nebo v řadě. Z hlediska plnění tvarových dutin je lepší uspořádání *do hvězdy*, protože k zaplnění dochází ve stejném čase a při stejném tlaku, kdežto u uspořádání *v řadě* se musí provést korekce ústí vtoku, tzn. změnit rozměry rozváděcích kanálů směrem ke vzdálenějším dutinám.

Vstřikovací forma se skládá z dílů, vymezujících tvarovou dutinu formy, z chladicího (temperačního) systému, z vtokového systému, z vyhazovacího systému a z upínacích a vodicích elementů. Jednotlivé části vstřikovacích forem lze rozdělit do dvou skupin na části konstrukční a na části funkční. *Konstrukční části* (zabezpečují správnou činnost nástroje), které se liší podle konstrukce formy, jsou:

- ◆ *upínací desky*, které slouží k uchycení formy na pevnou i pohyblivou část vstřikovacího stroje (někdy se podkládají izolačními deskami pro snížení přestupu tepla mezi formou a lisem),

- ◆ *kotevní desky*, které slouží k upevnění tvářecích částí formy,

- ◆ *opěrné desky*, které se používají k podložení tvářecích částí a zabraňují jejich zamačkávání do nástroje,

- ◆ *mezidesky*, které umožňují konstruovat nástroje s více dělicími rovinami a oddělování vtokového zbytku od výstřiku při otevírání formy,

- ◆ *středící kroužky*, které umožňují nastředění formy na upínací desku stroje a k zajištění souososti formy a trysky,

- ◆ *rozpěrky*, které vymezují mezeru mezi upínací deskou a formou pro správnou funkci vyhazovacího systému,

- ◆ *dorazy*, které slouží k přesnému vymezení dráhy pohyblivých částí formy,

- ◆ *vodící části*, které vedou pohyblivou část formy proti pevné a navzájem je vůči sobě střídí (vodící kolíky, sloupky).

a *funkční části* (stýkají se s tvářeným materiálem a udělují mu požadovaný tvar) vstřikovacích forem jsou:

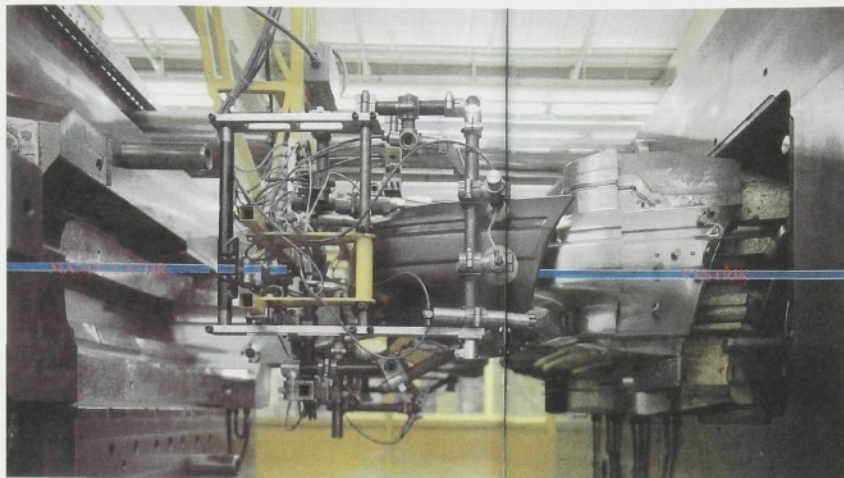
- ◆ *tvárník*, který vytváří vnitřní povrch výstřiku,

- ◆ *tvárnice*, která vytváří vnější povrch výstřiku,

- ◆ *vtoková vložka*, která spojuje vtokový systém formy s tryskou stroje,

♦ *jádro*, pokud je součástí formy, tak tvoří dutinu ve výrobku buď ve směru otevírání formy a nebo na boku výstřiku.

Pro představu o tvarové a konstrukční složitosti vstřikovacích forem je na obr. 2.38 ukázán pohled do otevřené vstřikovací formy pro výrobu předního nárazníku.



Obr. 2.38: Vstřikovací forma pro výrobu předního nárazníku

2.5.1.1. Vtoková soustava vstřikovacích forem

Kvalitu a jakost výstřiku spolu s produktivitou výroby nejvíce ovlivňuje *vtokový systém*, což je systém hlavních a rozváděcích kanálů a ústí vtoku, který musí zajišťovat správné naplnění dutiny formy, snadné odtržení nebo oddělení od výstřiku a snadné vyhození vtokového zbytku. Vtoková soustava je navrhována podle počtu tvarových dutin, podle jejich rozmístění a podle toho, zda bude konstruována jako studený nebo horký rozvod.

Při vstřikování termoplastů má druh a umístění vtoku podstatný vliv na proudění taveniny ve formě, vytváření tzv. studených spojů, orientaci makromolekul a plniva, rovnoměrnost krystalizace, anizotropii vlastností a rozměrů, povrchový vzhled (lesk, tokové čáry), vznik vnitřních dutin a povrchových propadlin, apod. Vtok má být zásadně řešen tak, aby tavenina naplnila formu nejkratší cestou bez velkých teplotních a tlakových ztrát, co nejrychleji a pokud možno všude ve stejném čase. Tento cíl je snáze dosažitelný u menších a tvarově jednoduchých výstřiků, než-li u rozměrných a členitých výrobků.

Konstrukční řešení vtokového systému závisí na konkrétním tvaru výstřiku a na násobnosti formy.

U jednonásobných forem patří k nejstarším, ale stále používaným pro svou jednoduchost *kuželový vtok*, označovaný také jako *plný*. Hodí se zejména pro výrobky s tlustou stěnou nebo pro hmoty se špatnou tekutostí. Aby byl zaručen bezvadný průběh vstřikování, musí být vtok správně dimenzován, tzn., že musí být správně zvolena jeho délka, průměr a kuželovitost.

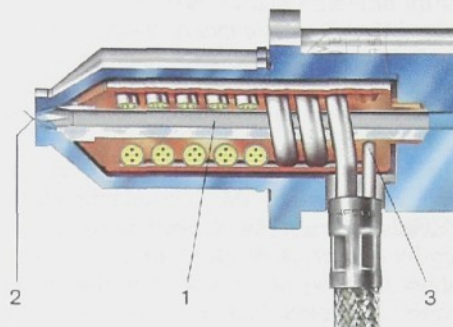
S ohledem na vyplňování dutiny taveninou je třeba, aby ústí vtoku zatuhlo až po dokonalém vyplnění dutiny formy, protože při předčasném „zamrznutí“ vtoku zůstane výstřik neúplný nebo obsahuje staženiny, propadliny nebo vnitřní dutiny. Tyto vady se objeví i tehdy, je-li kanál příliš dlouhý nebo úzký. V tomto případě se však na výrobku objeví „tokové čáry“, jejichž příčinou je strhávání hmoty zchladlé na stěnách vtokového kanálu další hmotou proudící do dutiny a vznik odlišného barevného odstínu. Příliš úzký kanál má za následek i ztráty tlaku v tavenině a tedy zmenšení rychlosti vstřikování a prodloužení doby plnění se všemi negativními důsledky. Na druhé straně však není vhodný ani příliš velký průřez vtoku, protože potom v něm zůstává tavenina v plastickém stavu dlouhou dobu a je nebezpečí vzniku staženiny přímo v místě ústí vtoku. Průměr ústí vtoku se obvykle volí asi o 1 až 1,5 mm větší, než-li je tloušťka stěny, do níž vtok ústí. Směrem od ústí se vtok zužuje a kuželovitost se volí 1:15 až 1:50. K nevýhodám plného vtoku patří pracnost při jeho odstraňování a nutnost začistit místo jeho vyústění.

Pro automatický proces vstřikování je výhodný *bodový vtok*, který umožňuje snadné oddělení vtokového zbytku přímo ve formě. Rozměry ústí bodového vtoku závisí na druhu vstřikovaného plastu a na tloušťce stěny výrobku, nejčastěji však mívá průměr asi 1 mm. Je vhodný i ze vzhledových důvodů, protože na výrobku nechává jen nepatrnou stopu, která je obtížně zjištělná. Hodí se hlavně pro tenkostěnné výrobky. Jestliže se bodový vtok upraví na tzv. *živý bodový vtok* (bodový vtok s předkomůrkou), hovoříme potom o bezodpadovém vstřikování, protože dochází k úspoře materiálu, který by jinak ztuhnul ve vtokovém systému. V tomto případě tavenina plastu ztuhne na stěně předkomůrky, působí jako izolace, ale uvnitř je plastické jádro, které zajišťuje plnění přes krátký vtokový kanál. Ten je dlouhý asi 1 mm, ústí vtoku má průměr jen asi 0,5 až 1,2 mm, směrem k dutině formy je kuželovitý s úhlem až 60°. To zaručuje, že se ztuhlý plast v kanálku odtrhne na přechodu do předkomůrky a z kanálku je vytažen společně s výstřikem, na kterém trvale zůstane.

Pro zlepšení tepelných poměrů v předkomůrce, vkládají se do předkomůrky různé vodivé nebo vytápěné nástavce. Aby bylo zaručeno „měkké“ odtržení vtokového zbytku od hmoty v předkomůrce a zabránilo se při tom poškození výrobku, zhotovuje se v dutině formy na protilehlé straně ústí vtoku „čočka“, kterou se v tomto místě tloušťka stěny zvětší asi o 0,3 až 0,5 mm. Její průměr bývá podle velikosti výstřiku 6 až 10 mm. V místě čочки hmota chladne pomaleji, takže k odtržení vtoku dojde při vyšší teplotě výstřiku a tím se sníží nebezpečí

prasknutí stěny výstřiku. Je to důležité hlavně u tvrdých a málo houževnatých plastů. Tvar čochy má také příznivý vliv na proudění taveniny do dutiny formy, které se stává plynulejší a rovnoměrnější.

Kromě živých vtoků lze použít pro vstřikování i tzv. *horké vtoky*, *trysky* (fa DYNISCO, GÜNTHER, aj.), které jsou sice cenově náročnější, ale na druhé straně snižují spotřebu polymeru, zkracují dobu vstřikovacího cyklu, snižují tlakové ztráty a umožňují snadnou výměnu poškozeného vtokového systému (viz. obr. 2.39). Mají vlastní regulaci teploty a jejich výhodou je i možnost umístění špičky trysky do jakékoliv části výrobku pod jakýmkoliv úhlem s volbou začištění vtoku.



Obr. 2.39: Řez horkou tryskou (fa HASCO)

1 – vstřikovací kanál horké trysky, 2 – ústí vtoku, 3 – elektrické topení

Při vstřikování válcových výrobků nebo obecně rotačních dílů se středovým otvorem je nutno zajistit současné a rovnoměrné plnění dutiny po celém jejím obvodu. Při plnění z jedné strany je nebezpečí, že se výstřik bude deformovat a že se na opačné straně od ústí vtoku bude tvořit studený spoj. Ke vstřikování se potom používá *deštníkový* nebo *talířový vtok*. Hlavní vtokový kanál tvoří klasický kuželový vtok, který se v patě kužele rozšiřuje na obvod vnitřního průměru výstřiku do tvaru kotouče nebo deštníku. Podobně se u trubkových výstřiků používá *kruhový vtok*. Tavenina nejprve z hlavního kanálu vtéká do pomocného nákrůžku a po jeho naplnění je vstřikována ústím ve tvaru šterbiny do dutiny formy. Toto uspořádání umožňuje navíc oboustranné uchycení trnu vytvářejícího otvor a tak se zamezí jeho případnému vyosení.

Dlouhé ploché výrobky se vstřikují pomocí *šterbinového vtoku*. Tloušťka ústí má být maximálně rovna polovině tloušťky stěny výstřiku, používá se však i tzv. *filmový vtok* s tloušťkou jen několik desetin milimetru.

U vícenásobných vstřikovacích forem je nejdůležitějším požadavkem, aby všechny tvarové dutiny byly plněny současně a při stejných technologických podmínkách, což znamená při stejné teplotě taveniny a při stejném vnitřním tlaku. Rozdil mezi jedno-

vícenásobnou formou spočívá v tom, že u jednonásobné formy působí šnek na hmotu v dutině formy bezprostředně jen přes hlavní vtokový kanál, zatímco u vícenásobných forem vstupuje hmota z hlavního kanálu nejdříve do rozváděcích kanálů a z nich teprve přes ústí vtoku do jednotlivých dutin. Dráha toku taveniny je tedy značně delší, a proto dochází k větším ztrátám tlaku i k většímu ochlazení. Aby vtokové kanály ovlivnily zpracovatelské vlastnosti hmoty co nejméně, platí i zde, že mají být krátké a mají mít co největší průřez při nejmenším ochlazujícím povrchu. Tomu nejlépe vyhovuje kanál kruhového průřezu. Ale tento požadavek je splnitelný jen u hlavního kanálu, rozváděcí kanály kruhového průřezu umístěné v dělicí rovině formy se špatně vyrábějí, protože každá polovina kanálu je v jiné desce. V praxi se dává přednost rozváděcím kanálům s lichoběžníkovým průřezem. Správnou volbu a rozměry rozváděcích kanálů v současnosti nejlépe modelují počítačové analýzy, ale lze použít i různých nomogramů a nebo výpočtových vztahů.

Je-li dělicí rovina rozváděcích kanálů shodná s dělicí rovinou tvarových dutin, leží i ústí vtoku v této dělicí rovině a formu lze navrhnout jako dvojdeskovou. Má-li rozváděcí kanál samostatnou dělicí rovinu, vzniká forma třidesková, která je složitější.

Nejčastěji používaným vtok je u vícenásobných forem bodový vtok, ale i u vícenásobných forem se používá obdoba živých vtoků. Nejjednodušší je tzv. *izolovaný kanál*. Forma je řešena jako třidesková a kanál má velký průměr, např. 10 až 15 mm. Kanál se při prvním pracovním cyklu naplní roztavenou hmotou a i když na povrchu hmota tuhne, uvnitř zůstává v plastickém stavu. Oblast hmoty v plastickém stavu se nazývá plastické jádro a to dovoluje průtok taveniny i v následujících cyklech. Doba cyklu ovšem nesmí být příliš. Forma se otevírá kvůli vyjímání výstřiků jen v hlavní dělicí rovině tvarových dutin, v dělicí rovině vtoku se otevře jen tehdy, když se postupným chlazením neúměrně zmenší průřez plastického jádra. Tento princip lze použít jen u hmot s dobrou tekutostí. x 2

Lepší řešení představuje vtoková soustava s *vytápěným rozváděcím blokem*, u které je deska, ve které jsou umístěny vtokové kanály, zahřívána přídavným topením. Teplota v rozváděcím bloku je řízena tepelným regulátorem. Představuje vlastně jakési prodloužení tavicí komory až ke vtokovým vložkám ve formě. Vytápěná deska musí být od ostatních chlazených částí formy i od upínací desky dobře izolována. Kritickým místem jsou ústí vtoku do tvarových dutin. Jejich teplota musí být tak vysoká, aby tavenina zůstávala dostatečně plastická pro další cyklus, ale současně aby umožňovala tuhnutí hmoty v tvarové dutině. Kombinací obou způsobů představuje *dotápěný vtok*. V podstatě se jedná o izolovaný kanál, ale tavenina v ústí vtoku je vyhřívána elektrickým topným tělesem s malým průměrem. Teplota je udržována opět samostatným regulátorem.

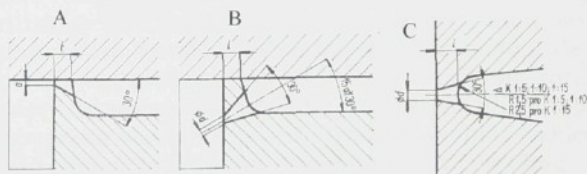
K těmto systémům se řadí, stejně jako u jednonásobných forem, i horké trysky, které se použijí pouze ve větším počtu přes rozvaděče potřebných velikostí

V současné době se používá, hlavně pro výrobu velkoplošných výlisků tvaru nárazníku nebo palubní desky, *kaskádový vtok*, který nahradil vícebodové vstřikování na jednom plastovém dílu. Princip spočívá v tom, že středový vtok i boční vtoky plní plastový díl najednou a přitéklá tavenina plastu od středního předimenzovaného vtoku pomáhá tečení u bočních vtoků (otevření nastane buď tlakem doteklé taveniny a nebo programově), čímž se zabrání vzniku studených spojů a plnění je mnohem dynamičtější.

Jak již bylo uvedeno, tak vtokový systém je tvořen jednoduchými nebo složitějšími vtokovými kanály, které končí na výrobku *ústím vtoku*. Dimenzování ústí vtoku musí respektovat základní požadavek zhotovit výrobek žádaného tvaru v maximální kvalitě. Výrobky musí vykazovat nejen požadované mechanické a fyzikální vlastnosti, ale nesmí obsahovat vysoká vnitřní pnutí, ani propadliny, spálená místa, deformace tvaru a jiné povrchové vady. To vyžaduje, aby ústí vtoku zatuhlo teprve ve vhodnou chvíli, kdy dotlak proběhl v optimálním režimu. Protože je vnitřní pnutí vždy maximální v okolí ústí vtoku, nemá vtok do dutiny ústit v místě, kde bude výrobek vystaven namáhání na ohyb nebo rázem, protože pak snadno může vzniknout trhlinka.

Dalším požadavkem je, aby se dal vtok od výstřiku snadno oddělit a aby byl co nejméně narušen vzhled výrobku a nemuselo se ústí vtoku dodatečně začišťovat. Ústí vtoku má být umístěno tak, aby tavenina postupující dutinou formy z ní plynule vytlačovala vzduch dělicí rovinou nebo odvodušňovacími kanálky. U výstřiku s nestejně tlustou stěnou musí kanál ústit do místa, kde je stěna nejtlustší a kde plastické jádro zaručuje dostatečně dlouhou dobu dotlaku.

Ústí vtoku lze u dvojdeskových forem řešit jako *šterbinové*, které je sice výrobně nejjednodušší, ale vyžaduje dodatečné odstranění vtoku od výstřiku. U třideskových forem mohou být rozváděcí kanály napojeny na dutiny formy *bodovým ústím*. Vtokový zbytek se potom oddělí od výrobku hned při otevírání formy. Nevýhodu vícedeskového uspořádání řeší tzv. *tunelový vtok*, u něhož je ústí vtoku vedeno pod řeznou hranou tvárníku a vtok je odstráněn při vyhazování výstřiku z formy. Příklady řešení ústí vtoku jsou ukázány na obr. 2.40.



Obr. 2.40: Nejčastější způsoby řešení ústí vtoku na výrobcích z plastů / 1/

A – boční šterbinové ústí, B – tunelové ústí, C – přímé bodové ústí

2.5.1.2. Temperační systém vstřikovacích forem

Pro zajištění opakovatelnosti výroby musí hmota v dutině formy zchladnout z technologického a ekonomického hlediska co nejrychleji a proto vstřikovací formy obsahují *temperační systém*. Temperačním systémem se rozumí systém kanálů a dutin, umožňujících přestup a prostup tepla z taveniny do formy a temperovací kapaliny. S ohledem na vlastnosti výrobku by bylo žádoucí, aby se hmota ochlazovala ve všech místech stejnou rychlostí. To vyžaduje, aby teplota dutiny formy byla ve všech místech stejná čili aby teplotní pole ve formě bylo homogenní. Důsledky nerovnoměrného ochlazování se projevují např. tím, že hmota na chladnějších místech formy tuhne rychleji, než-li na místech teplejších a v těchto místech se vytváří tlustší povrchová vrstva ztuhlé hmoty, čímž se však zmenšuje volný průřez, kterým proudí tavenina do dalších částí dutiny. Forma je potom plněna v různých místech při nestejných technologických podmínkách a to se projevuje i nestejnými vlastnostmi výstřiku v těchto místech. Podobný účinek má i nestejná teplota obou částí formy, tj. pevné a pohyblivé části. Jestliže je jedna část teplejší, než-li druhá, hmota na chladnější straně tuhne rychleji a rychleji se také smršťuje a výsledkem je deformace výstřiku, protože vlivem různých teplot došlo k posuvu tepelné osy ve výstřiku a to na stranu teplejšího povrchu formy. Projevem nerovnoměrného chlazení je také vznik vnitřních pnutí, která mohou dosáhnout takových hodnot, že se na výrobku začnou samovolně tvořit trhliny, ale i rozdílný stupeň orientace.

Teplota formy se udržuje na požadované výši pomocí chladicího média, které protéká soustavou chladicích kanálů. Do teploty formy asi 90 °C se jako temperačního média používá voda, při vyšších teplotách formy olej nebo glykol. Správně navržený systém zajišťuje optimální rozložení teplot na povrchu tvarové dutiny formy jak z hlediska místa, tak i času.

Dnešní moderní stroje umožňují velmi krátké pracovní cykly, kterým se musí přizpůsobit i konstrukce a provedení temperovacích kanálů. Temperační systém formy tedy má být navržen tak, aby zaručoval maximální intenzitu i maximální rovnoměrnost výměny tepla ve formě. Bývá rozdělen do dvou dílčích okruhů, a to na okruh pro pevnou neboli vtokovou část formy a na okruh pro pohyblivou část. Každý z okruhů se dále může dělit na podokruhy, které se řeší podle způsobu zaformování výstřiku ve formě a podle polohy dělicí roviny. Výkon temperačního systému lze zvýšit buď zvětšením rozdílu teploty formy a teploty temperační kapaliny, kdy však příliš nízká teplota temperačního média vede ke zhoršení kvality výrobku (vzhledové vady, trhliny, apod.) nebo vytvořením podmínek pro zvětšení součinitele přestupu tepla mezi kanálem a kapalinou. Intenzivního odvodu tepla v kanálech se dosahuje nuceným prouděním temperační kapaliny, přičemž její rychlost má být taková, aby proudění bylo turbulentní. Současné formy pro velké výrobky, např. pro nárazník, mají tzv. injekční vstřikování temperačního média, kdy je kapalina vstřikována do temperačního systému vysokou rychlostí pro zajištění co nejvyšší

turbulence. Tento systém je v poslední době vylepšen o možnost vhnát takto kapalinu do jednotlivých míst formy v různém čase v závislosti na toku taveniny plastu..

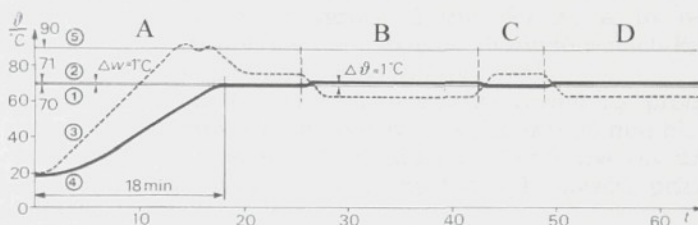
Rozmístění temperačních kanálů a jejich rozměry je nutno navrhnout s přihlédnutím k celkovému řešení formy, např. umístění vtokové soustavy, vyhazovacích systému, tvarových vložek a jiných dílů, ale i k požadavku na těsnost temperačního okruhu. Základní rozdělení rozmístění temperačních kanálů je buď sériové nebo paralelní. Vzdálenost kanálů od lícе formy má být navržena tak, aby nedošlo k porušení povrchu tvarové dutiny formy a aby v tvarové dutině nevznikala podchlazená místa. Důležité je i výrobní hledisko. Doporučuje se vzdálenost 1 až 6 D , kde D je průměr kanálu. Na vzdálenosti závisí přípustný rozdíl teplot na lici formy. Čím je vzdálenost kanálů od povrchu menší a čím je rozteč mezi kanály větší, tím větší jsou rozdíly mezi nejvyšší a nejnižší teplotou ve formě. Jako vhodná se doporučuje rozteč 2 až 5 D . Výhodnější je použít větší počet malých kanálů, než-li naopak. Kolem dutiny formy se kanály rozmísťují rovnoměrně a v optimálním případě je jejich vzdálenost od lícе formy všude stejná. Pouze tam, kde je třeba zvýšit intenzitu chlazení, např. v okolí ústí vtoku nebo v rozích výstřiku či v místech s tlustou stěnou, se kanály přiblíží lici formy nebo se zmenší vzdálenost mezi nimi.

Průřez kanálů se volí zpravidla kruhový a bývá 6 až 20 mm. Neúměrné zvětšování průměru však není vhodné, zejména proto, že má-li být zachováno turbulentní proudění, zvětšuje se množství cirkulující kapaliny, což vyžaduje výkonné čerpadlo. Kromě toho mohou kanály velkých průměrů nepříznivě ovlivnit pevnost formy. Vedle kruhových kanálů se používají i kanály s obdélníkovým průřezem. Celková délka kanálů má být taková, aby rozdíl teplot temperační kapaliny na vstupu a na výstupu byl dostatečně malý. Za optimální se považuje rozdíl 3 až 5 °C.

Směr proudění kapaliny se volí s přihlédnutím k možné rozdílné rychlosti odvodu tepla v různých místech formy. Kapalina se má přivádět do míst, kde jsou podmínky pro odvod tepla nejméně příznivé. Směr tečení temperačního média se má volit tak, aby umožnil dobré plnění dutiny formy a neomezoval působení dotlaku. Obecně platí, že hmota má v dutině formy tuhnout od nejvzdálenějšího konce směrem ke vtoku. Z toho vyplývá, že temperační kapalina s relativně nízkou teplotou se má přivádět na vnější konec výstřiku a odtud teprve do prostoru u vtoku. Tím se jeho teplota poněkud zvýší a ochlazování hmoty v okolí vtoku není tak intenzivní. Na druhé straně toto všeobecné pravidlo neplatí, protože u forem s horkými kanály je nutné přivést temperační kapalinu nejdříve do blízkosti horkých trysek. Intenzita odvodu tepla také závisí na kvalitě povrchu temperačních kanálů, které nesmí být znečištěny rzi a usazeninami, které účinnost snižují.

Dnešní vstřikovací formy jsou pro zvýšení kvality výrobků, pro možnost zpracování některých druhů plastů a pro zkrácení doby vstřikovacího cyklu vybavovány temperačními přístroji s uzavřeným

oběhem, které dokáží pracovat s přesností 0,5 °C a které zlepšují nejenom celkovou životnost formy, povrch výrobků a jejich tolerance, ale snižují i procento zmetků a zvyšují produktivitu až o 20 %. Tyto zařízení jsou vybaveny přesnými regulátory teploty a výkonnými čerpadly, neboť rozdíl teplot mezi teplotou formy a teplotou temperačního média se cyklicky mění na základě probíhajícího vstřikování (viz. obr. 2.41). Na počátku je potřebné formu vyhřát a posléze regulovat teplotu tak, že při každém zvýšení teploty formy musí dojít k ochlazení temperačního média. V neposlední řadě regulátory teploty a čerpadla ovlivňují rozdíl teplot na vstupu a na výstupu, který je závislý na množství temperačního média a na jeho rychlosti a tento rozdíl klesá s růstem obou parametrů. Dále změnou průřezů hadic temperační přístroje kompenzují pokles tlaku v temperačním systému a přísadou inhibitorů snižují množství koroze temperačních kanálů. Použití temperačních přístrojů je závislé na správném navržení temperačního systému.



Obr. 2.41: Přímé řízení teploty vstřikovací formy pomocí temperačního přístroje / 24/

A – rozběhová fáze (topení), B – vstřikovací cyklus (chlazení), vyhození výstřiku (topení), 3 – teplota temperačního média, 4 – teplota formy

2.5.1.3. Vyhazovací systém, odvzdušnění a povrch vstřikovacích forem

Mimo výše popsaných hlavních částí obsahují vstřikovací formy i různé *mechanismy pro vyhazování výstřiků*, protože výrobky se při ochlazování smršťují a zůstávají na tvarových součástech formy. Nejčastější způsob vyhazování výstřiků je mechanický princip buď pomocí vyhazovacích kolíků nebo pomocí stíracích desek, stíracích kroužků, popř. pomocí trubkového vyhazovače. U masivních výstřiků a u výstřiků, u kterých nevadí stopy po vyhazovačích, se používají vyhazovací kolíky. U tenkostěnných výstřiků s nebezpečím deformace nebo prolomení stěny se používají stírací desky nebo stírací kroužky. Někdy se pro vyhazování používá i stlačený vzduch, zvláště u hlubokých tenkostěnných výstřiků. V řadě případů se jednotlivé způsoby kombinují.

Kromě vyhazování výstřiků dochází u některých forem i k vyhazování vtokových zbytků, ke kterému se používají stejné systémy jako pro vyhazování výrobků a navíc se k ovládání mezidesky používají programové tyče, háky, řetězy apod. Na rozdíl od vyhazovacího systému formy se vyhazovací systém pro vtokový zbytek může umístit i do pevné části formy. K odtržení výrobku od vtokového systému slouží přídržovače vtoků.

Vyhazovací síly a jejich výpočet se odvozuje od měrných tlaků mezi formou a výstřikem, kdy síla na vyhození bude záviset na pružnosti tvárnice a tvárnice, na průběhu tlaků a teplot během vstřikování, na rozměrech výstřiku a na teplotní závislosti koeficientu tření mezi oběma plochami.

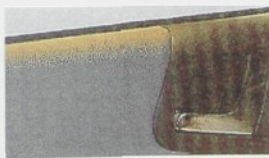
Odvzdušnění u vstřikovacích forem je velmi důležité, protože doba vstřiku je velmi krátká a mohlo by dojít k nedokonalému vyplnění tvarové dutiny taveninou plastu, k nebezpečnému zvýšení tlaku, k poklesu pevnosti v místech studených spojů nebo k tzv. diesel efektu, kdy může dojít až ke spálení materiálu. Proto je nutné zajistit intenzivní odvod vzduchu z tvarové dutiny formy, a to nejenom netěsnostmi v dělicí rovině, ale i konstrukcí odvzdušňovacích kanálků, které však nesmějí být příčinou vzniku otrepů.

Odvzdušnění má být provedeno v dělicí rovině na protilehlém místě vtoku. Odvzdušňovací kanálky bývají 0,02 až 0,05 mm hluboké a cca 5 mm široké. Na dostatečné odvzdušnění formy má vliv umístění vtoku, způsob zaformování výstřiku, umístění vyhazovačů, přítomnost tvarových vložek, apod.

Povrch tvarových dutin se liší podle toho, zda budou výrobky použité jako vzhledové nebo „pouze“ jako součást automobilu. Úpravy vzhledu povrchu plastových dílů (také viz. kap. 2.7) se provádějí pro zvýšení estetičnosti a odráží úroveň vybavy a komfortu vozu. V neposlední řadě slouží dezén k tomu, aby se snižovaly odlesky od slunečního záření a tím se nezhoršoval výhled z vozu. Dezén výrazně ovlivňuje úkosy potřebné pro vyjmutí z formy, kdy pro lesklý povrch jsou doporučeny úkosy 0,5 až 1°, ale pro jemný dezén se doporučuje 3 až 5° a pro hluboký dezén 5 až 7°. Ukázka dezénu v automobilu *Škoda Octavia* je na obr. 2.42. Nejčastěji se povrch tvarových dutin leští, příp. se chemicky upravuje, aby nedocházelo při zpracování některých hmot (např. PVC) ke korozi, ale zvláště v automobilovém průmyslu se může na vzhledových stranách vytvářet dezén (viz. obr. 2.43), kdy je na tvarových částech vyleptán negativní obraz dezénu.



páhbní deska



obložení dveří



Obr. 2.42: Dezén na dílech vnitřního vybavení – *Škoda Octavia*

hluboký dezén – tzv. imitace kůže (vlevo - Seat Cordoba Vario, vpravo VW - Sharan)



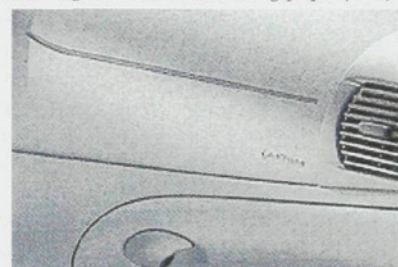
lesklý dezén – tzv. grafit (VW Golf Variant) vypěněný plast – tzv. kůra stromu (Audi A3)



jemný dezén – tzv. imitace kůže (Alfa Romeo)



matný dezén – tzv. tvrzený papír (Fiat)



Obr. 2.43: Vybrané ukázky typů dezénu

2.5.2. Nástroje pro lisování

Lisovací formy můžeme stejně jako i ostatní nástroje rozdělit na jednonásobné nebo vícenásobné. *Jednonásobné* lisovací formy se používají pro lisování velkoplošných nebo velkých výlisků nebo tehdy, pokud se nevyplácí konstruovat vícenásobnou formu. Násobnost formy se volí podle toho, kolik výrobků je nutné vyrobit za jednotku času, podle lisovací síly lisu a podle velikosti výrobku.

Formy pro zpracování reaktoplastů se dělí podle toho, zda jde o formy pro lisování nebo přetlačování a dále se dělí podle konstrukce na:

♦ *blokové formy*, které jsou většinou jednonásobné a používají se k lisování velkých výlisků,

♦ *vložkové formy*, které jsou vícenásobné a slouží k výrobě malých výlisků, kdy jednotlivé tvarové části jsou vloženy do kotevní desky,

♦ *čelistové formy*, které se používají pro lisování výlisků s nepravidelnými tvary, výstupky, které by jinak nebylo možné vyjmout ve směru lisování a podle způsobu otevírání se dělí na *klinové*, *nůžkové* a *sklápěcí*,

♦ *skládané formy*, které se používají tam, kde nestačí formy čelistové.

Cena formy roste se složitostí výlisku a zároveň se i konstrukčně složitější formy mnohem více opotřebovávají, než-li formy jednoduché.

Stejně jako u vstřikovacích forem, tak i u lisovacích forem lze jednotlivé části rozdělit do dvou skupin, a to na části konstrukční a na části funkční. *Konstrukční části* (zabezpečují správnou činnost nástroje) lisovací formy jsou:

♦ *upínací desky*, které slouží k uchycení formy na stůl a beran lisu a podkládají se izolačními deskami pro snížení přestupu tepla mezi formou a lisem,

♦ *kotevní desky*, které slouží k upevnění tvářecích částí formy,

♦ *opěrné desky*, které se používají k podložení tvářecích částí a zabraňují jejich zamačkávání do nástroje,

♦ *topné desky*, ve kterých jsou zabudovány topné spirály,

♦ *rozpěrky*, které vymezují mezeru mezi upínací deskou a formou pro správnou funkci vyhazovacího systému,

♦ *dorazy*, které slouží k přesnému vymezení dráhy pohyblivých částí formy,

♦ *vodící části*, které vedou pohyblivou část formy proti pevné a navzájem je vůči sobě středi (vodící kolíky, sloupky).

a *funkční části* (stýkají se s tvářeným materiálem a udělují mu požadovaný tvar) lisovacích forem jsou:

♦ *tvárník*, který vytváří vnitřní povrch výlisku,

♦ *tvárnice*, která vytváří vnější povrch výlisku,

♦ *jádro*, pokud je součástí formy, tak tvoří dutinu ve výlisku buď ve směru otevírání formy a nebo na boku výlisku,

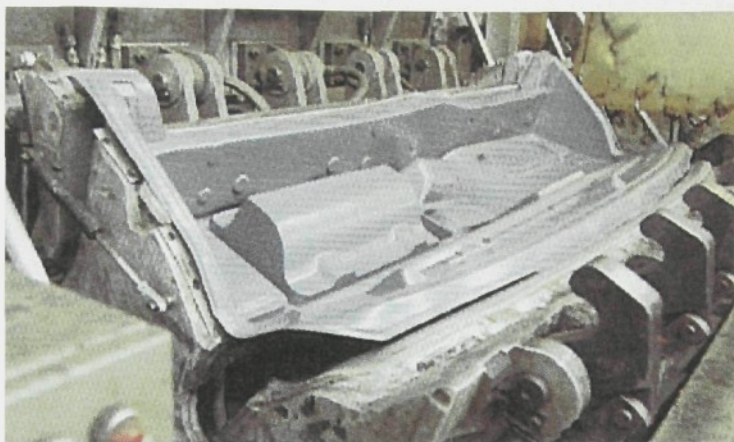
♦ *součásti pro tváření závitů*, které vytvářejí závit na výrobku.

Pohled do lisovací formy pro zpracování SMC polotovaru při tváření vnitřního obložení je ukázán na obr. 2.44.

Kromě výše popsaných částí jsou nezbytnou součástí lisovacích forem i vyhazovací mechanismus a vytápění.

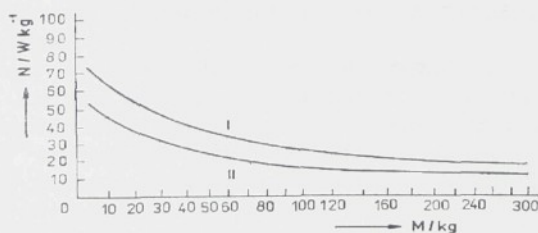
Vyhazovací mechanismus slouží k vyhození výlisku a je umístěn v té části formy, ve které zůstává výrobek. K vyhození se používá rozdílných způsobů a mechanismů, mezi které např. patří vyhazovací kolíky, stirací deska nebo kroužek, vyhazovací (programová) tyč a ovládání těchto mechanismů je odvozeno buď od pohybu beranu lisu

nebo přes stopku stroje. Někdy se používá i vyhození výrobku ručně stlačeným vzduchem. Tvarové části vyhazovacích systémů se umísťují, pokud to tvar a konstrukce výlisku dovolují, většinou pod zálsky, pod tvarové vložky apod., aby nedošlo k zanechání stop na výrobku.



Obr. 2.44: Lisovací forma pro výrobu plošného výlisku

Vytápění forem se nejčastěji provádí elektrickým odporovým topením, kdy topná tělesa mají buď tvar válce a nebo tvar prstence (pásu) a nebo se kombinují oba dva způsoby. Vytápění musí zajistit rovnoměrné prohřátí všech tvarových částí formy, ale nesmí formu přehřívát, aby nedošlo ke spálení materiálu. V praxi se doporučuje, aby z hlediska správné tepelné stability byla hmotnost tvářecích částí asi 300krát vyšší, než-li hmotnost výlisku. Celkový příkon topných těles se určuje na základě hmotnosti formy (viz. obr. 2.45).



Obr. 2.45: Graf pro stanovení měrného příkonu $N / W.kg^{-1}$ / topných těles podle hmotnosti vytápěné části formy M / kg / / 1/ I – vnější prstencové topné patrony, II – vnitřní topné patrony

Při konstrukci lisovací formy se musí dbát na správné umístění vtoku, na jeho velikost a na tvar ústí vtoku, ale také na správné odvědušnění formy. Ústí vtoku se nejčastěji umísťuje do nejtlustší části výrobku a na snadno přístupné místo. Velikost ústí závisí na lisovaném materiálu, na velikosti vylisku a na lisovacím tlaku. Ústí vtoku se zvětšuje s viskozitou taveniny a s procentem plniva v materiálu. Tvar ústí je většinou kruhový nebo obdélníkový. Odvědušňovací kanálky umožňují únik vzduchu, vlhkosti a tekavých produktů při plnění dutiny formy. Odvědušnění se provádí buď přes dělicí rovinu s využitím přetokových kanálků a nebo přes otvory spojené do kanálků, které jsou obvykle na opačné straně, než-li je ústí vtoku a ústí na vnější straně formy.

2.5.3. Nástroje pro vyfukování

Vyfukovací formy se podle velikosti výrobku a použitého materiálu dělí na *jednásobné* nebo *vícenásobné*. Formy pro menší dutá tělesa se konstruuji jako dvoudílné, pro větší výrobky jsou tvarové části složeny z více prvků.

Dutina vyfukovacích forem se konstruuje tak, aby odpovídala vnějšímu tvaru výrobku a rozměry se stanoví s ohledem na smrštění zpracovávané hmoty. Hrany a rohy musí být zaobleny co největšími poloměry (min. 1/10 průměru tloušťky nádoby nebo trojnásobek tloušťky stěny). Dělicí rovina se umísťuje u rotačních těles do meridiánového řezu, u ostatních těles do roviny souměrnosti.

Dosedací plochy vyfukovacích forem musí být přesně slicovány, aby nedošlo k přesazení v dělicí rovině a nebo ke vzniku stop na výrobku. U forem z neželezných kovů se dosedací vložky dělají ocelové a musí být tepelně úpraveny.¹ Vyfukovací formy musí být dobře odvědušněny, neboť dochází ke ztrátě lesku, nedotvarování, apod. Odvědušnění se provádí většinou dělicí rovinou pomocí štěrbin, jejichž hloubka nesmí přesáhnout 0,1 až 0,2 mm, aby nedocházelo k vzhledovým vadám a tyto štěrby ústí do sběrných kanálků. U větších vložkovaných forem se odvědušnění také může provést pomocí porézních vložek.

Chlazení vyfukovacích forem se provádí pomocí chladicích kanálů, ve kterých se jako temperačního média nejčastěji používá voda. Chlazení musí být intenzivní, a to i přesto, že teploty polotovaru jsou oproti vstřikování nižší, aby se co nejvíce zkrátil cyklus vyfukování. Ovládání formy (otevírání a zavírání) je většinou hydraulické.

Materiály^{nástroje} používané pro vyfukování, závisí na velikosti formy a na vyfukovacím tlaku. Většinou se používá ocel a neželezné kovy, nejčastěji hliník, který je výhodný i z hlediska odvodu tepla. Na svařovací hrany, dosedací plochy a tvarové části hrdel se používá kalená ocel.

2.5.4. Tvarovací formy

K přednostem tvarování termoplastických desek patří možnost používat jednoduché a zpravidla jednodílné tvarovací formy, protože funkci druhého dílu přejímá okolní přetlak vzduchu. Tvarovací síly jsou malé, a proto formy mohou být z málo pevných materiálů. Volba konkrétního materiálu závisí na dalších okolnostech, jako je geometrický tvar výtažku, požadovaná kvalita jeho povrchu a velikost série. Materiál forem musí snést alespoň krátkodobě teplotu v rozmezí od 20 do cca 200 °C. Používají se neželezné kovy, ocel, ale i sádra a dřevo.

Sádrové formy se hodí jen pro zhotovení několika kusů výtažků, např. při ověřovacích zkouškách, protože sádra vlivem teplotních změn snadno praská. Dřevěné formy jsou trvanlivější, ale kvalita jejich povrchu se postupně zhoršuje se střídající se teplotou. Naproti tomu formy z tvrzené tkaniny mají životnost až 20000 pracovních cyklů, ovšem podobně jako u dřeva je obtížné leštěním dosáhnout hladkého povrchu. Z tohoto hlediska je lepší tvrzené dřevo. Formy vyrobené odléváním epoxidových pryskyřic mají kvalitní povrch i dobrou rozměrovou stabilitu. Špatná tepelná vodivost samotných epoxidů se zlepši přidávkou litinového nebo hliníkového prášku nebo se do formy zalijí měděné trubky, kterými protéká chladicí kapalina. Pro velké série jsou nevhodnější formy z lehkých slitin. Vyrábějí se většinou odléváním a dodatečným obrobením funkčních ploch. Ocelové formy jsou nejtrvanlivější, ale používají se málo.

Formy musí být opatřeny odsávacími otvory, které spojují prostor dutiny formy pod tvarovanou deskou se zásobníkem a s odsávacím zařízením. Otvory jsou rozmístěny rovnoměrně po celém funkčním povrchu formy, aby nedošlo k uzavření zbytku vzduchu v některém místě dutiny, ale mohou být rozmístěny i nerovnoměrně hlavně v těch místech, kde chceme polotovar intenzivněji tvarovat oproti ostatním místům. Otvorů musí být dostatečný počet a musí mít i správný průměr. Ten závisí na druhu plastu a na tloušťce tvarované desky. Mají-li otvory příliš velký průměr, zůstanou na výtažku jejich otisky, které zhoršují vzhled výtažku. Udává se, že průměr kanálku nemá být větší než polovina tloušťky tvarované desky, avšak i u tenkých fólií se většinou používají kanálky s průměrem asi 1 mm a to s ohledem na jejich výrobu. U polyolefinů (PE, PP), které se vyznačují velmi dobrou tvarovatelností, se volí odsávací otvory co nejmenšího průměru, např. 0,4 až 0,5 mm, a to i u tlustších desek. U desek z PVC mohou mít průměr větší. Vzájemná vzdálenost odsávacích otvorů bývá na rovných plochách 75 až 150 mm, na hranách však jen 20 mm. Vždy je výhodnější použít větší množství malých kanálků, než-li malého počtu velkých. Optimální počet kanálků v závislosti na odsávaném objemu se určuje pomocí grafů. V některých případech lze kanálky s úspěchem nahradit odsávací šterbinou.

Podle velikosti výtažků se formy navrhují jako *jednonásobné* nebo *vícenásobné*. Vzdálenost mezi tvárníky u vícenásobných forem má být u pozitivního tvarování (tedy na tvárník) rovna nejméně 50 % jejich

výšky, ale doporučuje se 100 % výšky. U negativního tvarování (na tvárnici) lze umístit dutiny velmi blízko sebe, protože nedochází ke zvlnění. Aby se zvýšilo využití desky, pokládá se někdy na polotovary speciální mříž, která desku přidržuje v místech mezi jednotlivými výtažky při pohybu vícenásobných tvárnků vzhůru.

Vzhledem k nenáročnosti tvarovacích forem je jejich cena u srovnatelného výrobku asi pětkrát až desetkrát nižší, než-li u vstřikovací formy.

2.6. KLASIFIKACE VAD, JEJICH FYZIKÁLNÍ PŘÍČINY A MOŽNOSTI JEJICH ODSTRANĚNÍ

Při výrobě plastových dílů pro automobilový průmysl, a nejen pro něj, dochází k tomu, že se na výrobcích objevují v různém množství rozdílné typy vad, které lze rozdělit do dvou skupin.

První skupinou jsou vady zjevné (povrchové vady), které lze zjistit při vizuálním pozorování a dělí se do následujících skupin:

- vady tvaru, mezi které patří nedostříknuté výrobky, bubliny (propadliny), přetoky, vlákna u vtoků, stopy po vyhazovačích, trhliny na povrchu, zborcení, přetoky aj.,

- vady povrchu, např. šmouhy (barevné), tokové čáry, matný povrch, stříbření (šířovitost vzduchem a vlhkostí), studené spoje, vady z rozjíždění, poškrábaný povrch apod.

Druhou skupinou jsou vady skryté (vnitřní vady), které negativně ovlivňují vlastnosti výstřiku a jsou nebezpečné z aplikačního hlediska. Patří jsem nerovnoměrná orientace makromolekul, krystalizace, vnitřní pnutí a výskyt lunkrů.

Vada výrobku je tedy defekt, kterým se liší vzhled, rozměry, tvar a vlastnosti od předem stanoveného standardu. Zdroje vad mohou být ve zpracovávaném plastu, v konstrukci výrobku, stroji, formě a zejména ve zvolených technologických podmínkách.

Objevují se i některé další druhy vad (např. rozvrstvování, tmavé body na povrchu, místní spálení materiálu, zvrásnění, atd.), ty však zaujímají v celkovém objemu velmi malé procento a například v posledním období dvou let nebyly v a. s. *Peguform Bohemia* vůbec zaznamenány. Největším problémem současnosti jsou vlákna u vtoků (tzv. vlasy), nedostříknuté výrobky a lesklé skvrny.

2.6.1. Lesklé skvrny, rozdíly v lesku

Při zhodnocení dojmu lesku výrobků se rozlišují výrobky, které jako celek vykazují příliš vysoký lesk resp. malý lesk a výrobky, které na povrchu nemají jednotný lesk (viz. obr. 2.46). Rozdíly v lesku se např. často vyskytují u změn tloušťky stěny na vzhledové ploše, nebo pod vyhazovači, kde plocha výstřiku vykazuje nápadný lesk.



Obr. 2.46: Ukázka rozdílů v lesku na výrobku

Fyzikální příčinou je reflektující vlastnost jeho povrchu vůči dopadajícímu světlu. Dojem lesku je maximální, jeli povrchová drsnost výstřiků co nejmenší. Z tohoto důvodu má tedy být zobrazení leštěné stěny formy co nejlepší, dezénované stěny formy horší. Příčinou rozdílu lesku je rozdílné zobrazovací chování plastu na stěně formy, které je způsobeno rozdílnými poměry ochlazování nebo rozdíly smrštění. Např. nedostatečným chlazením ve vyhazovačích nebo ve vložkách dochází k místnímu přehřátí nástroje a tedy výstřiku. Tím se zvýší smrštění a dojde k oddálení výrobku od stěny formy. Deformace již silně ochlazených míst je potom jednou z příčin rozdílu lesku.

Možnosti řešení se liší podle toho, kde se rozdíl lesku objeví. Pokud je příliš malý lesk na strukturovaném povrchu výrobku je nutné:

- ◆ snížit teplotu taveniny,
- ◆ snížit rychlost vstřiku,
- ◆ odstranit jemnou strukturu povrchu,
- ◆ snížit teplotu stěny formy.

Při rozdílu lesku u vyhazovačů nebo u čelistí je nutné:

- ◆ snížit čas a velikost dotlaku,
- ◆ rovnoměrné temperování nástroje,
- ◆ změnit systém nebo tvar vyhazovače.

Při rozdílu lesku v okolí studených spojů je potřeba provést:

- ◆ zvýšit teplotu stěny formy,
- ◆ zvýšit rychlost vstřiku,
- ◆ změnit umístění vtoku.

Při rozdílném lesku v rozích výrobku je nutné:

- ◆ snížit teplotu stěny formy ze strany jádra,
- ◆ změnit geometrii rohů (zvětšit rádius),
- ◆ provést tepelné dimenzování formy.

Při rozdílu lesku na žebrech a žebrovaných plochách se doporučuje:

- ◆ optimalizovat čas dotlaku a nebo zvýšit dotlak,
- ◆ změnit tvar výrobku,
- ◆ provést tepelné dimenzování formy.

Při rozdílech lesku na přechodech tloušťky stěny je nutné:

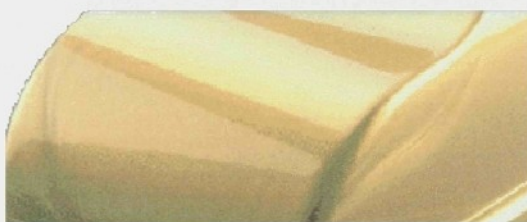
- ♦ optimalizovat čas dotlaku a nebo zvýšit dotlak,
- ♦ přizpůsobit vstřikovací profil geometrii formy,
- ♦ pokusit se o plynulé změny tloušťky stěny.

Pokud se nepodaří velké plochy, které se vzájemně liší v lesku a nebo skvrny s odlišným leskem odstranit, doporučuje se:

- ♦ změnit materiál,
- ♦ kontrola sušení,
- ♦ kontrola temperačního systému formy,
- ♦ zmenšit poměr plniva vůči matici (např. procento skleněných vláken).

2.6.2. Barevné šmouhy (barevná šířovitost)

Barevná šířovitost vzniká nerovnoměrným rozdělením používaných složek nebo rozdílným nasměrováním barevných pigmentů při proudění (tečení) plastu (viz. obr. 2.47). Rovněž termická poškození taveniny plastu resp. vysoké smykové deformace mohou způsobit změnu barvy nebo rozdíly v barvě. Znakem je špatné zabarvení a šmouhy ve směru toku materiálu.



Obr. 2.47: Ukázka barevné šířovitosti na výrobku

Fyzikální příčinou je např. při barvení pigmenty aglomerace částic pigmentů v rozdílné koncentraci a toto nevhodné rozdělení může být způsobeno plastem, zpracovatelskými parametry, aditivy nebo jinými přísadami. Při barvení barvivem mohou být vady způsobené neúplným rozpouštěním částic barviva v tavenině. Pigmenty a barviva jsou stejně jako termoplasty při překročení zpracovatelské teploty nebo doby tavení termicky choulostivé. Bude-li jako příčina zjištěno termické poškození, je třeba šmouhy brát jako spálené šmouhy. Velké deformace výrobků mohou být také příčinou barevných rozdílů, protože jinak velké deformace lámou světlo odlišně od okolních oblastí.

Možnosti řešení se liší podle toho, zda lze zvýšit smykové namáhání materiálu, či nikoliv. Pokud ano, tak je nutné:

- ♦ zvýšit tlak a přizpůsobit otáčky,
- ♦ zvýšit vstřikovací rychlost.

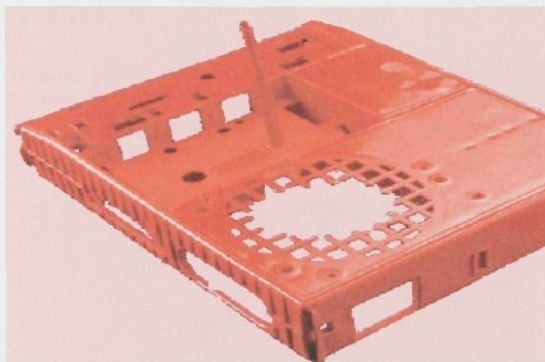
Pokud ne, tak je potřeba použít menší vtok.

Kromě těchto možností, souvisejících se smykovou rychlostí, je možné změnit následující parametry:

- ◆ snížit teplotu válce,
- ◆ redukovat odpor šneku,
- ◆ zkrátit dobu cyklu (dobu chlazení),
- ◆ plastikovat se zpožděním,
- ◆ předsoušet materiál,
- ◆ změnit materiál.

2.6.3. Neúplné výrobky

Tato vada je nejvíce patrná, neboť vnější obrysy výrobku nejsou zcela uzavřené, tvarová dutina nebyla úplně zaplněna. Vyskytuje se zvláště v těch případech, kdy jsou místa daleko od vtoku při dlouhých dráhách tečení nebo v oblasti tenkostěnných míst, např. žeber (viz. obr. 2.48). Tlaková ztráta v nástroji je příliš velká a nebo tavenina zamrzá dříve, než je zaplněna tvarová dutina formy. Může se také stát, že objem vstřiku je příliš malý. Neúplný výstřik může vzniknout i vlivem nedostatečného odvzdušnění formy.



Obr. 2.48: Ukázka nedostříknutého dílu

Fyzikálních příčin je několik a mohou se shrnout do následujících bodů:

- ◆ příliš malá dávka plastu,
- ◆ omezený tok taveniny plastu vlivem nedostatečného odvzdušnění formy,
- ◆ nedostatečný tlak stroje,
- ◆ předčasné zatuhnutí vtokového systému.

Možnosti řešení jsou:

- a) pokud je šnek na předním dorazu, potom je nutné
 - ◆ zvětšit dávkování,
 - ◆ přejít na větší průměr šneku,

- ♦ provést kontrolu zpětné uzávěrky.
- b) bylo-li dosaženo omezení vstřikovacího tlaku, potom je potřeba
 - ♦ zvýšit omezení vstřikovacího tlaku,
 - ♦ zvýšit teplotu taveniny.
- c) objeví-li se v tlakovém průběhu fáze plnění tlakový skok, pak je nutné
 - ♦ pozdější přepnutí na dotlak,
 - ♦ zvýšit tlak přepnutí,
 - ♦ prodloužit dráhu přepnutí,
 - ♦ prodloužit dobu přepnutí.

Další možná řešení jsou:

- ♦ změnit rychlost pohybu šneku vpřed,
- ♦ zvýšit teplotu stěny formy,
- ♦ zlepšit odvodu vzduchu stěny formy,
- ♦ provést korekci vtokového systému,
- ♦ zvolit materiál s vyšším indexem toku taveniny,
- ♦ změnit vtokovou geometrii (zvětšit ústí vtoku),
- ♦ provést kontrolu vrtání trysky a teploty,
- ♦ zvětšit teplotu válce.

2.6.4. Bubliny

Na výrobku, příp. uvnitř výrobku, jsou viditelné duté prostory, které vznikly nasáváním vzduchu nebo tvorbou plynu (viz. obr. 2.49). Na rozdíl od lunek (staženin) se zde jedná o uzavření plynu, který se může projevit také i v blízkosti stěny.



Obr. 2.49: Ukázka bublin na výrobku

Fyzikální příčina spočívá v tom, že během zpracování tavenina uzavírá vzduch, který je na výstřiku patrný jako dutý prostor (vzduchová bublina). V první řadě mohou odpovídat za tuto vadu dvě různé příčiny:

- ♦ příliš velká resp. příliš rychlá dekomprese,
- ♦ malý plastikační výkon,
- ♦ materiál s nízkým indexem toku taveniny,

♦ vysoká zbytková vlhkost v granulátu.

Při pozorování dutin se musí dělat rozdíly mezi uzavřeným vzduchem a lunkry. Lunker je bezvzduchý (vakuový) dutý prostor, který vznikl omezeným smrštěním hmoty. Vizuální rozdíl je vzhledem k podobným projevům velmi těžce určitelný. Při podezření na uzavřený vzduch je třeba neprůhledné díly namátkově rozřezat.

Možnosti řešení a odstranění této vady jsou následující:

- ♦ zpomalit nebo zmenšit dekompresi (zpětný pohyb šneku),
- ♦ přezkoušet přívod granulátu,
- ♦ zvýšit zpětný tlak a přizpůsobit otáčky,
- ♦ zmenšit dávkování,
- ♦ zvýšit účinnost sušení,
- ♦ zvětšit průřezy vtokového systému,
- ♦ zkontrolovat konstrukci výrobku,
- ♦ přezkoušet plastikační jednotku.

2.6.5. Vlákna u vtoků

Při otevření nástroje vytahuje vstřikovaný díl, příp. tyčka vtoku, z trysky stroje nebo z trysky horkého kanálu tenké vlákno materiálu, vznikají tzv. vlasy.

Fyzikální příčina: Během chlazení nedochází k dostatečnému ochlazení mezi vstřikovaným dílem, příp. vtokem, a tryskou. Toto nastane v důsledku příliš malé teplotní difference mezi výstřikem (vtokem) a tryskou a nebo u nástroje s topnými kanály v důsledku velkého vrtání trysky.

Možnosti řešení podle místa utržení materiálu jsou:

- vtokový zbytek se přetrhne v půlce
 - ♦ snížením teploty na dýze (poslední oblast topení ve formě, tam kde končí horký rozvod).
- materiál zatuhne a vytrhne se až v horkém rozvodu
 - ♦ zvýšením teploty na dýze.

Materiál je neustále pod tlakem a pokud ten je příliš veliký, materiál se přilepí na konec vtoku a vytrhne se. Potom je nutné provést následující úpravy:

- ♦ snížení velikosti dotlaku,
- ♦ snížení teploty špičky vstřikovacího válce a zintenzívnění chlazení v oblasti vtokové špičky,
- ♦ použití uzavíratelné špičky.

2.6.6. Stříbření (šlírovitost vzduchem a vlhkostí)

Podoba stříbření (šmouh) – zejména vlhkých a vzduchových - je často málo odlišná. Tato vada představuje pro výrobu výstřiků z plastů velký problém, protože klasifikace pouhým okem je složitá nebo

dokonce nemožná. Proto musí zpracovatel dostávat více informací o materiálu, aby byl schopen stříbrnění identifikovat.

Šlírovitost vzduchem se objevuje většinou jako malá stříbrná nebo bílá šlírovitost a vystupuje často v oblasti žeber a změn tloušťky stěn (viz obr. 2.50 vlevo). V oblasti vtoku může dojít k pruhovitě šlírovitosti směrem od vtoku (viz. obr. 2.50 vpravo). V okolí písma nebo prohloubení se často objevují tzv. vzduchové nosy nebo vzduchové háčky.



Obr. 2.50: Šlírovitosti vzduchem na vybraných výrobcích

Fyzikální příčinou je vzduch, který nemůže být během plnění řádně odvětrán a zůstane na povrchu nástroje ve směru tečení. Vytěsněný vzduch je přelit a uzavřen taveninou. Dochází k tomu především v oblasti žeber, dutin a prohlubní. Pokud je vzduch vtažen do předkomory šneku při jeho odskoku (dekompresi), projeví se to zpravidla šlírovitostí v oblasti vtoku. Vzduch je při procesu zpracování natlačen do dutiny formy a tam zamrzne na ovlivněných částech povrchu.

Možnosti řešení:

Pokud se tvoří vzduchové háčky:

- ◆ přizpůsobit vstřikovací rychlost,
- ◆ vyvarovat se ostrých přechodů,
- ◆ zmenšit hloubku rytí (popisů).

Pokud je šlírovitost blízko u vtoku:

- ◆ snížit rychlost odskoku šneku při dekompresi,
- ◆ snížit dekompresi,
- ◆ použít uzavíratelnou trysku.

Další možná řešení jsou:

- ◆ snížit vstřikovací rychlost,
- ◆ zvýšit odpor šneku,
- ◆ vyvarovat se ostrých přechodů,
- ◆ kontrola těsnosti trysky,
- ◆ změnit místo vtoku.

Šlírovitost vlhkostí se objevuje na povrchu dílů jako otevřený profil ve tvaru *U* proti směru tečení (viz. obr. 2.51). Výrobek vykazuje v oblasti stříbrné šlírovitosti většinou hrubý, porézní povrch. Šlírovitost

vlhkostí, která vznikla díky vlhkosti na povrchu nástroje, se projevuje jako velkoplošná, matná, pruhovitá oblast.



Obr. 2.51: Ukázka šířovitosti vlhkostí na výrobku

Fyzikální příčiny: Při skladování, příp. při zpracování, se váže do nebo na granulát vlhkost a vytváří v tavenině vodní páry. Přes rychlostní profil na čele toku jsou bubliny transportovány na povrch taveniny. Při jejich snaze vyrovnat tlak praskají a jsou postupujícím čelem toku ochlazeny na stěně nástroje. Šířovitost vlhkostí mohou způsobit různé příčiny:

- netěsný systém temperace nástroje,
- zkondenzovaná voda na stěnách nástroje, tj. vlhkost na povrchu nástroje,
- nedostatečné předsušení materiálu,
- špatné uskladnění materiálu, tj. vlhkost v % na kg granulátu.

Možnosti řešení se liší podle toho, zda je vlhkost na povrchu nástroje a nebo zda je vlhkost vázána v materiálu.

Pokud je vlhkost na povrchu formy, tak je potřeba provést:

- kontrolu těsnosti chlazení formy,
- zvýšit teplotu stěny nástroje,
- použít zařízení pro vytvoření tzv. závoje ze suchého vzduchu.

Pokud je vlhkost vázána v materiálu je nutné:

- materiál dostatečně předsušet,
- kontrola balení,
- kontrola uskladnění materiálu,
- zkrátit dobu setrvání materiálu v násypce (pokud možno

přivádět přímo z uzavřeného sušícího systému),

- nasadit plastikační jednotku s odplynováním.

2.6.7. Silné přetoky

Přetoky (otřepy) se často objevují v oblasti odvzdušňovacích kanálů, dělicích rovin nebo vyhazovačů. Otřep se objevuje jako více nebo méně výrazně vytvořený filmový okraj z plastu. Jemné otřepy

často nejsou na první pohled zřetelné. Naopak velkoplošné tlusté otřepty vyčnívají často několik centimetrů přes žádaný obrys. Vznik přetoků může během několika cyklů vést k poškození těsnících ploch (dělicích rovin).

Fyzikální příčiny se dají shrnout do čtyř základních případů:

• překročení dovolené šířky spár (forma nemá dostatečnou těsnost),

• uzavírací síla stroje není dostatečná,

• příliš vysoký tlak uvnitř formy,

• příliš malá viskozita hmoty (velké vnitřní tlaky ve formě a malé odpory tečení podporují vznik přetoků).

Možnosti řešení:

Pokud se dá zvýšit uzavírací síla, tak ji zvýšit.

Pokud existuje vysoká deformace formy, tak je nutné:

• optimalizovat pod přepnutí,

• snížit dotlak.

• změnit uzavírací sílu,

• nástroj konstrukčně využít.

Pokud je přestříknutí v oblasti vtoku, je potřeba snížit rychlost vstřiku.

Nevyhovuje-li ani jedna z možností, je nutné:

• dříve přepnout na dotlak,

• použít materiál s nižším indexem toku taveniny,

• proměřit a očistit formu a upravit odvodušňovací kanálky,

• snížit teplotu materiálu,

• snížit teplotu stěny formy.

2.6.8. Studené spoje

Studené spoje se často objevují v místech, kde tavenina plastu musela obtékat překážku, kde tavenina plastu byla vstřikována do dutiny formy dvěma nebo více vtoky a nebo v místech, kde byla dlouhá dráha taveniny plastu oproti místům s krátkou dráhou. Projevují se zřetelnou a viditelnou spojnicí dvou čel taveniny plastu (viz. obr. 2.52). V těchto místech má výstřik odlišné vlastnosti, nežli v místech ostatních.

Příčin vzniku studených spojů je hned několik a patří mezi ně:

• použití materiálu s nízkým indexem toku taveniny,

• nízké hodnoty technologických parametrů,

• poddimenzovaná vtoková soustava,

• špatný tvar výrobku.

Možnosti řešení a odstranění studených spojů spočívají v těchto úpravách:

• zvýšit teplotu taveniny a teplotu formy, dotlak, rychlost

vstřiku a tlak,

• kontrola souososti a dosedu trysky,

• změnit umístění vtoku a rozměry vtokových kanálů,

• použít jiný materiál.



Obr. 2.52: Studený spoj na plastovém dílu

2.6.9. Vady z rozjždění

Při seřizování stroje a před znovu uvedením do chodu mohou vznikat jakékoliv vady. Mohou být způsobeny např. studenou formou, nepravidelným vstřikovacím cyklem, rozběhovou fází vstřikovacího cyklu, špatnou konstrukcí vstřikovací formy, špatnou konstrukcí vyhazovacího systému, velkou lepivostí plastu, velkou drsností povrchu tvarové dutiny formy nebo tím, že materiál byl v tavicí komoře příliš dlouho. Tyto vady se klasifikují jako vady z rozjždění a odstraňují se seřízením vstřikovacího stroje.

2.6.10. Poškrábaný povrch

Poškrábaný povrch může být způsoben špatnou manipulací obsluhy s výrobkem nebo špatným konečným opracováním vzniklých malých otřepů a ostrých krajů na výstřicích. Dále může být poškrábaný povrch způsoben vlivem složení materiálu, jehož následkem dochází k nepředpokládanému smrštění výrobku. V důsledku toho se výstřík při vyhazování z formy jinak nakloní, jinak výstřík uchopí robot podavače, jinak ho upustí na pás a tím vznikají škrábance na povrchu.

Mohou se také objevovat vyjímací rýhy na dezénovém povrchu, které mohou být způsobeny velikostí vyhazovací síly a proto by tato síla měla být co nejmenší. U výstřiků tvarů pouzdra nebo krabice je třeba docílit malého smrštění, protože tyto výstřiky zůstávají na tvárníku formy a při násilném stahování se mohou poškrábat.

2.6.11. Orientace makromolekul

Orientace nastává při zpracování termoplastů, u reaktoplastů se vlivem zesíťování neobjeví. Princip této vady spočívá v tom, že rychle

chladnoucí tavenina plastu se protlačuje vysokým tlakem vtokovým systémem a průřezy ve formě a normálně zkroucené makromolekuly se narovnávají ve směru toku a v této nerovnovážné poloze ztuhnou. Čím více jsou makromolekuly vedle sebe, tím větší je stupeň orientace. Směr srovnání makromolekul určuje směr orientace. Výsledkem orientace je anizotropie vlastností, která má za následek:

- ♦ vzrůst pevnosti a modulu pružnosti ve směru orientace na úkor tažnosti a opačně pro směr kolmý na směr orientace,
- ♦ změnu hodnot výrobního smrštění, kdy smrštění ve směru toku je jiné než ve směru kolmém,
- ♦ zvětšení dodatečného smrštění ve směru orientace,
- ♦ pokles odolnosti proti korozi za napětí,
- ♦ pokles součinitele teplotní roztažnosti ve směru orientace a vzrůst ve směru kolmém,
- ♦ vzrůst součinitele tepelné vodivosti ve směru orientace proti kolmému směru.

Možnosti ovlivnění orientace makromolekul jsou buď pomocí teploty taveniny a teploty formy nebo pomocí tlaku a rychlosti. Jednoduše se dá říci, že vyšší teplota taveniny a formy snižuje orientaci, kdežto použitý vyšší tlak zvyšuje orientaci a anizotropii. S vyšší rychlosti vstřiku orientace v průměru klesá.

Stupeň orientace závisí na gradientu rychlosti a viskozitě taveniny, ale také na vtokovém systému nástroje, na jeho rozměrech. S klesající smykovou rychlostí klesá i orientace. Pokud smykové napětí, vyvolávající orientaci, přestane působit dříve, než tavenina ztuhne, snaží se narovnané makromolekuly zaujmout zase svoji rovnovážnou polohu a orientace se neobjeví nebo pouze zčásti. Nastává dezorientace, nebo také snížení stupně orientace, která může nastat i dodatečně vlivem působení vyšších teplot.

Podmínky pro vznik orientované struktury nejsou ve všech místech výstřiku stejné, takže stupeň orientace se ve výstřiku mění jednak ve směru tloušťky stěny, jednak se vzdáleností od vtoku. Tenká vrstvička plastu, která se vytvoří na stěně formy, „zamrzne“ dříve než na ni začnou působit smyková napětí a zůstane neorientovaná. Stupeň orientace v ostatních vrstvách závisí na velikosti smykového napětí v daném místě. Smyková napětí jsou největší ve vrstvě těsně sousedící se ztuhlou povrchovou vrstvou. Nacházejí se tedy v určité vzdálenosti pod povrchem výstřiku. Směrem k ose smyková napětí klesají až k nule. Stejně se mění i orientace makromolekul. Největší je těsně pod povrchem, v ose není žádná nebo malá.

Obsahuje-li hmota vláknité plnivo, jsou vlákna vlivem smykových sil rovněž orientována do směru toku taveniny. Vlákna jsou ukládána ve hmotě velice složitým způsobem, kdy se vytváří vícevrstvá struktura s různou orientací vláken. V optimálním případě lze na průřezu výstřiku nalézt čtyři vrstvy. Na povrchu je vrstva, v níž jsou vlákna uložena zcela chaoticky a nevykazuje tedy žádnou přednostní orientaci. Ve vrstvě pod ní jsou vlákna orientována ve směru toku, protože zde převládá podélné proudění. Třetí, přechodová vrstva, je

opět bez přednostní orientace a uprostřed se nachází vrstva, ve které jsou vlákna orientována kolmo ke směru tečení. To proto, že v této vrstvě je určující příčné proudění. Výsledné vlastnosti výstřiku závisí na poměru tloušťek vrstev s podélnou a příčnou orientací. U tenkostěnných výrobků převládá vliv podélně orientovaných vláken.

2.6.12. Krystalizace

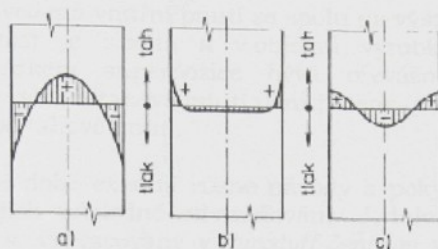
Krystalizace může nastat pouze u semikrystalických plastů a probíhá hlavně při tuhnutí taveniny ve formě. Ve výrobku následně probíhá i dodatečná krystalizace, která může být spojena s jistými deformacemi nebo i vznikem vnitřního pnutí. Zvýšené teploty dodatečnou krystalizaci podporují. Krystalizace závisí na rychlosti tuhnutí taveniny plastu. Čím větší je rychlost tuhnutí, tím větší je objem amorfni fáze a naopak. Procento krystalinity roste od povrchu výrobku směrem k jádru, kdy každé vrstvy mají rozdílný stupeň krystalinity, rozdílnou jemnost, rozdílnou houževnatost, která klesá a rozdílné smrštění. Mechanismus krystalizace závisí na teplotě a na čase. Nejprve musí vzniknout krystalické zárodky a teprve na nich se potom tvoří sférolity. Zárodky začnou vznikat až při teplotě, která je nižší, než je teplota tání polymeru. Potom se rychlost tvorby zárodků zvyšuje s klesající teplotou až k maximu. Pod touto teplotou rychlost tvorby zárodků opět klesá a při teplotě dostatečně vzdálené od teploty tání je rovna nule. Probíhá-li krystalizace polymeru v chlazené kovové formě, jsou podmínky pro krystalizaci v povrchové vrstvě výstřiku krajně nepříznivé a tenká vrstvička na povrchu zůstává buď úplně amorfni anebo dosažený stupeň krystalinity je nízký. Pod povrchovou vrstvičkou se ve výstřiku nacházejí drobné sférolity, protože se vytvořilo mnoho zárodků. I když je uspořádanost v těchto oblastech vyšší, než ve vrstvě povrchové, stále nedosahuje rovnovážného stavu. Tomu se přibližuje struktura uprostřed stěny, kde jsou pro krystalizaci relativně nejpríznivější podmínky. Je zde dost času na to, aby se vytvořily velké sférolity. Tomu odpovídá i vyšší stupeň krystalinity. Protože velikost sférolitů a stupeň krystalinity přímo ovlivňují mechanické i fyzikální vlastnosti výstřiku, např. pevnost, modul pružnosti a hustotu, přispívá každá vrstva k výsledné vlastnosti výstřiku jiným způsobem, a protože jsou vrstvy mezi sebou pevně spojeny, je výsledkem určitá integrální hodnota dané vlastnosti.

Tyto nepříjemné procesy je možné částečně ovlivnit vyšší teplotou formy, avšak s nevýhodnou vyšší dobou cyklu. V dnešní době existují nukleační činidla, které urychlují proces krystalizace a vznikne rovnoměrná jemná struktura s minimálním vnitřním pnutím.

2.6.13. Vnitřní pnutí

Vnitřní pnutí vzniká během procesu zpracování a nebo dodatečně a může ve výrobku ovlivnit pevnostní a deformační chování.

Podle mechanismu vzniku rozeznáváme různé druhy vnitřních pnutí, kdy průběh vybraných druhů je ukázán na obr. 2.53.



Obr. 2.53: Průběh napětí u vybraných typů vnitřního pnutí / 1,13/
a) ochlazovací pnutí, b) pnutí vlivem efektu proudění, c) expanzní pnutí

Orientační pnutí vzniká jako následek rozdílné orientace makromolekul ve výstřiku (viz. kap. 2.6.11.). Jsou dosti velká a mohou vést k dodatečným nepravidelným deformacím a trhlinám. S vyšší teplotou taveniny a teplotou nástroje a nižším použitým tlakem bude orientační pnutí klesat.

Krystalizační pnutí vznikají následkem rozdílného smršťování rozdílných krystalických oblastí a následkem dodatečné krystalizace. Mohou vzniknout pouze u semikrystalických plastů a závisí na rychlosti tuhnutí taveniny. Studená forma má za následek potlačení tvorby krystalizace, kdežto teplá forma naopak povede k vytvoření jemné struktury na povrchu. Procento krystalinity roste od povrchu (většinou amorfni oblasti) směrem k jádru součásti. Obě oblasti mají jiné smrštění a následkem toho vzniká krystalizační pnutí, která jsou však menší, nežli orientační pnutí.

Ochlazovací pnutí vzniká nerovnoměrným ochlazováním různých částí výstřiku. Na povrchu je ochlazení prudké a smrštění malé, kdežto v jádře je tomu naopak. Po ztuhnutí celého průřezu je v povrchové vrstvě tlakové pnutí a v jádru tahové (viz. obr. 2.53.a). Ochlazovací pnutí také vzniká kolem zastříknutých kovových záložek vlivem rozdílné teplotní roztažnosti materiálů a rozdílným smrštěním. Vznik ochlazovacího pnutí je silně podporován nerovnoměrnou teplotou stěn formy. S použitím vyšší teploty formy se bude ochlazovací pnutí snižovat.

Pnutí vlivem efektu proudění. Čelo proudu taveniny je tvořeno chladnější vysokoviskózní povrchovou vrstvou, která se napíná a vzniká v ní plošná (biaxiální) orientace oproti ostatním vrstvám. Jakmile tato vrstva přilehne na stěnu formy a ztuhne, vznikne tahové pnutí na povrchu výrobku (viz obr. 2.53.b).

Expanzní pnutí se objeví tehdy, jestliže po otevření formy není materiál v celém objemu dostatečně ztuhlý a expanduje pod tlakem vnitřních ne zcela tuhých částí. Výsledkem je tahové pnutí v povrchové vrstvě a tlakové pnutí v jádře stěny výstřiku (viz obr. 2.53.c). U plastů,

kteří jsou křehké, mohou mít za následek vznik trhlinek ve směru orientace. Expanzní pnutí lze zmenšit snížením vstřikovacího tlaku.

Všechna uvedená vnitřní pnutí se spolu na výstřiku sčítají, takže výsledná napjatost je složitá a v objemu výrobku nerovnoměrně rozložená. Výsledkem superpozice bývá převážně tlakové pnutí v podpovrchové vrstvě a tahové pnutí uvnitř stěny, povrchová vrstvička mívá tlakové nebo tahové pnutí.

V současné době existují různé návody a pokyny pro zjišťování příčin vad a jejich následně odstraňování. Jedním z nich je např. program *DiagBes*, vypracovaný v *Kunststoff-Zentrum* v Lipsku, který je postaven na komerční bázi a obsahuje velké množství dat a informací. Je postaven, kromě ostatních systémů, na schématu člověk – stroj – nástroj – materiál – technologie – prostředí, ve kterém jsou zahrnuty všechny vlivy, které mohou ovlivňovat vznik povrchových vad.

2.7. POVRCHOVÉ ÚPRAVY VÝROBKŮ Z PLASTŮ

Povrchovými úpravami se rozumí skupina technologií, které nějakým způsobem upravují povrch výrobků. Mezi hlavní technologie, používané na výrobky pro automobilový průmysl, patří lakování, pokovování a kaširování. Existují i jiné postupy, jako např. potiskování, leštění, desénování, ale jejich použití v automobilovém průmyslu je minimální.

2.7.1. Lakování plastů

Nejrozšířenějším postupem vytváření tenkého organického povlaku na povrchu plastových dílů je zejména v automobilovém průmyslu lakování (viz. obr. 2.54). Nanesená hmota v tenké vrstvě vytváří po zaschnutí pevnou povrchovou vrstvu, tzv. film a toto zasychání může proběhnout buď fyzikální cestou (odpaření rozpouštědla) a nebo chemickou cestou (např. polymerace) a nebo kombinací obou způsobů. Ucelený povrch, obvykle z více vrstev, se nazývá nátěr.

Jedna z největších a nejmodernějších lakoven v Evropě je lakovna v a. s. *Pegufarm Bohemia* v Liberci (viz. obr. 2.55).

Nátěr musí plnit dvě základní funkce, a to funkci estetickou a funkci ochrannou. Záleží na podmínkách použitelnosti, která funkce bude převládat. Z hlediska estetického je důležitá barva, kryvost a lesk nátěrů a z hlediska povrchové ochrany má význam zejména životnost nátěru, která závisí zejména na druhu lakovaného materiálu, na úpravě povrchu a na nátěrové hmotě.



Obr. 2.8.2: Ukázka lakovaného dílu – automobil Škoda Octavia (přední nárazník)



Obr. 2.55: Lakovací a montážní linka v a. s. Peguform Bohemia

Každý díl (plastové díly pro automobilový průmysl), který má být lakován, musí být nejdříve odmaštěn a následně opláchnut demineralizovanou vodou, po které následuje ofuk zbytkové vody. Po této operaci následuje sušení, ochlazení a ožeh povrchu dílu, aby se docílilo zvýšení povrchového napětí. Na takto upravený povrch se aplikuje nástřikem nátěrová hmota (akryláto – melaminová hmota s vysokou koncentrací pigmentů s vysokou kryvostí) ve dvou vrstvách, která má po vysušení tloušťku kolem 20 μm . Po vytěkání látek následuje mezisušení (cca 80 $^{\circ}\text{C}$) a nástřik bezbarvého laku ve dvou vrstvách při teplotě nižší, než 35 $^{\circ}\text{C}$. Celková tloušťka je 30 až 40 μm . Po dalším časovém vytěkání následuje sušení a ochlazení. Pro exteriérové díly se používají barevné odstíny, pro interiérové díly se pro zvýšení odolnosti proti poškrábání aplikují bezbarvé nátěrové hmoty.

Pro kvalitně provedený povrch je potřeba velmi přesně dodržovat optimální hodnoty teploty a relativní vlhkosti a hlavně dbát na čistotu prostředí v prostoru stříkacích kabin a lakovací linky.

2.7.2. Pokovování plastů

Kovovým povlakem na povrchu výrobku se dosáhne jednak kovového efektního vzhledu (viz. obr. 2.56) a jednak i změn řady vlastností:

- ♦ celkově se zlepši mechanické vlastnosti,
- ♦ zmenší se navlhavost, propustnost pro kapaliny a plyny a zvětší se odolnost proti chemikáliím,
- ♦ zlepši se tvarová stálost proti působení teploty,
- ♦ výrazně se zmenší stárnutí plastu.



Obr. 2.56: Příklad pokoveného dílu – Škoda Octavia (přední část)

Rozhodující vliv pro úspěšné pokovení plastových výrobků má způsob výroby, protože z hlediska adheze kovového povlaku k plastu jsou rozhodující technologické podmínky zpracování a s tím související úprava povrchu před vlastním pokovením. Norma automobilového průmyslu je velmi přísná na výrobky z plastů, které mají být pokoveny. Tyto díly nesmí mít vady, nesmí být mastné, povrch musí být dokonale čistý, neboť v zásadě platí, že kovový povlak vadu ještě zvýrazní, než aby ji překryl.

Tenký kovový povlak na povrchu výrobků z plastů se vytváří postupy, které se dají podle hlavních rysů rozdělit na chemické, galvanické, vakuové a jiné speciální způsoby pokovování. Povrch výrobků je třeba před pokovováním upravit, aby bylo dosaženo dobré adheze na polymerní povrch. Úprava povrchu spočívá v jemném zdrsnění a odmaštění, v leptání a v povrchovém zcitlivění paladiem nebo stříbrem.

Při *chemickém pokovování* (bezproudové) se kov vylučuje na povrchu předmětů z roztoku soli povlakového kovu působením redukčního činidla buď trvale obsaženého v pokovovací lázni nebo je redukční činidlo dodáváno až na speciálně upravený povrch předmětů. Tímto způsobem se plasty pokovují nejčastěji mědi nebo niklem, ale i stříbrem a zlatem. Kovová vrstva se vylučuje rovnoměrně po celém povrchu i u složitých výrobků a dosažitelná tloušťka je kolem 10 μm .

Galvanické pokovování spočívá ve vyloučení z roztoku účinkem stejnosměrného elektrického proudu. Základní vodivá vrstva na plastu se vytváří chemickým pokovením. Dosažitelná tloušťka kovové vrstvy není omezena a může se skládat i z více vrstev, nanesených postupně. Galvanicky se pokovují téměř všechny termoplasty, ale nejlepších výsledků bylo dosaženo u ABS, kde je nejlepší adheze.

Pokovování ve vakuu je metoda, při které dochází k napařování kovů na plast za velmi nízkých tlaků (10^{-3} až 1 Pa). Předměty musí být umístěny ve vzdálenosti menší, než-li je volná dráha molekul par kovu. Nejčastěji se nanáší hliník a dosahované tloušťky vrstvy při pokovení jsou 0,1 až 1 μm .

2.7.3. Kašírování plastů

Kašírování je technologie, kterou se nanáší horní vrstva z jiného materiálu a nebo vrstva polymeru na podkladový materiál, a to buď suchým kašírováním, kašírováním pomocí vosků a nebo kašírováním za tepla s cílem zlepšit nebo vhodně změnit základní vlastnosti nosiče. Ukázka kašírovaného dílu je na obr. 2.57. K zabezpečení dobré soudržnosti obou materiálů se pro většinu aplikací používají lepidla, kdy tloušťka této vrstvy je setina milimetru (kolem 5 g lepidla na 1 m^2). Kašírováním se vrství klasické materiály (textil, papír), ale i materiály syntetické (termoplastické fólie, apod).

Při *suchém kašírování* se na plastový díl nanese vrstva lepidla (adheziva) ve formě roztoku nebo disperze. Po vysušení se plastový díl tlakem spojuje s povrchovým materiálem, pro díly v automobilovém průmyslu nejčastěji s textilií. Možný je i opačný postup. Jako kašírovací lepidla se používají roztoky latexu, polyuretanů, apod.



Obr. 2.57: Příklad kašírovaného dílu (vnitřní výplň dveří - Škoda Octavia)

Technologie *kaširování pomocí vosků* se používá pro spojování dvou fólií z plastů, kdy se roztavené adhezivo nanáší ne jednu fólii a ještě před ztuhnutím je na nanesenou vrstvu přitlačována druhá fólie. Následuje chlazení a tento způsob nepotřebuje oproti předchozí technologii sušící tunel.

Poslední uvedenou technologii bude *kaširování za tepla*, při které se neuplatňují adheziva, ale využívá se termoplastičnosti alespoň jednoho materiálu. Povrch alespoň jednoho kaširovaného materiálu se nahřeje buď teplým vzduchem nebo sálavým teplem. Následuje spojení tlakem a ochlazení. Nejčastěji se tato technologie používá pro kaširování textilií na povrch plastových dílů, na které se po přehřevu povrchu nalisuje textilie. Výhodou oproti suchému kaširování je vyšší rychlost a velmi dobrá pevnost při dlouhodobém používání.

2.8. RECYKLACE AUTOMOBILOVÝCH DÍLŮ Z PLASTŮ

Pokles nároků na primární surovinové zdroje lze snižovat zaváděním bezodpadových technologií, kdy veškeré odpady se vracejí zpět do výroby. Nezbytným předpokladem pro technicky i ekonomicky účelné využití odpadu je dobrá znalost technologie výroby, zpracování i sortimentu výrobků. Je to hlavně do značné míry hlavně vysoká cena plastů, která vede výrobce k tomu, aby se zabývaly zpracováním odpadu z plastů a recyklací nefunkčních výrobků. Kromě toho se blíží i doba, kdy budou stanoveny procentuální výtěžnosti u recyklovaných dílů. Tak např. v automobilovém průmyslu v roce 2015 vstoupí v platnost předpis, který stanovuje hranici znovupoužitelnosti materiálů při zpětném odběru automobilů na min. 95 %.

V současné době existuje mnoho zařízení (mlýny, regranulační linky, podavače, manipulátory, apod), které dokáží zpracovat odpad na regenerát za přijatelné náklady a ve vyhovující kvalitě.

2.8.1. Rozdělení odpadů

Odpady, vznikající při výrobě lze rozdělit na technologický a užitný odpad. *Technologické odpady*, vznikající při výrobě, zahrnují v sobě vtokové systémy, vadné výrobky, odřezky, aj. a je tedy záležitostí každého výrobce, aby byly vráceny zpět do výroby jako vstupní surovina už jenom kvůli energetické náročnosti (na 1 tunu plastů se spotřebuje kolem 2,5 tuny ropy). Kromě toho existuje i *užitný odpad*, což jsou výrobky po skončení své funkční doby. Zatímco první skupina poskytuje relativně kvalitní materiál, srovnatelný s původními dosud nezpracovanými materiály, tak druhá skupina je obvykle znečištěna a polymer je více či méně znehodnocen stárnutím.

Zpracování odpadu se dělí podle stupně znečištění do čtyř skupin:

- čistý tříděný odpad (např. vtokové zbytky, odřezky, pytle, zbytky polotovarů, aj.), který vzniká přímo při zpracování plastů,
- znečištěný tříděný odpad,

- čistý netříděný odpad (např. vícevrstvé fólie, koženky, apod.),
- znečištěný netříděný odpad.

Při použití jednotlivých odpadů k dalšímu zpracování je nutné si uvědomit jejich původ a zvážit, jak byl materiál dříve zpracováván. Záleží také na tom, zda byl materiál pouze drcený a nebo drcený a regranulovaný. Použití drceného materiálu má výhodu u tepelně citlivých materiálů (nejsou znovu tepelně namáhány při regranulaci), ale nevýhodou je nestejná velikost drcených (mletých) částí a zvýšený obsah prachových podílů. Tato nevýhoda se dá odstranit použitím vhodných sít, pomalým mletím a nebo odsáváním prachu. Na druhé straně regranulovaný materiál je z hlediska tvaru vstupních částic rovnocenný materiálu původnímu. Navíc lze použít různých aditiv (stabilizátory, plniva, maziva, barviva, apod.) ke zlepšení užitných a zpracovatelských vlastností. Nevýhodou regranulace je energetická náročnost a u většiny plastů dokonale vysušení rozemletého odpadu.

Rozemleté a nebo regranulované plastové odpady a výrobky lze ve výrobním procesu zpracovávat buď samostatně a nebo jako příměs k originálnímu materiálu. První způsob je méně výhodný, protože regeneraci nejsou zaručeny původní vlastnosti materiálů. Výhodnější je používat regenerátu jako příměsi, přičemž je nutné míchat jen takový poměr, aby se objemové procento následně regenerovaného materiálu rychle snižovalo. Většina předních výrobců hmot, zpracovatelů a vědeckých a výzkumných pracovišť doporučují přidávat maximálně 20 % regenerátu do původní hmoty, čímž je zaručeno, že materiál se nevrátí k regeneraci více jak desetkrát, což je pro většinu plastů vyhovující.

2.8.2. Zpracování odpadů

Pro zpracování odpadů drcením (mletím) se používají různé typy mlýnů (kladivový, třecí, nožový, kulový, aj.), kdy zmenšování rozměrů lze dosáhnout tlakem, smykem nebo řezem. Pro volbu drcení jsou důležité fyzikální vlastnosti rozměňovaného materiálu, jako je tvrdost a charakter lomu. Drtící zařízení by mělo splňovat tyto požadavky:

- velikost částic nadrceného materiálu by měla být co nejrovnoměrnější,
- množství vzniklého prachu by mělo být co nejmenší,
- nadrcený materiál musí být co nejrychleji odstraněn z mlecího prostoru,
- výměna opotřebovaných částí má být co nejjednodušší,
- spotřeba energie co nejnižší.

Všechny typy strojů by kromě toho měly navíc umožňovat kontinuální zásobování mlecího prostoru a regulovat stupeň rozmělnění.

Pro vlastní drcení, resp. mletí, lze vytýčit tato pravidla:

- ◆ rozměňňování se má provádět pouze do takového stupně, který je nezbytný pro další zpracování,
- ◆ způsob rozměňňování a druh mlecího zařízení volíme podle vlastností zpracovávaného odpadu a podle požadované jemnosti částic.

Při výrobě regranulovaných regenerátů se po operaci mletí nebo drcení provádí následné zpracování na hnětacích strojích nebo na jednošnekových nebo vícešnekových strojích, na které navazuje granulační jednotka. Z hlediska výsledné kvality povrchu je důležitá čistota při jednotlivých operacích, dostatečná tepelná oxidační stabilita a potřebné snížení vlhkosti.

Znovuzpracování odpadu (drceného nebo regranulovaného) a výsledná kvalita výrobků závisí na typu polymeru, jeho aditivaci a podmínkách zpracování původního materiálu. Obecně platí, že degradace polymerů závisí na obsahu a typu stabilizátorů, vlhkosti, teplotě vstřikování a době prodlevy materiálu v tavicí komoře. Posouzení kvality zpracovávaného odpadu lze provést pouze pomocí experimentů a provádí se těmito metodami:

- ◆ změřením změny indexu toku taveniny (*ITT*),
- ◆ změřením viskozity taveniny v závislosti na době pobytu hmoty v tavicí komoře,
- ◆ změřením mechanických vlastností.

Podle výsledků z experimentů lze posoudit, do jaké míry se drcený nebo regranulovaný materiál přibližuje materiálu původnímu a díky tomu rozhodnout, v jakém poměru se bude přidávat k původnímu materiálu a nebo zda se bude zpracovávat jako 100 % plast (recyklát resp. regranulát). Na základě hodnot tokových vlastností se provede úprava technologických podmínek zpracování tak, aby nedošlo k ovlivnění konečných vlastností výrobku.

Při zvažování možností využití druhotných surovin je třeba mít na zřeteli, že materiál prochází při zpracování rozdílnými fyzikálními i chemickými procesy, které vedou ke změnám struktury a složení. Každá operace se projeví svými vlivy na vlastnostech materiálu a tím pádem i na výrobku a proto je nutné mít na zřeteli následující vlivy:

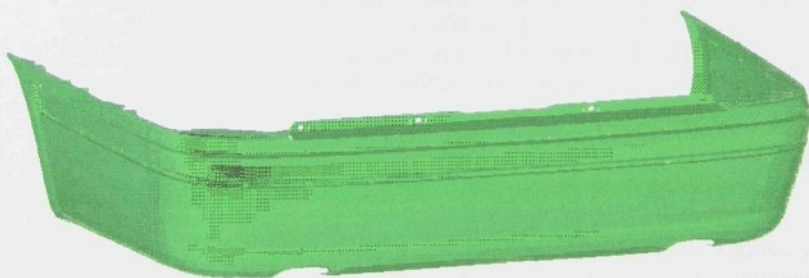
- ◆ vliv druhotné suroviny na konečné fyzikálně – chemické a mechanické vlastnosti výrobku,
- ◆ vliv druhotné suroviny na prvotní materiál a z toho vyplývající požadavky na předúpravu,
- ◆ vliv druhotné suroviny na zpracovatelnost a nestabilitu vlastností,
- ◆ míru degradace druhotné suroviny při dalším zpracování.

3. SIMULACE TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PRO ZADNÍ NÁRAZNÍK ŠKODY FELICIE COMBI

Požadavky na kvalitu a rozměrovou přesnost plastových výrobků vedou návrháře, konstruktéry a technology k progresivnějšímu a ekonomičtějšímu přístupu při projektování. Neocenitelným pomocníkem tvůrců nových výrobků jsou CAD/CAM/CAE počítačové systémy. Významným efektem těchto systémů je snaha posunout řešení možných problémů a chyb návrhu do co nejranější fáze vývoje nového výrobku. Příklady existují zvláště v automobilovém průmyslu, kdy analýza vstřikovacího procesu pomohla odstranit dodatečné úpravy tvarové dutiny nebo vtokového systému formy, optimalizací teploty zkrátit výrobní cyklus a tím uspořit obrovské finanční náklady a nebo vysoké zatížení nástroje. Udávají se průměrné úspory 10 – 20 % výrobních časů i nákladů, které se již ušetří při jednom vzorkování vstřikovacího nástroje pro středně složitou formu, pokud se objeví problémy a musí dojít k úpravě formy.

Simulační programy, zaměřené do oblasti plastikářských technologií, jsou schopny pomocí složitých algoritmů předvídat téměř přesně proces plnění a chlazení, ale i rozložení vnitřních pnutí a deformací.

Hlavním cílem této kapitoly habilitační práce je ukázat použití simulačního programu *STRIM 100* (a hlavně jeho části *STRIMFLOW* pro technologii zpracování plastů) při simulaci technologie vstřikování na složitém dílu – zadním nárazníku *Škody Felicie Combi*, model roku 1998 (viz. obr. 3.1) a následné porovnání výsledků simulace a výsledků experimentu z hlediska kvality rozložení teplotních polí a přesnosti simulačního výpočtu.



Obr. 3.1: Vysvícený model zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi, vytvořený v programu STRIMFLOW

3.1. SIMULAČNÍ PROGRAM STRIMFLOW

Simulace je jedním z velmi důležitých oborů nasazení počítačů. Počítačem se provádí simulace fyzikálních, chemických, ale i dalších problémů. Simulační programy slouží k realizaci virtuálního modelu za skutečných podmínek. Programy pracují na základě matematických metod (metoda konečných prvků, metoda sítí, metoda hraničních prvků, apod.). Jejich výsledky je možné využít při tvorbě výkresové dokumentace a jsou vstupními parametry pro výrobní stroje. Uplatňují se v nejrůznějších odvětvích, kde pomáhají snižovat náklady a vyhnout se kritickým stavům. Tyto programy se také používají pro simulaci vstřikování. V současné době se pro návrh výrobků z plastů a pro návrh a optimalizaci konstrukce vstřikovacích forem používá celá řada simulačních programů. Jedním z nich je i systém *STRIM 100*, jehož původním majitelem byla firma *Cisigraph*, následně firma *Matra Datavision* a v současné době je majetkem firmy *IBM* a je začleňován do systému *CATIA*. Jednou částí z celého balíku produktů je program *STRIMFLOW*, který je určen pro oblast zpracování plastů.

STRIMFLOW je uživateli hodnocen jako praktický, výkonný, nepostradatelný nástroj pro návrh a výrobu vysoce kvalitních produktů z plastů. Nabízí komplexní programové nástroje pro uživatele 3D grafiky. Integruje návrh, analýzu a NC výstupy pro obrábění pod společnou databází a tím výrazně zkracuje předvýrobní i výrobní etapy výrobku. *STRIMFLOW* se uplatňuje hlavně v těchto oblastech:

- ◆ komplexní řešení pro analýzy vstřikování plastů,
- ◆ návrh a konstrukci součástí velmi komplikovaných tvarů,
- ◆ výkonný generátor sítě pro výpočty MKP,
- ◆ generátor vstupů pro obrábění zvláště v pěti osách.

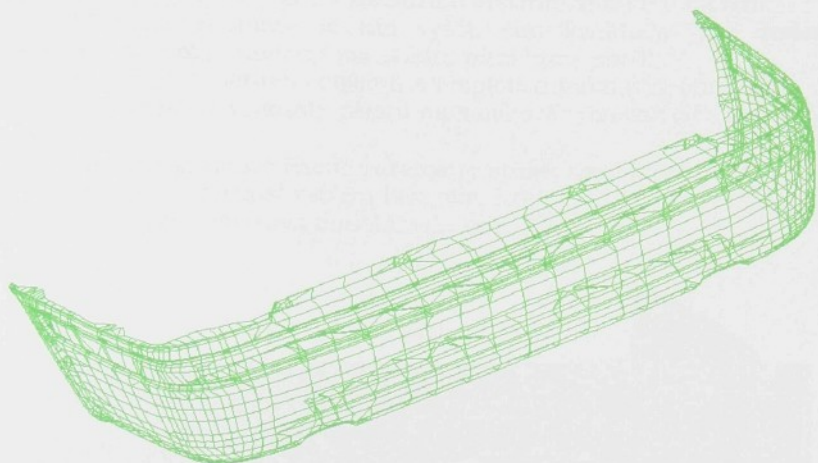
Ze světových firem používají v rozličných oblastech tento software např. tyto společnosti:

- ◆ plastický průmysl (Sommer Alliberti, Monsanto, ..),
- ◆ automobilový průmysl (BMW, Honda, Renault, Toyota, ..),
- ◆ letecký průmysl (Lockheed, Sikorsky, ..),
- ◆ slévárnictví (Moravské železárny, Pechiney, Smoby, ..),
- ◆ strojírenství (Akromold, Safe, Sumitomo, ..).

3.2. APLIKACE STRIMFLOW PŘI SIMULACI PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ PRO VYBRANÝ DÍL

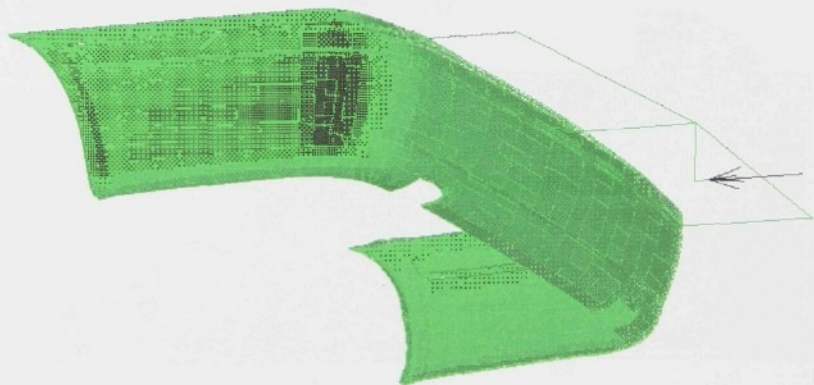
Vybraný díl, zadní nárazník (viz. obr. 3.1) je namodelován ve *STRIMFLOW* pomocí modulu *3D povrchové modelování* dle výkresové dokumentace z a. s. *Peguform Bohemia* tak, aby přesnost byla co nejvyšší vzhledem k tomu, že chci v závěru habilitační práce nejenom vyhodnotit procentuální úspěšnost simulace oproti experimentálnímu měření, ale hlavně jsem nechtěl vnášet chybu již od počátku celkového procesu modelování vstřikování. Na vytvořeném povrchu modelu byla automaticky vygenerována síť zvolených typů prvků (čtyřúhelníková

doměna) podle definovaného rozdělovacího kroku (viz. obr. 3.2), kdy systém automaticky zkontroloval spojení mezi sítěmi na jednotlivých přilehlých prvcích a vzniklé chyby, kterých bylo opravdu minimum, byly opraveny ručně.



Obr. 3.2: Vytvořená síť na povrchu nakresleného modelu

Následně byla každému prvku sítě přiřazena tloušťka a po zadání těchto parametrů byl modelu nadefinován vtokový systém (kaskádové vstřikování) s určením místa vstřiku a směrem vstřiku, kterému byly, jako dvouuzlovým elementům, přiřazeny průměry (viz. obr. 3.3).



Obr. 3.3: Vtokový systém na modelu s určením směru tečení

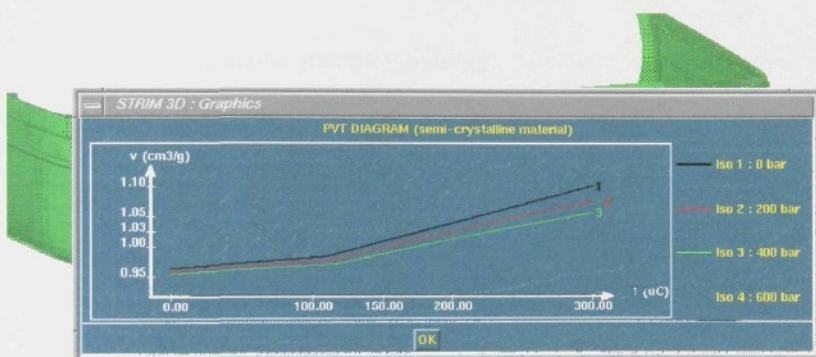
Z hlediska požadavku, uvedeného na začátku této kapitoly (aby bylo možné vyhodnotit vztah simulace a experimentu), byly do výpočtu zadány rozměry výrobku a vtokového systému přesně podle stávajícího stavu ve výrobě. To samé se týkalo i parametrů materiálu (PP KELTAN TP 2550/3 od firmy DSM) a stroje (Battenfeld BA 27000/16000), které se používaly při výrobě dílů v okamžiku experimentálního měření.

Přesnost simulace je tím vyšší, čím kvalitněji jsou zadane nejenom vstupní parametry materiálu, mezi které patří:

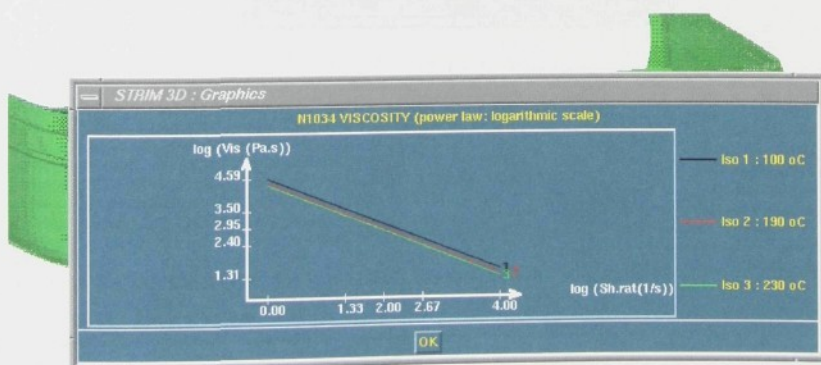
- ♦ závislost měrného objemu na teplotě a tlaku (viz. obr. 3.4),
- ♦ a závislost viskozity plastu na smykové rychlosti (viz. obr. 3.5),

ale i programově řízené parametry stroje, mezi které patří:

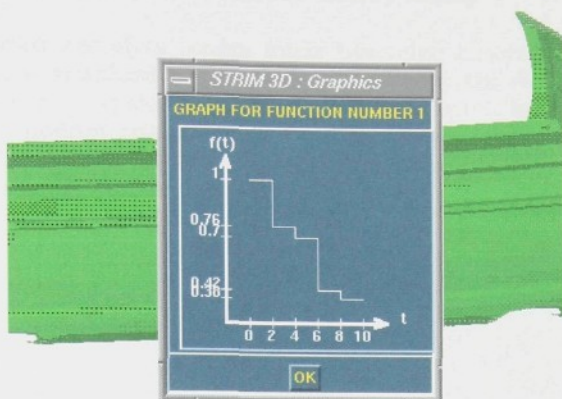
- ♦ časová závislost vstřiku (viz. obr. 3.6)
- ♦ a časová závislost dotlaku (viz. obr. 3.7).



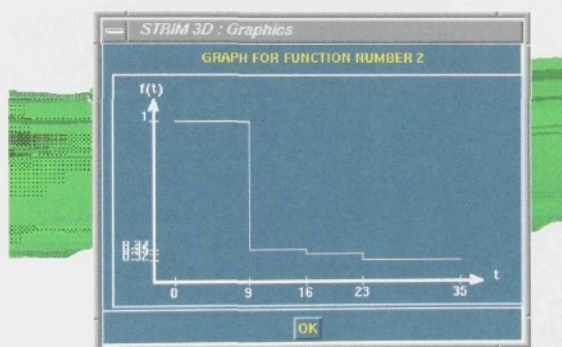
Obr. 3.4: Diagram $p - v - T$ pro použitý semikrystalický plast



Obr. 3.5: Závislost viskozity plastu na smykové rychlosti a teplotě



Obr. 3.6: Časově rozdělená oblast doby vstřikování (definováno jako funkce 1)



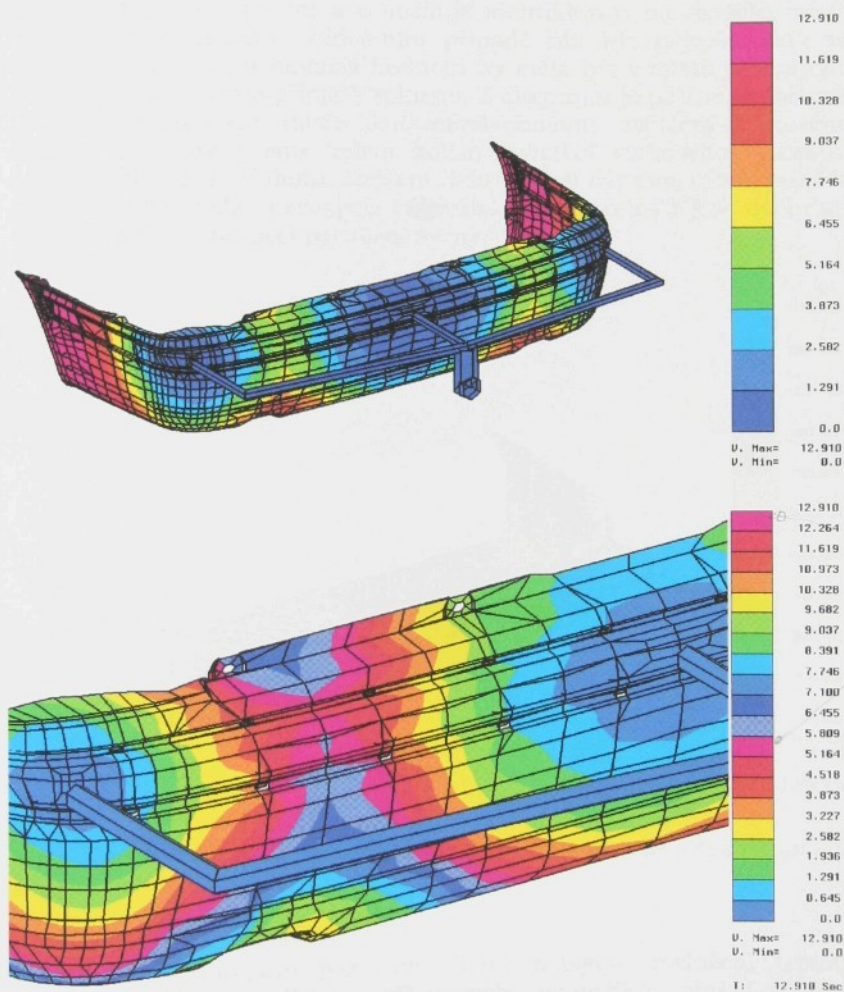
Obr. 3.7: Časově rozdělená oblast doby dotlaku (definováno jako funkce 2)

Dále byla do výpočtu zadány vstupní hodnoty teploty taveniny plastu (240 °C), střední teploty formy (60 °C), teplota vyhřívání vtokového systému (220 °C) a velikost vstřikovacího tlaku (12 MPa).

Po zadání vstupních parametrů (tvar a rozměry modelu, parametry plastu, tvar a rozměry vtokového systému, parametry stroje), potřebných pro výpočet a po zkontrolování správnosti byla spuštěna první analýza, a to *3D analýza plnění* (tečení).

3.2.1. Analýza plnění tvarové dutiny formy

Výsledků z analýzy plnění může být velké množství, ale protože pro porovnání simulace a experimentu mě ve svém důsledku budou zajímat hlavně výsledky z analýzy chlazení, které vycházejí z konečných hodnot analýzy plnění, uvedu zde pouze některé výstupní diagramy, které jednak kontrolují hodnoty, zadané ve výrobě a jednak kontrolují, zda nedochází k problémům během procesu plnění tvarové dutiny formy.

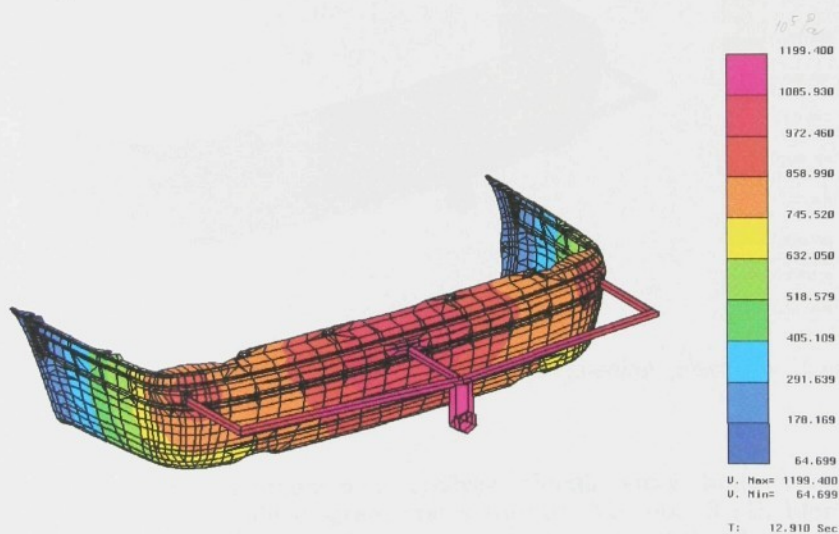


Obr. 3.8: Diagram plnění (doba vstřikování) pro zadané vstupní parametry /s/ s detailem místa kolem vtoků

Prvním diagramem je celkový diagram plnění (viz. obr. 3.8), který ukazuje celkovou dobu plnění, místa na konci plnicí fáze a možná místa vzniku studených spojů (setkání „studených“ čel dvou proudů tavenin). Pro lepší přehlednost je zde uvedeno dvojnásobné dělení pro stejný časový interval a detail místa kolem vtoků.

Dalšími dvěma diagramy budu kontrolovat kvalitu „taveniny“ plastu, zda nedošlo k tepelné degradaci nebo ke spálení vlivem vysokého tlaku nebo škrcením při průchodu taveniny vtokovým systémem do tvarové dutiny formy.

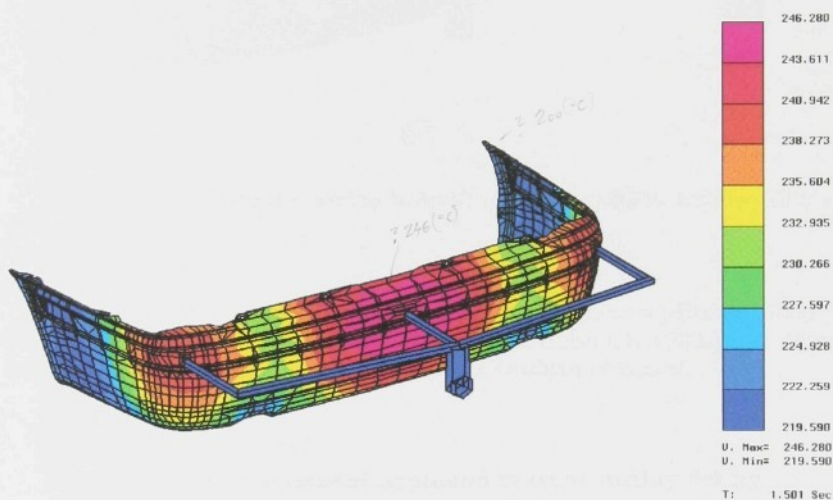
Tlakový diagram (viz. obr. 3.9) ukazuje tlakový profil na modelu ve vybraném čase plnění a umožňuje identifikovat na modelu místa s maximálním tlakem. V ideálním případě má být nejvyšší tlak ve vtokovém systému a nejnižší hodnota by měla být v místě posledního plnění, což je v tomto případě splněno. Z diagramu je patrné, že během procesu vstřikování dojde k desetinásobnému zvětšení tlakového zatížení taveniny plastu (místa kolem vyústění vtokového systému) oproti vstřikovacímu tlaku. Zvýšení tlaku nesmí být moc velké, protože potom vzniká i velké nebezpečí vnitřního pnutí, přetoků (tzv. dýchnutí formy) a nebo nebezpečí porušení formy.



Obr. 3.9: Tlakový diagram (tlak v tavenině plastu) v čase naplnění tvarové dutiny formy / 10⁵ Pa/

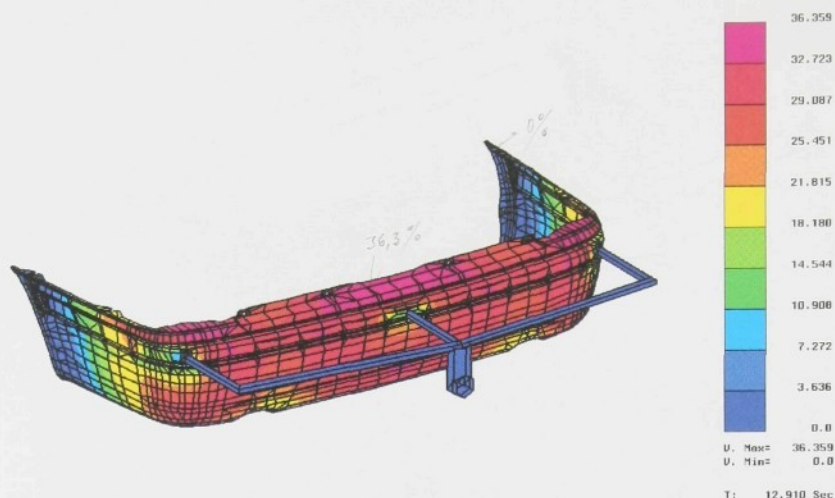
Teplotní diagram (viz. obr. 3.10) popisuje rozložení teploty v tavenině plastu během jednotlivých okamžiků plnění. Tímto diagramem se dá také popsat poslední „pohyb“ materiálu, což je na uvedeném diagramu patrné ze zadních pozic obou boků, kdy tavenina při průchodu přes tvarové řešení na bocích zadního nárazníku zvýší

svoji teplotu. Vtokový systém je vyhříván na teplotu 220 °C, čemuž odpovídá i teplota, vyjádřená odpovídající barvou na stupnici teploty, ale při průchodu taveniny plastu ústím vtoku se tato teplota zvýší až na hodnotu 246,2 °C. V neposlední řadě musí být kontrolována i maximální zjištěná teplota, aby nedošlo k tepelné degradaci materiálu a tím pádem ke vzhledovým vadám. Z diagramu je patrné, že zvýšení teploty nebude mít za následek tepelnou degradaci materiálu, protože použitý materiál (PP KELTAN TP 2550/3) bez problémů snáší teploty kolem 260 °C a dále je vidět, že teplota u středového vtoku je zhruba o 6 °C vyšší, než-li u bočních vtoků a také, že pokles teploty v posledních místech plnění z teploty taveniny je přibližně 20 °C.



Obr. 3.10: Teplotní diagram (teplota v tavenině plastu) v čase naplnění tvarové dutiny formy /°C/

Posledním diagramem z analýzy plnění, který bude v této kapitole uveden, bude diagram vrstev tuhnutí (viz. obr. 3.11), který ukazuje procento ztuhlého materiálu, který již ztuhnul (ztratil vlastnosti taveniny) během fáze plnění. Příliš vysoké procento ztuhlého materiálu zastavuje nebo znemožňuje efekt plnění a dotlačování materiálu do dutiny formy a 100 % ztuhlá tavenina plastu před koncem plnění způsobí v daných místech stejné nepříjemnosti, jako vměstky u kovů. Zvláště u tak velkých a rozměrově složitých dílů s malou tloušťkou, jako je např. uváděný zadní nárazník, musí být tento diagram pečlivě kontrolován. Z diagramu je vidět, že procento ztuhlé vrstvy je přes 36 %, což je už dosti vysoká hodnota, ale stále ještě akceptovatelná.



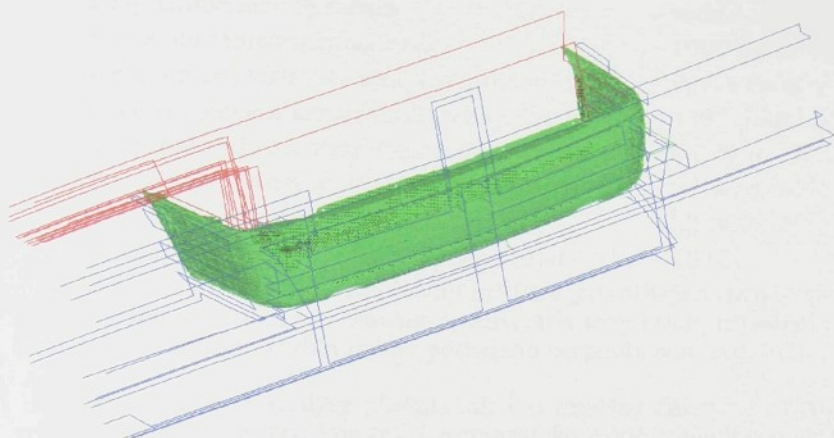
Obr. 3.11: Diagram vrstev tuhnutí v čase naplnění tvarové dutiny formy /%/

Po ukončení analýzy plnění a její optimalizace v případě nového plastového dílu a po vybrání a provedení potřebných výstupů a jejich kontroly následuje další analýza, a to *3D analýza chlazení*.

3.2.2. Analýza chlazení naplněné tvarové dutiny formy

Po ukončení analýzy plnění jsem provedl analýzu chlazení (analýzu tuhnutí taveniny plastu vlivem působení temperačního systému a chladicího média na plast v dutině formy), která pro svoji vysokou přesnost výpočtu využije a použije konečné výstupní hodnoty z analýzy plnění. K tomu, aby bylo možné chladicí analýzu provést, musí se namodelovat temperační systém tvárníku a tvárnice (viz. obr. 3.12) a musí se zadat parametry chladicího obvodu. Vlastní temperační systém je systém uzavřený, rozdělený do jednotlivých okruhů pro tvárník a tvárnici tak, jak to uvádí tab. 3.1.

Temperační systém pro obě poloviny vstřikovací formy (pevnou i pohyblivou) byl na *katedře tváření a plastů* namodelován podle výkresové dokumentace, dodané firmou *Peguform Bohemia a. s.*, pro stávající vstřikovací formu (Pozn.: Při konstrukci vstřikovací formy pro zadní nárazník *Škody Felicie Combi* s využitím simulace procesu vstřikování nebyla chladicí analýza oslovenou firmou provedena. Byla provedena pouze analýza plnění).



Obr. 3.12: Model a chladicí okruhy v tvárníku (červená barva) a v tvárnici (modrá barva)

Tab. 3.1: Průtočné objemy v jednotlivých temperačních okruzích tvárníku a tvárnice

TEMPERAČNÍ OKRUH			
tvárník	průtočné množství /l.hod ⁻¹ /	tvárnice	průtočné množství /l.hod ⁻¹ /
č. 1	475	č. 1	680
č. 2	490	č. 2	670
č. 3	540	č. 3	640
č. 4	636	č. 4	615
č. 5	615	č. 5	670
č. 6	650	č. 6	680
č. 7	650	č. 7	610
č. 8	630	č. 8	630
č. 9	580	č. 9	615
č. 10	530		

Pozn.: Vzhledem k větší vzdálenosti chladicího systému tvárnice oproti chladicímu systému tvárníku je i doporučené průtočné množství pro tvárnici vyšší.

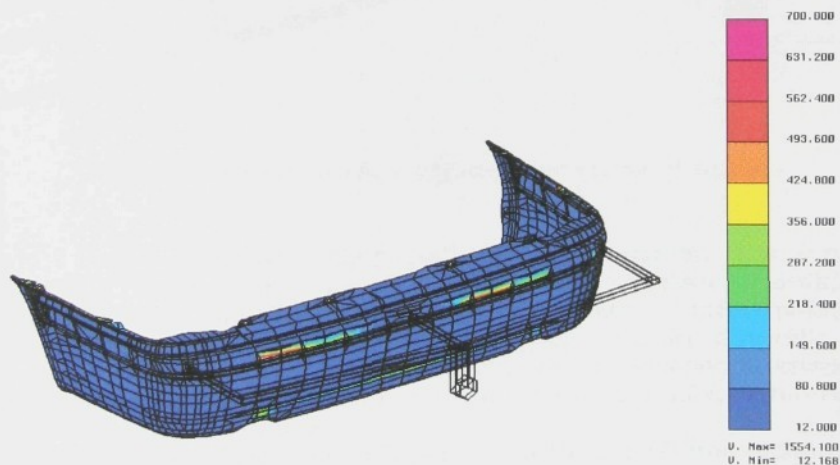
Mezi zadávané vstupní parametry chladicího obvodu, které svoji přesností ovlivňují kvalitu výpočtu, patří:

- ♦ typ temperačního média – voda,
- ♦ hustota temperačního média – 1000 kg.m^{-3} ,
- ♦ dynamická viskozita temperačního média – $0,001 \text{ Pa.s}$,
- ♦ měrná tepelná kapacita temperačního média – $4187 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- ♦ tepelná vodivost temperačního média – $0,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- ♦ tepelná vodivost materiálu tvárníku – $35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- ♦ tepelná vodivost materiálu tvárnice – $35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
- ♦ teplota temperačního média na vstupu – $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ♦ průtočné množství chladicího média v jednotlivých uzavřených

temperačních okruzích pro tvárník a tvárnici, a tedy i tlak, působící na temperační médium, je dán typem použitého čerpadla (viz. tab. 3.1).

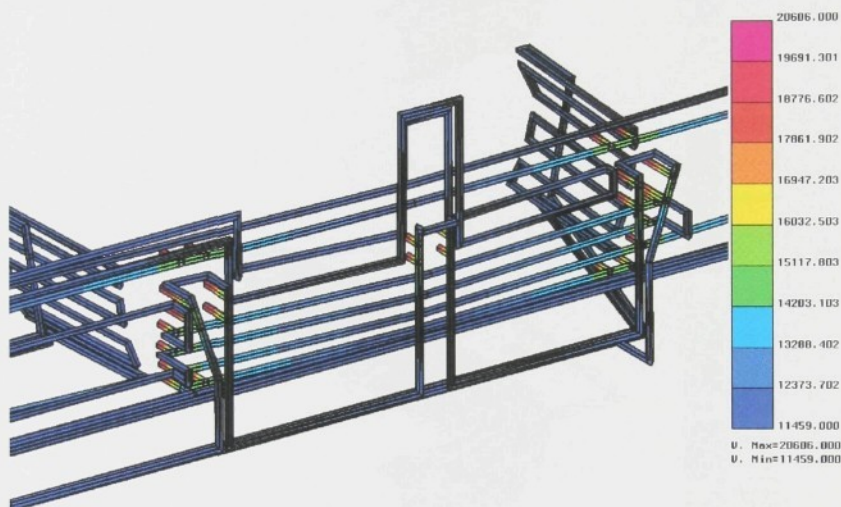
Stejně jako u analýzy plnění, tak i u analýzy chlazení existuje velké množství výstupů, kterými lze popsat konečné výsledky a nebo provedenou optimalizaci navrženého chladicího okruhu s tím rozdílem, že grafické výstupy lze rozdělit do tří skupin.

První z nich je *geometrická analýza*, která počítá vzdálenost mezi každým elementem sítě a temperačním okruhem tvárníku a tvárnice (viz. obr. 3.13) pro zvýšení účinnosti chlazení nebo pro odhalení nebezpečí porušení stěny tvarové dutiny formy v důsledku malé tloušťky mezi tvarovou dutinou formy a temperačním systémem. Z diagramu je patrná velká vzdálenost v oblasti lišty a v oblasti tvarového řešení ve spodní části zadního nárazníku.



Obr. 3.13: Vzdálenost jednotlivých temperačních okruhů od povrchu tvárnice / mm/

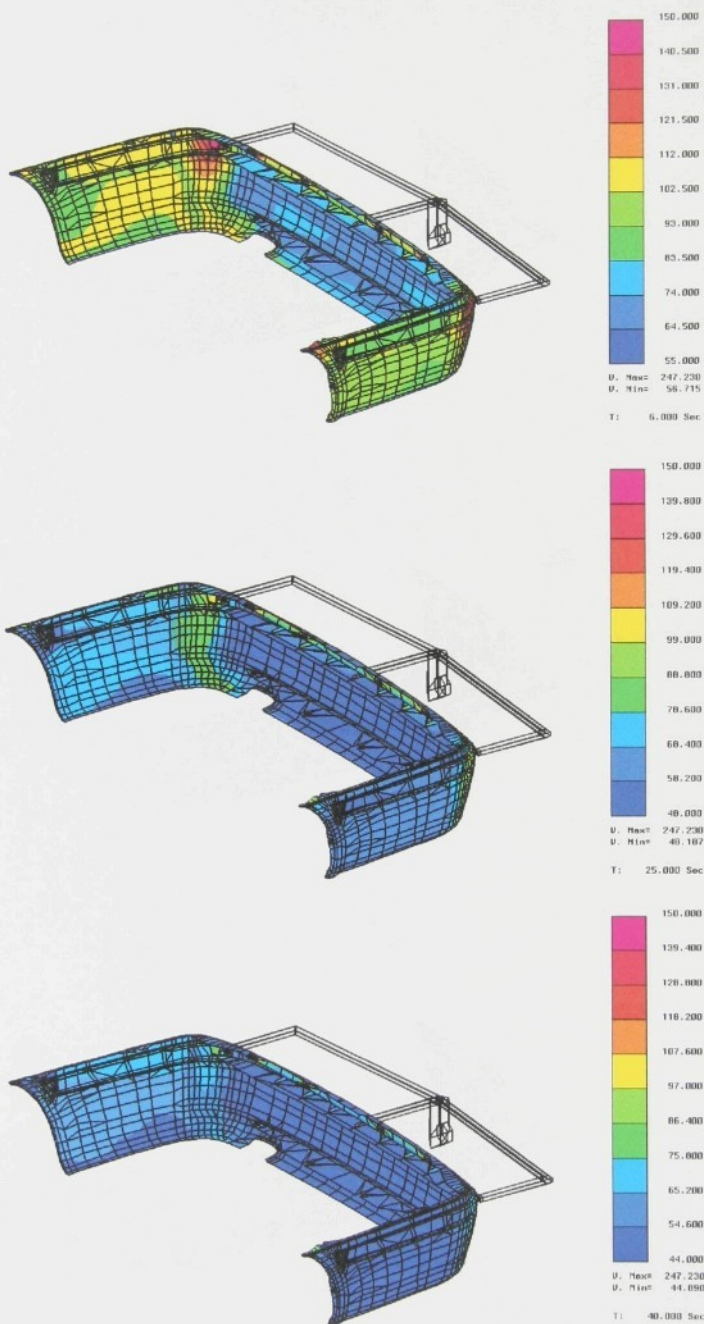
Druhou skupinou možných grafických výstupů z analýzy chlazení, zabývající se výpočtem parametrů chladicího média, tekoucího uvnitř temperačního systému, je *hydraulická analýza*. Je důležitá z hlediska kontroly intenzity proudění (Reynoldsova čísla), aby nedošlo k poklesu rychlosti a k přechodu z turbulentního proudění do oblasti laminárního proudění (viz. obr. 3.14). Spojením výsledků z geometrické a hydraulické analýzy lze určit reálný součinitel účinnosti chladicího obvodu. Z obr. 3. 14 je patrné, že ve všech částech temperačního systému tvárnice bude turbulentní proudění, které bylo zjištěno i pro temperační systém tvárníku.



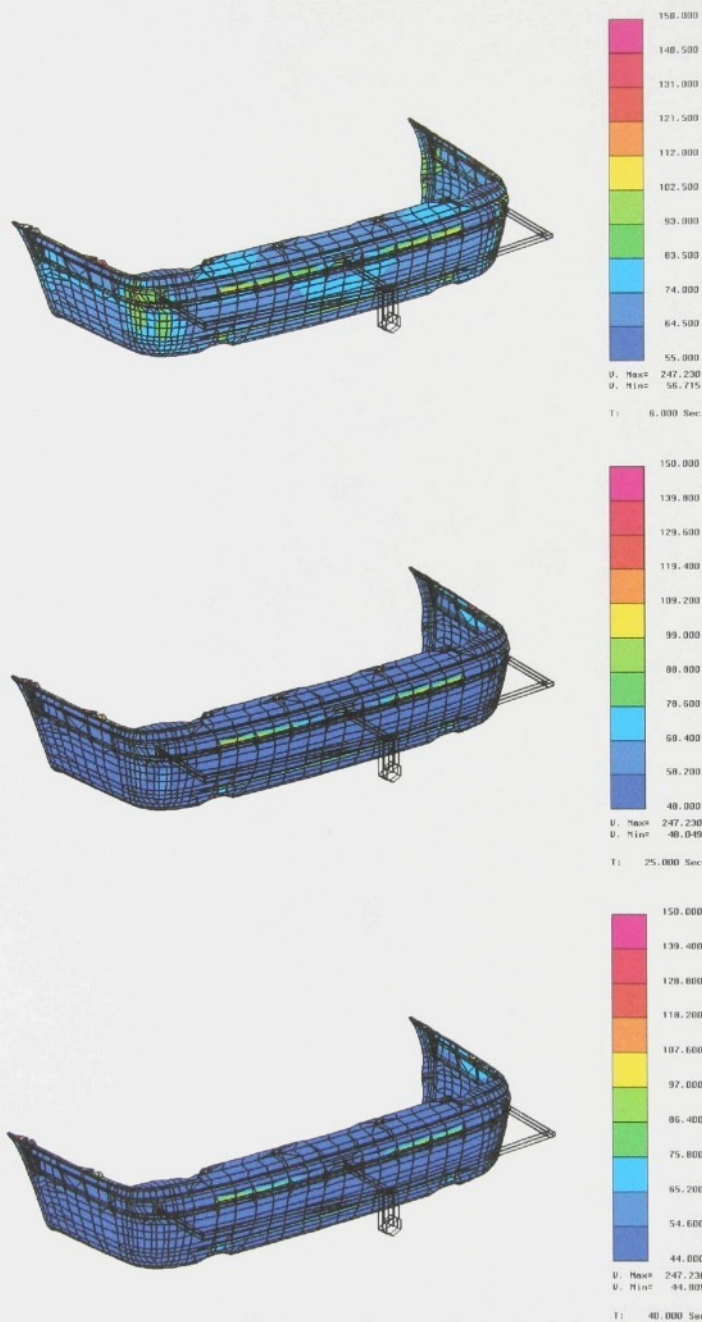
Obr. 3.14: Reynoldsovo číslo v temperačních okruzích tvárnice

Poslední možnou skupinou grafických výstupů z analýzy chlazení výrobku je *teplotní analýza*, která využívá výsledků z předchozích dvou částí výpočtu chlazení a kromě jiného počítá teplotu na povrchu modelu, teplotu na povrchu tvárnice a tvárníku, tuhnoucí vrstvu během procesu chlazení, včetně jednotlivých křivek v závislosti na čase a tím dává potřebné informace o době, nutné ke chlazení na teplotu vyhození.

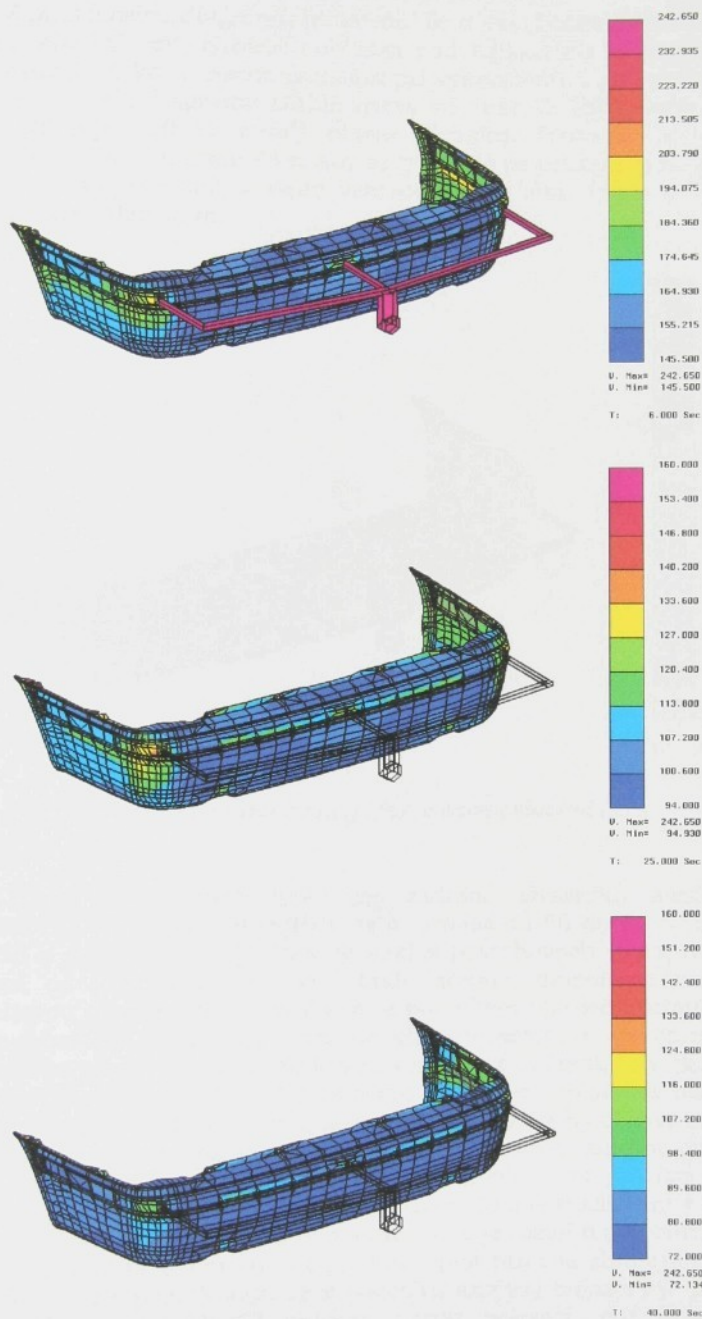
Na následujících obrázcích (viz. obr. 3.15 až 3.17) jsou ukázány jednotlivé výstupy z teplotního výpočtu analýzy chlazení ve vybraných časových okamžicích během doby chlazení.



Obr. 3.15: Teplota /°C/ na povrchu tvárníku v čase 6, 25 a 40 s

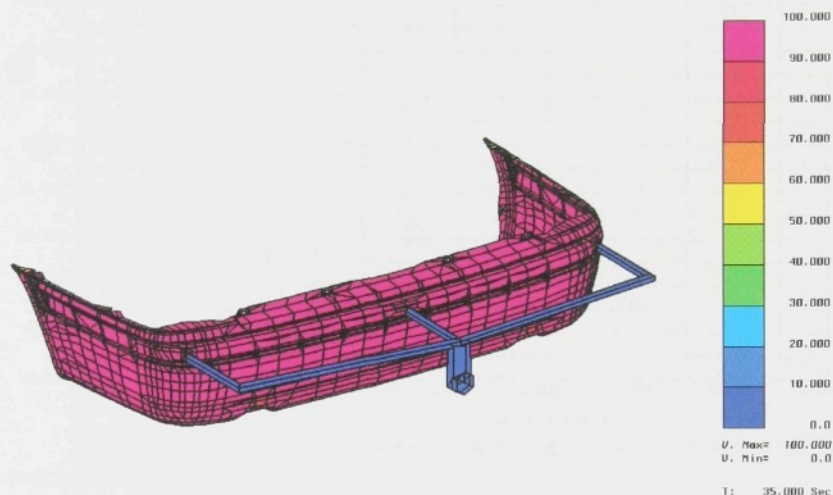


Obr. 3.16: Teplota /°C/ na povrchu tvárnice v čase 6, 25 a 40 s



Obr. 3.17: Teplota /°C/ na povrchu výrobku v čase 6, 25 a 40 s

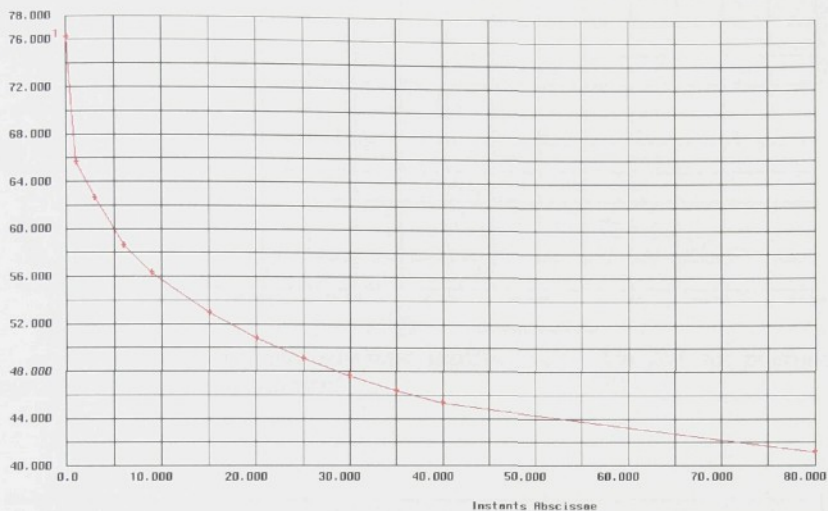
Z předchozích diagramů je patrné, že doba chlazení 40 s nestačí k tomu, aby byl celý výrobek uchlazen pod teplotu 80 °C (teplota při které nedochází ke tvarovým změnám při vyhazování u polypropylenu) a to i přesto, že z diagramu ztuhlé vrstvy (viz. obr. 3. 18) je vidět, že již v čase 35 s je 100 % ztuhlý objem výrobku. Proto je ve výrobě doporučená doba chlazení 44 s, aby se předešlo případným problémům při vyhazování výrobků a nebo vzhledovým vadám, které se nedají odstranit ani lakováním.



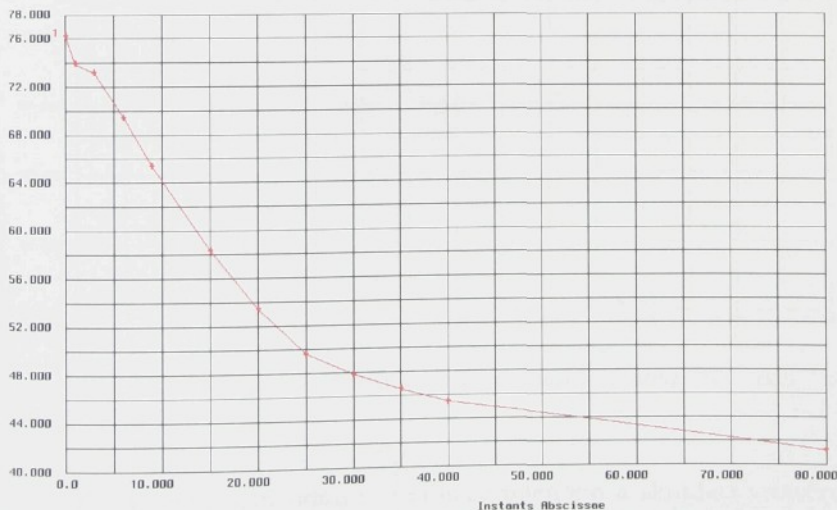
Obr. 3.18: Objem ztuhlé vrstvy / %/ v čase chlazení 35 s

Pokles povrchových teplot na zadním nárazníku mezi časy chlazení 6 s a 25 s (rozdíl je 19 s) je v rozmezí od 50 do 60 °C a mezi časy 25 s a 40 s (rozdíl je 15 s) je pokles povrchových teplot pouze v rozmezí od 20 do 25 °C, což bude zřejmě způsobeno vzniklou vzduchovou mezerou mezi výrobkem a povrchem tvarové dutiny formy vlivem smrštění plastu, kdy výrazně klesá intenzita a vliv chladicího systému na „teplý“ výrobek. To je velmi zajímavé zjištění, kdy skoro při stejném časovém rozdílu doby chlazení je pokles teplot tak rozdílný. Nebo-li procentuálně vyjádřeno, pokles teplot pro druhý časový interval je pouze 40 % předchozího poklesu. Co se týče porovnání povrchových teplot mezi tvárnici, resp. tvárnkem a výrobkem, tak pro čas 6 s je rozdíl teplot zhruba 100 °C, pro čas chlazení 25 s je rozdíl teplot 50 °C, tedy poloviční (50%) a pro čas temperace 40 s je rozdíl teplot zhruba 30 °C, tedy pokles je kolem 70 % z rozdílu teplot pro čas chlazení 6 s. Je zde ještě nutné podotknout, že z výsledku analýzy chlazení je patrné, že tvárník je intenzivněji chlazen oproti tvárnici, což je zřejmě způsobeno větší vzdáleností chladicího obvodu tvárnice od tvarové dutiny formy v důsledku umístění vtokového systému formy.

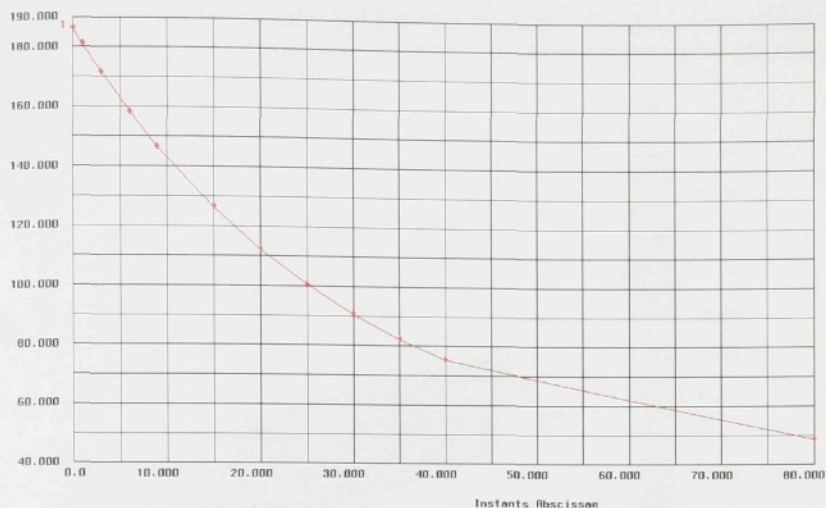
Pro lepší přehlednost jsou tyto časové změny povrchových teplot na výrobku, tvárníku a tvárnici v grafické podobě ukázány na obr. 3.19 až 3.21 a na obr. 3.22 je ukázána křivka tuhnutí pro vybrané místo na výrobku – prostředek přední části zadního nárazníku i se zahrnutým simulačním výpočtem pro čas 80 s.



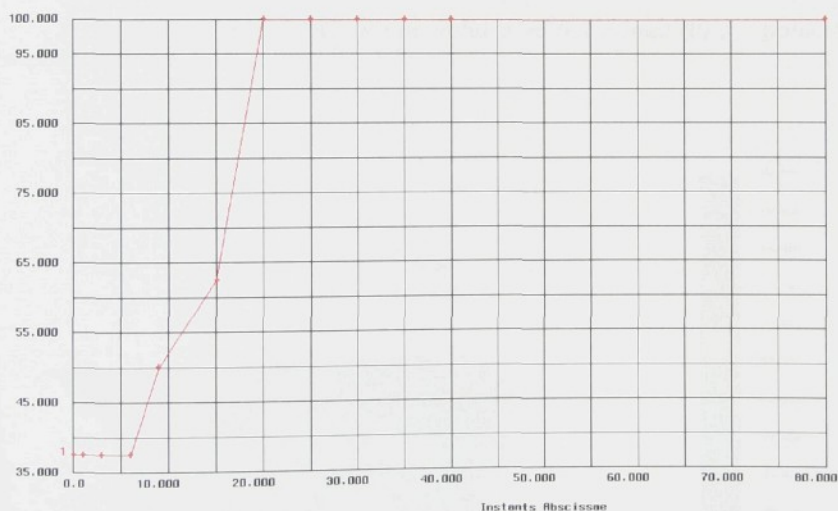
Obr. 3.19: Grafická závislost teplota /°C/- čas /s/ na povrchu tvárníku během doby chlazení



Obr. 3.20: Grafická závislost teplota /°C/- čas /s/ na povrchu tvárnice během doby chlazení



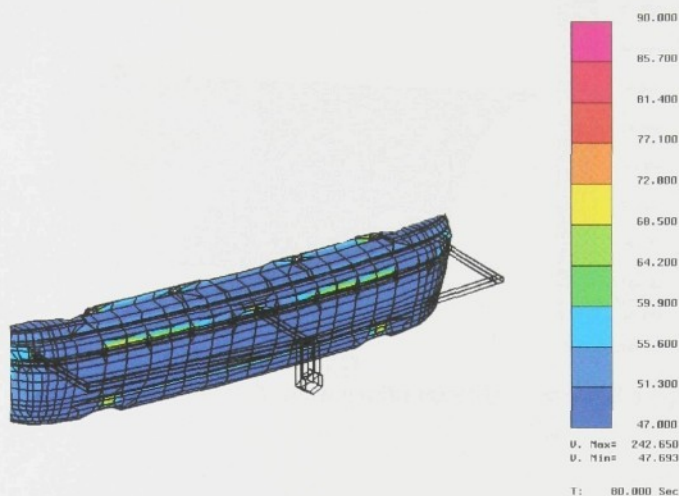
Obr. 3.21: Grafická závislost teplota /°C/– čas /s/ na povrchu výrobku během doby chlazení



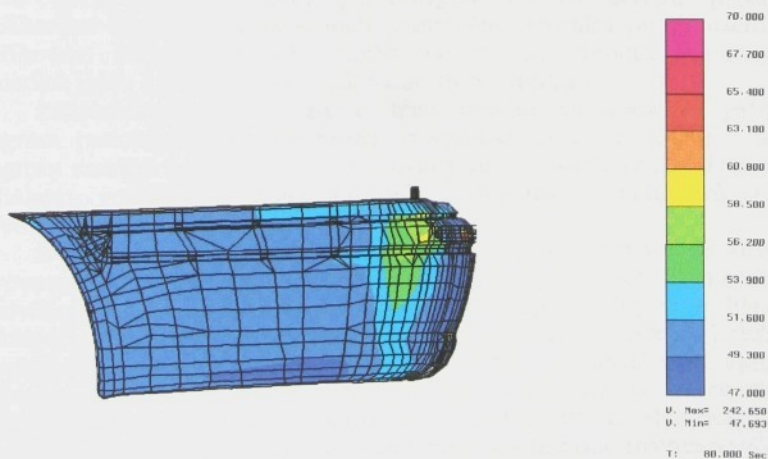
Obr. 3.22: Grafická závislost procento ztuhlé vrstvy /%/– čas /s/ během doby chlazení

Pro vyhodnocení vztahu mezi experimentem a simulací v závěru této habilitační práce jsem na následujících obrázcích (viz. obr. 3.23 až 3. 25) provedl grafické výstupy rozložení teplotních polí pro čas 80 s po

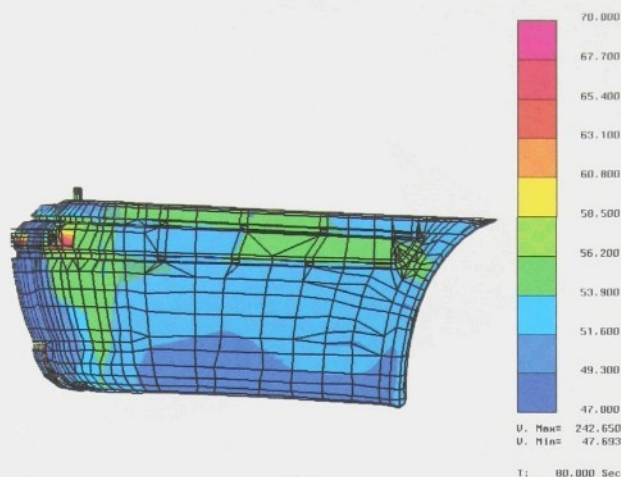
otevření formy a to tak, aby pohledy na výsledky simulace byly shodné s nasnímanými termovizními výstupy a tedy vzájemně snadněji hodnotitelné a přehlednější.



Obr. 3.23: Teplota /°C/ na povrchu výrobku v čase 80 s – pohled zepředu, detail



Obr. 3.24: Teplota /°C/ na povrchu výrobku v čase 80 s – pohled zprava



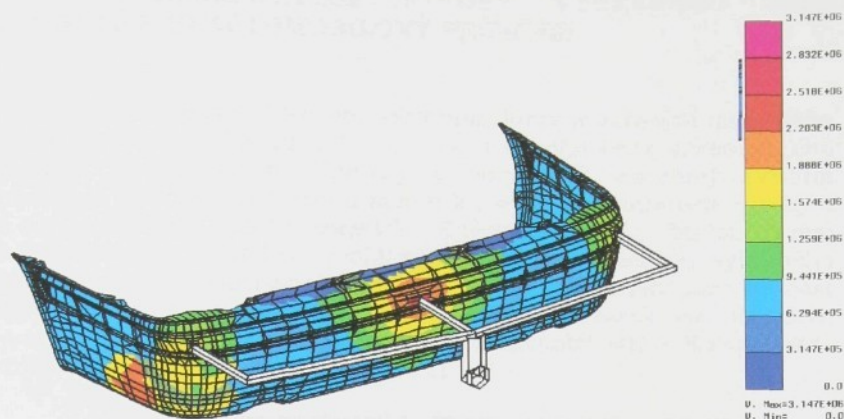
Obr. 3.25: Teplota /°C/ na povrchu výrobku v čase 80 s – pohled zleva

3.2.3. Strukturní analýza plastového dílu po vyhození ze vstřikovací formy

Po ukončení analýzy plnění a analýzy chlazení následuje pro dokončení kompletní analýzy vstřikování plastů strukturní analýza, která se zabývá účinkem jednotlivých vlivů během procesu vstřikování na konečné vlastnosti plastového výrobku po vyhození ze vstřikovací formy a která využívá ke svému výpočtu konečných výsledků jak z analýzy tečení, tak i z analýzy chlazení.

Základními výstupy z této třetí oblasti simulace je jednak diagram rozložení vnitřního pnutí ve výrobku (viz. obr. 3.25) a také diagram smrštění, které jsou ovlivňovány např. vstřikovacím tlakem a dotlakem, rozložením teplotních polí a napěťových polí, způsobem tečení, apod.

Z diagramu vnitřního pnutí (viz. obr. 3.26) je patrné, že vlivem nerovnoměrného plnění tvarové dutiny formy, nerovnoměrného takového profilu a nerovnoměrného rozložení teplotních polí je, hlavně v oblastech vyústění vtokových systémů, v dolních částech boků u přechodové oblasti a v přední části obou boků, poměrně dost vysoká hodnota vnitřního pnutí na výrobku. Tato skutečnost by se ve svém důsledku měla projevit při hodnocení mechanických vlastností na odebraných tělesech ze zadního nárazníku, které bude uvedeno v kap. 4.2.2.



Obr. 3.26: Diagram rozložení vnitřního pnutí /Pa/ ve výrobku v okamžiku otevření formy

V následující kapitole bude provedeno experimentální měření jednak parametrů materiálu plastu na vstupu do vstřikovacího procesu a jednak termovizní měření teplotních polí na povrchu zadního nárazníku, které „silou“ praktických měření bude rozhodujícím činitelem pro hodnocení kvality provedené simulace pomocí systému STRIMFLOW, která byla uvedena v této kapitole.

4. PROBLEMATIKA VÝROBY VYBRANÉHO DÍLU Z PLASTŮ PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

Míra účelnosti vědeckého výzkumu, který je zaměřen na potřeby praxe, je v konečném důsledku určována a hodnocena kritériem jeho praktické použitelnosti. Správný a konkrétně zaměřený výzkum problémů přispívá významnou měrou k rozvoji a produktivitě výroby a k co nejnížšímu počtu zmetků. Z těchto důvodů budou v této habilitační práci uvedeny problémy, které byly řešeny u vybraného plastového dílu, používaného v automobilovém průmyslu jako součást montovaného vozu. Vybraným dílem je zadní nárazník (viz. obr. 3.1), vyráběný v a. s. Peguform Bohemia, na automobil A02 – Škoda Felicie Combi, model roku 1998 (viz. obr. 4.1).



Obr. 4.1: Škoda Felicie Combi, model roku 1998

S pronikáním plastů do technických aplikací rostou i požadavky na kvalitu a jakost vyráběných dílů, které nespočívají pouze v konečné kvalitě vyrobeného dílu, ale i v řízení kvality během procesu zpracování. Nejedná se tedy např. jen o kvalitní vzhled, ale např. i o rozměrovou přesnost, shodnou kvalitu v celém objemu plastového výrobku, atd.

Při výrobě dílů z plastů se můžeme setkat z různými chybami, které následně vedou k výrobě zmetků. Rozeznáváme následující kategorie chyb, které způsobují problémy při výrobě:

- ◆ vady, vznikající špatnou konstrukcí a návrhem výrobku,
- ◆ nevyhovující vlastnosti materiálu,
- ◆ konstrukční vady nástroje,
- ◆ technologické chyby a nedostatky,
- ◆ strojně technické chyby.

V normálním případě je velmi obtížné přiřadit vzniklé problémy k některé z uvedených kategorií, neboť se vzájemně překrývají, ale platí, že čím dříve chyba vznikne, tím více zmetků a špatných výrobků je v konečném stádiu vyrobeno. Proto se musí důsledně provádět kontrola kvality v jednotlivých oblastech zpracovatelského cyklu a v případě vzniku problémů je co nejrychleji odstranit.

Vzhledem k požadavkům a. s. Škoda Auto na tvar výrobku, který je dán designem vozu a vzhledem ke kvalitě zpracovatelských zařízení a technologie vstřikování včetně mikropřesového řízení, jsem v dalších kapitolách této habilitační práce neuvažoval vliv konstrukce a tvaru výrobku, vliv použité výrobní technologie a vliv stroje na problémy, které vznikají při výrobě zadního nárazníku a zabýval jsem se proto pouze studiem vlivu materiálu a vlivu formy na konečný produkt.

4.1. PROBLEMATIKA ZMETKOVITOSTI PŘI VÝROBĚ NÁRAZNÍKŮ VE VZTAHU KE ZMĚNÁM PARAMETRŮ VYBRANÝCH ŠARŽÍ

Vlastnosti výrobku jsou určeny a ovlivňovány použitým druhem plastu, tj. jeho molekulárními vlastnostmi, nadmolekulární strukturou, složením hmoty, makrostrukturou a vnitřním stavem materiálu, který je výsledkem tepelně mechanické historie, již byla hmota vystavena během procesu zpracování. Vlastnosti materiálu jsou tedy jednak dány jejich základní fyzikální a chemickou strukturou a jednak výrobním a zpracovatelským procesem.

Před rokem 1998 se na výrobu nárazníků pro *Škodu Felicii* všech typů používal polypropylen *MOSTEN 52.534*, vyráběný *a. s. Chemopetrol Litvínov*. Jednalo se o homopolymer, modifikovaný přídavkem EPDM kaučuku a stabilizátory proti působení povětrnostních vlivů. Od samého počátku nasazení materiálu *MOSTEN 52.534* se *a. s. Peguform Bohemia* potýkala s vysokou zmetkovitostí výrobků z tohoto materiálu, kolísáním vlastností jednotlivých šarží a výsledky zkoušek, prováděných na vstupní kontrole v *a. s. Peguform Bohemia* se výrazně lišily od hodnot, udávaných výrobcem. Vzniklé problémy a odlišné vlastnosti způsobovaly kolísání parametrů na vstřikovacím stroji a vysoký nárůst zmetků při nájezdu nové šarže a tím tedy i velké prostoje při opětovném seřizování stroje.

Po dlouhodobých problémech a neochotě *a. s. Chemopetrolu Litvínov* řešit situaci se od roku 1998 používá k výrobě nárazníků materiál *KELTAN TP 2550/3* od firmy *DSM* (Holandsko), který měl nahradit materiál *MOSTEN 52.534* a snížit vliv materiálu na zmetkovitost výroby. Jedná se o polypropylen plněný talkem (anorganické minerální plnivo na bázi křemičitanů) v objemu 4 až 8 %, stabilizovaný proti povětrnostním vlivům, dobře tekoucí a vhodný k výrobě dílů s nulovou spárou a pro lakování (viz. tab. 4.1).

Během dodávek jednotlivých šarží polypropylénu *KELTAN TP 2550/3* byly odebrány vzorky hmoty pro zkoušky indexu toku taveniny

(ITT), zkoušky hustoty, zkoušky pevnosti v tahu, tažnosti a zkoušky na obsah popela. Během zpracování jednotlivých šarží byl sledován počet zmetků s popisem vyskytujících se vad. Cílem tohoto řešení, pokud to bude možné, mělo být nalezení souvislosti mezi materiálovými vlastnostmi a vzniklými vadami a vyhodnocení velikosti vlivu jednotlivých materiálových vlastností.

Tab. 4.1: Vlastnosti polypropylenu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3	Typické hodnoty
Fyzikální vlastnosti	
Hustota /g.cm ⁻³ /	0,905
Tvrdost Shore D	50
Smrštění /%/	0,9 až 1,1
Technologické vlastnosti	
ITT /g.10min ⁻¹ /	20 (při 230 °C, 2,16 kg)
Index tekutosti /cm/	57,86 (při 240 °C)
Min. teplota zpracování /°C/	200
Max. teplota zpracování /°C/	270
Teplota formy /°C/	60
Sušení /°C.hod ⁻¹ /	80/2
Mechanické vlastnosti	
Modul pružnosti /MPa/	1189 /1 mm.min ⁻¹ /
Napětí na mezi pevnosti /MPa/	16
Napětí při přetržení /MPa/	14
Tažnost /%/	10
Tažnost při přetržení /%/	100
Rázová houževnatost IZOD /kJ.m ⁻² /	> 60
Tepelné vlastnosti	
Odolnost za tepla podle VICATA /°C/	115
Teplotní odolnost /°C/	90

4.1.1. Kontrola vlastností vstupního plastu – měření indexu toku taveniny, hustoty a obsahu minerálního plniva

Index toku taveniny (ITT) je velmi důležitou vlastností plastů a zjišťuje se technologickou zkouškou, která hodnotí tekutost plastů a tedy vhodnost jednotlivých materiálů pro vybrané technologie a druhy výrobků. Měření se provádí na plastometrech přes trysku standardních rozměrů. Index toku taveniny byl pro tři rozdílné materiálové šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3 měřen v a. s. Peguform Bohemia na přístroji CEAST (viz obr. 4.2) italské výroby dle normy ISO 1133.



Obr. 4.2: Plastometr CEAST

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty ITT pro tři šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - index toku taveniny ITT /g.10min ⁻¹ /			
č. měření / č. šarže	šarže č. 1	šarže č. 2	šarže č. 3
měření č. 1	20,45	21,45	19,20
měření č. 2	20,26	21,04	20,25
měření č. 3	20,21	21,11	19,88
měření č. 4	20,86	22,02	19,10
měření č. 5	21,04	21,88	19,60
měření č. 6	20,62	21,72	20,35
měření č. 7	20,58	21,86	19,72
měření č. 8	20,84	21,11	20,14
měření č. 9	20,60	21,89	20,27
měření č. 10	20,35	21,52	20,02
měření č. 11	20,46	21,70	19,96
měření č. 12	20,72	21,52	19,82
měření č. 13	20,24	21,26	20,04
měření č. 14	20,79	21,84	20,41
měření č. 15	21,02	21,72	20,16
měření č. 16	20,28	21,52	20,45
měření č. 17	20,36	21,88	20,32
měření č. 18	20,49	21,26	20,06
měření č. 19	20,57	21,60	20,17
měření č. 20	20,63	21,84	19,89
prům. hodnota	20,57	21,59	19,99
směrodatná odchylka	0,2393	0,2847	0,3490

Při měření nelze získat hodnotu indexu toku taveniny (*ITT*) přímo, protože přístroj vyhodnocuje objemový tavný index $MVR / \text{cm}^3 \cdot 10 \text{min}^{-1}$, který se musí následně přepočítat na hmotnostní tavný index $MFR / \text{g} \cdot 10 \text{min}^{-1}$. Pro vyhodnocení hmotnostního tavného indexu je nutné zvážit automaticky odříznutou vytlačenou strunu až po vychladnutí. Materiál byl zkoušen při teplotě 230 °C a po době předehřevu 360 s byl vytlačován tryskou o průměru $2,095 \pm 0,005 \text{ mm}$ a délce $8 \pm 0,025 \text{ mm}$ a při zatížení 2,16 kg (21,18 N). Materiál byl ve formě granulí a hmotnost vkládaného materiálu byla $5 \pm 0,2 \text{ g}$. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.2.

2. dílek

Z naměřených a vypočtených hodnot je patrné, že index toku taveniny je téměř shodný s indexem toku, uváděným v materiálových listech (viz. tab. 4.1), kde je uvedena střední hodnota. Rozmezí *ITT* pro polypropylén *KELTAN TP 2550/3* je 18 až 22 $\text{g} \cdot 10 \text{min}^{-1}$, čemuž naměřené hodnoty bezesbýtku vyhovují. Pokud srovnáme jednotlivé šarže mezi sebou, tak pouze u šarže č. 2 je poněkud vyšší hodnota *ITT* oproti ostatním dvěma šaržím (4,75 % vůči šarži č. 1 a 7,42 % vůči šarži č. 3).

Hustota plastů je dána chemickým složením (klesá s rostoucí nepolaritou plastu), druhem a množstvím přísad a na nadmolekulární strukturu (stoupá se zvyšujícím se stupněm krystalinity).

Měření hustoty materiálu polypropylénu *KELTAN TP 2550/3* byla provedeno podle zkušební metody A (hydrostatická metoda) dle ČSN 640111, která je určena pro granuláty nebo konečné výrobky z plastů. Jako materiál pro měření hustoty bylo použito strun vytlačených při zkoušce indexu toku taveniny. Tyto struny nesměly obsahovat vzduchové bubliny a po zvážení na vzduchu a v imersní kapalině byl proveden výpočet hustoty zkoušeného plastu, jehož výsledky jsou uvedeny v tab. 4.3. Uvedené hodnoty jsou průměry z pěti měření. Teplota imersní kapaliny byla 23 °C.

2. dílek
"struny"

Hustota, naměřená pro tři šarže zkoušeného polypropylénu (viz. tab. 4.3) je vyšší, než-li udávaná materiálová hodnota a to o 0,83 % pro šarži č. 1, o 1,78 % pro šarži č. 2 a o 0,61 % pro šarži č. 3, což jsou odchylky od materiálového listu dle mého názoru akceptovatelné a nevyžadující výrazné pozornosti. Nejvyšších hodnot hustoty vykazuje šarže č. 2, která obsahuje zřejmě vyšší procento plniva (talku), než-li druhé šarže, což by měla potvrdit zkouška na obsah plniva v plastu.

Plnivem lze do značné míry ovlivnit vlastnosti materiálu a vlastnosti výstřiku, proto je velice důležité jak dodržení stanoveného množství, tak i rovnoměrnost rozložení v celém objemu.

K ověření **obsahu plniva** v materiálu se používá zkouška, která spočívá v přesném odvážení vzorku (na čtyři desetinná místa) a následném žihání v elektrické peci při teplotě 600 °C po dobu dvou hodin. Z rozdílu vah je potom stanoven obsah plniva v materiálu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.4:

Ze zjištěných hodnot (viz. tab. 4.4) se potvrdil předpoklad, že s rostoucí hustotou roste i obsah plniva v plastu, který je pro všechny šarže polypropylénu *KELTAN TP 2550/3* nad hodnotou 5 %. Poměr

mezi naměřenou hustotou a zjištěnými hodnotami obsahu plniva je pro všechny tři šarže vyšší, jak hodnota 0,17 (0,171 pro šarži č. 1, 0,17 pro šarži č. 2, 0,176 pro šarži č. 3), ale nižší jak hodnota 0,181, což je poměr mezi materiálově uváděnou hustotou a obsahem talku 5 % (rozmezí pro obsah plniva 4 až 8 % talku je 0,226 až 0,113).

Tab. 4.3: Naměřené hodnoty hustoty pro tři šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - hustota ρ /g.cm ⁻³ /			
č. měření/ č. šarže	šarže č. 1	šarže č. 2	šarže č. 3
měření č. 1	0,9108	0,9251	0,9111
měření č. 2	0,9113	0,9197	0,9124
měření č. 3	0,9147	0,9221	0,9102
měření č. 4	0,9120	0,9241	0,9089
měření č. 5	0,9167	0,9199	0,9108
měření č. 6	0,9146	0,9237	0,9119
měření č. 7	0,9117	0,9221	0,9141
měření č. 8	0,9116	0,9224	0,9086
měření č. 9	0,9092	0,9213	0,9107
měření č. 10	0,9186	0,9211	0,9092
měření č. 11	0,9133	0,9219	0,9117
měření č. 12	0,9092	0,9207	0,9108
měření č. 13	0,9113	0,9187	0,9121
měření č. 14	0,9119	0,9201	0,9097
měření č. 15	0,9145	0,9220	0,9084
měření č. 16	0,9114	0,9188	0,9124
měření č. 17	0,9124	0,9199	0,9106
měření č. 18	0,9117	0,9237	0,9090
měření č. 19	0,9111	0,9216	0,9112
měření č. 20	0,9141	0,9186	0,9087
prům. hodnota	0,9126	0,9214	0,9106
směrodatná odchylka	0,002231	0,001769	0,001470

Také rozdíl mezi jednotlivými šaržemi není nijak výrazný a nepřekračuje hodnotu 5 % (mezi šarží č. 1 a č. 2 je 1,66 %, mezi šarží č. 1 a č. 3 je 3,37 % a mezi šarží č. 2 a č. 3 je 4,98 %).

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty obsahu minerálního plniva pro tři šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - obsah plniva /%/			
č. měření / č. šarže	šarže č. 1	šarže č. 2	šarže č. 3
měření č. 1	5,31	5,40	5,16
měření č. 2	5,31	5,46	5,28
měření č. 3	5,30	5,43	5,14
měření č. 4	5,37	5,49	5,04
měření č. 5	5,28	5,39	5,01
měření č. 6	5,37	5,39	5,12
měření č. 7	5,34	5,43	5,13
měření č. 8	5,37	5,45	5,13
měření č. 9	5,38	5,46	5,24
měření č. 10	5,38	5,29	5,16
měření č. 11	5,33	5,44	5,27
měření č. 12	5,31	5,37	5,13
měření č. 13	5,26	5,51	5,14
měření č. 14	5,33	5,41	5,19
měření č. 15	5,41	5,46	5,26
měření č. 16	5,29	5,24	5,31
měření č. 17	5,33	5,33	5,09
měření č. 18	5,33	5,40	5,00
měření č. 19	5,28	5,49	5,14
měření č. 20	5,37	5,52	5,07
prům. hodnota	5,33	5,42	5,15
směrodatná odchylka	0,0387	0,0679	0,0832

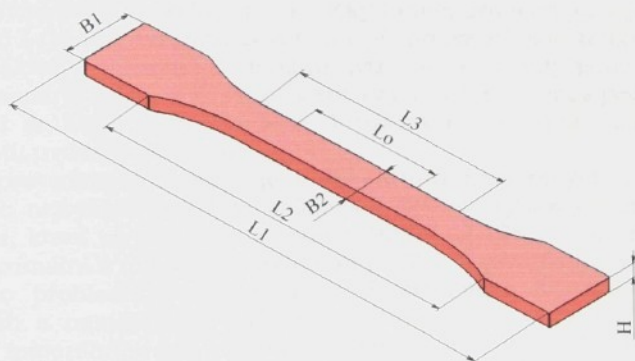
4.1.2. Kontrola vlastností vstupního plastu s použitím zkoušky tahem

Pro zjištění materiálových vlastností (mechanických vlastností) byla dále použita tahová zkouška podle normy *DIN 53 455*, která slouží k popisu chování plastů při statickém namáhání tahem. Tahová zkouška byla provedena v a. s. *Peguform Bohemia* na trhacím stroji *INSTRON 4202* (viz. obr. 4.3), který ukazuje a zapisuje průběh síly a prodloužení při vybrané zkušební rychlosti a který zajišťuje podmínky, stanovené normou *DIN 51 221*, mezi které především patří:

- ♦ podélná osa zkušební tělesa musí být ve směru tahové síly;
- ♦ nesmí docházet ke klouzání materiálu v čelistech;
- ♦ čelisti nesmí způsobit porušení materiálu;
- ♦ čelisti se nesmí během zkoušky otevřít.



Obr. 4.3: Trhací stroj INSTRON 4202 pro zkoušku tahem



Obr. 4.4: Rozměry zkušební tyčky pro zkoušku tahem dle DIN 53 455: $L_0 = 50 \pm 0,5$ mm, $L_1 \geq 150$ mm, $L_2 = 115 \pm 5$ mm, $L_3 = 60 \pm 0,5$ mm, $H = 4 \pm 0,4$ mm, $B_1 = 20 \pm 0,5$ mm, $B_2 = 10 \pm 0,5$ mm.

Zkušební tělesa ve tvaru zkušební tyčky (viz. obr. 4.4) z jednotlivých šarží polypropylénu *KELTAN TP 2550/3* byly vyrobeny v laboratoři *katedry tváření a plastů* na speciálně upraveném

vstřikovacím stroji pro výrobu zkušebních těles *ENGEL ES 50/25* za následujících technologických podmínek zpracování:

• teplota taveniny	: 230 °C;
• teplota formy	: 60 °C;
• rychlost vstřiku	: 2 s;
• vstřikovací tlak	: 5 MPa;
• dotlak	: 100 % vstřikovacího tlaku;
• zpětný odpor šneku	: 4,5 MPa
• uzavírací tlak	: 14 MPa
• čas vstřikování včetně dotlaku	: 20 s;
• doba chlazení	: 15 s;
• celkový cyklus	: 60 s.

Po vyrobení byly zkušební tělesa kondicionovány po dobu 24 hod při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 50 %. Následně byla na zkušebních tyčkách proměřena tloušťka a šířka na třech místech v pracovní části zkušebního tělesa a z těchto hodnot byl vypočten počáteční průřez pro další vyhodnocení zkoušky tahem.

Po upnutí zkušebních těles do čelistí trhacího stroje proběhl vlastní měření při rychlosti oddalování upínacích částí 50 mm.min⁻¹. Současně se v průběhu zkoušky zaznamenávala síla a prodloužení (měření probíhalo pomocí průtahoměrů i přesto, že u krystalických plastů a hlavně u polyolefinů, je poměrně značné a některá zařízení nejsou schopné toto postihnout) a z tohoto průběhu se vyhodnotily charakteristické veličiny, které jsou pro jednotlivé šarže uvedeny v tab. 4.5, 4.6 a 4.7.

Z naměřených hodnot ze zkoušky tahem pro šarži č. 1 je patrné, že napětí i tažnost na mezi pevnosti i při přetržení jsou téměř shodné s materiálově uváděnými hodnotami (viz. tab. 4.1), kdy pouze tažnost při přetržení je skoro o deset procent vyšší (9,1 %) a mez pevnosti při přetržení se liší o 8 %. Šarže č. 1 má akceptovatelné odchylky od vlastností, uváděných výrobcem.

Z provedených měření je a ze shrnutí naměřených hodnot je jasné, že nejvyšší rozptyl ze zjištěných hodnot vykazuje tažnost při přetržení, která se pohybuje v rozmezí 93,39 až 128,11 %, kdy poměr mezi maximální a minimální hodnotou je 27,1 % (rozdíl činí 34,72 %).

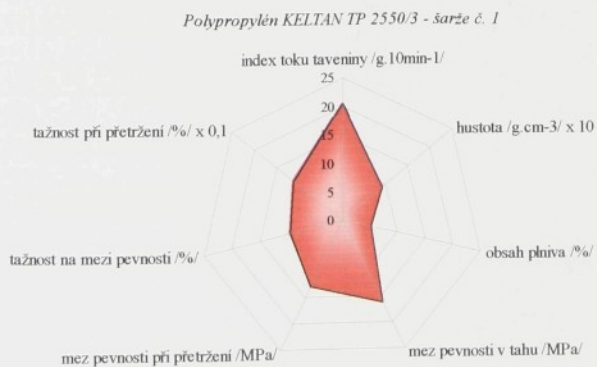
Pro přehlednost je na obr. 4.5 provedeno shrnutí doposud zjištěných a naměřených hodnot, tj. indexu toku taveniny, hustoty, obsahu minerálního plniva, meze pevnosti v tahu a při přetržení a tažnosti na mezi pevnosti a při přetržení pro šarži č. 1.

U šarže č. 2 je zjištěná hodnota tažnosti při přetržení výrazně odlišná, a to jednak jak od šarže č. 1, tak i od materiálových údajů, uváděných výrobcem. Hodnota tažnosti při přetržení dosahuje skoro 135 % a je tak o 24,93 % vyšší, jak materiálová hodnota a také vykazuje velký rozptyl naměřených hodnot, který se pohybuje v rozmezí 107,74 až 131,07 %, kdy poměr mezi maximální a minimální hodnotou je 17,8 % (rozdíl činí 23,33 %) a je tak nižší, jak u šarže č. 1.

? šar. 153

Tab. 4.5: Naměřené hodnoty ze zkoušky tahem pro šarži č. 1 polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - TAHOVÁ ZKOUŠKA, šarže č. 1				
číslo měření	mez pevnosti /MPa/		tažnost /%/	
	v tahu	při přetržení	mezni	při přetržení
měření č. 1	16,289	12,784	9,515	128,11
měření č. 2	16,365	13,885	9,355	118,87
měření č. 3	16,285	12,565	9,534	109,12
měření č. 4	16,314	14,144	9,337	116,44
měření č. 5	16,365	12,553	9,504	102,79
měření č. 6	16,340	12,634	9,262	100,07
měření č. 7	16,238	12,519	9,645	109,20
měření č. 8	16,442	12,396	9,442	104,25
měření č. 9	16,391	12,829	9,055	95,83
měření č. 10	16,340	12,641	9,644	93,39
měření č. 11	16,081	12,359	9,594	115,32
měření č. 12	16,004	13,234	9,670	109,31
měření č. 13	16,132	12,174	9,586	120,06
měření č. 14	16,234	12,955	9,698	112,35
měření č. 15	15,953	13,275	9,690	112,78
měření č. 16	16,234	12,270	9,614	107,19
měření č. 17	16,157	13,782	9,360	104,86
měření č. 18	16,132	12,222	9,420	114,36
měření č. 19	16,030	13,869	9,689	107,21
měření č. 20	16,004	13,978	9,638	117,72
prům. hodnota	16,217	12,953	9,513	109,962
směrodatná odchylka	0,1392	0,6195	0,1633	8,0881



Obr. 4.5: Naměřené hodnoty pro polypropylén KELTAN TP 2550/3, šarži č. 1

Na rozdíl od tažnosti při přetržení jsou napětí na mezi pevnosti i při přetržení téměř shodné s materiálovými uváděnými daty (16 MPa a 14 MPa) a i tažnost na mezi pevnosti se blíží uváděným 10 %.

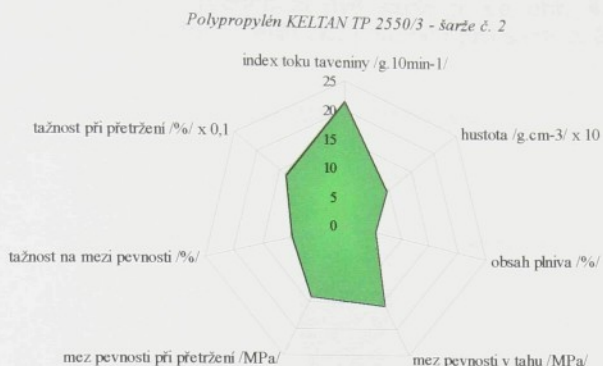
Na obr. 4.6 je pro šarži č. 2 provedeno shrnutí obdobným způsobem, jako pro šarži č. 1.

Z naměřených hodnot ze zkoušky tahem pro šarži č. 3 lze učinit podobný závěr, jako pro šarži č. 2. Nebo-li všechny zjištěné hodnoty napětí a tažnosti na mezi pevnosti a při přetržení odpovídají materiálovým, udávaných výrobcem, pouze tažnost při přetržení je mnohem vyšší, než-li uváděných 100 %. Rozdíl činí 20,51 %.

Ze shrnutí naměřených hodnot je patrné, že nejvyšší rozptyl ze zjištěných hodnot vykazuje tažnost při přetržení, která se pohybuje v rozmezí 107,99 až 143,47 %, kdy poměr mezi maximální a minimální hodnotou je 24,73 % (rozdíl činí 35,48 %) a je srovnatelný s šarží č. 1.

Tab. 4.6: Naměřené hodnoty ze zkoušky tahem pro šarži č. 2 polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - TAHOVÁ ZKOUŠKA, šarže č. 2				
číslo měření	mez pevnosti /MPa/		tažnost /%/	
	v tahu	při přetržení	na mezi pevnosti	při přetržení
měření č. 1	15,846	14,225	9,610	149,70
měření č. 2	15,923	14,810	9,403	128,34
měření č. 3	15,923	13,623	9,645	111,74
měření č. 4	15,719	13,041	9,699	115,99
měření č. 5	15,693	14,001	9,788	120,99
měření č. 6	15,668	15,310	9,691	137,21
měření č. 7	15,872	13,485	9,712	146,00
měření č. 8	15,744	13,260	9,592	157,68
měření č. 9	15,642	12,171	9,668	134,51
měření č. 10	15,438	13,694	9,626	132,83
měření č. 11	15,331	14,482	9,581	161,07
měření č. 12	15,440	13,827	9,619	139,92
měření č. 13	15,384	14,901	9,603	126,52
měření č. 14	15,629	13,218	9,702	107,74
měření č. 15	15,527	14,499	9,623	126,00
měření č. 16	15,578	13,751	9,802	129,05
měření č. 17	15,658	13,787	9,583	156,87
měření č. 18	15,655	12,657	9,605	113,39
měření č. 19	15,731	15,032	9,535	146,87
měření č. 20	15,962	13,443	9,567	121,80
prům. hodnota	15,668	13,861	9,633	133,211
směrodatná odchylka	0,1735	0,7737	0,0842	15,1752

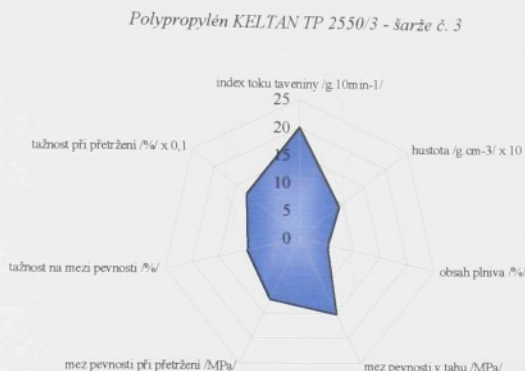


Obr. 4.6: Naměřené hodnoty pro polypropylén Keltan TP 2550/3, šarži č. 2

Tab. 4.7: Naměřené hodnoty ze zkoušky tahem pro šarži č. 3 polypropylénu Keltan TP 2550/3

PP Keltan TP 2550/3 - TAHOVÁ ZKOUŠKA, šarže č. 3				
číslo měření	mez pevnosti /MPa/		tažnost /%/	
	v tahu	při přetržení	na mezi pevnosti	při přetržení
měření č. 1	15,884	12,682	9,619	124,25
měření č. 2	15,527	11,791	9,581	132,92
měření č. 3	15,099	11,024	9,777	143,47
měření č. 4	15,058	11,970	9,899	119,47
měření č. 5	15,290	11,977	9,729	125,39
měření č. 6	14,823	12,332	9,854	132,51
měření č. 7	15,139	12,260	9,874	108,82
měření č. 8	15,002	12,541	9,866	118,99
měření č. 9	15,180	11,884	9,861	107,99
měření č. 10	15,884	12,767	9,856	127,08
měření č. 11	15,290	12,670	9,839	110,59
měření č. 12	15,440	13,162	9,685	124,44
měření č. 13	15,359	13,436	9,704	140,70
měření č. 14	15,180	12,272	9,604	139,62
měření č. 15	15,099	11,349	9,778	133,64
měření č. 16	15,124	12,260	9,819	138,81
měření č. 17	15,234	13,183	9,648	117,82
měření č. 18	15,152	11,458	9,790	111,38
měření č. 19	15,195	12,604	9,890	119,82
měření č. 20	14,810	11,951	9,774	138,34
prům. hodnota	15,238	12,279	9,772	125,803
směrodatná odchylka	0,2673	0,5964	0,0965	10,7917

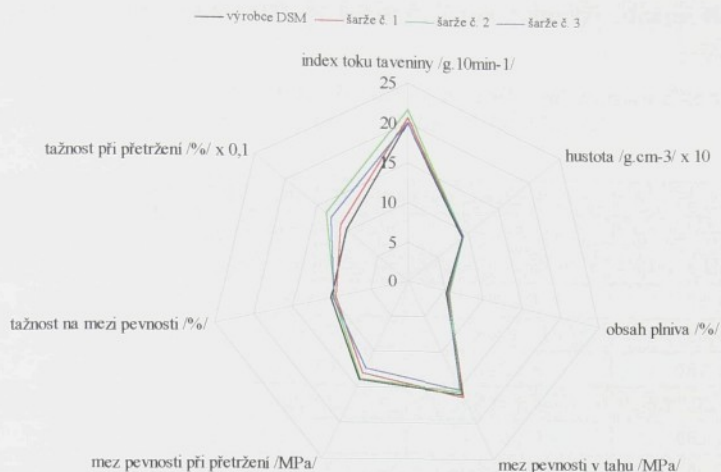
Stejně jako pro předchozí dvě šarže je na obr. 4.7 provedeno shrnutí zjištěných hodnot v grafické podobě i pro šarži č. 3.



Obr. 4.7: Naměřené hodnoty pro polypropylén Keltan TP 2550/3, šarže č. 3

Při hodnocení jednotlivých šarží mezi sebou a mezi hodnotami, uváděnými výrobcem, pomocí paprskového grafu (viz. obr. 4.8) je možné konstatovat, že čím menší plochu zaujímá obrazec, vytvořený z jednotlivých zkoušených parametrů, tak tím pádem bude materiál mít vlastnosti, které nebudou významně ovlivňovat konečnou kvalitu výrobku, jeho užité vlastnosti a tedy prodejnost a konkurenceschopnost výrobku na trhu. Je však otázkou, co s materiálem, který bude mít hodnoty mnohem nižší, než-li jsou hodnoty uváděné od výrobce. V tomto případě samozřejmě neplatí předchozí závěr a proto bych chtěl původní tvrzení opravit na skutečnost, že čím bude menší rozdíl mezi obsahem plochy vytvořeného obrazce k obsahu plochy obrazce, vytvořeného z hodnot udávaných výrobcem, tak tím pádem bude mít materiál vhodnější vlastnosti pro použití při zpracování.

Z provedených měření a ze zjištěných hodnot má nejvhodnější vlastnosti u polypropylénu Keltan TP 2550/3 pro další použití šarže č. 1, a to i tehdy, že při srovnání rozptylu hodnot u tažnosti při přetržení má nejhorší hodnoty, potom šarže č. 3 a nakonec šarže č. 2, a to i přesto, že tyto dvě šarže jsou ve svém důsledku skoro srovnatelné. Je zajímavým zjištěním, že i u stejné šarže tak kolísají naměřené hodnoty při jednotlivých odběrech během procesu zpracování, což svádí k tvrzení, že ani celá šarže nemá konstantní vlastnosti. Tedy tvrzení velmi odvážné, které by se muselo potvrdit dalším mnohem větším počtem experimentálních měření. Co je však nepřijemné, tak to jsou změny parametrů na výstupu při použití materiálu při vstřikování, protože parametry stroje nemohou kopírovat změnu vlastností hmoty, což ve svém důsledku vede k výrobě zmetků.



Obr. 4.8: Porovnání a srovnání jednotlivých šarží a tabulkových hodnot od výrobce pro polypropylén KELTAN TP 2550/3

4.1.3. Sledování zmetkovitosti při výrobě zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi při použití jednotlivých šarží

Pro jednotlivé odběry, které jsou označeny v předchozích tabulkách jako měření č. 1 až měření č. 20 a pro jednotlivé šarže, byl současně sledován výskyt zmetků při výrobě zadního nárazníku na Škodu Felicii Combi s cílem prokázat, zda má změna vlastností vstupního plastu výrazný či nevýrazný vliv na zmetkovitost výroby a pokud ano, tak jak významný.

Počet zmetků, zjištěný během zpracování (vstřikování) jednotlivých šarží je uveden v tab. 4.8.

Z naměřených výsledků a ze zjištěného počtu zmetků během použití jednotlivých šarží polypropylénu KELTAN TP 2550/3 je patrné, že procentuálně vyjádřený počet zmetků na počet celkem vyrobených kusů je v rozsahu od 2,85 % pro šarži č. 1 až do 10,66 % pro šarži č. 2 (pro šarži č. 3 je 9,08 %). Nebo-li čím horší jsou vstupní vlastnosti plastu, tím více zmetků vzniká během procesu výroby. Procento zmetků je u šarže č. 2 a u šarže č. 3 poměrně dost vysoké a ztráty na materiálu, energiích a práci potom mohou představovat statisíce během jednoho měsíce.

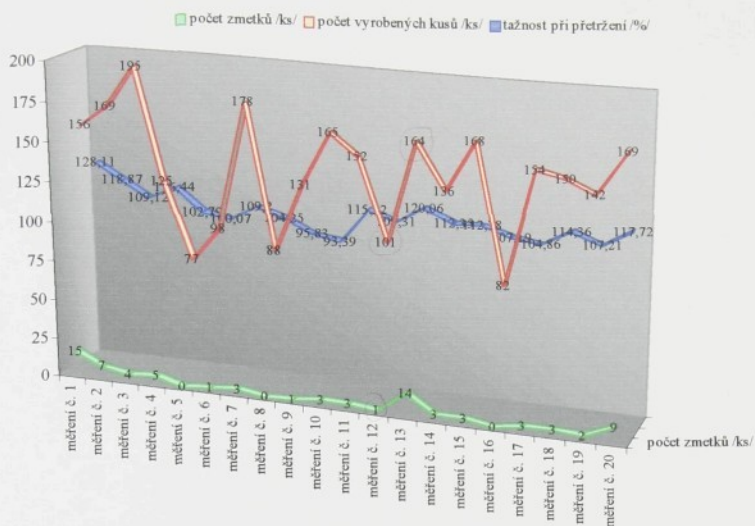
Vzhledem k tomu, že během provedených měření byl pro všechny tři šarže vyroben přibližně stejný počet výrobků, lze srovnat i počet zmetků na jedno měření. Pro zkoušený materiál a šarži č. 1 je tento průměr roven 4 zmetkům/měření, pro šarži č. 2 je průměr 15,4 zmetků/měření a pro šarži č. 3 je průměr 13,1 zmetků/měření. Opět

se potvrdila ta skutečnost, že šarže č. 2 má nejnevýhodnější vlastnosti pro zpracování.

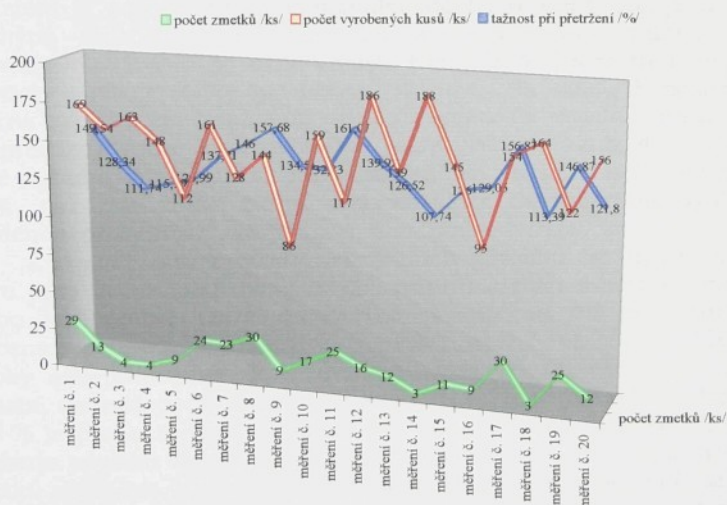
Tab. 4.8: Počet zmetků při výrobě zadního nárazníku Škody Felicie Combi pro tři šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - počet zmetků /ks/			
č. šarže č. měření	šarže č. 1 celkem ks/zmetky ks	šarže č. 2 celkem ks/zmetky ks	šarže č. 3 celkem ks/zmetky ks
měření č. 1	156 / 15	169 / 29	135 / 12
měření č. 2	169 / 7	154 / 13	89 / 9
měření č. 3	195 / 4	163 / 4	157 / 26
měření č. 4	125 / 5	148 / 4	195 / 9
měření č. 5	77 / 0	112 / 9	156 / 14
měření č. 6	98 / 1	161 / 24	140 / 16
měření č. 7	178 / 3	128 / 23	158 / 2
měření č. 8	88 / 0	144 / 30	123 / 2
měření č. 9	131 / 1	86 / 9	98 / 0
měření č. 10	165 / 3	159 / 17	136 / 11
měření č. 11	152 / 3	117 / 25	158 / 3
měření č. 12	101 / 1	186 / 16	139 / 11
měření č. 13	164 / 14	139 / 12	160 / 27
měření č. 14	136 / 3	188 / 3	175 / 28
měření č. 15	168 / 3	145 / 11	143 / 25
měření č. 16	82 / 0	95 / 9	159 / 24
měření č. 17	154 / 3	154 / 30	166 / 8
měření č. 18	150 / 3	164 / 3	129 / 3
měření č. 19	142 / 2	122 / 25	144 / 8
měření č. 20	169 / 9	156 / 12	126 / 24
celkem zmetků /ks/	80	308	262
celkem vyr. kusů /ks/	2800	2890	2886

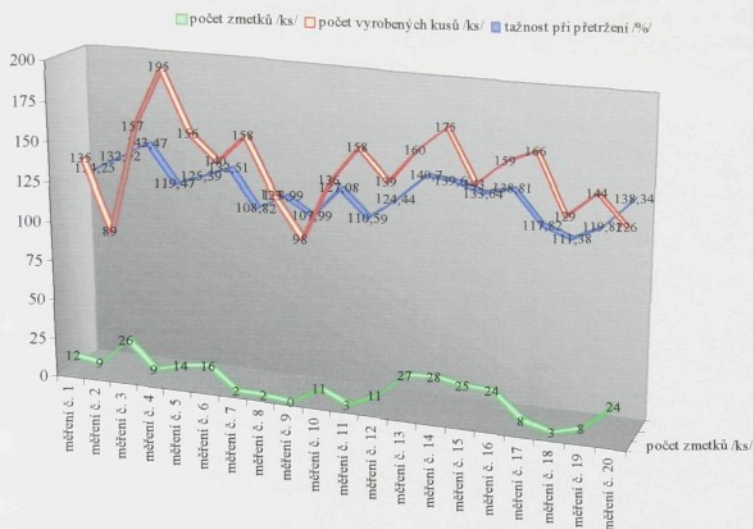
Z předchozích shrnutí a z naměřených hodnot vyplynul závěr, že u materiálu *KELTAN TP 2550/3* ze všech zjišťovaných vlastností nejvíce kolísá tažnost při přetržení a proto bude tomuto parametru v následujících částech věnována větší pozornost. Pro lepší přehlednost uváděných závěrů a pro další hodnocení jednotlivých šarží a zmetkovitosti výroby vlivem kolísání tažnosti je na obr. 4.9 až 4.11 graficky provedeno srovnání počtu zmetků, počtu kusů a tažnosti při přetržení (hodnoty převzaty z tab. 4.7 a z tab. 4.8).



Obr. 4.9: Porovnání počtu zmetků, počtu kusů a tažnosti při přetržení pro šarži č. 1 polypropylénu KELTAN TP 2550/3



Obr. 4.10: Porovnání počtu zmetků, počtu kusů a tažnosti při přetržení pro šarži č. 2 polypropylénu KELTAN TP 2550/3



Obr. 4.11: Porovnání počtu zmetků, počtu kusů a tažnosti při přetržení pro šarži č. 3 polypropylénu KELTAN TP 2550/3

Z grafu 4.9 až 4.11 (šarže č.1, č. 2 a č. 3) jsou patrné a můžu uvést tři hlavní závěry, a to za prvé, že s rostoucí tažností při přetržení roste i počet zmetků, za druhé, že do určité úrovně tažnosti při přetržení je počet zmetků maximálně do tří procent, což je u takto složitých dílů vynikající hodnota, ale nad touto hranicí počet nekvalitních výrobků výrazně vzrůstá (viz. tab. 4.9) a za třetí, že počet zmetků kopíruje svým průběhem tažnost. Na základě posledního závěru bylo provedeno shrnutí procenta zmetků v závislosti na tažnosti při přetržení, které je pro všechny šarže uvedeno v tab. 4.9. Jinak je ještě nutné podotknout, že počet zmetků pro šarži č. 2 a č.3 je výrazně vyšší, než-li u šarže č.1 a mnohem lépe dokumentuje výsledky, uvedené v předchozích grafech.

Z vypočtených procent nekvalitních výrobků lze učinit závěry, které jsou svým důsledkem až překvapivé a mají důležitou zpětnou vazbu na výrobu. Do hodnoty 115 % tažnosti při přetržení není procento zmetků vyšší, jak 3 % (rozsah 0 až 2,7 %), což je z hlediska výroby akceptovatelné. Nad hodnotou tažnosti při přetržení 115 % výrazně vzrůstá počet zmetků z vyrobených kusů. U hodnoty tažnosti 120 % je procento zmetků kolem 5,5 %, u hodnoty tažnosti 125 % je procento zmetků kolem 8 %, u hodnoty tažnosti 130 % je procento zmetků již kolem 10 %, u hodnoty tažnosti 140 % je procento zmetků vyšší, jak 15 % a u hodnoty tažnosti nad 150 % překračuje procento špatných kusů 20 % (grafické vyjádření pro jednotlivé šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3 po srovnání hodnot tažnosti při přetržení podle vzrůstající tendence je ukázáno na obr. 4.12).

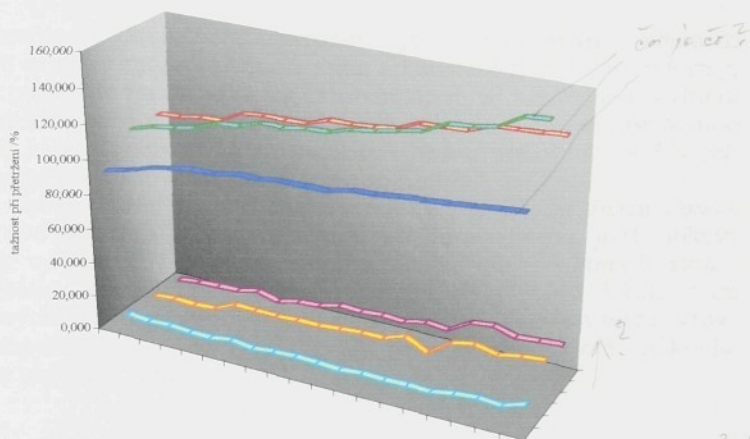
Tab. 4.9: Procentuální vyjádření počtu zmetků z celkově vyrobených kusů v závislosti na tažnosti při přetržení pro jednotlivé šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3

PP KELTAN TP 2550/3 - počet zmetků /% / z počtu vyrobených kusů						
číslo měření	šarže č. 1		šarže č. 2		šarže č. 3	
	tažnost při přetržení /% /	počet zmetků /% /	tažnost při přetržení /% /	počet zmetků /% /	tažnost při přetržení /% /	počet zmetků /% /
měření č. 1	128,110	9,62	149,700	17,16	124,250	8,89
měření č. 2	118,870	4,14	128,340	8,44	132,920	10,11
měření č. 3	109,120	2,05	111,740	2,45	143,470	16,56
měření č. 4	116,440	4,00	115,990	2,70	119,470	4,62
měření č. 5	102,790	0,00	120,990	8,04	125,390	8,97
měření č. 6	100,070	1,02	137,210	14,91	132,510	11,43
měření č. 7	109,200	1,69	146,000	17,97	108,820	1,27
měření č. 8	104,250	0,00	157,680	20,83	118,990	1,63
měření č. 9	95,830	0,76	134,510	10,47	107,990	0,00
měření č. 10	93,390	1,82	132,830	10,69	127,080	8,09
měření č. 11	115,320	1,97	161,070	21,37	110,590	1,90
měření č. 12	109,310	0,99	139,920	8,60	124,440	7,91
měření č. 13	120,060	8,53	126,520	8,63	140,700	16,88
měření č. 14	112,350	2,21	107,740	1,60	139,620	16,00
měření č. 15	112,780	1,79	126,000	7,59	133,640	17,48
měření č. 16	107,190	0,00	129,050	9,47	138,810	15,09
měření č. 17	104,860	1,95	156,870	19,48	117,820	4,82
měření č. 18	114,360	2,00	113,390	1,83	111,380	2,33
měření č. 19	107,210	1,41	146,870	20,49	119,820	5,56
měření č. 20	117,720	5,33	121,800	7,69	138,340	19,05

Zkráceně řečeno, nejenom že s rostoucí tažností při přetržení se zvyšuje počet zmetků, ale tento počet vzrůstá strmou křivkou k nepříjemným číslům, která ve svém důsledku vedou k výrazným ztrátám ve výrobě a dalším nákladům na jejich znovupoužití (recyklaci) nebo likvidaci. Tak např. zvýšení tažnosti z hodnoty 115 % na hodnotu 125 % (rozdíl 10 %) vede ke zvýšení počtu zmetků z 2,5 % na 8 % (rozdíl 5,5 %), ale již při změně tažnosti ze 115 % na hodnotu 150 % (rozdíl 35 %) vede ke zvýšení počtu zmetků z 2,5 % na 20 % (změna o 17,5 %).

Ve svém důsledku se jedná o vysoké hodnoty, které jenom dokazují, že vstupní kontrola je při výrobě nezbytně nutná a to i přesto, že výrobce materiálů vlastní atesty o kvalitě plastu. Zvláště u zpracování plastů na kvalitní a cenově náročné díly je nutné provést kontrolu vstupního plastu. Víam a je všeobecně známé, že náklady na kontrolu na vstupu jsou vysoké, ale cena, ušetřená ve výrobě při použití vhodného plastu, dokáže tyto náklady plně vyrovnat a dokonce

snížit vliv vstupního materiálu na konečnou cenu výrobku, což by mělo být prvoradé. Na druhé straně je však nutné podotknout, že by pro ověření předchozích závěrů bylo potřeba provést mnohem větší počet srovnávacích měření.



Obr. 4.12: Porovnání tažnosti při přetržení a procenta vadných kusů pro jednotlivé šarže polypropylénu KELTAN TP 2550/3

Pro větší přehlednost a pro srovnání bylo stejné měření provedeno na podobných typech výrobku. Nebo-li během prováděných měření a zjišťování počtu zmetků během výroby zadního nárazníku na Škodu Felicii Combi byl zjišťován i počet zmetků při výrobě předního a zadního nárazníku Škody Felicie, které byly vstříkovány ze stejných šarží.

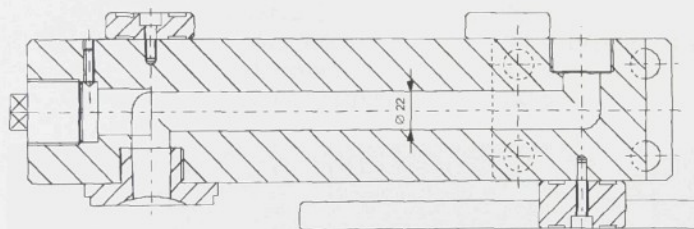
Vzhledem k omezenému rozsahu této habilitační práce bude zde uvedeno pouze stručné srovnání s uvedením možného vlivu vzniku zmetků. Nejvyšší počet vadných výrobků byl zjištěn pro zadní nárazník dlouhý (Felicie Combi), potom následoval zadní nárazník krátký, kde byl pokles zmetků vůči zadnímu dlouhému nárazníku o 18 % a nejnižší počet zmetků byl zjištěn pro přední nárazník a to i přesto, že je tvarově složitější, než-li nárazníky zadní. Pokles v tomto případě byl vůči zadnímu dlouhému nárazníku o 43 %. Po vyloučení všech shodných parametrů je určujícím faktorem, který dle mého názoru ovlivňuje počet vadných výrobků, průměr horkého vtokového kanálu, který je rozdílný pro jednotlivé formy. U zadního dlouhého nárazníku je průměr vtokového kanálu 22 mm, u krátkého zadního nárazníku je průměr vtokového kanálu 16 mm a pro přední nárazník je průměr kanálu 20 mm. Pokud srovnám tvarově velmi shodné výrobky, tzn. zadní krátký a dlouhý nárazník, tak změnou průměru o 6 mm se snížil počet zmetků o 18 %.

Vlivu konstrukce vstřikovací formy na rozložení teplotních a napětových polí na výrobku bude věnována následující kapitola habilitační práce.

4.2. PROBLEMATIKA TEMPERACE U VELKOPLOŠNÝCH VÝLISKŮ

Vlastnosti konečného výrobku jsou ovlivňovány nejenom použitým druhem plastu, ale i návrhem a konstrukcí vstřikovací formy, která se projevuje na výrobku nejen rovnoměrností a rychlostí zaplnění tvarové dutiny, ale i rozložením teplotních polí od účinků temperačního systému, které sebou ve svém důsledku nesou vytvoření napětových polí od toku taveniny plastu a od tuhnutí hmoty.

K výrobě zadního dlouhého nárazníku pro Škodu Felicii Combi, model 1998 se používá jednonásobná vstřikovací forma, jejíž vtokový systém je vyhřívaný, tedy tzv. „horký“ vtokový systém a který je složen z rozváděcího kanálu o průměru 22 mm (viz. obr. 4.13), dvou šterbinových vtoků a jednoho filmového vtoku s odstřihovačem. Vtoky jsou temperovány, tj. udržovány na požadované teplotě, několika okruhy s topnými pásy.



Obr. 4.13: Horký rozváděcí kanál pro vstřikovací formu na výrobu zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi

Vlastní vstřikovací proces probíhá pomocí kaskádového vstřikování (viz. kap. 2.5.1.1, viz. kap. 3.2.1), kdy tlak taveniny, doteklé do míst, kde jsou umístěny další vtoky, pomáhá dalšímu plnění tvarové dutiny formy. Dochází ke stálému plnění při zachování tlaku taveniny bez vzniku studených spojů.

Vstřikovací forma je temperována na teplotu 60 °C pomocí temperačních rozvodů, kdy je do temperačních kanálů vháněna voda o vysoké rychlosti tak, aby byl zajištěn co největší přestup tepla mezi částmi vstřikovací formy a povrchem temperačního kanálu, tzn. aby bylo zajištěno co nejvyšší *Reynoldsovo číslo*. Díky tomuto systému má být zajištěno rovnoměrné chlazení nejenom po celé ploše výrobku, ale i v zadních (vzdálenějších) částech nárazníku. Temperační médium se

přivádí do formy na straně obsluhy a také se na této straně i temperační médium odvádí. Temperují se i jádra vstřikovací formy, neboť vlastní vstřikovací nástroj je vložkován vzhledem k otvorům na zadním dlouhém nárazníku.

Vstřikovací forma byla v čase experimentálních měření umístěna na vstřikovacím stroji fy Battenfeld, který měl označení BA 27000/16000 a jehož základní technologické parametry, nastavené pro vstřikování, jsou následující:

♦ materiál:	PP KELTAN TP 2550/3
♦ násobnost formy:	jednonásobná
♦ podmínky sušení:	80 °C
	průběžně
♦ teplota:	220 °C
	- teplota:
	- čas:
	- pod násypkou:
	- tavicí komora:
	- špička:
	- horký rozvod:
♦ tlak:	3 x 200 °C, 9 x 220 °C
	12 MPa
	- vstřikovací tlak:
	- dotlak:
	4,0 – 3,8 – 3,6 – 0 MPa
	- odpor šneku
♦ dráha (pohyb):	1,0 – 0,7 – 0,5 MPa
	- plastikace:
	330 mm
	- polštář:
	28 mm
	- přepnutí na dotlak:
♦ čas:	58 mm
	- vstřikování:
	12,5 s
	- dotlaku:
	20 s
	- plastikace:
	24 s (během chlazení)
	- chlazení:
	44 s
	- celkový cyklus:
	80 s



Obr. 4.14: Manipulace s nárazníkem po otevření formy při pohledu proti místu obsluhy

Po dokončeném vstřikovacím cyklu a po otevření formy a vyhození výrobku se výstřik odebírá z prostoru vstřikovací formy pomocí doplňkového manipulátoru (viz. obr. 4.14), který ho umístí do oblasti obsluhy, která zkontroluje, zda výstřik neobsahuje vzhledové vady, tedy zda nejde o zmetek.

4.2.1. Termovizní měření teplotních polí

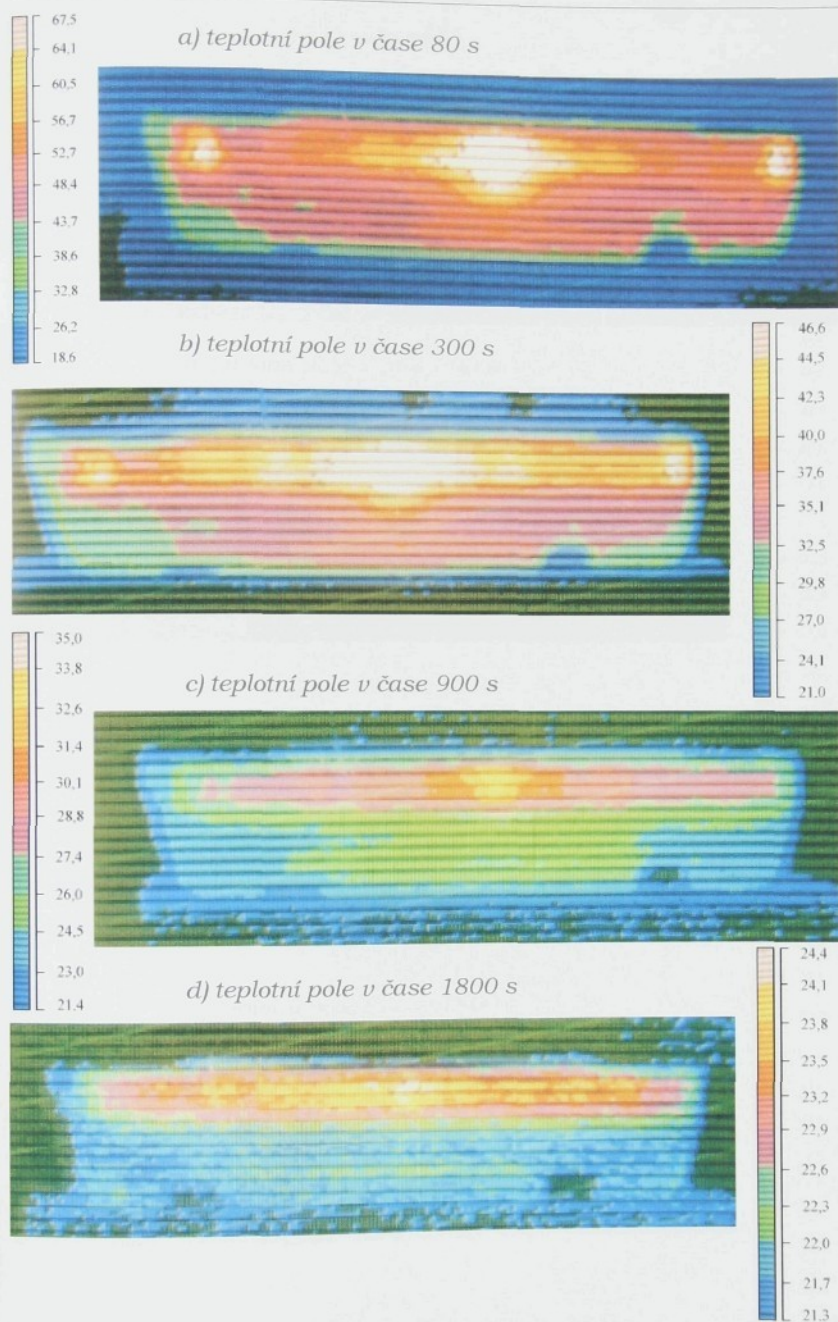
Následně bylo přímo na vyrobených zadních náraznících v *a. s. Peguform Bohemia* provedeno experimentální měření rozložení teplotních polí na povrchu výstřiku v různých časech po otevření formy (80 s, 300 s, 900 s, 1800 s) a z různých pohledů (zepředu, zezadu, z levé strany a z pravé strany, tedy z obou boků) pomocí termovize firmou *Raen s. s r. o. Praha*. K experimentálnímu měření byla použita termovizní souprava AGA 782, pracující na principu detekce infračerveného záření, kdy se využívá vlastností těles, popsanych *Stefan – Boltzmanovým* zákonem pro absolutně černé těleso. Pro skutečné předměty musí být do vztahu zahrnuta i emisivita povrchu zářiče v rozmezí 0 až 1, tedy emisivita měřeného objektu. Pro experimentální měření byla nastavena emisivita povrchu na hodnotu 0,9.

Při měření bylo nutné co nejvíce snížit vliv okolních vlivů na vlastní měření a dále respektovat možnosti použití termovize, mezi které patří:

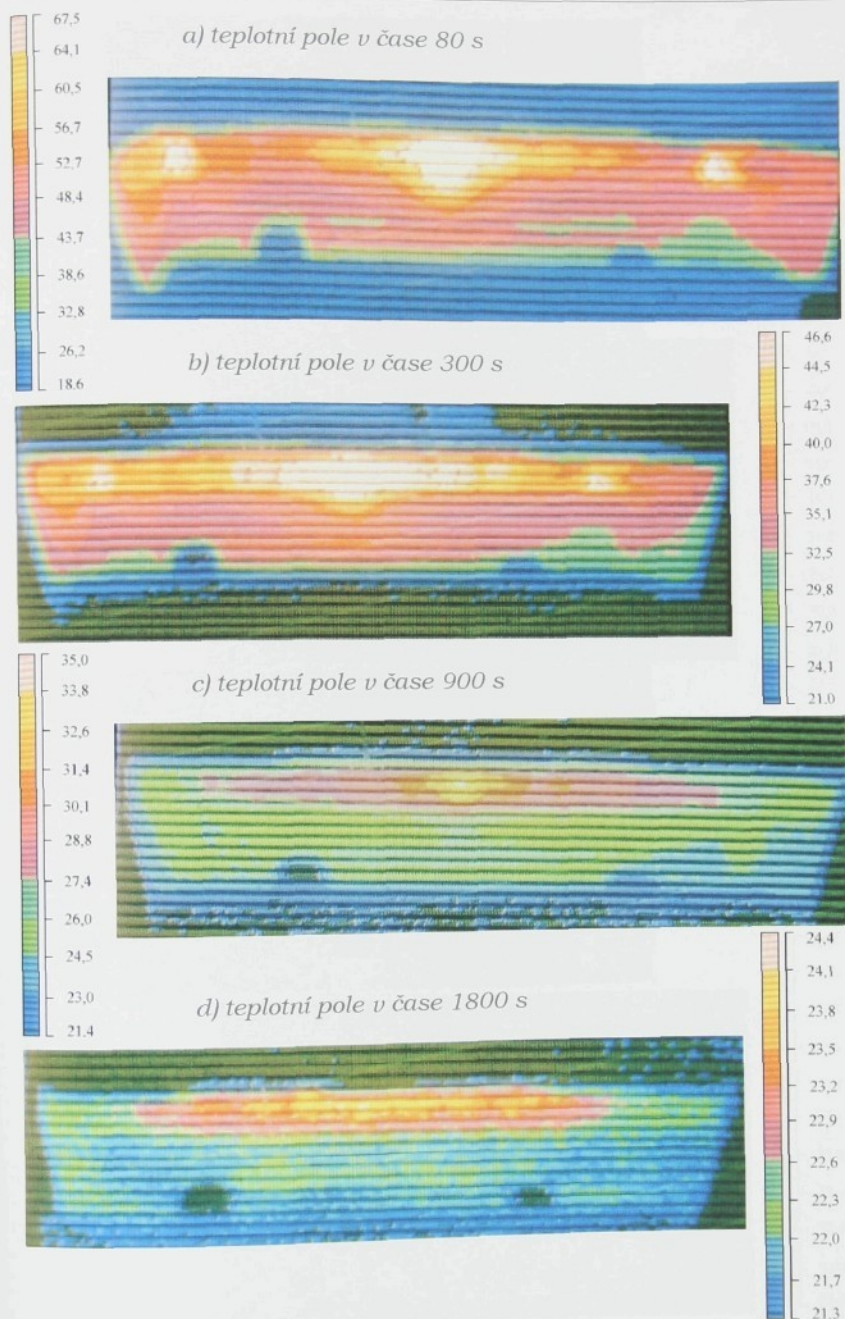
- ◆ nárazník musí být viditelný z místa termovizní kamery,
- ◆ pro vlastní praktické měření je nutný dostatečný odstup (cca od 3 do 5,5 m),
- ◆ nárazník nesmí být zastíněn jinými předměty,
- ◆ v okamžiku měření musí být nárazník v klidové poloze,
- ◆ objekty v pozadí nesmí být teplejší, než-li měřený nárazník,
- ◆ objekty, mezi nárazníkem a termovizní kamerou, nesmí svou teplotou ovlivňovat vlastní měření,
- ◆ mezi měřeními nesmí být objekt teplotně ovlivňován,
- ◆ teplota okolního prostředí musí být pokud možno konstantní po celou dobu měření.

K tomu je nutné si uvědomit, že emisivita povrchu měřeného tělesa se může měnit s teplotou nebo s vlnovou délkou infračerveného záření, což tedy znamená, že závislost mezi skutečnou povrchovou teplotou měřeného objektu a infračervenou energií, vycházející s povrchu tělesa, není lineární a tato nelinearita může výrazně ovlivnit konečné výsledky měření. Proto byl prováděn firmou *Raen* přepočít, ve kterém byly zahrnuty jednak vlastnosti měřeného objektu (emisivita), jednak vliv prostředí (zeslabení infračerveného záření při průchodu atmosférou), ale i vliv použité optiky v termovizní kameře.

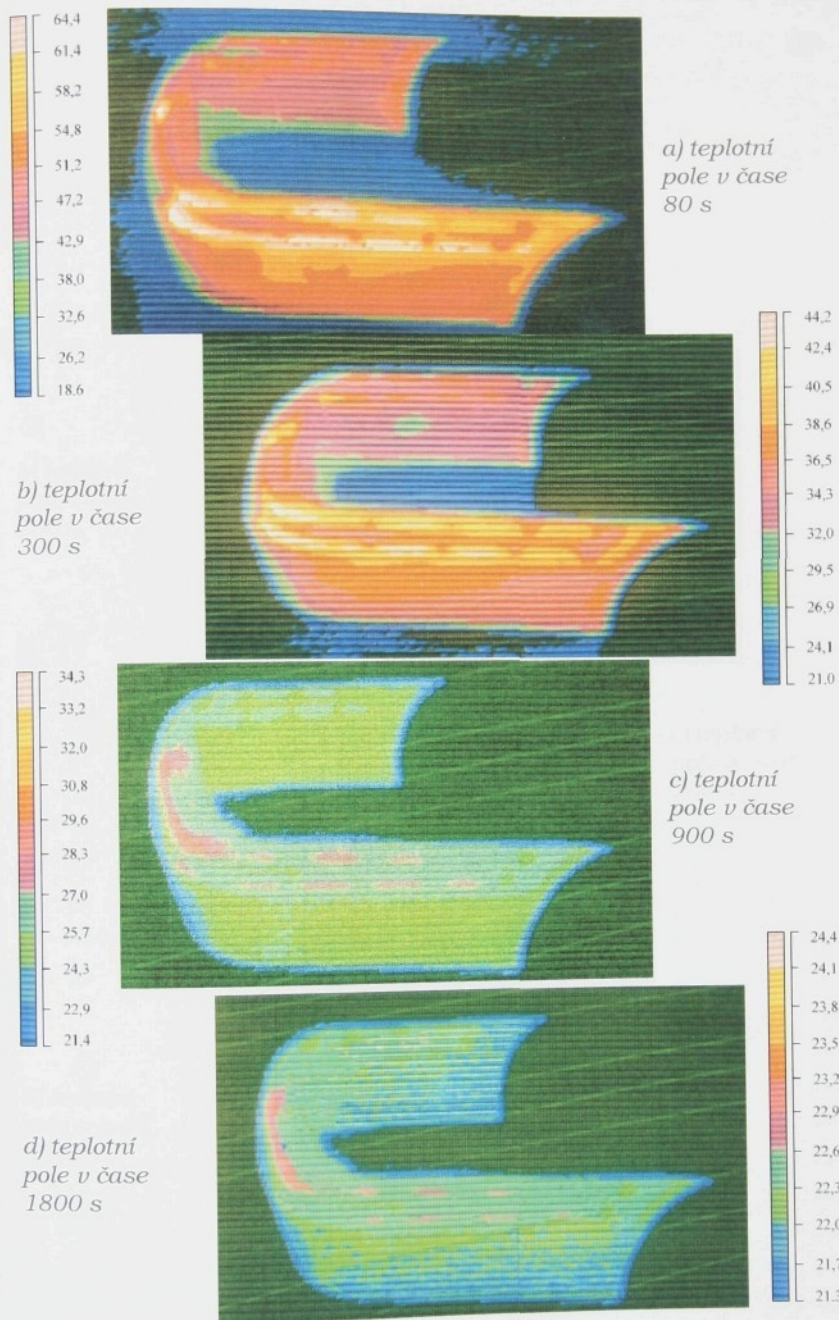
Naměřené rozložení teplotních polí na povrchu zadního nárazníku pro *Škodu Felicii Combi* je pro jednotlivé časy a pro jednotlivé pozice graficky zobrazeno na obr. 4.15 až 4.18.



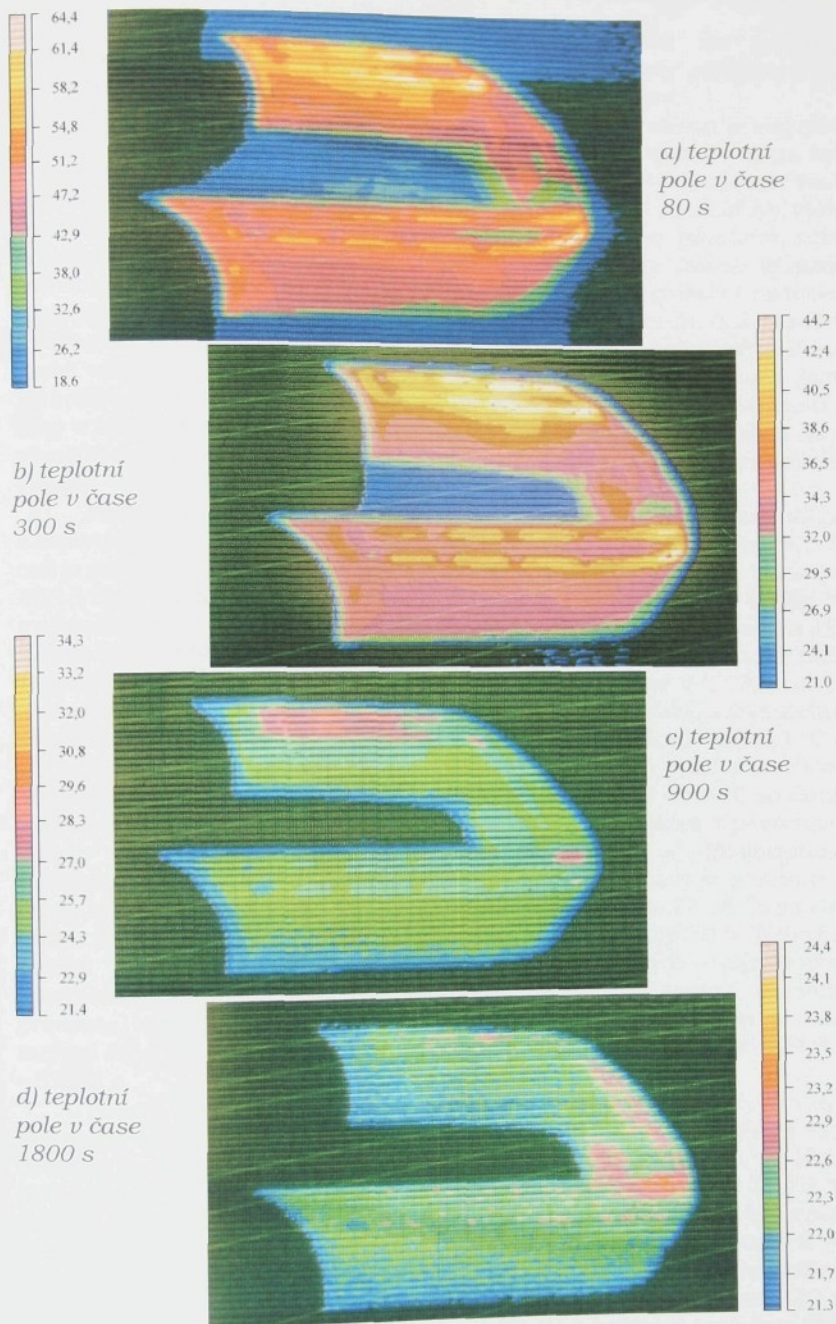
Obr. 4.15: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku při pohledu zepředu pro čtyři časy měření (hodnoty na stupnicích jsou ve °C)



Obr. 4.16: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku při pohledu zezadu pro čtyři časy měření (hodnoty na stupnicích jsou ve $^{\circ}\text{C}$)



Obr. 4.17: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku při pohledu zprava pro čtyři časy měření (hodnoty na stupnicích jsou ve °C)



Obr. 4.18: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku při pohledu zleva pro čtyři časy měření (hodnoty na stupnicích jsou ve °C)

Z termovizně naměřených povrchových teplot na povrchu zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi, které byly zobrazeny na předchozích stranách, lze učinit následující vyhodnocení:

1. Povrchová teplota v místech vyústění vtokového systému je nejvyšší ze všech naměřených povrchových teplot, a to jak na straně vtoku, tak i na opačné (zadní) straně nárazníku (viz. obr. 4.15 a 4.16). Je zde však jasně patrné, a to i přesto, že se ke vstřikování použil kaskádový vtok, že středový vtok svým vyústěním teplotně ovlivňuje mnohem větší oblast, než-li oba dva stranové vtoky a s rostoucím časem výrazně ovlivňuje teplotu vrchní části výrobku (prostor pro umístění ozdobné lišty) oproti plošně mnohem větší spodní ploše nárazníku, což je velmi dobře vidět z obr. 4.15c,d a z obr. 4.16c,d. Je to velmi zajímavé zjištění, které ukazuje na skutečnost, že i přesto, že rozváděcí kanály jsou vytápěné, snižuje se teplota taveniny průchodem vtokovým systémem a tedy v okamžiku bočního vyústění nemá tavenina takovou teplotu, aby výrazně ovlivnila větší plochu v okolí ústí, tak je tomu u středového vtoku.

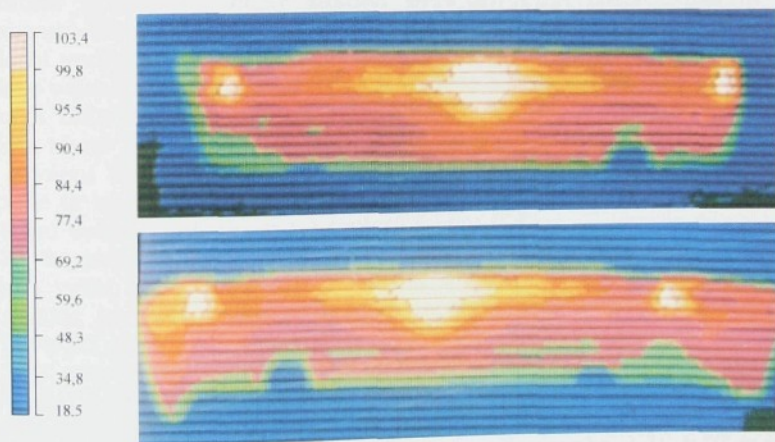
Povrchová teplota v místě vyústění středového vtoku klesá s teploty 67,5 °C v čase 80 s na teplotu 46,6 °C v čase měření 300 s, což je pokles o 30,96 %, na teplotu 35 °C v čase 900 s, což je pokles o 48,15 % a na teplotu 24,4 °C v čase 1800 s, což je pokles o 63,85 % z původní teploty. U bočních vtoků je tento pokles ještě mnohem vyšší. V čase měření 80 s je povrchová teplota v místě vstřiku u obou bočních vtoků 67,5 °C, kdežto v čase 1800 s je teplota již pouze 22,7 °C, což je pokles o 66,67 %. Pro čas 300 s je pokles u bočních vtoků srovnatelný se středovým vtokem, ale pro čas 900 s je pokles již 55,41 % (67,5 °C a 30,1 °C). Znamená to tedy, že stejný rozdíl je jak pro vyšší povrchové teploty a kratší čas (pokles z teploty 67,5 °C na teplotu 46,6 °C za dobu 220 s), tak pro nižší povrchové teploty a delší čas (pokles z povrchové teploty 46,6 °C na teplotu 24,4 °C za dobu 1500 s). Posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly mezi měřeními časy je potom pro místo vyústění středového vtoku 30,96 % za čas 220 s, 17,19 % za čas 600 s a 15,7 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Nejvyšší pokles je v prvním časovém úseku, který je skoro dvojnásobný ostatních, které jsou skoro srovnatelné. Ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase měření 80 s je tedy pro jednotlivé časové úseky potřeba 7,11 s – 34,9 s – 57,32 s.

Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty pro čas 220 s 30,96 %, pro čas měření 600 s 24,89 % (46,6 °C a 35 °C) a pro čas 900 s je pokles 30,28 % (teplota 35 °C a 24,4 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot je srovnatelný pro první a třetí interval, ale v druhém úseku je překvapivě nižší. Naproti tomu posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly v místě vyústění bočních vtoků je 30,96 % za čas 220 s, 24,45 % za čas 600 s a 11,26 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Nejvyšší pokles je opět v prvním časovém úseku, ale na rozdíl od středového vtoku je u bočního vtoku nejnižší pokles v třetí části, který

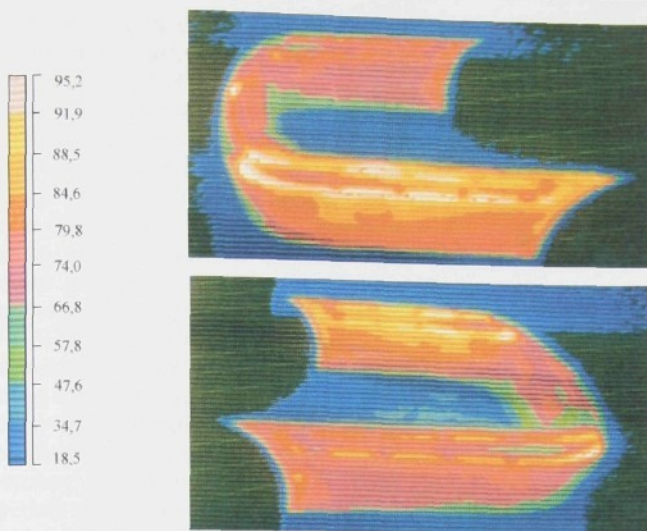
je zhruba třetinou v prvním úseku a polovinou v druhém časovém. Ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky a pro boční vyústění potřeba 7,11 s – 24,53 s – 79,93 s, které jsou delší v třetím úseku (téměř o polovinu) a kratší ve druhém úseku (téměř o třetinu), než-li pro středové vyústění. A pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, je potom pro časový rozdíl 220 s 30,96 %, pro čas 600 s 35,41 % (46,6 °C a 30,1 °C) a pro čas 900 s je pokles 24,58 % (30,1 °C a 22,7 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že na rozdíl od středového vyústění je nejvyšší pokles teplot pro druhý interval. Naměřené povrchové teploty jsou téměř shodné jak pro přední část zadního nárazníku, tak i pro zadní část zadního nárazníku v místech vyústění vtokového systému.

2. Z experimentálně naměřených povrchových teplot v jednotlivých časech bylo možné graficky aproximovat teploty, které byly na povrchu nárazníku v okamžiku otevření formy při vyhazování výlisku. Graficky získané povrchové teploty na přední a zadní straně nárazníku jsou uvedeny na obr. 4.19 a na obr. 4.20 jsou teploty na povrchu jednotlivých boků. Lze předpokládat, že rozložení teplotních polí na povrchu výlisku bude obdobné rozložení teplotních polí v čase 80 s pouze s jinou stupnicí teplot.

Vzhledem k tomu, že není známo rozložení teplotních polí v čase 0 s, a to i přesto, že se dá předpokládat obdobné rozložení, bude v následujících bodech provedeno vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot pouze pro čtyři měřené časy a zvolené pohledy tak, jak tomu bylo v bodě 1, i když je nepochybné, že by závěry byly velmi zajímavé. Vyhodnocení graficky aproximovaných hodnot povrchových teplot v čase 0 s bude tedy provedeno pouze v tomto bodě.



Obr. 4.19: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi při pohledu zepředu (zezadu) v okamžiku otevření formy (hodnoty na stupnici jsou ve °C)



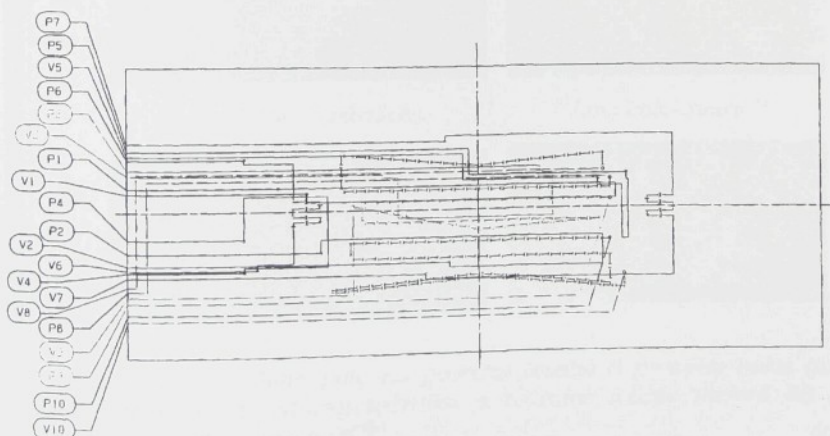
Obr. 4.20: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi při pohledu zleva (zprava) v okamžiku otevření formy (hodnoty na stupnici jsou ve $^{\circ}\text{C}$)

Z předchozích obrázků a teplotních stupnic se experimentálně dokazuje skutečnost, o které se v současné době hodně mluví, ale experimentální potvrzení jsou velmi složitá, že vlivem vzduchové mezery mezi výliskem ve formě a tvarovou dutinou v důsledku smrštění plastu se téměř zastaví přestup tepla mezi výliskem a chlazenou kovovou formou, což je ještě podpořeno špatnou tepelnou a teplotní vodivostí vzduchu a plastu. Již nejvyšší naměřené povrchové teploty v čase 80 s jsou vyšší, než-li teplota formy, která je udržována pomocí chladicího média na hodnotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je pravděpodobné, že teplota těsně pod povrchem vstřikovací formy bude samozřejmě vyšší, ale zvýšení není tak drastické, jako na povrchu výrobku. V našem případě je maximální povrchová teplota v místech vyústění vtokového systému vyšší oproti udávané teplotě formy o $43,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je nárůst o $72,34\%$, mezi vtoky v horní oblasti zadního nárazníku je povrchová teplota vyšší o $30,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je nárůst o $50,67\%$ a v dolní polovině nárazníku je mezi vtoky povrchová teplota vyšší o $13,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je nárůst o $22,16\%$.

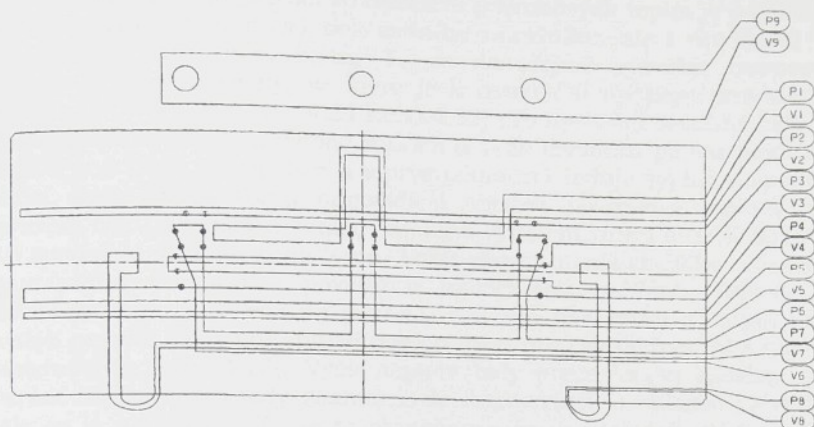
U povrchových teplot na bocích je nutné rozlišit, zda se jedná o levý nebo pravý bok při pohledu zepředu na zadní nárazník. Pro levý bok je povrchová teplota v nejteplejších místech o $25,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší, což je nárůst o 42% a průměrná povrchová teplota je zhruba o $10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší oproti teplotě vstřikovací formy, což je nárůst o $17,67\%$. U pravého boku je maximální povrchová teplota vyšší o $35,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je zvýšení o $58,67\%$ a průměrná povrchová teplota v horní a spodní části je vyšší o $30,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ resp. $22,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tedy nárůst je o $50,17\%$ a $37,67\%$.

Dále je pravděpodobné, že pokud by byl výrobek, při uvažování konstantní tloušťky stěny, delší dobu ve formě po vystříknutí (delší doba chlazení), byla by teplota ve středu vylisku mnohem nižší, neboť podle okrajových podmínek *Fourierovy diferenciální rovnice* vedení tepla je teplota povrchu výrobku brána za konstantní. Teprve po otevření formy a po vyhození výrobku dochází k vyrovnávání teplot mezi středem a povrchem výrobku při současném poklesu teploty na povrchu. Nebo-li teplota na povrchu jakoby vzrůstá a teplota ve středu klesá a velikost tohoto rozdílu mezi oběmi popsanými teplotami a rychlost poklesu povrchové teploty je dána celkovou dobou chlazení, teplotou okolního prostředí a tloušťkou stěny.

3. Při porovnání povrchových teplot na obou bocích zadního nárazníku (viz. obr. 4.17 a 4.18) jsem získal zajímavé výsledky, které by byly o to markantnější, čím větší plochu by měl mít výrobek a čím delší by byla chladicí dráha temperačního média. Temperační médium se přivádí do tvárníku z levé strany výrobku (při pohledu zepředu), tedy ze strany obsluhy a i pro tvárnici je přívod temperačního média proveden z levé strany a po oběhu temperačním okruhem se vždy na straně přívodu temperačního média i odvádí. Vlastní temperační systém je velmi složitý a pro pevnou a pohyblivou část vstřikovací formy obsahuje devět, resp. deset samostatných okruhů (viz. obr. 4.21 a 4.22 a viz. tab. 3.1). Do vstřikovací formy je voda, která byla použita pro chlazení jako temperační médium, přiváděna vysokou rychlostí a během prováděných experimentů (tj. během výroby) tak, aby nepřekročil rozdíl teplot na vstupu a na výstupu 3 °C. O to zajímavější potom vypadají naměřené povrchové teploty, které se výrazně liší pro levý a pravý bok zadního nárazníku, a to i přesto, že oba dva boky mají samostatný okruh se shodným objemovým průtokem jak ze strany tvárníku, tak i ze strany tvárnice.

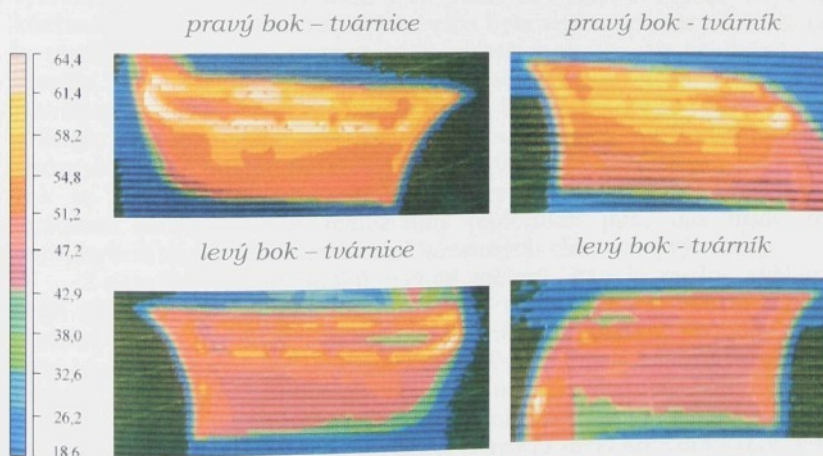


Obr. 4.21: Temperační okruhy v tvárníku vstřikovací formy pro výrobu zadního nárazníku Škody Felicie Combi



Obr. 4.22: Temperační okruhy v tvárnici vstřikovací formy pro výrobu zadního nárazníku Škody Felicie Combi (spodek formy nahoře)

Porovnání rozložení teplotních polí na povrchu výlisku ze strany tvárniku a tvárnice pro levý a pravý bok zadního nárazníku v jednotlivých časech měření je srovnáno na obr. 4.23 až 4.26.



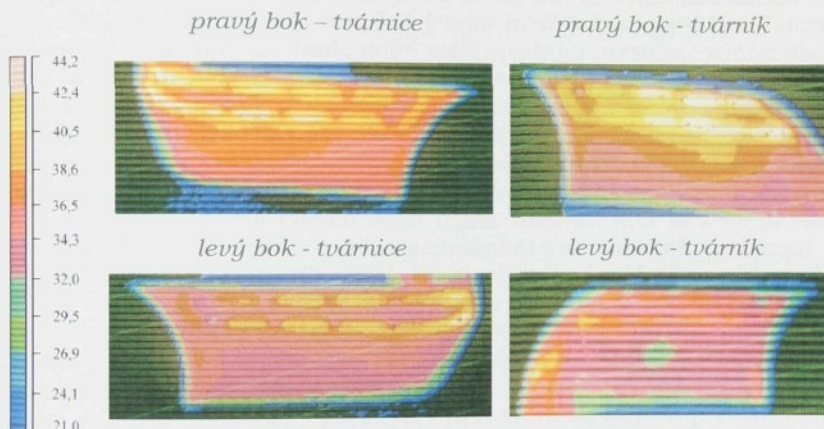
Obr. 4.23: Teplotní pole na povrchu levého a pravého boku (při pohledu zepředu) ze strany tvárníku a tvárnice v čase měření 80 s (hodnoty na stupnici jsou ve °C)

Z obr. 4.23 je patrné, že rozložení povrchových teplot je nejenom rozdílné pro levý a pravý bok zadního nárazníku, ale i pro horní a spodní polovinu obou boků. To se dá zřejmě vysvětlit tvarovou složitostí horní poloviny, ve které je konstrukční úpravou provedeno vybrání s otvory (viz. obr. 4.31 nebo 4.32) pro umístění ozdobné lišty a tento přechod pravděpodobně rozvádí a vede taveninu plastu nejdříve nad a pod tímto přechodem a teprve potom následuje vyplnění spodní části obou boků. Tomu odpovídá i shodná povrchová teplota na pravém boku s teplotou v místě bočního vyústění vtoku a nižší teploty ve spodní části, kdežto na levém boku vlivem intenzivnějšího chlazení tato situace neplatí a povrchové teploty jsou odlišné. Teploty a rozložení teplotních polí na povrchu zadního nárazníku a to jak pro vnější povrch, tak i pro vnitřní povrch, jsou pro čas měření 80 s téměř shodné (viz. obr. 4.23). Vyšší teploty byly přece jenom zjištěny na straně tvárnice. To tedy znamená, že intenzivněji je chlazen tvárník. Ale co je nejzajímavější, je ta skutečnost, že ve stejných místech na levém a pravém boku jsou výrazně odlišné naměřené povrchové teploty. Tak např. na horním rohu na konci zadního nárazníku ze strany tvárnice byla na pravém boku naměřena teplota 61,4 °C, kdežto na levém boku ve stejném místě pouze teplota 51,2 °C, což znamená rozdíl 10,2 °C. Ve stejném místě, ale tentokrát ve spodním rohu byla naměřena povrchová teplota na pravém boku 51,2 °C a na levém boku 47,2 °C, což je rozdíl „pouze“ 4 °C. Na opačné straně obou boků a v horní části těchto boků, tj. v místě přechodu (zaoblení) do přední části zadního nárazníku, byla pro pravý bok a pro místo nad i pod vybráním pro ozdobnou lištu naměřena povrchová teplota 64,4 °C, kdežto ve stejném místě na levém boku byla teplota pouze 53,1 °C, což je rozdíl 11,3 °C. Ve srovnatelném místě a ve spodní části byla na pravém boku naměřena povrchová teplota 51,2 °C a na levém boku povrchová teplota 42,9 °C, což je rozdíl 8,3 °C, který je však výrazně ovlivněn intenzivnějším chlazením levého spodního přechodu zadního nárazníku. Ze zjištěných povrchových teplot je tedy jasné, že každý bok je chlazen odlišnou intenzitou, která se projevuje rozdílnými teplotami a výsledným rozložením teplotních polí, což bude mít nepochybně za následek ovlivnění konečných vlastností výrobku.

Z naměřených výsledků v čase měření 80 s je možné udělat i další závěr a to, že teplotní namáhání od procesu chlazení nebude rozdílné jenom pro levý a pravý bok zadního nárazníku, ale bude jiné i mezi spodní a horní polovinou obou boků, ale i mezi zadním koncem a místem přechodu do přední části. Tak např. pro pravý bok je rozdíl mezi maximální teplotou u spodní a horní poloviny (64,4 °C a 42,9 °C) ohromných 21,5 °C, u horní poloviny je rozdíl mezi koncem (61,4 °C) a přechodem boku (64,4 °C) zadního nárazníku pouze 3 °C, kdežto ve spodní části je rozdíl povrchových teplot zanedbatelný. Jiná situace je však pro levý bok, kde rozdíl mezi maximálními povrchovými teplotami je 15,3 °C (58,2 °C a 42,9 °C), ale u horní poloviny je rozdíl mezi koncem (51,2 °C) a přechodem boku (53,1 °C) zadního nárazníku pouze 1,9 °C, kdežto ve spodní části je rozdíl povrchových teplot 4,3 °C (47,2 °C a 42,9 °C), ale s opačným spádem. Situace je tedy opět

výrazně odlišná jak pro levý, tak i pro pravý bok a to i přesto, že povrchové teploty na levém boku jsou celkově o více než $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší. Zajímavá je i naměřená povrchová teplota v místě tvarového řešení pro dodatečně umístění ozdobné lišty a to hlavně v oblasti u zaoblení při přechodu do přední části. U pravého boku byla povrchová teplota v místě nad a pod lištou na hodnotě $61,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdežto mezi těmito místy je povrchová teplota rovna pouze $51,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je na tak malém prostoru rozdíl $10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. U levého boku je situace obdobná pouze s tím rozdílem, že povrchové teploty zde jsou nižší. A tak rozdíl činí $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($51,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $42,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Obdobné závěry lze učinit i pro následující čas měření, tedy pro naměřené rozložení teplotních polí v čase měření 300 s. Povrchové teploty a jejich plošné rozložení na zadním nárazníku a to jak pro vnější povrch, tak i pro vnitřní povrch, jsou pro čas měření 300 s opět téměř shodné, což dokazuje obr. 4.24.



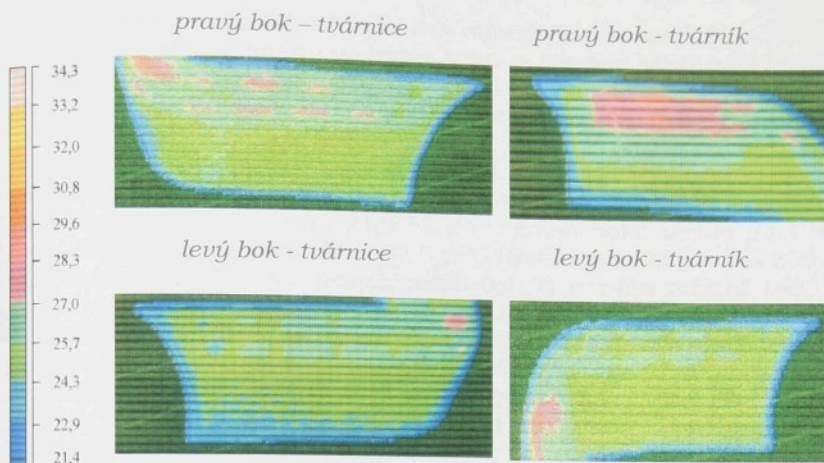
Obr. 4.24: Teplotní pole na povrchu levého a pravého boku (při pohledu zepředu) ze strany tvárníku a tvárnice v čase měření 300 s (hodnoty na stupnici jsou ve $^{\circ}\text{C}$)

Vyšší teploty jsou opět na straně tvárnice, nebo-li intenzivněji je chlazen tvárník. A opět se výrazně liší zjištěné povrchové teploty na pravém a levém boku, i když rozdíly budou díky delšímu času měření určitě nižší. Na pravém boku, na horním rohu a na konci zadního nárazníku ze strany tvárnice byla naměřena povrchová teplota $40,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdežto na levém boku ve stejném místě byla teplota $38,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, což znamená rozdíl $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je více než pětkrát nižší rozdíl, než-li pro čas měření 80 s. Ve stejném místě, ale tentokrát ve spodním rohu byla naměřena povrchová teplota na pravém boku $36,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a na levém boku $34,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je rozdíl $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, zhruba polovina rozdílu pro čas 80 s. Na opačné straně obou boků a v horní části těchto boků, tj. v místě přechodu (zaoblení) do přední části zadního nárazníku, byla pro pravý

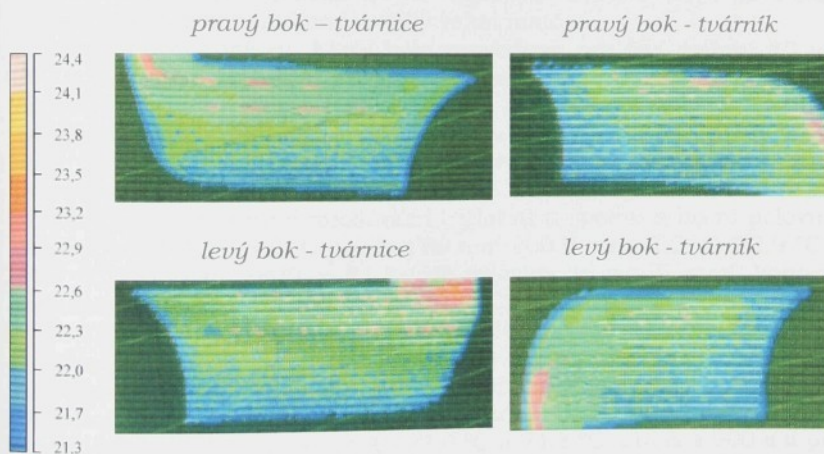
bok a pro místo nad i pod vybráním pro ozdobnou lištu naměřena povrchová teplota 44,2 °C, kdežto ve stejném místě na levém boku byla povrchová teplota 42,4 °C, což je více jak šestinásobný pokles rozdílu na 1,8 °C oproti času měření 80 s. Ve srovnatelném místě, ale tentokrát ve spodní části, byla na pravém boku naměřena povrchová teplota 36,5 °C a povrchová teplota na levém boku byla 32 °C, což je rozdíl 4,5 °C a je zhruba poloviční oproti času měření 80 s. Ze zjištěných rozdílů povrchových teplot je opět patrné, že každý bok je ještě chlazen odlišnou intenzitou, která se projevuje rozdílnými teplotami a výsledným rozložením teplotních polí, kdy však vyšších rozdílů mezi levým a pravým bokem bylo zjištěno ve spodní části těchto boků. Ale hlavně během doby, než-li došlo k tomuto měření (220 s), jsou původně velké teplotní rozdíly mezi levým a pravým bokem již skoro smazané a tedy povrchové teploty jsou již téměř shodné.

Z naměřených výsledků v čase měření 300 s je možné udělat i závěry obdobné jako pro čas 80 s a to, že teplotní namáhání od procesu chlazení nebude rozdílné jenom mezi levým a pravým bokem zadního nárazníku, ale bude jiné i mezi spodní a horní polovinou obou boků, ale i mezi zadním koncem a místem přechodu do přední části. Potom pro pravý bok je rozdíl mezi maximální povrchovou teplotou u spodní a horní poloviny (44,2 °C a 32 °C) 12,2 °C, u horní poloviny je rozdíl mezi koncem (40,5 °C) a přechodem boku (44,2 °C) zadního nárazníku 3,7 °C, což je srovnatelné s časem měření 80 s, kdežto ve spodní části je rozdíl povrchových teplot nulový. Jiná situace je však pro levý bok, kde rozdíl mezi maximálními povrchovými teplotami je 10,4 °C (42,4 °C a 32 °C), ale u horní poloviny je rozdíl mezi koncem (38,6 °C) a přechodem boku (42,4 °C) zadního nárazníku 3,8 °C, tedy dvojnásobek teplotního rozdílu pro čas 80 s, kdežto ve spodní části je rozdíl povrchových teplot 2,3 °C při teplotách 32 °C a 34,3 °C, ale opět s opačným spádem. Situace je tedy opět výrazně odlišná jak pro levý, tak i pro pravý bok kdy i přes vyšší povrchové teploty na pravém boku jsou rozdíly v horních částech srovnatelné, ale v dolní části levého boku při ještě nižších naměřených teplotách je zjištěný rozdíl dosti výrazný. V místě tvarového řešení pro dodatečné umístění ozdobné lišty a to hlavně v oblasti u zaoblení při přechodu do přední části zůstávají nadále výrazně odlišné teploty. U pravého boku byla zjištěna povrchová teplota nad a pod lištou na hodnotě 42,4 °C, kdežto mezi těmito místy je povrchová teplota rovna 36,5 °C, což je na tak malém prostoru rozdíl 5,9 °C a je zhruba poloviční oproti předchozímu času měření. U levého boku je situace obdobná pouze s tím rozdílem, že povrchové teploty i přesto, že jsou zde nižší, tak vzniklý rozdíl je vyšší, tj. 7,7 °C (41,5 °C a 33,8 °C) a pokles oproti času měření 80 s je necelých deset procent.

Povrchové teploty v čase měření 900 s, zobrazené na obr. 4.25 a povrchové teploty v čase 1800 s, ukázané na obr. 4.26 a jejich plošné rozložení na zadním nárazníku *Škody Felicie Combi* pro vnější povrch, ale i pro vnitřní povrch, jsou již téměř shodné.



Obr. 4.25: Teplotní pole na povrchu levého a pravého boku (při pohledu zepředu) ze strany tvárníku a tvárnice v čase měření 900 s (hodnoty na stupnici jsou ve °C)



Obr. 4.26: Teplotní pole na povrchu levého a pravého boku (při pohledu zepředu) ze strany tvárníku a tvárnice v čase měření 1800 s (hodnoty na stupnici jsou ve °C)

Vyšší teploty jsou zde pro čas měření 900 s na straně tvárníku a to hlavně u pravého boku, jinak jsou povrchové teploty a jejich rozložení téměř podobné, což platí i pro čas měření 1800 s. Povrchová teplota na pravém boku, v horní části a na konci zadního nárazníku ze

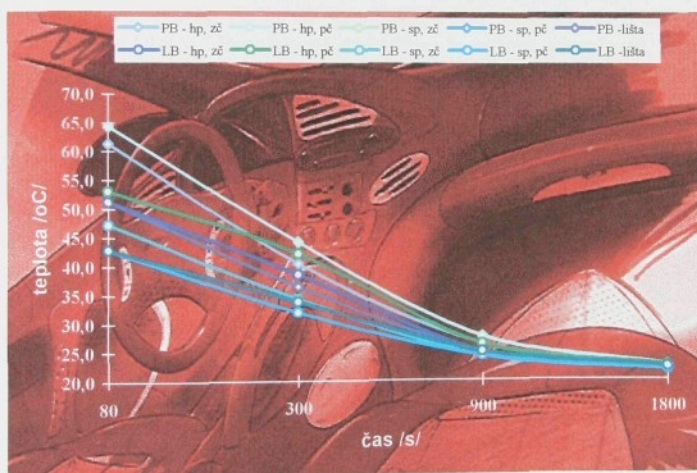
strany tvárnice byla 26,4 °C pro čas měření 900 s, resp. 22,4 °C pro čas měření 1800 s, kdežto na levém boku ve stejném místě byla teplota 25 °C, resp. 22,3 °C, což znamená rozdíl pro čas měření 900 s 1,4 °C (téměř shodný s rozdílem pro čas měření 300 s) a 0,1 °C pro čas měření 1800 s, což je zanedbatelná hodnota (pokles oproti času měření 900 s je téměř dvanásobný). Ve stejném místě, avšak tentokrát ve spodním rohu boků byla naměřena povrchová teplota na pravém boku 25 °C, resp. 21,9 °C a na levém boku potom 24,3 °C, resp. 21,8 °C, což je jednak rozdíl 0,7 °C (třetina rozdílu pro čas 300 s) pro čas měření 900 s a jednak rozdíl 0,1 °C pro čas měření 1800 s (sedmkrát nižší rozdíl oproti času měření 900 s). Na opačné straně obou boků a v horní části těchto boků, tj. v místě přechodu (zaoblení) do přední části zadního nárazníku, byla pro pravý bok naměřena povrchová teplota 27,7 °C pro čas měření 900 s a teplota 22,6 °C pro čas měření 1800 s, kdežto ve stejném místě na levém boku byla povrchová teplota 26,4 °C, resp. 22,5 °C, což představuje rozdíl 1,3 °C resp. 0,1 °C. Ve srovnatelném místě, ale tentokrát ve spodní části boků, byla na pravém boku pro čas 900 s a 1800 s naměřena povrchová teplota 25 °C, resp. 22 °C a povrchová teplota na levém boku byla 24,3 °C, resp. 21,9 °C, což je jednak rozdíl 0,7 °C (pokles o sedmdesát procent oproti času měření 300 s) a 0,1 °C. Ze zjištěných rozdílů povrchových teplot je patrné, že s rostoucím časem se úplně smazal teplotní rozdíl mezi levým a pravým bokem, když už v čase měření 900 s byly naměřené rozdíly velmi malé.

Stejně hodnocení, které bylo provedeno pro čas měření 80 s a 300 s a týkající se toho, že teplotní namáhání od procesu chlazení nebude rozdílné jenom mezi levým a pravým bokem zadního nárazníku, ale bude jiné i mezi spodní a horní polovinou obou boků, ale i mezi zadním koncem a místem přechodu do přední části, bude provedeno pro čas měření 900 s a také pro čas 1800 s. Potom pro pravý bok je rozdíl mezi maximální teplotou u spodní a horní poloviny (29,6 °C a 24,3 °C) 5,3 °C pro čas měření 900 s resp. 1,2 °C (22,9 °C a 21,7 °C) pro čas 1800 s. U horní poloviny je rozdíl mezi koncem zadního nárazníku (26,4 °C resp. 22,4 °C) a přechodem boku (27,7 °C resp. 22,6 °C) 1,3 °C (třetina rozdílu pro čas měření 300 s), resp. 0,2 °C (šestina rozdílu pro čas 900 s), kdežto ve spodní části je pro čas 900 s rozdíl povrchových teplot nulový a pro čas 1800 s činí rozdíl 0,1 °C. Obdobná situace je i pro levý bok, kde rozdíl mezi maximálními povrchovými teplotami je 2,7 °C (27,0 °C a 24,3 °C) pro čas 900 s a pro čas 1800 s je 1 °C. U horní poloviny je rozdíl mezi koncem (25 °C resp. 22,3 °C) a přechodem boku (26,4 °C resp. 22,5 °C) zadního nárazníku 1,4 °C (zhruba 50 % rozdílu v čase měření 900 s), resp. 0,2 °C. Ve spodní části je pro čas 900 s rozdíl naměřených povrchových teplot nulový a pro čas měření 1800 s činí rozdíl 0,1 °C. I zde je jasně patrné, jak se snížily rozdíly po ploše obou boků.

V místě tvarového řešení pro dodatečné umístění ozdobné lišty a to hlavně v oblasti u zaoblení při přechodu do přední části zůstávají nadále vyšší rozdíly, což je dost překvapivé i po tak dlouhé době měření. U pravého boku a čas měření 900 s je rozdíl mezi povrchovou

teplotou nad a pod lištou a mezi teplotou v místě lišty $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), což je téměř padesátiprocentní pokles oproti času 300 s a pro čas 1800 s činí rozdíl $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). U levého boku je situace obdobná, nebo-li pro čas 900 s je rozdíl $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (téměř šestnásobný pokles oproti času měření 300 s) a pro čas 1800 s je rozdíl $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ze zjištěných hodnot v jednotlivých místech na bocích zadního nárazníku a ve čtyřech časech měření je také velmi zajímavé na grafickém vyjádření sledovat s tímto spojený pokles povrchových teplot (viz obr. 4.27). Z grafické závislosti je patrné, že rychlý pokles teploty je téměř do času měření 900 s (tj. 15 min) po vyhození výrobku ze vstřikovací formy a potom již nenastává výrazné snižování povrchové teploty. Je to dáno skutečností, že právě v tomto čase již došlo k tak výraznému poklesu povrchových teplot zadního nárazníku a k jejich přiblížení teplotě okolí, že další vyrovnávání teplot bude už dlouhodobou záležitostí. Lze tedy konstatovat, že vliv na strukturu výrobku a na dobu vyrovnání teplot bude mít ještě a právě doba v délce 900 s po vyhození výlisku o hmotnosti $4,65\text{ kg}$.



Obr. 4.27: Teplotní spády pro čtyři časy měření a hodnocená místa na levém a pravém boku nárazníku
(PB – pravý bok, LB – levý bok, hp – horní polovina, sp – spodní polovina, zc – zadní část, lišta – přechodová část)

Pokles povrchových teplot je pro pravý bok zadního nárazníku vyšší, než-li pro levý bok, což je dané vyšší naměřenou teplotou na pravém boku. Pokles povrchové teploty jednak pro jednotlivé časy měření a pro jednotlivá místa odečítání povrchových teplot a jednak

pro pravý a levý bok zadního nárazníku bude uveden v následujícím srovnání.

Pro horní polovinu a zadní část pravého boku byl pokles mezi časem měření 80 s a 300 s 34,03 % (61,4 °C a 40,5 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 57 % (61,4 °C a 26,4 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s byl 63,51 % (61,4 °C a 22,4 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Je tedy patrné, že poslušnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 34,03 % za čas 220 s, 22,97 % za čas 600 s a 6,51 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Jinak vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky potřeba následující časový úsek: 6,46 s – 26,12 s – 138,24 s. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílů pro čas 220 s 34,03 %, pro čas 600 s 34,81 % (40,5 °C a 26,4 °C) a pro čas 900 s je pokles 15,15 % (26,4 °C a 22,4 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly pouze s tím rozdílem, že ke srovnatelnému poklesu potřebuji buď vyšší výchozí teplotu (61,4 °C oproti 40,5 °C) a nebo delší čas (600 s oproti 220 s). Pro poslední nejdelší časový úsek (900 s) je pokles již pouze padesát procent předchozího poklesu. Pro horní polovinu a místo přechodu do přední části pravého boku byl pokles mezi časem měření 80 s a 300 s roven 31,36 % (64,4 °C a 44,2 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 57 % (64,4 °C a 27,7 °C) a pokles mezi časy 80 s a 1800 s byl potom 64,91 % (64,4 °C a 22,6 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Potom poslušnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 31,36 % za čas 220 s, 25,64 % za čas 600 s a 7,91 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Je patrné, že k vyššímu teplotnímu spádu u přechodu dochází až ve druhých časových úsecích. Obdobně se dá, jako u zadní části horní části pravého boku, vyjádřit i snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase měření 80 s pro jednotlivé časové rozdíly, kdy je potřeba následující časový úsek: 7,01 s – 23,4 s – 113,78 s. Nižší časy u posledních úseků potvrzují předešlý předpoklad, že teplotní spád je zde vyšší. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty pro rozdílový čas 220 s je pokles 31,36 %, pro čas 600 s je pokles 37,33 % (44,2 °C a 27,7 °C) a pro čas 900 s je pokles 18,41 % (27,7 °C a 22,6 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot pro druhý interval je zhruba o pětinu vyšší a pokles teplot v třetím intervalu je opět polovinou předchozího poklesu.

Naproti tomu ve stejných místech, ale na levém boku, je situace díky nižším povrchovým teplotám poněkud odlišná. Pro horní polovinu a zadní část byl pokles mezi časem 80 s a 300 s 24,61 % (51,2 °C a 38,6 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 51,17 % (51,2 °C a 25 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s byl 56,44 % (51,2 °C a 22,3 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Vzhledem k nižším povrchovým teplotám jsou tedy i zjištěné rozdíly nižší, a to zhruba o

deset procent a posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 24,61 % za čas 220 s, 26,56 % za čas 600 s a 5,27 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s.

Zde, u nižších povrchových teplot, je nejvyšší pokles pro druhý časový úsek oproti pravému boku, kde tomu bylo naopak u prvního časového úseku. A tedy ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky potřeba následující časový úsek: 8,94 s – 22,59 s – 170,77 s. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty pro čas 220 s 24,61 %, pro čas 600 s 35,23 % (38,6 °C a 25 °C) a pro čas 900 s je pokles 10,8 % (25 °C a 22,3 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot je pro druhý interval zhruba o polovinu vyšší a pro poslední nejdelší časový úsek (900 s) je pokles již pouze třicet procent předchozího poklesu, ale přes čtyřicet procent poklesu pro první časový interval, což je výrazně odlišná situace oproti pravému boku a stejnému místu, kde první dva poklesy byly téměř srovnatelné a poslední byl zhruba polovinou předchozích. Pro horní polovinu a místo přechodu do přední části levého boku byl pokles mezi časem měření 80 s a časem 300 s roven 20,15 % (53,1 °C a 42,4 °C), pokles mezi časem 80 s a časem 900 s byl 50,28 % (53,1 °C a 26,4 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a časem 1800 s byl 57,62 % (53,1 °C a 22,5 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Potom posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 20,15 % za čas 220 s, 30,13 % za čas 600 s a 7,34 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Je patrné, že zde opět k vyššímu teplotnímu spádu dochází až ve druhém časovém úseku. Obdobně se dá, jako předchozích míst, vyjádřit i snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s pro jednotlivé časové rozdíly. Potom je potřebný časový úsek 10,91 s – 19,91 s – 122,62 s. Nižší čas u prostředního úseku potvrzují předešlý předpoklad, že teplotní spád je zde vyšší nejenom oproti první časové oblasti, ale i vůči pravému boku. Naproti tomu u prvního a třetího časového úseku (jednak od 80 s do 300 s a jednak od 900 s do 1800 s) je potřeba mnohem delší čas a to i přesto, že zde jsou teploty nižší. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty pro čas 220 s je pokles 20,15 %, pro čas 600 s je pokles 37,91 % (42,2 °C a 26,4 °C) a pro čas 900 s je pokles 14,77 % (26,4 °C a 22,5 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot pro druhý interval je téměř dvojnásobný a pokles teplot v třetím intervalu je skoro třetina předchozího poklesu.

Stejně srovnání provedu i pro spodní polovinu obou boků. A tak tedy pro spodní polovinu a zadní část pravého boku byl pokles mezi časem měření 80 s a 300 s 28,71 % (51,2 °C a 36,5 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 51,17 % (51,2 °C a 25 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s byl 57,22 % (51,2 °C a 21,9 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Je tedy patrné celkové poklesy povrchových teplot jsou nižší vlivem nižších naměřených povrchových teplot ve spodní části a posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je potom

28,71 % za čas 220 s, 22,46 % za čas 600 s a 6,05 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Nejvyšší pokles je opět v prvním časovém úseku, tak jak tomu bylo i pro horní část pravého boku. Ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky potřeba následující časový úsek: 7,66 s – 26,71 s – 148,76 s, které jsou delší, než-li pro horní polovinu. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty pro čas 220 s 28,71 %, pro čas 600 s 31,51 % (36,5 °C a 25 °C) a pro čas 900 s je pokles 12,4 % (25 °C a 21,9 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot je srovnatelný pro první dva intervaly a pro poslední časový úsek (900 s) je pokles již pouze čtyřicet procent předchozího poklesu. Pro spodní polovinu a místo přechodu do přední části u pravého boku jsou hodnoty totožné s hodnotami pro zadní část pravého boku ve spodní části. Naproti tomu ve stejných místech, ale na levém boku, je situace díky nižším, ale i rozdílným povrchovým teplotám poněkud odlišná. Pro spodní polovinu a zadní část levého boku byl pokles mezi časem 80 s a časem 300 s 27,33 % (47,2 °C a 34,3 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 48,52 % (47,2 °C a 24,3 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s byl 53,81 % (47,2 °C a 21,8 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Vzhledem k nižším povrchovým teplotám jsou tedy i zjištěné rozdíly nižší. Posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 27,33 % za čas 220 s, 22,19 % za čas 600 s a 5,29 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Je zde patrné, že i u nižších povrchových teplot, je nejvyšší pokles pro první časový úsek tak, jak tomu bylo i u pravého boku. Ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky potřeba časový úsek v délce 8,04 s – 27,02 s – 170,13 s. Z výpočtů je patrné, že pro stejné místo potřebuji ve třetím úseku, a to i přes nižší povrchové teploty, mnohem delšího času (170,13 s), než-li pro stejné místo u pravého boku (138,24 s). Pokud budu počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty pro čas 220 s 27,33 %, pro čas měření 600 s 29,15 % (34,3 °C a 24,3 °C) a pro čas 900 s je pokles 10,28 % (24,3 °C a 21,8 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot je pro první dva intervaly téměř shodný a díky nižším teplotám je i nižší oproti pravému boku a zároveň pokles teplot pro poslední nejdelší časový úsek (900 s) je zhruba třetina předchozího poklesu. Pro spodní polovinu zadního nárazníku *Felicie Combi* a místo přechodu do přední části u levého boku byl pokles mezi časem měření 80 s a 300 s roven 25,41 % (42,9 °C a 32 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 43,35 % (42,9 °C a 24,3 °C) a pokles mezi časy 80 s a 1800 s byl 48,95 % (42,9 °C a 21,9 °C) z naměřené povrchové teploty v čase 80 s. Díky nízké teplotě, způsobené intenzivnějším chlazením spodního přechodu na levém bolu jsou zjištěné poklesy odlišné od všech dříve vypočtených hodnot, a to jak pro pravý, tak i pro levý bok. Potom posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 25,41 % za čas 220 s, 17,94 % za čas 600 s a 5,6 % za čas 900 s z povrchové teploty

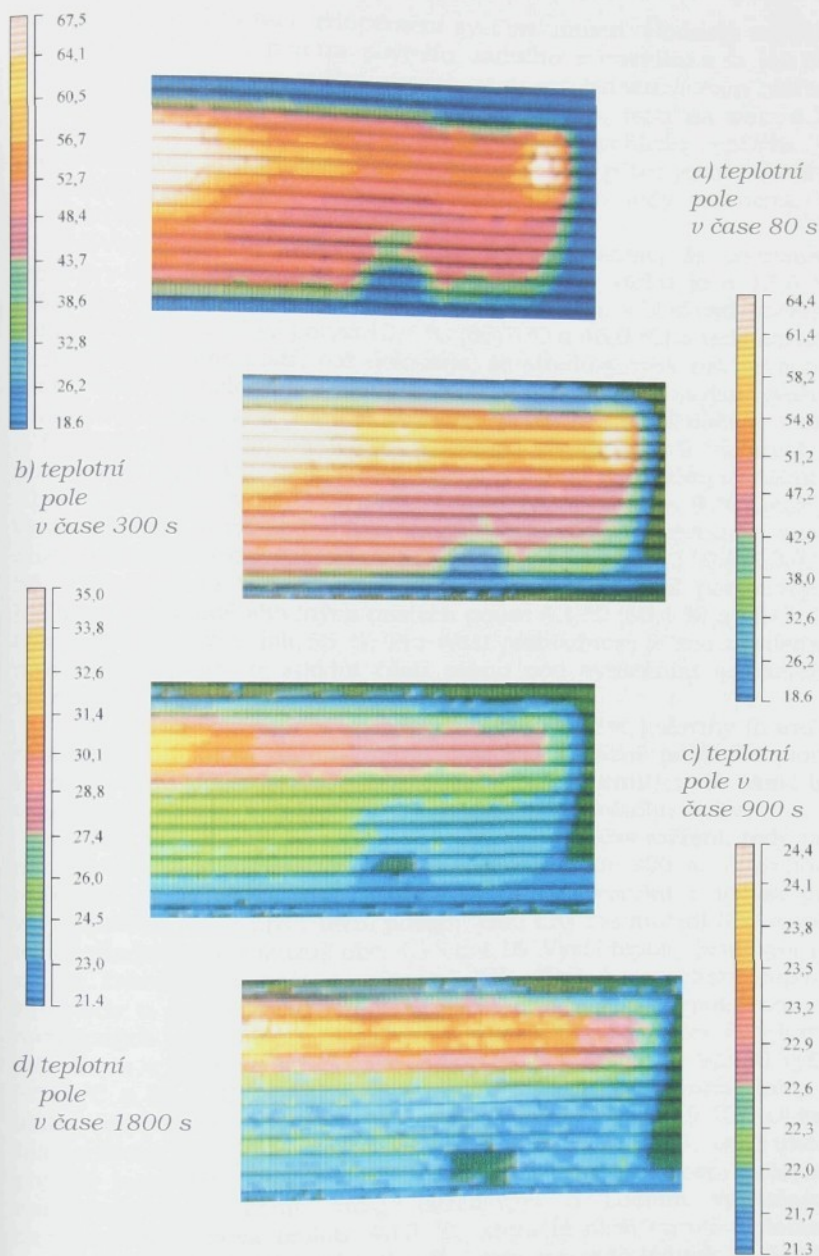
v čase 80 s. Snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s pro jednotlivé časové rozdíly je potom 8,65 s – 33,45 s – 160,72 s. Pokud budu uvažovat a počítat pokles teploty během času mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom pro čas 220 s je pokles 25,41 %, pro čas 600 s je pokles 24,06 % (32 °C a 24,3 °C) a pro čas 900 s je pokles 9,87 % (24,3 °C a 21,9 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot je zhruba poloviční, než-li pro stejné místo na pravém boku a výrazně odlišný pro horní část levého boku (20,15 %, 37,91 % a 14,77 %).

Poslední části hodnocení obou boků bude v tomto bodě vyhodnocení změny povrchové teploty s časem v místě tvarového řešení pro umístění lišty. Takže pro pravý bok a místo nad lištou (teplotně srovnatelné s místem pod lištou), resp. místo uprostřed tvarového řešení, byl pokles mezi časem měření 80 s a časem 300 s 30,94 % (61,4 °C a 42,4 °C), resp. 28,71 % (51,2 °C a 36,5 °C). Pokles mezi časem 80 s a 900 s byl 54,89 % (61,4 °C a 27,7 °C), resp. 51,17 % (51,2 °C a 25 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s byl 63,03 % (61,4 °C a 22,7 °C), resp. 56,84 % (51,2 °C a 22,1 °C), z povrchové teploty v čase měření 80 s. Je tedy patrné, že posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 30,94 % za čas 220 s, 23,95 % za čas 600 s a 8,14 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s, resp. 28,71 %, 22,46 % a 5,67 %. Je patrné, že i přes nižší teploty jsou jednotlivé hodnoty ve stejných časových úsecích srovnatelné, pouze ve třetím úseku je pokles výrazně vyšší pro místo nad tvarovým řešením. A dále, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky potřeba čas 7,11 s – 25,05 s – 110,57 s, resp. 7,66 s – 26,71 s – 158,73 s. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom pro vypočtený časový rozdíl 220 s je rozdíl 30,94 %, pro čas 600 s je pokles 34,67 % (42,4 °C a 27,7 °C) a pro čas 900 s je pokles 18,05 % (27,7 °C a 22,7 °C), resp. 28,71 % pro čas 220 s, 31,51 % (36,5 °C a 25 °C) pro čas 600 s a 11,6 % (25 °C a 22,1 °C) pro čas 900 s a místo uprostřed tvarového řešení. Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot je přibližně srovnatelný a pro obě místa odečtu, ale pro místo nad tvarovým řešením je ve třetím intervalu pokles zhruba polovina předchozího, kdežto pro místo uprostřed tvarového řešení je tento pokles třetinou předchozího poklesu. Na druhém boku zadního nárazníku (levý bok) a místo nad lištou, resp. místo uprostřed tvarového řešení, byl pokles mezi časem měření povrchových teplot 80 s a 300 s 18,95 % (51,2 °C a 41,5 °C), resp. 21,21 % (42,9 °C a 33,8 °C). Pokles mezi časem měření 80 s a 900 s byl 48,44 % (51,2 °C a 26,4 °C), resp. 41,72 % (42,9 °C a 25 °C) a pokles mezi časy 80 s a 1800 s byl 56,05 % (51,2 °C a 22,5 °C), resp. 48,02 % (42,9 °C a 22,3 °C), z povrchové teploty v čase měření 80 s. Potom posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 18,95 % za čas 220 s, 29,49 % za čas 600 s a 7,61 % za čas 900 s z povrchové teploty v čase 80 s, resp. 21,21 %, 20,51 % a 6,3 %. Z předchozího

srovnání je patrné, že pro místo nad tvarovým řešením je pokles ve druhé časové oblasti výrazně vyšší, a to o více, než-li o polovinu poklesu v první časové oblasti a pokles v třetí oblasti je pouze již čtvrtinou předchozího. Snížení povrchové teploty je tedy hlavně realizováno od času 300 s do času 800 s. Naproti tomu v místě uprostřed tvarového řešení jsou první dva poklesy srovnatelné, tak, jak tomu bylo u většiny předchozích míst a pokles v třetí oblasti je třetinou předchozích poklesů. Ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky tedy potřeba čas 11,61 s – 20,35 s – 118,26 s, resp. 10,37 s – 29,25 s – 142,86 s. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k naměřeným povrchovým teplotám v daném čase, tak potom pro časový rozdíl 220 s je pokles 18,95 %, pro čas 600 s je pokles 36,39 % (41,5 °C a 26,4 °C) a pro čas rozdílu 900 s je pokles 14,77 % (26,4 °C a 22,5 °C), resp. 21,21 % pro rozdílový čas 220 s, 26,04 % (33,8 °C a 25 °C) pro čas 600 s a 10,8 % (25 °C a 22,3 °C) pro čas 900 s a místo uprostřed tvarového řešení. Z tohoto porovnání je patrné, že pokles teplot pro místo nad lištou (nad tvarovým řešením) a pro první časový interval je zhruba polovinou dalšího rozdílu a je skoro srovnatelný s rozdílem ve třetím časovém úseku, což potvrzuje skutečnost, že pokles povrchové teploty o 9,7 °C za čas 220 s je srovnatelný s poklesem povrchové teploty o 3,9 °C za čas 900 s. Pro místo uprostřed tvarového řešení není rozdíl tak markantní a rozdíl ve třetím časovém úseku je zhruba poloviční předchozích. Při porovnání s pravým bokem a stejnými místy můžu konstatovat, že vlivem nižších teplot jsou i zjištěné rozdíly nižší, a to zhruba v rozmezí 2 až 7 % pro místo uprostřed tvarového řešení. Pro místo nad tvarovým řešením to neplatí v důsledku odlišných teplotních spádů.

4. Při porovnání a hodnocení povrchových teplot na přední a zadní straně zadního nárazníku *Škody Felicie Combi* (viz. obr. 4.15 a 4.16) je patrné, že srovnatelné jsou nejenom povrchové teploty, ale i rozložení těchto teplotních polí na povrchu je téměř shodné a symetrické. Díky tomuto závěru budu v dalším textu srovnávat pouze povrchové teploty z pravé poloviny přední strany zadního nárazníku z hlediska místa a času (viz. obr 4. 28).

Porovnání rozložení teplotních polí na povrchu zadního nárazníku při pohledu zepředu v jednotlivých časech měření je srovnáno na obr. 4.28, z kterého je patrné, že rozložení povrchových teplot je nejenom rozdílné pro čas do 300 s oproti času nad 300 s, ale i pro horní a spodní polovinu přední (resp. zadní) části zadního nárazníku. Zřejmě se to dá vysvětlit jednak tvarovou složitostí horní poloviny, ve které je konstrukční úprava provedeno vybrání s otvory pro umístění ozdobné lišty a tento přechod pravděpodobně rozvádí a vede taveninu plastu nejdříve nad a pod tímto přechodem a teprve potom následuje vyplnění spodní části obou boků a jednak tím, že umístění vtokového systému je v horní polovině nástroje a je obtížné uchládit tato místa výrobku, když je na jedné straně vtokový systém vyhříván a na straně druhé je i problematické, z konstrukčního



Obr. 4.28: Teplotní pole na povrchu zadního nárazníku pro Škodu Felicii Combi při pohledu zepředu pro čtyři časy měření hodnoty na stupnici jsou ve °C)

hlediska, do těchto míst temperační systém umístit. Hodnoty teplot a rozložení teplotních polí na povrchu zadního nárazníku a to jak pro vnější povrch, tak i pro vnitřní povrch, jsou pro jednotlivé časy měření téměř shodné a proto, jak již bylo dříve řečeno, jsou na obr. 4.28 uvedeny pouze poloviny zadního nárazníku při pohledu zepředu. Je zde však nutné poznamenat, že vyšší teploty byly přece jenom zjištěny na straně tvárnice (viz. obr. 4.15 a 4. 16). To tedy znamená, že intenzivněji je chlazen tvárník.

Z naměřených výsledků v čase 80 s je patrné, že povrchová teplota v horní polovině a v blízkosti středového vtoku je o 15,8 °C vyšší (65,9 °C a 50,1 °C), než-li ve spodní části a v blízkosti bočního vtoku je tento rozdíl již pouze 10,7 °C (56,7 °C a 46,0 °C) a tedy zhruba o padesát procent nižší, což dokazuje, že středový vtok má mnohem vyšší vliv na rozložení teplotních polí a to nejenom svým vyšším průměrem. Dále byla v horní polovině uprostřed mezi oběma vtoky (středovým a bočním) naměřena povrchová teplota 54, 9 °C, která je nižší oproti teplotám, naměřeným blízko vyústění vtokového systému o 11,0 °C (65,9 °C a 54,9 °C) resp. 1,8 °C (56,7 °C a 54,9 °C), což je výrazná změna mezi hodnotami. Rozdíl povrchových teplot mezi místy blízko vyústění vtokových systémů v horní polovině je 9,2 °C (65,9 °C a 56,7 °C). Naproti tomu v dolní polovině je tento rozdíl povrchových teplot ve vertikálně shodných místech pouze 4,1 °C (50,1 °C a 46,0 °C), což je pokles o více jak 55 %. Pro větší přehlednost je zde uvedena i povrchová teplota ve spodní části přímo pod vyústěním středového vtoku (52,7 °C), což představuje změnu o 14,8 °C.

Ze zjištěných hodnot je tedy jasné, že obě dvě poloviny (horní a spodní) přední části zadního nárazníku mají výrazně odlišné teploty, které ve svém důsledku povedou k ochlazovacím pnutím. To samé lze však zkonstatovat i o místech u středového nebo bočního vtoku.

Obdobné závěry lze učinit i pro následující čas měření, tedy pro naměřené rozložení teplotních polí v čase měření 300 s. Povrchové teploty a jejich plošné rozložení na zadním nárazníku a to jak pro vnější povrch, tak i pro vnitřní povrch, jsou pro čas měření 300 s opět téměř shodné, což dokazují obr. 4.15 a 4.16. Vyšší teploty jsou opět na straně tvárnice. A opět se výrazně liší zjištěné povrchové teploty v místech u jednotlivých vtoků a mezi horní a spodní polovinou. Z naměřených povrchových teplot v čase měření 300 s je vidět, že v horní polovině a v blízkosti středového vtoku je rozdíl teplot o 9,2 °C vyšší (45,5 °C a 36,3 °C) oproti spodní části a v blízkosti bočního vtoku je tento rozdíl skoro srovnatelný, tj. 9,4 °C (42,3 °C a 32,9 °C). Oproti času měření 80 s je to změna v prvním případě o 30 %, ve druhém případě je zjištěný rozdíl téměř shodný. Dále byla v horní polovině uprostřed mezi oběma vtoky (středovým a bočním vyústěním) naměřena povrchová teplota 40,3 °C, která je nižší oproti teplotám, naměřeným blízko vyústění vtokového systému a to jednak o 5,2 °C (45,5 °C a 40,3 °C) resp. 2,0 °C (42,3 °C a 40,3 °C), což je v prvním případě oproti času 80 s pokles kolem 50 %, ve druhém případě je rozdíl teplot téměř shodný, ale již zde není takový výrazný rozdíl, jako u času měření 80 s. Rozdíl povrchových teplot mezi místy blízko vyústění

vtokových systémů v horní polovině je $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($45,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $42,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Naproti tomu v dolní polovině je tento rozdíl povrchových teplot ve vertikálně shodných místech téměř shodný $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($36,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $32,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pro větší přehlednost je zde uvedena i povrchová teplota ve spodní části přímo pod vyústěním středového vtoku ($37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), což představuje vůči teplotě v místě vyústění středového vtoku změnu $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($46,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vůči času měření 80 s je to pokles o více než 30 %.

Z naměřených výsledků v čase měření 300 s je možné udělat závěry obdobné jako pro čas 80 s a to, že teplotní namáhání od procesu chlazení nebude rozdílné jenom mezi středem a koncem (přechod mezi přední částí a bokem), ale i mezi spodní a horní polovinou přední části zadního nárazníku a tedy povede ke vzniku vnitřních pnutí a k rozdílné krystalizaci a to i přesto, že zjištěné rozdíly již nejsou tak velké, jako pro čas měření 80 s. To samé lze také zkonstatovat i pro místa u středového nebo bočního vtoku.

Pro dva následující časy termovizního měření povrchových teplot (900 s resp. 1800 s) došlo k tomu, že povrchová teplota v horní části zadního nárazníku a v místě mezi vyústěním bočního a středového vtoku je již vyšší, než-li teplota u bočního vtoku, když pro předchozí časy měření (80 s a 300 s) byla v tomto místě a v horní polovině nejnižší a tedy existuje zde již časová posloupnost středový vtok – místo uprostřed – boční vtok. Potom tedy zjištěný teplotní rozdíl má opačný teplotní spád, než-li pro první dva časy měření. Potom pro čas měření 900 s jsem potom dostal teplotní rozdíly v horní polovině $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($31,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $28,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) mezi vyústěním středového vtoku a místem uprostřed a $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($28,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $27,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) mezi místem uprostřed a bočním vtokem pro celkový teplotní rozdíl $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ mezi vyústěním obou vtoků. Vzhledem ke změně posloupnosti teplot následně porovnám pouze změnu teplotního rozdílu pro místa mezi vyústěním obou vtoků a potom tedy pokles oproti času měření 80 s je skoro 60 % a vzhledem k času měření 300 s jsou zjištěné rozdíly srovnatelné ($3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Obdobně jsou vypočteny i teplotní rozdíly pro čas experimentálního měření 1800 s a tedy rozdíl mezi povrchovými teplotami mezi středovým vtokem a místem uprostřed je $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, mezi místem uprostřed a bočním vtokem je také $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a potom rozdíl mezi vyústěním vtoků je $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oproti času měření 80 s představuje poslední zjištěný teplotní rozdíl hodnotu zhruba 10 % teplotního rozdílu ($9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a oproti času 300 s, resp. 900 s je to téměř 15 %.

Pro naměřené rozložení teplotních polí v čase měření 900 s resp. 1800 s jsou povrchové teploty a jejich plošné rozložení na zadním nárazníku a to jak pro vnější povrch, tak i pro vnitřní povrch téměř shodné. Z naměřených povrchových teplot v čase měření 900 s je vidět, že v horní polovině a v blízkosti vyústění středového vtoku je rozdíl teplot o $5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší ($31,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $26,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) oproti spodní části a v blízkosti vyústění bočního vtoku je tento rozdíl $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($42,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $32,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Oproti času měření 80 s je to v prvním případě změna skoro o 70 %, ve druhém případě je zjištěný rozdíl kolem 60 % rozdílu v čase 80 s a oproti času termovizního měření 300 s je v prvním případě pokles kolem 40 % a v druhém případě je zjištěný rozdíl nižší o 60 %. Pro čas

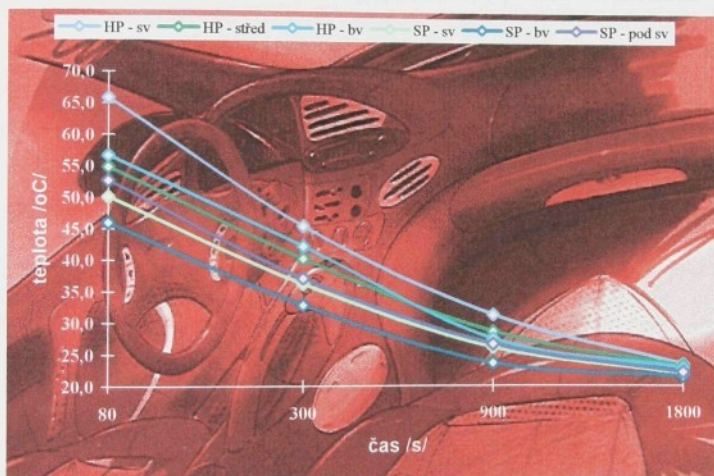
měření 1800 s je rozdíl mezi povrchovými teplotami v horní a spodní části zadního nárazníku ve shodných svislých místech 1,5 °C (23,5 °C a 22,0 °C) resp. 1,4 °C (22,9 °C a 21,5 °C). Potom pokles zjištěného rozdílu v čase měření 1800 s oproti časům 80 s, 300 s a 900 s je v prvním případě 90 %, 85 % resp. 70 % a v druhém případě (vyústění bočního vtoku) 85 %, 85 % resp. 65 %. Kromě již dříve vypočtených rozdílů povrchových teplot mezi místy blízko vyústění vtokových systémů v horní polovině bude proveden i výpočet pro dolní (spodní) polovinu ve vertikálně shodných místech. Potom pro čas experimentálního měření 900 s je rozdíl mezi naměřenými povrchovými teplotami 2,5 °C (26,2 °C a 23,7 °C) a vůči času měření 80 s a 300 s je to pokles o 40 % resp. o 25 % a pro čas měření 1800 s je rozdíl mezi povrchovými teplotami ve spodní části 0,5 °C (22,0 °C a 21,5 °C), což představuje oproti časům měření 80 s, 300 s a 900 s pokles o 90 %, o 85 % a o 80 %. Pro větší přehlednost je zde uvedena i povrchová teplota ve spodní části přímo pod vyústěním středového vtoku, která je pro čas měření 900 s 26,7 °C, což představuje vůči teplotě v místě vyústění středového vtoku změnu o 8,3 °C (35,0 °C a 26,7 °C) a vůči času měření 80 s je to pokles o více než 40 % a oproti času 300 s je to pokles skoro o 15 %. Pro čas měření 1800 s je rozdíl mezi povrchovou teplotou ve spodní části a středovým vtokem 2,2 °C (24,4 °C a 22,2 °C), což je vzhledem k dřívějším časům měření 80 s, 300 s a 900 s pokles o 85 %, o 75 % a o 75 %.

Z naměřených výsledků v čase měření 900 s a 1800 s je možné udělat závěry, které potvrzují obecně známé znalosti, že s rostoucím časem chlazení a s klesající teplotou se snižují i zjištěné a naměřené rozdíly. Z jednotlivých časů měření je dále patrné, že poklesy mezi jednotlivými časy jsou téměř shodné pouze s tou výjimkou, že nejvyšší teplotní spády jsou mezi časem měření 80 s a 300 s, kdy jsou povrchové teploty ještě výrazné. Ze zjištěných rozdílů je dále patrné, že i horní a spodní část přední části zadního nárazníku si stále, i s rostoucím časem, udržují stejné teplotní rozdíly a to i přesto, že horní část je výrazně teplejší, než-li část spodní. A dále je nutné zkonstatovat, že zde nejsou takové teplotní rozdíly mezi místy těsně nad a pod tvarovým řešením pro umístění ozdobné lišty, jako tomu bylo u obou boků.

V dalším textu habilitační práce bude i zde provedeno srovnání teplotních spádů pro přední část zadního nárazníku *Škody Felicie Combi* (viz. obr. 4.29) tak, jak tomu bylo i u bočních částí.

Pro horní polovinu zadního nárazníku *Škody Felicie Combi* a pro místo blízko středového vtoku je tedy potom pokles mezi časem měření 80 s a 300 s 30,95 % (65,9 °C a 45,5 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s je 52,35 % (65,9 °C a 31,4 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s je 64,33 % (65,9 °C a 23,5 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Je tedy patrné, že posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 30,95 % za čas 220 s, 21,4 % za čas 600 s a 11,98 % za čas rozdílu 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Jinak vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky potřeba

následující časový úsek: 7,11 s – 28,03 s – 75,13 s, což je přibližně vždy trojnásobek předchozího potřebného času. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílů pro čas 220 s 30,95 %, pro čas 600 s 30,98 % (45,5 °C a 31,4 °C) a pro čas 900 s je pokles 25,16 % (31,4 °C a 23,5 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly pouze s tím rozdílem, že ke srovnatelnému poklesu potřebuji buď vyšší výchozí teplotu (65,9 °C oproti 45,5 °C) a nebo delší čas (600 s oproti 220 s). Pro poslední nejdelší časový úsek (900 s) je pokles pouze zhruba o 15 % nižší oproti předcházejícím a je tedy možné říci, že delší čas chladnutí při nižších teplotách má shodný účinek jako krátká doba při teplotách vyšších. Obdobně vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento v jednotlivých vypočtených časových úsecích je potřeba následující doba: 7,11 s – 19,37 s – 35,77 s, což je, na rozdíl od předchozího stanovení poklesu o jedno procento, přibližně dvojnásobek předchozího času.



Obr. 4.29: Teplotní spády pro čtyři časy měření a hodnocená místa na přední straně zadního nárazníku Škody Felicie Combi

(HP – horní polovina, lišta, SP – spodní polovina, lišta, sv – místo blízko středového vtoku, bv – místo blízko bočnímu vtoku, střed – místo mezi vyústěním bočního a středového vtoku, pod sv – místo ve spodní části pod středovým vtokem)

Pro horní polovinu zadního nárazníku a pro místo blízko vyústění bočního vtoku je potom pokles mezi časem měření 80 s a časem měření 300 s 26,39 % (56,7 °C a 42,3 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s je 51,85 % (56,7 °C a 27,3 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s je 59,61 % (56,7 °C a 22,9 °C) z povrchové teploty

v čase 80 s. To tedy znamená, že posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 26,39 % za čas 220 s, 25,46 % za čas 600 s a 7,76 % za čas rozdílu 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Jinak vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky doby chlazení potřeba následující čas: 8,33 s – 23,56 s – 115,98 s, což představuje oproti místu u středového vtoku výraznou změnu hlavně v třetí oblasti (skoro 40 %), kdy je již potřebný čas pětinasobkem předchozího. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílů pro čas 220 s 26,39 %, pro čas 600 s 34,75 % (42,3 °C a 27,6 °C) a pro čas 900 s je pokles 17,03 % (27,6 °C a 22,9 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly pouze s tím rozdílem, že vyšší intenzita chlazení je ve druhé oblasti, což už naznačoval i čas, potřebný ke snížení teploty o jedno procento a že pokles ve třetí oblasti je buď skoro a nebo 50 % hodnotou předchozích dvou vypočtených hodnot. Nebo-li k výrazné změně teploty dochází pouze v prvních dvou časových oblastech, ve třetí je změna malá. Obdobným způsobem vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento v jednotlivých vypočtených časových úsecích je potřeba následující čas: 8,33 s – 17,27 s – 52,84 s, což je, na rozdíl od předchozího stanovení poklesu o jedno procento, přibližně dvojnásobek předchozího času pro první dvě doby a trojnásobek pro poslední úsek.

Naproti tomu pro spodní polovinu zadního nárazníku a vertikálně srovnatelné místo odečtu a pro místo blízko středového vtoku je tedy potom pokles mezi časem měření 80 s a 300 s 27,54 % (50,1 °C a 36,3 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s je 47,7 % (50,1 °C a 26,2 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s je 56,09 % (50,1 °C a 22,0 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. Z toho provedu jako pro předchozí rozdíly v horní polovině výpočet posloupnosti poklesu, kdy pro jednotlivé časové rozdíly je vypočtená změna teplot 27,54 % za čas 220 s, 20,16 % za čas 600 s a 8,39 % za čas rozdílu 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Srozumitelněji vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé časové rozdíly potřeba následující časový úsek: 7,99 s – 29,76 s – 107,27 s a oproti horní polovině jsou zde potřebné časy delší a jsou tím vyšší, čím delší je doba chlazení. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílů pro čas 220 s je rozdíl 27,54 %, pro čas 600 s 27,82 % (36,3 °C a 26,2 °C) a pro čas 900 s je pokles 16,03 % (26,2 °C a 22,0 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly pouze s tím, že ke srovnatelnému poklesu potřebuji buď vyšší výchozí teplotu a nebo delší čas chladnutí, což je srovnatelný závěr jako u horní poloviny, ale zjištěné hodnoty jsou zde nižší. Pro poslední nejdélší časový úsek (900 s) je pokles zhruba o 50 % nižší oproti předcházejícím vypočteným poklesům. Způsobem, kterým bylo

vyjádřeno snížení teploty o jedno procento v jednotlivých vypočtených časových úsecích, bude proveden výpočet tohoto poklesu i pro jednotlivé časové rozdíly u jednotlivých měření. Potom potřebný čas je následující: 7,99 s – 21,56 s – 56,14 s.

Pro spodní polovinu zadního nárazníku a pro místo blízko vyústění bočního vtoku ve stejném vertikálním místě je pokles mezi časem měření 80 s a časem měření 300 s mezi naměřenými povrchovými teplotami 28,48 % (46,0 °C a 32,9 °C), pokles mezi časem měření 80 s a 900 s je 48,48 % (46,0 °C a 23,7 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s je 53,26 % (46,0 °C a 21,5 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. To tedy znamená, že posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 28,48 % za čas 220 s, 20 % za čas 600 s a 4,78 % za čas rozdílu 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Jinak vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky doby chlazení potřeba následující čas: 7,72 s – 30 s – 188,28 s, což představuje oproti místu u středového vtoku výraznou změnu hlavně v třetí oblasti (skoro 45 %) a dostavám téměř shodné hodnoty jako pro stejné místo, ale v horní polovině. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílu: pro čas 220 s je zjištěný rozdíl 28,48 %, pro čas 600 s je 28,02 % (32,9 °C a 23,7 °C) a pro čas 900 s je pokles 9,28 % (23,7 °C a 21,5 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly a pokles ve třetí oblasti je pouze 30 % předchozích rozdílu. Nebo-li k výrazné změně teploty dochází pouze v prvních dvou časových oblastech, ve třetí je změna, přehnaně řečeno zanedbatelná. Obdobným způsobem vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento v jednotlivých vypočtených časových úsecích je potřeba následující čas: 7,72 s – 21,41 s – 96,98 s, což potvrzuje již předešlé závěry, že v třetí úseku již je chlazení neúčinné, neboť ke změně teploty o jedno procento je potřeba až čtyřnásobně delší čas, než-li pro předchozí hodnotu.

Obdobným způsobem, jako pro horní a spodní polovinu předního dílu zadního nárazníku a pro místa blízko vyústění obou vtoků, provedu i srovnání pro místo v horní polovině a mezi vtoky a dále i pro místo ve spodní polovině pod vyústěním středového vtoku. A tak tedy pro horní polovinu zadního nárazníku a pro místo mezi vyústěním obou vtoků je pokles mezi časem měření 80 s a časem 300 s 26,59 % (54,9 °C a 40,3 °C), pokles mezi časem měření 80 s a časem 900 s je 47,72 % (54,9 °C a 28,7 °C) a pokles mezi časy měření 80 s a 1800 s je 57,74 % (54,9 °C a 23,2 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. To tedy znamená, že posloupnost poklesu pro jednotlivé vypočtené časové rozdíly je 26,59 % za čas 220 s, 21,13 % za čas 600 s a 10,02 % za čas rozdílu 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. A tedy, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky doby chlazení potřeba následující čas: 8,27 s – 28,4 s – 89,82 s, což představuje vždy tak trojnásobek předchozího času a hodnocení je totožné, jako pro místo v horní

polovině a blízko vyústění středového vtoku. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílů, kdy pro čas 220 s je rozdíl 26,59 %, pro čas 600 s je rozdíl 28,78 % (40,3 °C a 28,7 °C) a pro čas 900 s je pokles 19,16 % (28,7 °C a 23,2 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly pouze s tím rozdílem, že vyšší intenzita chlazení je ve druhé oblasti a že pokles ve třetí oblasti je pouze o třetinu nižší, oproti předchozím vypočteným hodnotám. A obdobným způsobem vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento v jednotlivých vypočtených časových úsecích je potřeba následující doba: 8,27 s – 20,84 s – 46,97 s, což je, na rozdíl od předchozího stanovení poklesu o jedno procento, přibližně dvojnásobek předchozího času.

Pro spodní polovinu zadního nárazníku a pro místo pod vyústěním středového vtoku je pokles mezi časem měření 80 s a časem měření 300 s mezi naměřenými povrchovými teplotami 29,0 % (52,4 °C a 37,2 °C), pokles mezi časem měření 80 s a časem měření 900 s je 49,05 % (52,4 °C a 26,7 °C) a pokles mezi časem měření 80 s a časem měření 1800 s je potom 57,63 % (52,4 °C a 22,2 °C) z povrchové teploty v čase 80 s. To tedy znamená, že posloupnost poklesu pro jednotlivé časové rozdíly je 29,0 % za čas 220 s, 20,05 % za čas 600 s a 8,58 % za čas rozdílu 900 s z povrchové teploty v čase 80 s. Jinak vyjádřeno, ke snížení teploty o jedno procento, vyjádřené v jednotkách času, z povrchové teploty v čase 80 s je pro jednotlivé úseky doby chlazení potřeba následující čas: 7,58 s – 29,92 s – 104,89 s, což představuje výraznou změnu hlavně v třetí oblasti, ke je potřeba mnohem delší doby ke stejnému účinku. Pokud budu uvažovat a počítat pokles mezi jednotlivými měřeními vzhledem k povrchovým teplotám v daném čase, tak potom dostanu následující hodnoty rozdílů: pro čas 220 s je rozdíl 29,0 %, pro čas 600 s je rozdíl 28,22 % (37,2 °C a 26,7 °C) a pro čas 900 s je pokles 16,8 % (26,7 °C a 22,2 °C). Z tohoto porovnání je patrné, že pokles povrchových teplot je srovnatelný pro první dva intervaly a pokles ve třetí oblasti je zhruba 60 % předchozích rozdílů. A potom, vyjádřeno shodným způsobem, ke snížení teploty o jedno procento v jednotlivých vypočtených časových úsecích je potřeba následující čas: 7,58 s – 21,26 s – 53,41 s, což je ukazuje na důležitost každé časové oblasti chlazení.

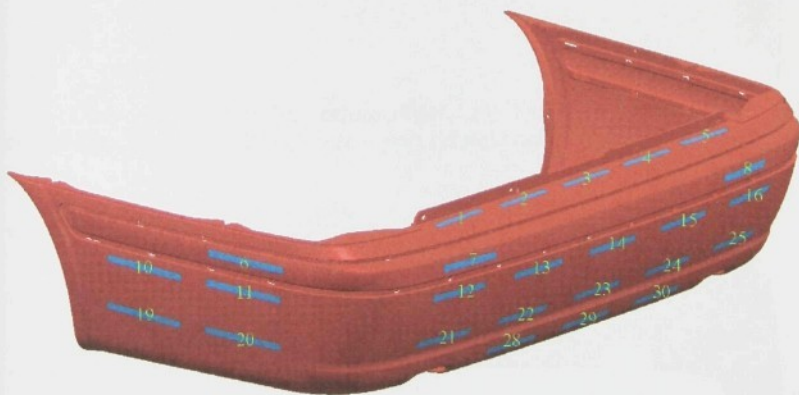
Z provedených termovizních měření rozložení teplotních polí na povrchu výrobku můžu učinit předpoklad, že rozdílné teplotní zatížení jednotlivých míst od nestejnomořného chlazení zadního nárazníku Škody Felicie Combi bude mít vliv na strukturu a vlastnosti použitého semikrystalického plastu (PP) a tím pádem bude i rozložení napětových polí také odlišné. Na základě tohoto hodnocení mechanických vlastností ze této habilitační práce provedeno hodnocení mechanických vlastností ze zkoušky tahem na zkušebních tělesech, odebraných z vyrobených kusů.

nic není!
od toho!

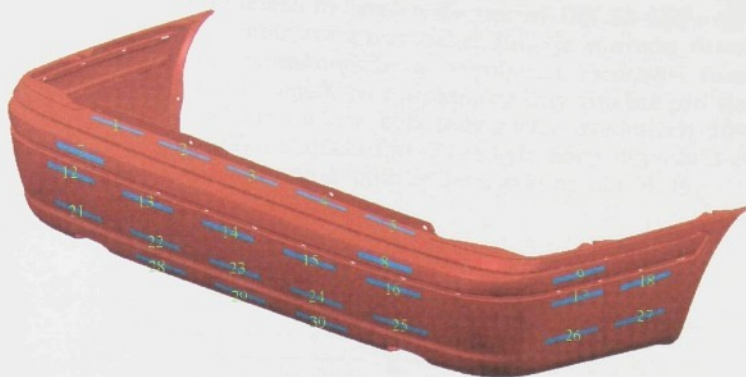
4.2.2. Hodnocení účinků rozložení teplotních polí na mechanické vlastnosti

Pro další prováděné experimenty jsem tedy předpokládal, že rozdílné rozložení teplotních polí a jejich rozdílná velikost, které byly popsány v předchozí kapitole 4.2.1., povede k odlišným napětovým účinkům v jednotlivých oblastech zadního nárazníku Škody Felicie Combi a také, že se mi podaří vyhodnotit vliv působení rozdílných teplot, a to jak ve vstřikovací formě během doby chlazení, tak i po chladnutí na volném vzduchu, na mechanické hodnoty.

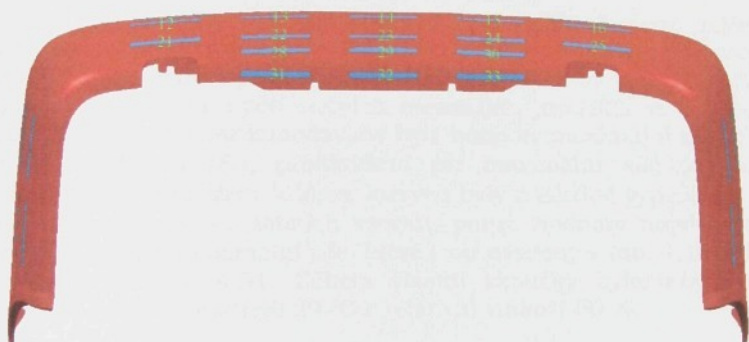
Zkušební vzorky byly odebrány ze zadních nárazníků, které byly použity pro termovizní měření a poloha jednotlivých odebraných vzorků je ukázána na obr. 4.30 až 4.33. Pro srovnání mechanických hodnot byly zkušební tělesa odebrány i z výztužných prvků a ze spodních partií nárazníku, což dokumentuje obr. 4.32 a 4.33. Zkušební tělesa byla odebrána z míst, kde se neměnila tloušťka stěny a kde bylo vůbec možné zkušební těleso vyříznout bez možnosti ovlivnění dalšího měření. To tedy znamená, že na ploše zkušebních těles nebylo ani místo vtoku, ale ani žebro, přechody v tloušťce stěny a nebo změny tvaru. Vzorky byly vyříznuty kotoučovou frézou $\varnothing 80 \times 0,8$ mm podle ČSN 22 2165, označeny čísly a barvou podle jednotlivých nárazníků a následně byly doobrobeny v upínacím přípravku, který zajišťoval, aby nedocházelo k deformacím během opracování, frézou $\varnothing 50 \times 32$ mm dle ČSN 22 2158 při otáčkách 380 min^{-1} a posuvu $55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Po obrobení byly vzorky kondicionovány v laboratořích katedry tváření a plastů po dobu 24 hodin při teplotě 23°C a relativní vlhkosti 50%.



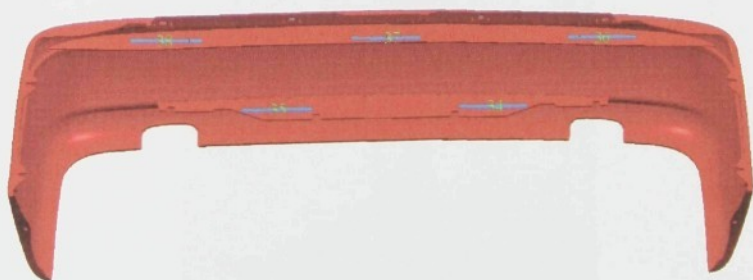
Obr. 4.30: Poloha odebraných zkušebních těles ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi – pohled zepředu a zleva



Obr. 4.31: Poloha odebraných zkušebních těles ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi – pohled zepředu a zprava

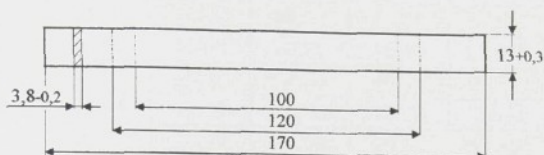


Obr. 4.32: Poloha odebraných zkušebních těles ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi – pohled zespodu



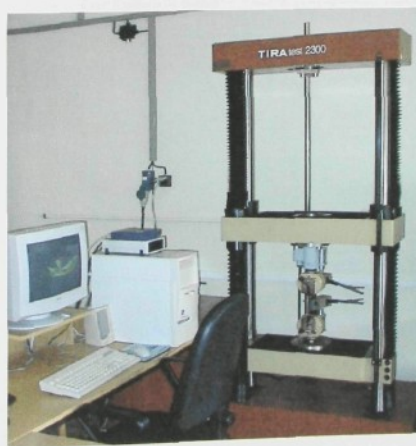
Obr. 4.33: Poloha odebraných zkušebních těles ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi – pohled zezadu

Tvar zkušební tělesa byl zvolen dle normy DIN 53 455 – typ 5 a protože byly vzorky odebírány z tvarového dílu, je normou dovoleno z důvodů tvarových, rozměrových a výrobních, upravit rozměry zkušebních těles tak, aby jejich tvar a rozměry byly vhodné pro vlastní zkoušku. Šířka zkušební tělesa byla tedy z výše uvedených důvodů zvolena 13 mm a tloušťka zkušební tělesa byla dána tloušťkou stěny nárazníku. Rozměry a tvar zkušební tělesa jsou na obr. 4.34.



Obr. 4.34: Tvar a rozměry zkušební tělesa pro zkoušku tahem dle DIN 53 455

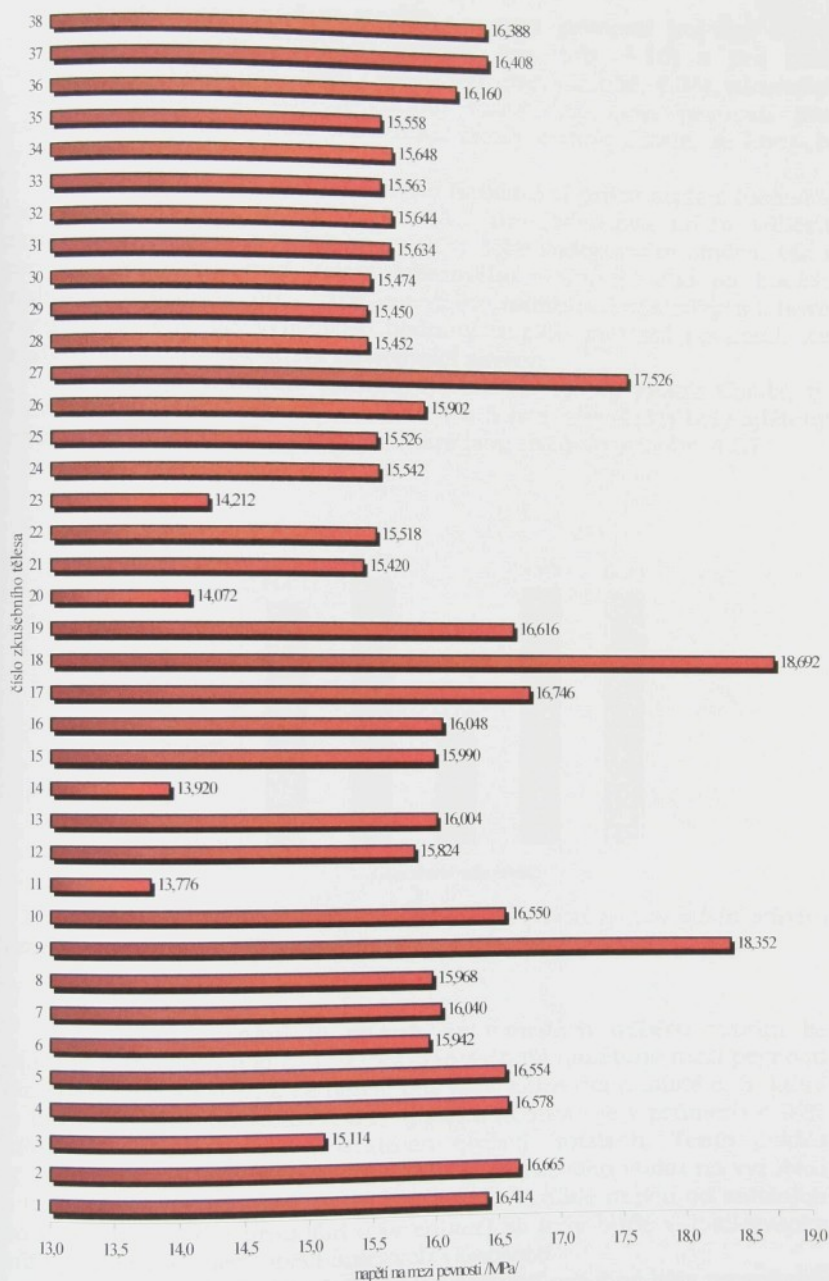
Tahová zkouška byla provedena v laboratořích *katedry tváření a plastů* na trhacím stroji *Tiratest 2300* (viz. obr. 4.35) při konstantní rychlosti oddalování upinacích čelistí $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dle DIN 53 455 na zkušebních tělesech z pěti zadních nárazníků, jdoucích ve výrobě za sebou. Odečítány a zaznamenávány byly hodnoty maximální síly ($F_{\max}$), síly při přetržení (F_R), prodloužení při maximální síle ($\Delta l_{F_{\max}}$) a prodloužení při přetržení (Δl_R), ze kterých byly následně vypočteny, pro naměřené rozměry zkušebních vzorků, pouze hodnoty napětí (σ_B) a deformací (ε_B) při maximální síle, které jsou uvedeny v tab. 4.10 a 4.11 a na obr. 4.36 a 4.51. Během vlastní zkoušky byla v laboratoři naměřena teplota prostředí 22°C a relativní vlhkost 50 %.



Obr. 4.35: Trhací stroj Tiratest 2300 v laboratořích KPT

Tab. 4.10: Napětí na mezi pevnosti σ_B (při maximální síle) na zkušebních tělesech z pěti zadních nárazníků Škody Felicie Combi

Napětí na mezi pevnosti σ_B /MPa/							
č. zk. těl.	nárazník 1	nárazník 2	nárazník 3	nárazník 4	nárazník 5	průměr	směr. odch.
1	16,41	16,47	16,42	16,36	16,41	16,414	0,0350
2	16,64	16,75	16,70	16,57	16,66	16,664	0,0602
3	15,06	15,15	15,12	15,22	15,02	15,114	0,0697
4	16,51	16,60	16,63	16,72	16,43	16,578	0,0999
5	16,56	16,60	16,64	16,54	16,43	16,554	0,0709
6	15,92	15,94	16,01	15,96	15,88	15,942	0,0431
7	16,08	16,02	15,99	16,08	16,03	16,040	0,0352
8	15,98	15,89	16,05	15,92	16,00	15,968	0,0571
9	18,31	18,44	18,29	18,45	18,27	18,352	0,0770
10	16,53	16,58	16,54	16,38	16,72	16,550	0,1088
11	13,78	13,85	13,69	13,89	13,67	13,776	0,0862
12	15,87	15,83	15,64	15,86	15,92	15,824	0,0965
13	15,99	16,07	16,05	15,87	16,04	16,004	0,0720
14	13,91	13,92	14,06	13,96	13,75	13,920	0,1002
15	15,95	16,00	16,07	16,06	15,87	15,990	0,0740
16	16,03	16,11	16,08	16,08	15,94	16,048	0,0598
17	16,72	16,90	16,86	16,87	16,38	16,746	0,1932
18	18,67	18,64	18,96	18,74	18,45	18,692	0,1649
19	16,62	16,63	16,70	16,72	16,41	16,616	0,1100
20	14,03	14,15	14,11	14,13	13,94	14,072	0,0776
21	15,38	15,50	15,60	15,40	15,22	15,420	0,1271
22	15,54	15,61	15,49	15,31	15,64	15,518	0,1165
23	14,15	14,22	14,27	14,32	14,10	14,212	0,0793
24	15,51	15,76	15,47	15,65	15,32	15,542	0,1514
25	15,29	16,00	15,78	15,22	15,34	15,526	0,3076
26	15,88	16,05	15,92	15,99	15,67	15,902	0,1298
27	17,46	17,67	17,58	17,56	17,36	17,526	0,1065
28	15,36	15,64	15,56	15,41	15,29	15,452	0,1292
29	15,47	15,42	15,50	15,39	15,47	15,450	0,0395
30	15,44	15,44	15,69	15,47	15,33	15,474	0,1181
31	15,69	15,72	15,58	15,87	15,31	15,634	0,1866
32	15,59	15,80	15,74	15,67	15,42	15,644	0,1322
33	15,58	15,72	15,64	15,63	15,26	15,563	0,1781
34	15,66	15,65	15,68	15,89	15,36	15,648	0,1689
35	15,59	15,68	15,43	15,68	15,41	15,558	0,1175
36	16,14	16,35	16,22	16,08	16,01	16,160	0,1175
37	16,39	16,46	16,54	16,44	16,21	16,408	0,1102
38	16,27	16,57	16,45	16,56	16,09	16,388	0,1840

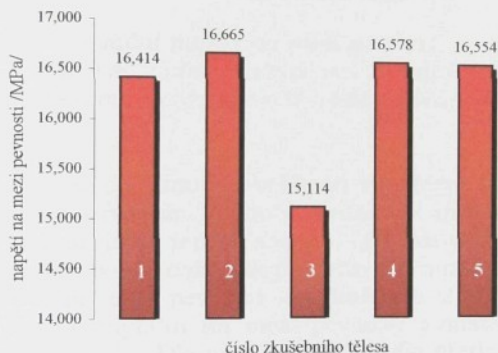


Obr. 4.36: Porovnání vypočtených hodnot napětí na mezi pevnosti σ_B na zkušebních tělesech z pěti zadních nárazníků Škody Felicie Combi

Z vypočtených hodnot napětí na mezi pevnosti (σ_B) byl z pěti provedených měření vypočten průměr (viz. tab. 4.10) a pro tuto hodnotu byl potom nakreslen i sloupcový graf (viz. obr. 4.36), ukazující celkové srovnání zjištěných hodnot napětí na mezi pevnosti pro všechna místa na zadním nárazníku Škody Felicie Combi, ze kterých byla odebrána zkušební tělesa.

V dalším textu této předložené habilitační práce bude z hlediska lepší přehlednosti provedeno srovnání pro jednotlivá místa odběru zkušebních vzorků, a to jak ve svislém nebo vodorovném směru, tak i pro shodná místa buď kolem středového vtoku a nebo na bocích zadního nárazníku, pro experimentálně naměřené výsledky z tahové zkoušky a tedy pro vypočtené hodnoty napětí na mezi pevnosti. Ze zjištěných hodnot lze učinit následující závěry:

1. Na horní straně zadního nárazníku Škody Felicie Combi, tj. v místech odběru vzorků č. 1, 2, 3, 4 a 5 (viz. obr. 4.31) byly zjištěny hodnoty napětí na mezi pevnosti, které jsou uvedeny na obr. 4.37.

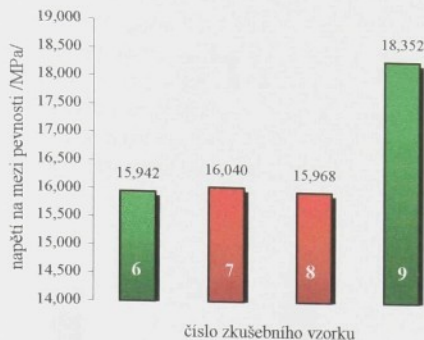


Obr. 4.37: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 1, 2, 3, 4 a 5 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Z tohoto srovnání je patrné, že v místech odběru vzorků ze zadního nárazníku pod č. 1, 2, 4 a 5 je zjištěné napětí na mezi pevnosti téměř shodné a výrazně se neliší, což však nelze říci o místě č. 3, které je blízko středového vtoku a kde zjištěná hodnota je v průměru o 9 % nižší, oproti hodnotám v ostatních čtyřech místech. Tento pokles zřejmě bude způsoben účinkem vyústění středového vtoku na výrobku a to i přesto, že se jedná o vyhřívavý vtok. Vzniklé napětí od vnitřních pnutí (pnutí vlivem proudění a orientace) se tedy bude v dosti vysoké míře podílet na změně mechanických vlastností.

2. V místě tvarového řešení pro umístění ozdobné lišty na zadním nárazníku byly odebrány zkušební vzorky č. 6, 7, 8 a 9, a to tak, že všechny jsou umístěny kolem vyústění bočních vtoků avšak s tím rozdílem, že zkušební tělesa č. 7 a 8 jsou z přední části zadního

nárazníku a zkušební tělesa č. 6 resp. 9 jsou z levého resp. pravého boku při pohledu zepředu (viz. obr. 4.30 a 4.31). Stejně jako pro předchozí vyhodnocení, ale i pro další možnosti, je pro větší přehlednost provedeno grafické srovnání napětí na mezi pevnosti pouze pro tato místa odběru zkušebních těles (viz. obr. 4.38).



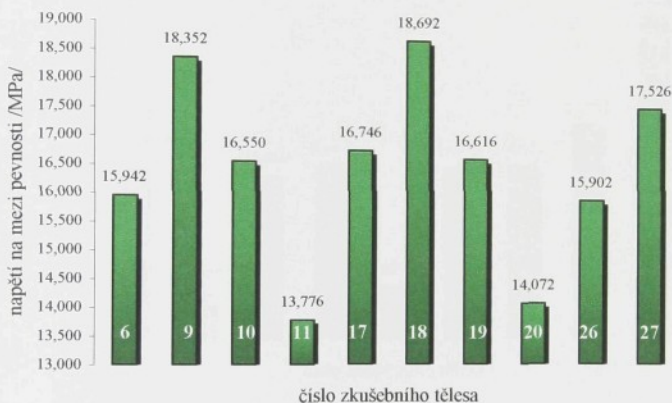
Obr. 4.38: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 6, 7, 8 a 9 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi (zeleně jsou označena místa na bocích, červeně místa v přední části)

Z předchozího digramu a z velikosti vypočtených napětí na mezi pevnosti je jasně vidět, že hodnoty v různých místech přední části zadního nárazníku jsou téměř shodné, ale zároveň jsou shodné i s místem na levém boku, což však již nelze říci o pravém boku. Zde je hodnota napětí na mezi pevnosti v průměru o 2,37 MPa vyšší, což představuje oproti napětím na mezi pevnosti v místech č. 6, 7 a 8 přírůstek téměř o 15 %. Dle mého názoru a dle předchozích výsledků z termovizního měření nedochází na pravém boku k tak intenzivnímu ochlazení povrchu zadního nárazníku, protože je v těchto místech vyšší teplota formy oproti levému boku a přední části a proto je zde i více krystalizačních zárodků, ale také i menší krystalizační pnutí mezi rozdílným objemem této fáze na povrchu a uprostřed stěny zadního nárazníku.

3. Zajímavých hodnot napětí na mezi pevnosti bylo zjištěno u celkového srovnání pro oba boky (viz. obr. 4.39) a tedy pro místa na levém boku (č. 6, 10, 11, 19, 20) oproti místům na pravém boku (č. 9, 17, 18, 26, 27) zadního nárazníku (viz. obr. 4.30 a 4.31).

Z následujícího diagramu je patrné, že napětí na mezi pevnosti a na levém boku je výrazně nižší oproti hodnotám na pravém boku, což může být způsobeno důvody, popsanými v předchozím bodě. Tak např. v tvarové části blízko vyústění bočních vtoků je rozdíl mezi levým a pravým bokem (zkušební těleso č. 6 a 9) již dříve popsaných 2,37 MPa, což představuje změnu o 15 % oproti levému boku. U zkušebních těles v horní polovině obou boků je změna v zadní části 2,14 MPa mezi

zkušebními tělesy č. 10 a 18, což je oproti vzorku č. 10 nárůst o 13 % a v přední části mezi zkušebními tělesy č. 11 a 17 je rozdíl 2,97 MPa, což představuje nárůst oproti zkušebnímu tělesu č. 11 skoro 22 %. Ve spodní části je změna ve velikosti napětí na mezi pevnosti o něco nižší a potom tedy rozdíl mezi zkušebními tělesy č. 19 a 27 v zadní části obou boků je 0,91 MPa, což představuje vůči zkušebnímu vzorku č. 19 změnu o 5,5 % a v přední části je mezi zkušebními vzorky č. 20 a 26 rozdíl 1,83 MPa, což je změna o 13 % vůči místu č. 20. Je nepochybné, že se zvyšující se povrchovou teplotou roste i rozdíl v mechanických hodnotách mezi levým a pravým bokem pro shodná místa odběru zkušebních těles. Nebo-li ve spodní části není tak výrazný rozdíl mezi naměřeným napětím na mezi pevnosti, jako je tomu v horní polovině, kde jsou povrchové teploty mnohem vyšší.

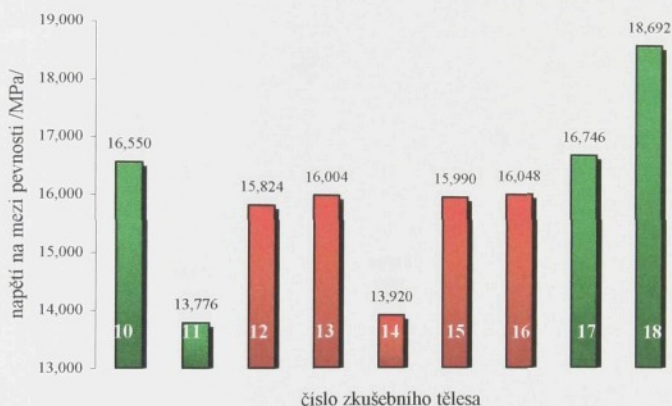


Obr. 4.39: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 6, 10, 11, 19 a 20 (levý bok) a místa odběru vzorků č. 9, 17, 18, 26 a 27 (pravý bok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Na druhé straně jsem zjistil i změnu ve velikosti napětí na mezi pevnosti u obou boků i mezi předním (blízko přechodové části do přední části zadního nárazníku) a zadním odebraným zkušebním tělesem. Potom pro levý bok je mezi zkušebním tělesem č. 10 a 11 v horní polovině rozdíl 2,77 MPa, což představuje oproti místu odběru vzorků č. 11 nárůst o 20 % a ve spodní části je rozdíl mezi zkušebním tělesem č. 19 a 20 2,54 MPa, což je nárůst oproti místu č. 20 více než 18 %. A pro pravý bok zadního nárazníku a pro místa odběru vzorků č. 17 a 18 je rozdíl ve velikosti napětí 1,95 MPa, což je vůči zkušebnímu tělesu č. 17 nárůst téměř o 12 % a ve spodní polovině mezi zkušebními tělesy č. 26 a 27 je potom rozdíl 1,62 MPa a nárůst představuje 10,2 % oproti místu č. 26. Z těchto výsledků je patrné, že i když v přední části u obou boků byla naměřena vyšší

povrchová teplota, tak i přes lepší podmínky pro krystalizaci byly v těchto oblastech naměřeny nižší mechanické hodnoty a tyto rozdíly jsou tím vyšší, čím nižší povrchová teplota byla v daném místě naměřena. Tedy jinak řečeno, tyto rozdíly nejsou tak výrazné na pravém boku, jako na boku levém (1,95 MPa oproti 2,77 MPa, resp. 1,62 MPa oproti 2,54 MPa).

4. Porovnání vypočtených hodnot napětí na mezi pevnosti provedu i pro všechna zkušební tělesa, odebraná z horní poloviny zadního nárazníku, tedy pro místa odběrů č. 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 18 (viz. obr. 4.30 a 4.31). Diagram je ukázán na obr. 4.40. Hodnocení zkušebních vzorků z obou boků bylo provedeno v předchozím bodě a proto zde uvedu pouze srovnání zkušebních těles z přední části jednak mezi sebou a jednak s oběma boky.

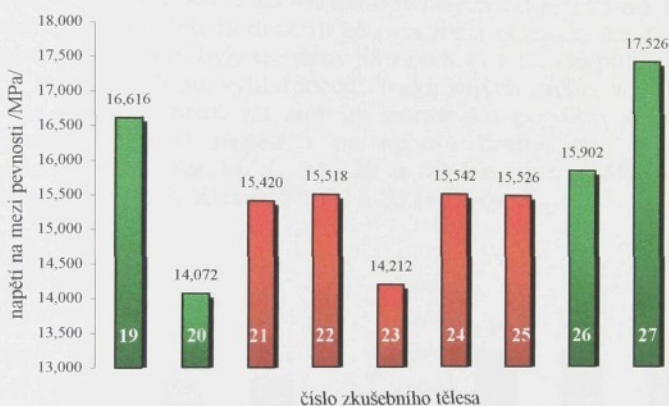


Obr. 4.40: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 18 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi (zeleně jsou označeny místa na bocích, červeně místa v přední části)

Z diagramu na obr. 4.40 je patrné, že pravý bok vykazuje opět mnohem vyšší hodnoty napětí na mezi pevnosti, než-li bok levý (viz. bod 3. této kapitoly), ale i než přední část zadního nárazníku. Maximální hodnota napětí na mezi pevnosti v této vodorovné řadě horní poloviny je v průměru o 2,72 MPa vyšší oproti místům č. 12, 13, 15 a 16, což představuje nárůst téměř 17 % a oproti zkušebnímu tělesu č. 14 (těsně pod vyústěním středového vtoku) je tento rozdíl ještě vyšší a představuje 4,77 MPa, což je téměř 35 % hodnoty v místě odběru zkušebního tělesa č. 14. Další dvě místa na bocích, ve kterých byly odebrány zkušební tělesa č. 10 a 17 jsou srovnatelné s místy na přední části zadního nárazníku kromě zkušebního vzorku č. 14, kde rozdíl činí kolem 2,7 MPa a vyjádřeno v procentech z hodnoty napětí pro zkušební těleso č. 14 představuje tento rozdíl skoro 20 %. Jediným

srovnatelným místem vůči vzorku č. 14 je zkušební těleso č. 11, které je blízko vyústění bočního vtoku a tak i zřejmě zde vlivem změny tvaru a vlivem orientace dochází k výraznému poklesu i přesto, že zde byly naměřeny poměrně vysoké teploty. V přední části mají zbylá čtyři zkušební tělesa (č. 12, 13, 15 a 16) oproti místu č. 14 napětí zhruba o 2,1 MPa vyšší, což je vůči zkušebnímu vzorku č. 14 nárůst o 15 %. Zde zřejmě působí podobné vlivy, jako účinky, uvedené v bodě č. 1 této kapitoly habilitační práce.

5. Porovnání vypočtených hodnot napětí na mezi pevnosti provedu, stejně jako po předchozí odstavci, i pro všechna zkušební tělesa, odebraná ze spodní poloviny zadního nárazníku, tedy pro místa odběrů č. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 a 27 (viz. obr. 4.30 a 4.31). Porovnání zjištěných hodnot napětí na mezi pevnosti je obr. 4.41.

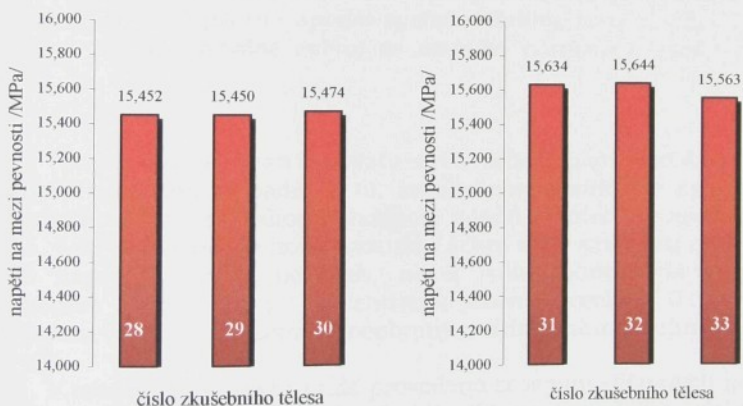


Obr. 4.41: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 a 27 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi (zeleně jsou označeny místa na bocích, červeně místa v přední části)

Stejně jako v předcházejícím bodě i zde platí, že pravý bok zadního nárazníku vykazuje opět vyšší hodnoty napětí na mezi pevnosti, než-li bok levý (viz. bod 3. této kapitoly), ale i než přední část nárazníku, avšak hodnoty již zde nejsou tak rozdílné. Maximální hodnota napětí na mezi pevnosti v této vodorovné řadě spodní poloviny je v průměru o 2 MPa vyšší, což je rozdíl oproti místům č. 21, 22, 24 a 25 necelých 13 % a oproti zkušebnímu tělesu č. 23 (těsně pod vyústěním středového vtoku) je tento rozdíl, stejně jako v předchozím bodě pro horní polovinu, ještě vyšší a činí 3,32 MPa, což je téměř 25 % hodnoty v místě odběru zkušebního tělesa č. 23. Další dvě místa na bocích, ve kterých byly odebrány zkušební tělesa č. 19 a 26 jsou odlišně srovnatelné s místy na přední části zadního nárazníku. Zkušební těleso č. 26 má téměř shodnou hodnotu napětí na mezi

pevnosti se vzorky č. 21, 22, 24, a 25, tak potom napětí u zkušební tělesa č. 19 je vyšší v průměru o 1,1 MPa, což je nárůst o 7 %. A vůči zkušebnímu vzorku č. 23, je tento rozdíl ještě vyšší. Pro místo odběru č. 19 je rozdíl 2,4 MPa, což vyjádřeno v procentech z hodnoty napětí pro zkušební těleso č. 23 představuje změnu skoro 17 %. Naproti tomu pro zkušební těleso č. 26 je rozdíl mezi hodnotami napětí na mezi pevnosti 1,69 MPa a změna, vyjádřená v procentech z hodnoty pro místo odběru č. 23 je potom 12 %. Jediným srovnatelným místem vůči vzorku č. 23 je zkušební těleso č. 20, které je blízko vyústění bočního vtoku a tak i zřejmě zde, stejně jako v předchozím případě, vlivem změny tvaru a vlivem orientace dochází k výraznému poklesu hodnoty napětí na mezi pevnosti a to i přesto, že zde byly naměřeny poměrně vysoké teploty. V přední části mají zbylá čtyři zkušební tělesa (č. 21, 22, 24 a 25) oproti místu č. 23 napětí zhruba o 1,3 MPa vyšší, což je vůči zkušebnímu vzorku č. 23 nárůst o necelých 10 %. Pro zdůvodnění rozdílných naměřených hodnot napětí na mezi pevnosti lze zde uvést podobné účinky, které byly uvedeny již v bodě č. 1 této kapitoly.

6. Pro kompletní vyhodnocení vodorovných změn v hodnotách napětí na mezi pevnosti na zadním nárazníku provedu v této části vyhodnocení velikosti napětí i na spodní hraně (viz. obr. 4.42) v místech odebrání vzorků č. 28, 29 a 30 (viz. obr. 4.31), ale také v místech zkušebních těles č. 31, 32 a 33 (viz. obr. 4.33).

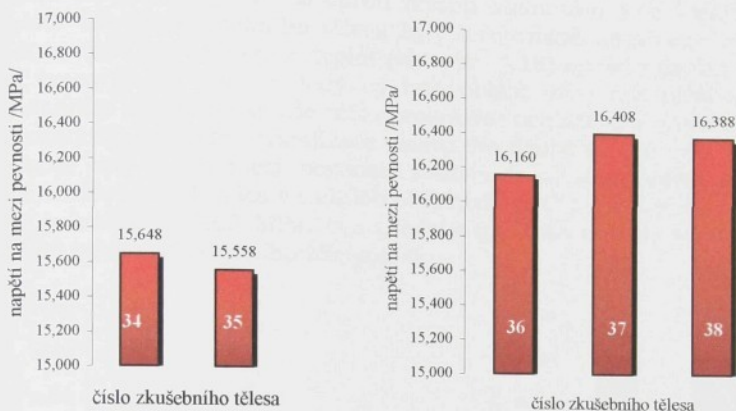


Obr. 4.42: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 28, 29 a 30 (vlevo), resp. č. 31, 32 a 33 (vpravo) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Z obr. 4.42 je patrné, že jak pro zkušební tělesa č. 28, 29 a 30, tak i pro zkušební tělesa č. 31, 32 a 33 jsou zjištěné hodnoty napětí na mezi pevnosti srovnatelné a pouze nepatrně (v průměru o 0,6 MPa) jsou vyšší hodnoty pro zkušební tělesa č. 31, 32 a 33, které představují

změnu oproti místům č. 28, 29 a 30 necelá 4 %.

7. Obdobným způsobem jako pro spodní hranu, provedu z hlediska kompletnosti v dalším textu i srovnání pro odebraná zkušební tělesa ze zadních výztužných žeber (viz. obr. 4.43) na zadním nárazníku (viz. obr. 4.33), které mají označení č. 34 a 35 (spodní výztužné žebro), resp. 36, 37, 38 (horní výztužné žebro).



Obr. 4.43: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 34 a 35 (vlevo - spodní výztužné žebro), resp. č. 36, 37 a 38 (vpravo - horní výztužné žebro) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Pro tělesa, odebraná z výztužných žeber, platí podobný závěr jako v předchozím případě, a to, že zkušební vzorky ze společného výztužného žebra mají shodné hodnoty napětí na mezi pevnosti. Jinak z obr. 4.43 je patrné, že horní výztužné žebro má v průměru o 0,7 MPa vyšší napětí na mezi pevnosti, než-li jsou hodnoty na spodním výztužném žebře, což je procentuální změna necelých 5 % oproti spodnímu výztužnému žebře a odebraným zkušebními tělesům.

V následujícím textu bude provedeno srovnání zjištěných hodnot napětí na mezi pevnosti v jednotlivých oblastech zadního nárazníku pro všechna odebraná zkušební tělesa z těchto míst, a to jak z levého boku, tak i z pravého boku, jak z přední části v blízkosti obou bočních vtoků, tak i z přední části ve svislé rovině vyústění středového vtoku a z oblastí mezi vyústěním obou vtoků. Jinak řečeno, zde nebudu srovnávat napětí na mezi pevnosti pro zkušební tělesa ze shodných místech odběru nebo změnu ve vodorovném směru, ale rozložení napětí na hodnocené oblasti a také změnu ve vertikálním směru.

8. Při porovnání hodnot napětí na mezi pevnosti pro všechna odebraná zkušební tělesa (označení č. 6, 10, 11, 19 a 20) z levého boku zadního nárazníku (viz. obr. 4.30) je ze zjištěných hodnot patrné (viz.

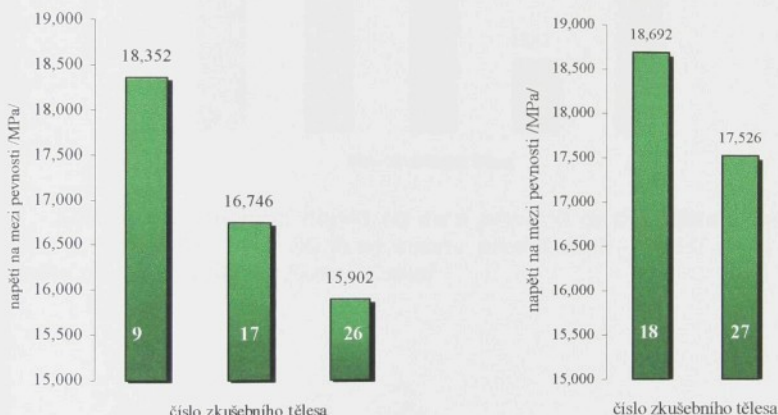
obr. 4.44), že v zadní oblasti levého boku není ve svislém směru téměř žádný rozdíl mezi napětím, naměřeným pro zkušební těleso č. 10 a 19. To samé však již nelze říci o přední oblasti levého boku, kde jsou sice zjištěné hodnoty napětí na mezi pevnosti pro zkušební tělesa č. 11 a 20 téměř shodné (rozdíl necelá dvě procenta), ale v místě odběru zkušební vzorku č. 6 (tvarové řešení pro umístění ozdobné lišty) je zjištěné napětí o 1,87 MPa resp. 2,17 MPa vyšší, což představuje změnu o 13 % resp. 16 % oproti nižším hodnotám a to i přesto, že v místě odběru zkušební tělesa byly termovizně naměřeny výrazně nižší hodnoty povrchových teplot (viz. obr. 4.18) oproti místům nad a pod tvarovým řešením a tedy by tato oblast měla mít nižší stupeň krystalinity a také by se zde mělo projevovat ochlazovací pnutí a pnutí od rozdílného stupně krystalizace plastu. Na druhé straně byla zjištěná hodnota napětí na mezi pevnosti v místě č. 6 nižší oproti místům odběru zkušebních těles v zadních oblastech levého boku (č.10 a 19), a to v průměru o 0,63 MPa, což představuje změnu 4 % vůči napětí v místě odběru zkušební tělesa č. 6.



Obr. 4.44: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 6, 11, 20, 10 a 19 (levý bok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

9. Při stejném porovnání hodnot napětí na mezi pevnosti pro všechna odebraná zkušební tělesa (označení č. 9, 17, 18, 26 a 27) na druhém boku, tedy z pravého boku zadního nárazníku (viz. obr. 4.31) je ze zjištěných hodnot patrné (viz. obr. 4.45), že v zadní oblasti pravého boku, zřejmě vlivem vyšších povrchových teplot, již neplatí to, co u levého boku ve stejných místech, neboť ve svislém směru je mezi místy odběru zkušební tělesa č. 18 a 27 rozdíl 1,17 MPa ve prospěch výše odebraného zkušební vzorku (č.18), kde byly naměřeny i vyšší povrchové teploty, což představuje rozdíl 6,5 % z hodnoty 17,526 MPa. A v přední oblasti pravého boku jsou zjištěné hodnoty napětí na mezi pevnosti nejvyšší pro zkušební těleso č. 9 - tvarové řešení pro umístění

ozdobné lišty (18,352 MPa) a nejnižší je hodnota napětí na mezi pevnosti pro zkušební těleso č. 26 (15,902 MPa) a tedy napětí klesá od horní části směrem ke spodní části zadního nárazníku. Rozdíl mezi hodnotami napětí pro zkušební těleso č. 9 a 26 je potom 2,45 MPa, což je více jak 15 % z hodnoty napětí v místě č. 26. Je to zajímavé, protože, stejně jako u levého boku, tak i u pravého boku, byly v místě odběru zkušebního tělesa termovizně naměřeny výrazně nižší povrchové teploty (viz. obr. 4.17) oproti místům nad a pod tvarovým řešením se všemi důsledky rozdílného ochlazování, rozdílného smrštění, apod. V místě uprostřed (zkušební těleso č. 17) bylo zjištěné napětí na mezi pevnosti vyšší o 0,85 MPa oproti vzorku č. 26, což je rozdíl 5 % oproti nižší hodnotě. Na druhé straně je rozdíl vůči zkušebnímu tělesu č. 9 1,61 MPa a představuje skoro 10 % hodnoty napětí, zjištěné při měření zkušebního tělesa č. 17. Srovnáním vertikálních oblastí mezi zadní a přední částí pravého boku zadního nárazníku lze zkonstatovat, že přibližně shodné napětí na mezi pevnosti mají vzorky č. 9 a 18, na druhé straně také zkušební tělesa č. 17 a 27.

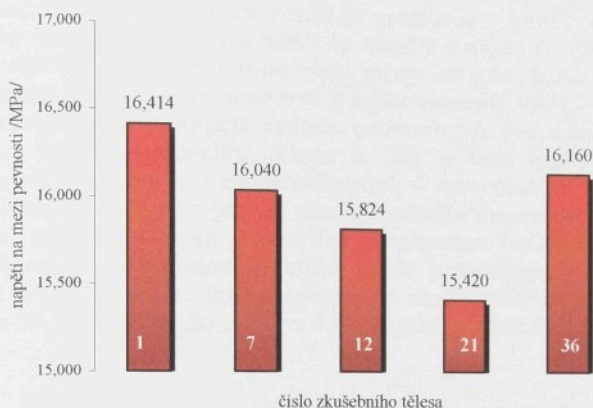


Obr. 4.45: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 9, 17, 26, 18 a 27 (pravý bok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

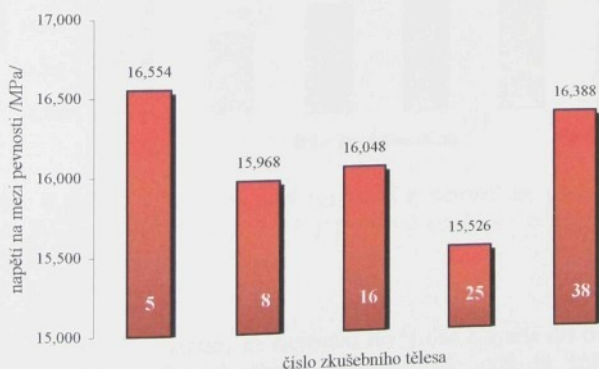
10. V tomto bodě bude provedeno srovnání napětí na mezi pevnosti ve vertikální rovině v blízkosti vyústění bočního vtoku pro zkušební tělesa č. 1, 7, 12, 21 a 36 (viz. obr. 4.30), které je graficky srovnáno v diagramu na obr. 4.46 a také pro zkušební tělesa č. 5, 8, 16, 25 a 38 (viz. obr. 4.31), které je ukázáno na obr. 4.47.

A tedy pro levou polovinu přední části zadního nárazníku a pro zkušební tělesa č. 1, 7, 12, 21 a 36 je patrné, že napětí na mezi pevnosti klesá od horní hrany směrem ke spodní části zadního nárazníku a ani v oblasti tvarového řešení pro umístění ozdobné lišty (zkušební těleso č. 7) není zjištěná hodnota nejvyšší tak, jako tomu bylo na obou bocích. Nejvyšší rozdíl je potom mezi zkušebním vzorkem

č. 1 a 21, který činí necelý 1 MPa a z hodnoty napětí v místě č. 21 představuje tento rozdíl necelých 6,5 %. Mezi jednotlivými místy odběru zkušebních vzorků je potom pokles směrem ke spodní hraně vždy tak kolem 2 %. Pro přehlednost je zde uvedena i hodnota napětí na mezi pevnosti pro horní žebro (zkušební těleso č. 36) ve stejné vertikální oblasti a tato hodnota je nepatrně vyšší, než-li průměr mezi zkušebními vzorkem č. 1 a 21 a tedy nijak výrazně se neliší od naměřených hodnot z přední plochy zadního nárazníku.



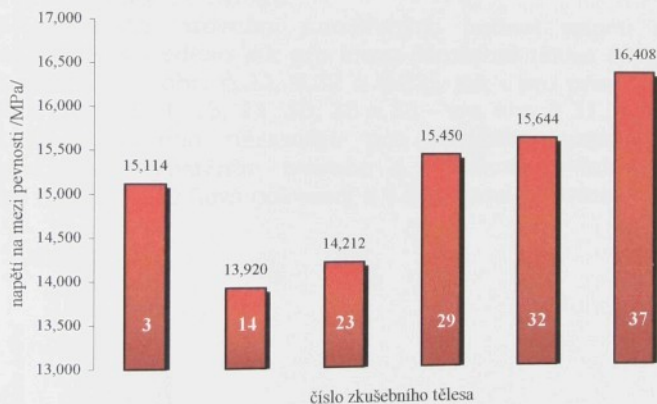
Obr. 4.46: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 1, 7, 12, 21 a 36 (levá strana přední části – boční vtok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi



Obr. 4.47: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 5, 8, 16, 25 a 38 (pravá strana přední části – boční vtok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Na druhé polovině, tedy na pravé polovině přední části zadního nárazníku a pro okolí vyústění pravého bočního vtoku a pro zkušební tělesa č. 5, 8, 16, 25 a 38 je předem nutné zkonstatovat, že zde byly na zkušebních tělesech naměřeny vyšší hodnoty napětí na mezi pevnosti, i když jen nepatrně. Dále, stejně jako v blízkosti vyústění levého bočního vtoku, tak i zde dochází od horního okraje směrem ke spodní polovině zadního nárazníku k poklesu hodnoty napětí na mezi pevnosti a ani zde, v oblasti tvarového řešení pro umístění ozdobné lišty (zkušební těleso č. 8) nebyla naměřena vyšší hodnota oproti zkušebnímu vzorku pod označením č. 5. Nejvyšší rozdíl je mezi zkušebním vzorkem č. 5 a 25, který činí 1,03 MPa a z hodnoty napětí v místě č. 25 představuje tento rozdíl 6,7 %. Mezi jednotlivými místy odběru zkušebních vzorků je potom pokles poměrně nepatrný a nijak výrazný. Pro přehlednost je i zde uvedena hodnota napětí na mezi pevnosti pro horní žebro ve stejné vertikální oblasti (zkušební těleso č. 38) a tato hodnota je téměř srovnatelná s hodnotou v místě odběru č. 1, ale nijak výrazně se neliší od naměřených hodnot z přední plochy zadního nárazníku.

11. Stejně jako pro místa v okolí vyústění bočních vtoků, tak i pro okolí vyústění středového vtoku bude provedeno srovnání napětí na mezi pevnosti ve vertikální rovině pro zkušební tělesa č. 3, 14, 23, 29, 32 a 37 (viz. obr. 4.30, 4.32 a 4.33), které je ukázáno na obr. 4.48.

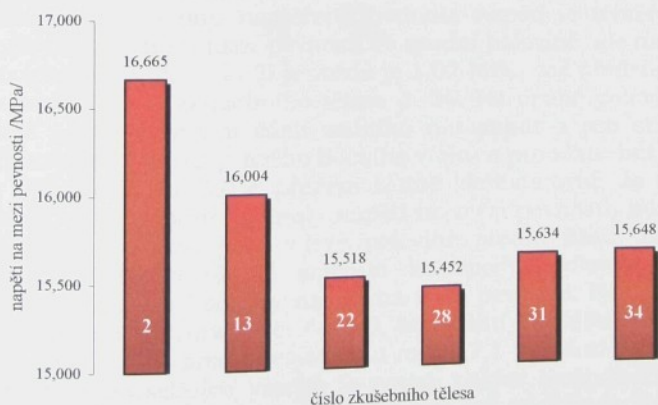


Obr. 4.48: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 3, 14, 23, 29, 32 a 37 (středový vtok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

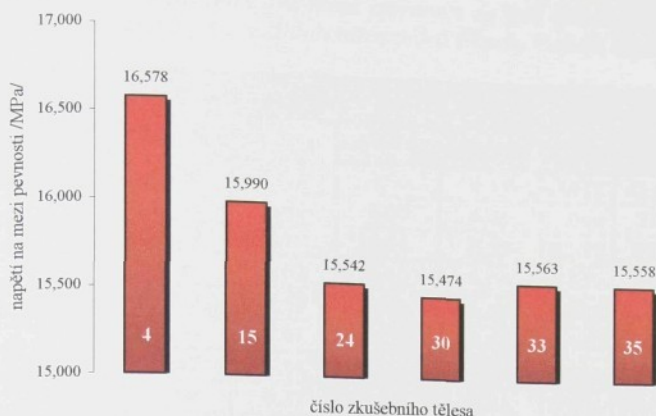
Z obr. 4.48 je patrné, že nejnižší hodnota napětí na mezi pevnosti je v místě odběru zkušebního tělesa č. 14, což je místo nejbližší vyústění středového vtoku. Potom rozdíl mezi tímto místem a mezi vyústění horní hranou (zkušební těleso č. 14 a 3) je 1,19 MPa, což je nárůst o 8,5 % oproti místu č. 14 a rozdíl mezi zkušebním tělesem č. 14 a mezi spodní hranou (zkušební těleso č. 32 a č. 14) je 1,72 MPa, což je

nárůst o 12,4 % vůči místu č. 14. Nebo-li s rostoucí vzdáleností od vyústění středového vtoku roste i naměřená hodnota napětí na mezi pevnosti, což je zřejmě ovlivněno velkým vnitřním pnutím v místě vyústění středového vtoku. Pokud srovnám horní a spodní hranu mezi sebou, tak napětí na mezi pevnosti je na spodní hraně o 0,53 MPa vyšší, než-li na horní hraně a rozdíl je potom 3,5 % z hodnoty v místě odběru zkušební tělesa č. 3. Nejvyšší hodnota napětí na mezi pevnosti byla naměřena na horním žeburu (zkušební těleso č. 37) a to i přesto, že i toto místo je v těsné blízkosti vyústění středového vtoku. Zřejmě zde však odlišné chlazení, ale i odlišné tečení taveniny plastu způsobuje výraznou změnu působících vlivů na konečné mechanické vlastnosti. Potom tedy nárůst napětí oproti místu č. 14 je 2,49 MPa a tento nárůst představuje 17,87 % z hodnoty napětí, zjištěného v místě č. 14. A změna mezi horní (zkušební těleso č. 3) resp. spodní hranou (zkušební těleso č. 32) a hodnotou napětí, zjištěnou na horním žeburu je potom 1,29 MPa resp. 0,96 MPa, což představuje nárůst o 8,5 % resp. 6,2 % oproti zkušebním tělesům, odebraným z horní resp. spodní hrany. Ostatní místa v této vertikální ose (zkušební těleso č. 23 a 29) mají hodnotu napětí na mezi pevnosti, odpovídající umístění zkušební tělesa ve vzdálenosti od středového vtoku. A co je zřejmé, tak naměřené hodnoty napětí na mezi pevnosti jsou v okolí vyústění středového vtoku mnohem nižší, než-li hodnoty napětí, naměřené v okolí vyústění bočních vtoků.

12. Poslední srovnání naměřených hodnot napětí na mezi pevnosti bude provedeno jak pro levou (zkušební tělesa č. 2, 13, 22, 28, 31 a 34 – viz. obr. 4.30, 4.32 a 4.33), tak i pro pravou polovinu (zkušební tělesa č. 4, 15, 24, 30, 33 a 35 – viz. obr. 4.31, 4.32 a 4.33) přední části zadního nárazníku pro vertikálně umístěná tělesa uprostřed mezi vyústěním bočního a středového vtoku, které je ukázáno na obr. 4.49 (levá polovina) a 4.50 (pravá polovina).



Obr. 4.49: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 2, 13, 22, 28, 31 a 34 (levá strana přední části – mezi vtoky) ze zadního nárazníku Škodie Felicie Combi



Obr. 4.50: Srovnání napětí na mezi pevnosti σ_B pro místa odběru vzorků č. 4, 15, 24, 30, 33 a 35 (pravá strana přední části – mezi vtoky) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Potom pro levou polovinu přední části zadního nárazníku a pro zkušební tělesa č. 2, 13, 22, 28, 31 a 34 je patrné, že napětí na mezi pevnosti klesá od horní hrany směrem ke spodní části zadního nárazníku. Nejvyšší rozdíl je potom mezi zkušebními vzorkem č. 2 a 28, který činí 1,2 MPa a z hodnoty napětí v místě č. 28 představuje tento rozdíl necelých 7,9 %. Mezi jednotlivými místy odběru zkušebních vzorků je potom pokles směrem ke spodní hraně vždy tak kolem 2 %. Hodnoty napětí u spodní hrany (zkušební tělesa č. 22, 28 a 31) jsou téměř shodné. Pro přehlednost je zde uvedena i hodnota napětí na mezi pevnosti pro spodní žebro (zkušební těleso č. 34) ve stejné vertikální oblasti a tato naměřená hodnota napětí je téměř shodná s hodnotami napětí na mezi pevnosti ve spodní polovině, ale mezi horní hranou (zkušební těleso č. 2) je rozdíl je 1,02 MPa, což představuje 6,5 % z hodnoty napětí zkušební tělesa č. 34. Na druhé polovině, tedy na pravé polovině přední části zadního nárazníku a pro střed mezi vyústěním středového a pravého bočního vtoku a pro zkušební tělesa č. 4, 15, 24, 30, 33 a 35 je předem nutné zkonstatovat, že zde byly naměřeny téměř shodné hodnoty napětí na mezi pevnosti, jako u levé poloviny. Dále, stejně jako v levé polovině přední části, tak i zde dochází od horního okraje směrem ke spodní polovině zadního nárazníku k poklesu hodnoty napětí na mezi pevnosti. Nejvyšší rozdíl je mezi zkušebními vzorkem č. 4 a 30, který činí 1,1 MPa a z hodnoty napětí v místě č. 30 představuje tento rozdíl 7,1 %. Mezi jednotlivými místy odběru zkušebních vzorků je potom pokles směrem ke spodní hraně vždy tak kolem 2 %. Pro přehlednost je i zde uvedena hodnota napětí na mezi pevnosti pro spodní žebro ve stejné vertikální oblasti (zkušební těleso č. 35) a tato naměřená hodnota napětí je téměř shodná s hodnotami napětí na mezi pevnosti ve spodní polovině, ale

Tab. 4.11: Deformace na mezi pevnosti ε_B (při maximální síle) na zkušebních tělesech z pěti zadních nárazníků Škody Felicie Combi

Deformace na mezi pevnosti ε_B /MPa/							
č. zk. těl.	nárazník 1	nárazník 2	nárazník 3	nárazník 4	nárazník 5	průměr	směr. odch.
1	6,57	6,56	6,52	6,60	6,61	6,572	0,0319
2	6,60	6,62	6,61	6,60	6,59	6,604	0,0102
3	6,22	6,19	6,17	6,24	6,23	6,210	0,0261
4	6,63	6,67	6,62	6,60	6,64	6,632	0,0232
5	6,59	6,58	6,53	6,62	6,60	6,584	0,0301
6	6,53	6,54	6,57	6,52	6,55	6,542	0,0172
7	6,50	6,57	6,54	6,53	6,43	6,514	0,0476
8	6,55	6,55	6,57	6,56	6,43	6,532	0,0515
9	7,44	7,39	7,46	7,49	7,45	7,446	0,0326
10	6,59	6,61	6,61	6,54	6,57	6,584	0,0265
11	5,80	5,79	5,82	5,77	5,80	5,796	0,0162
12	6,55	6,53	6,55	6,49	6,56	6,536	0,0250
13	6,60	6,62	6,57	6,60	6,60	6,598	0,0160
14	5,92	5,97	5,88	5,93	5,91	5,922	0,0293
15	6,61	6,65	6,58	6,58	6,62	6,608	0,0264
16	6,57	6,52	6,50	6,60	6,62	6,562	0,0458
17	6,66	6,60	6,61	6,70	6,68	6,650	0,0390
18	7,53	7,55	7,48	7,50	7,52	7,516	0,0242
19	6,64	6,65	6,65	6,60	6,61	6,630	0,0210
20	5,86	5,82	5,79	5,72	5,80	5,798	0,0458
21	6,25	6,30	6,27	6,22	6,21	6,250	0,0329
22	6,30	6,30	6,26	6,27	6,34	6,294	0,0280
23	5,88	5,78	5,90	5,87	5,92	5,870	0,0482
24	6,27	6,30	6,28	6,31	6,29	6,290	0,0141
25	6,28	6,28	6,30	6,33	6,24	6,286	0,0294
26	6,31	6,35	6,30	6,27	6,28	6,302	0,0279
27	7,11	7,14	7,07	7,03	7,13	7,096	0,0408
28	6,20	6,20	6,22	6,21	6,19	6,204	0,0102
29	6,24	6,27	6,22	6,24	6,26	6,246	0,0174
30	6,25	6,27	6,29	6,21	6,24	6,252	0,0271
31	6,31	6,29	6,27	6,30	6,27	6,288	0,0160
32	6,27	6,30	6,30	6,26	6,24	6,274	0,0233
33	6,30	6,32	6,29	6,30	6,30	6,302	0,0098
34	6,29	6,34	6,30	6,27	6,29	6,298	0,0232
35	6,27	6,28	6,26	6,31	6,27	6,278	0,0172
36	6,54	6,47	6,53	6,52	6,50	6,512	0,0248
37	6,56	6,49	6,57	6,54	6,55	6,542	0,0279
38	6,59	6,62	6,63	6,62	6,63	6,618	0,0147



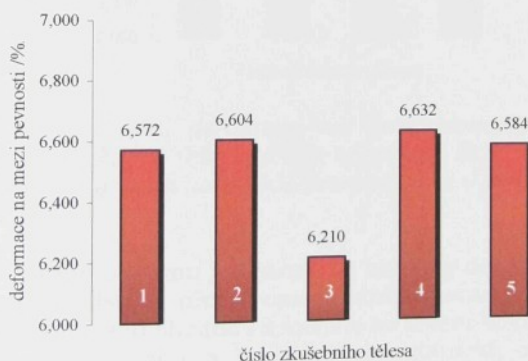
Obr. 4.51: Porovnání vypočtených hodnot deformace na mezi pevnosti ε_B na zkušebních tělesech z pěti zadních nárazníků Škody Felicie Combi

mezi horní hranou (zkušební těleso č. 4) je rozdíl je 1,02 MPa, což představuje 6,6 % z hodnoty napětí zkušební tělesa č. 35. Hodnoty napětí na mezi pevnosti u spodní hrany na zkušebních tělesech č. 24, 30 a 33 jsou i zde téměř shodné.

Stejně jako v předchozím textu habilitační práce bylo u napětí na mezi pevnosti (σ_B) provedeno jak celkové srovnání, tak i srovnání hodnoty napětí v jednotlivých horizontálních a vertikálních osách, tak i z vypočtených hodnot deformace na mezi pevnosti (ε_B) byl z pěti provedených měření vypočten průměr (viz. tab. 4.11) a pro tuto hodnotu byl potom nakreslen i sloupcový graf, ukazující celkové srovnání zjištěných hodnot deformace na mezi pevnosti pro všechna místa na zadním nárazníku Škody Felicie Combi, ze kterých byla odebrána zkušební tělesa (viz. obr. 4.51).

A také i pro deformaci na mezi pevnosti bude v dalším textu této habilitační práce z hlediska lepší přehlednosti provedeno srovnání pro jednotlivá místa odběru zkušebních vzorků, a to jak ve svislém nebo vodorovném směru, tak i pro shodná místa buď kolem středového vtoku a nebo na bocích zadního nárazníku, pro experimentálně naměřené výsledky z tahové zkoušky a tedy pro vypočtené hodnoty deformace na mezi pevnosti. Ze zjištěných hodnot lze učinit následující závěry:

1. Na horní straně zadního nárazníku Škody Felicie Combi, tj. v místech odběru vzorků č. 1, 2, 3, 4 a 5 (viz. obr. 4.30) byly zjištěny hodnoty deformace na mezi pevnosti, které jsou uvedeny na obr. 4.52.

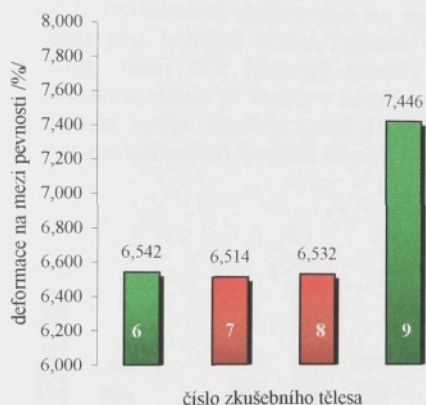


Obr. 4.52: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 1, 2, 3, 4 a 5 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Z tohoto srovnání je patrné, že v místech odběru vzorků ze zadního nárazníku pod č. 1, 2, 4 a 5 jsou zjištěné deformace na mezi pevnosti téměř shodné a výrazně se neliší, což však nelze říci o

zkušební tělese č. 3, které je blízko středového vtoku a kde zjištěná hodnota je v průměru o 0,4 % nižší, což oproti hodnotám v ostatních čtyřech místech představuje změnu 6,3 % z deformace v místě odběru zkušební tělesa č. 3. A dále, že deformace na pravé straně (polovině) přední části je nepatrně vyšší, než-li na polovině levé.

2. Z plochy tvarového řešení pro umístění ozdobné lišty na zadním nárazníku byly odebrány zkušební vzorky č. 6, 7, 8 a 9, a to tak, že všechny jsou umístěny kolem vyústění bočních vtoků avšak s tím rozdílem, že zkušební tělesa č. 7 a 8 jsou z přední části zadního nárazníku a zkušební tělesa č. 6 resp. 9 jsou z levého resp. pravého boku při pohledu zepředu (viz. obr. 4.30 a 4.31). Stejně jako pro předchozí vyhodnocení a stejně jako pro napětí na mezi pevnosti, ale i pro další možnosti, je provedeno grafické srovnání deformace na mezi pevnosti pouze pro tato místa odběru zkušebních těles (viz. obr. 4.53).

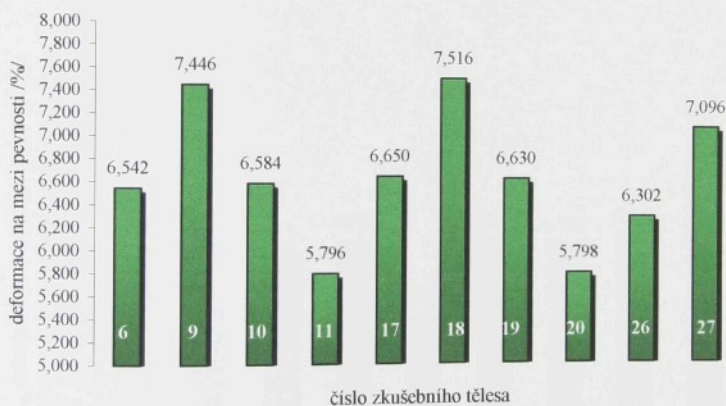


Obr. 4.53: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 6, 7, 8 a 9 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi (zeleně jsou označeny místa na bocích, červeně místa v přední části)

Z předchozího digramu je patrné, že hodnoty deformace na mezi pevnosti ve dvou místech přední části zadního nárazníku jsou téměř shodné, ale zároveň jsou shodné i s místem na levém boku, což však již nelze říci o pravém boku a také lze zkonstatovat, že obdobným způsobem kopírují průběh pro napětí na mezi pevnosti. Zde je hodnota deformace na mezi pevnosti v průměru o 0,92 % vyšší, což představuje oproti deformacím na mezi pevnosti v místech č. 6, 7 a 8 přírůstek o více jak 14 %.

3. Zajímavých hodnot napětí na mezi pevnosti bylo zjištěno u celkového srovnání pro oba boky (viz. obr. 4.54) a tedy pro místa na levém boku (č. 6, 10, 11, 19, 20) oproti místům na pravém boku (č. 9, 17, 18, 26, 27) zadního nárazníku (viz. obr. 4.30 a 4.31).

Z následujícího diagramu je patrné, že deformace na mezi pevnosti a na levém boku je nižší oproti hodnotám na pravém boku. Tak např. v tvarové části blízko vyústění bočních vtoků je rozdíl mezi levým a pravým bokem (zkušební těleso č. 6 a 9) 0,91 %, což představuje změnu téměř o 14 % oproti levému boku. U zkušebních těles v horní polovině obou boků je změna deformace na mezi pevnosti v zadní části 0,93 % mezi zkušebními tělesy č. 10 a 18, což je oproti vzorku č. 10 nárůst o více jak 14 % a v přední části mezi zkušebními tělesy č. 11 a 17 je rozdíl 0,85 %, což představuje nárůst oproti zkušebnímu tělesu č. 11 skoro 15 %. Ve spodní části je změna ve velikosti deformace na mezi pevnosti o něco nižší a potom tedy rozdíl mezi zkušebními tělesy č. 19 a 27 v zadní části obou boků je 0,47 %, což představuje vůči zkušebnímu vzorku č. 19 změnu o 7 % a v přední části je mezi zkušebními vzorky č. 20 a 26 rozdíl 0,5 %, což je změna o 8,7 % vůči místu č. 20. Je nepochybné, že se zvyšující se povrchovou teplotou roste i rozdíl v hodnotách deformace na mezi pevnosti mezi levým a pravým bokem pro shodná místa odběru zkušebních těles. Nebo-li ve spodní části není tak výrazný rozdíl mezi naměřenou deformací na mezi pevnosti, jako je tomu v horní polovině, kde jsou povrchové teploty mnohem vyšší. Rozdíly mezi zjištěnými deformacemi jsou však nižší, než-li u naměřených hodnot napětí na mezi pevnosti.



Obr. 4.54: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 6, 10, 11, 19 a 20 (levý bok) a místa odběru vzorků č. 9, 17, 18, 26 a 27 (pravý bok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Na druhé straně jsem zjistil i změnu ve velikosti deformace na mezi pevnosti u obou boků i mezi předním (blízko přechodové části do přední části zadního nárazníku) a zadním odebraným zkušebním tělesem. Potom pro levý bok je mezi zkušebním tělesem č. 10 a 11 v horní polovině rozdíl 0,79 %, což představuje oproti místu odběru vzorků č. 11 nárůst o 13,6 % a ve spodní části je rozdíl mezi

zkušebními tělesy č. 19 a 20 0,83 %, což je nárůst oproti místu č. 20 více než 14 %. A pro pravý bok zadního nárazníku a pro místa odběru napětí 0,87 %, což je vůči zkušebnímu tělesu č. 17 nárůst o 13 % a ve spodní polovině mezi zkušebními tělesy č. 26 a 27 je potom rozdíl 0,794 % a nárůst představuje 12,6 % oproti místu č. 26. Z těchto výsledků je patrné, že i když v přední části u obou boků byla naměřena vyšší povrchová teplota, tak i přes lepší podmínky pro krystalizaci byly v těchto oblastech naměřeny nižší hodnoty tažnosti a tyto rozdíly jsou tím vyšší, čím nižší povrchová teplota byla v daném místě naměřena. Tedy jinak řečeno, tyto rozdíly nejsou tak výrazné na pravém boku, jako na boku levém a také rozdíly, vypočtené pro deformace na mezi pevnosti nejsou již tak odlišné od vypočtených rozdílů pro napětí na mezi pevnosti, jako tomu bylo mezi shodnými místy pro levý a pravý bok.

4. Porovnání vypočtených hodnot deformace na mezi pevnosti provedu i pro všechna zkušební tělesa, odebraná z horní poloviny zadního nárazníku, tedy pro místa odběrů č. 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 18 (viz. obr. 4.30 a 4.31). Srovnávací diagram deformace je ukázán na obr. 4.55. Hodnocení zkušebních vzorků z obou boků bylo provedeno v předchozím bodě a proto zde uvedu pouze srovnání zkušebních těles z přední části jednak mezi sebou a jednak s oběma boky.

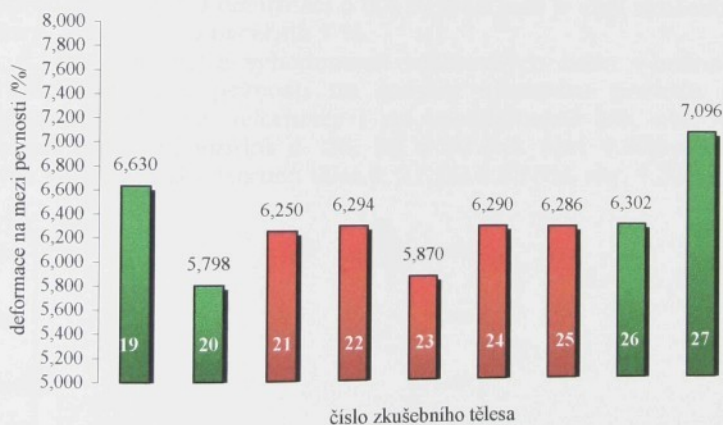


Obr. 4.55: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 18 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi (zeleně jsou označeny místa na bocích, červeně místa v přední části)

Z diagramu na obr. 4.55 je patrné, že pravý bok vykazuje opět mnohem vyšší hodnoty napětí na mezi pevnosti, než-li bok levý (viz. bod 3.), ale zároveň i než-li přední část zadního nárazníku. Maximální

hodnota napětí na mezi pevnosti v této vodorovné řadě horní poloviny je v průměru o 0,95 % deformace vyšší oproti místům č. 12, 13, 15 a 16, což představuje nárůst o 14,4 % a oproti zkušebnímu tělesu č. 14 (těsně pod vyústěním středového vtoku) je tento rozdíl ještě vyšší a představuje 1,595 %, což je téměř 27 % hodnoty v místě odběru zkušební tělesa č. 14. Další dvě místa na bocích, ve kterých byly odebrány zkušební tělesa č. 10 a 17 jsou srovnatelné s místy na přední části zadního nárazníku kromě zkušební vzorku č. 14, kde rozdíl činí kolem 0,65 % deformace a vyjádřeno v procentech z hodnoty deformace na mezi pevnosti pro zkušební těleso č. 14 představuje tento rozdíl skoro 11 %. Jediným srovnatelným místem vůči vzorku č. 14 je zkušební těleso č. 11, které je blízko vyústění bočního vtoku a tak i zřejmě zde vlivem změny tvaru a vlivem orientace dochází k výraznému poklesu tažnosti a to i přesto, že zde byly naměřeny poměrně vysoké teploty. V přední části mají zbylá čtyři zkušební tělesa (č. 12, 13, 15 a 16) oproti místu č. 14 deformaci zhruba o 0,65 % vyšší, což je vůči zkušebnímu vzorku č. 14 nárůst o 10 %.

5. Porovnání vypočtených hodnot napětí na mezi pevnosti provedu, stejně jako po předchozí odstavci, i pro všechna zkušební tělesa, odebraná ze spodní poloviny zadního nárazníku, tedy pro místa odběrů č. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 a 27 (viz. obr. 4.30 a 4.31). Porovnání zjištěných hodnot napětí na mezi pevnosti je obr. 4.56.

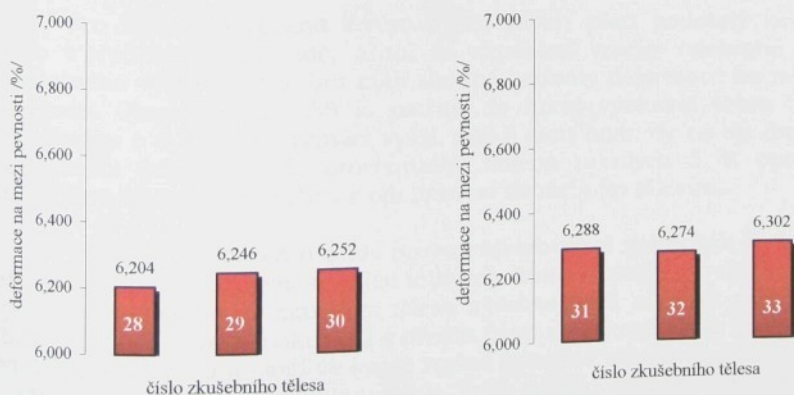


Obr. 4.56: Srovnání napětí na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 a 27 ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi (zeleně jsou označeny místa na bocích, červeně místa v přední části)

Stejně jako v předcházejícím bodě i zde platí, že pravý bok zadního nárazníku vykazuje opět vyšší hodnoty deformace na mezi pevnosti, než-li bok levý (viz. bod 3.), ale i než přední část nárazníku, avšak hodnoty již zde nejsou tak rozdílné. Maximální hodnota

deformace na mezi pevnosti v této vodorovné řadě spodní poloviny je v průměru o 0,82 % deformace vyšší, což je rozdíl oproti místům č. 21, 22, 24 a 25 necelých 13 % a oproti zkušebnímu tělesu č. 23 (těsně pod bodě pro horní polovinu, nejvyšší a činí 1,23 %, což je téměř 21 % hodnoty v místě odběru zkušební tělesa č. 23. Další dvě místa na bocích, ve kterých byly odebrány zkušební tělesa č. 19 a 26 jsou odlišně srovnatelné s místy na přední části zadního nárazníku. Zkušební těleso č. 26 má téměř shodnou hodnotu deformace na mezi pevnosti se vzorky č. 21, 22, 24, a 25, tak potom deformace u zkušební tělesa č. 19 je vyšší v průměru o 0,36 % deformace, což je nárůst o 5,7 %. A vůči zkušebnímu vzorku č. 23 je tento rozdíl ještě vyšší. Pro místo odběru č. 19 je rozdíl 0,76 %, což vyjádřeno v procentech z hodnoty napětí pro zkušební těleso č. 23 představuje změnu skoro 13 %. Naproti tomu pro zkušební těleso č. 26 je rozdíl mezi hodnotami deformace na mezi pevnosti 0,43 % a změna, vyjádřená v procentech z hodnoty pro místo odběru č. 23, je potom téměř 7,5 %. Jediným srovnatelným místem vůči vzorku č. 23 je zkušební těleso č. 20, které je blízko vyústění bočního vtoku a tak i zřejmě zde, stejně jako v předchozím případě, vlivem změny tvaru a vlivem orientace dochází k výraznému poklesu hodnoty deformace na mezi pevnosti a to i přesto, že zde byly naměřeny poměrně vysoké teploty. V přední části mají zbylá čtyři zkušební tělesa (č. 21, 22, 24 a 25) oproti místu č. 23 deformaci o 0,4 % vyšší, což je vůči zkušebnímu vzorku č. 23 nárůst o necelých 7 %.

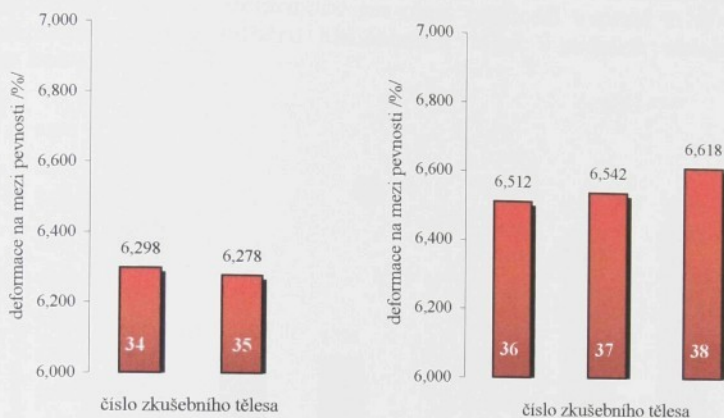
6. Pro kompletní vyhodnocení vodorovných změn v hodnotách deformace na mezi pevnosti na zadním nárazníku provedu ještě vyhodnocení velikosti deformace i na spodní hraně (viz. obr. 4.57) v místech odebrání vzorků č. 28, 29 a 30 (viz. obr. 4.30), ale také zároveň v místech zkušebních těles č. 31, 32 a 33 (viz. obr. 4.32).



Obr. 4.57: Srovnání deformace na mezi pevnosti ϵ_B pro místa odběru vzorků č. 28, 29 a 30 (vlevo), resp. č. 31, 32 a 33 (vpravo) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Z obr. 4.57 je patrné, že jak pro zkušební tělesa č. 28, 29 a 30, tak i pro zkušební tělesa č. 31, 32 a 33 jsou zjištěné hodnoty deformace na mezi pevnosti srovnatelné a pouze nepatrně jsou vyšší hodnoty pro zkušební tělesa č. 31, 32 a 33.

7. Obdobným způsobem jako pro spodní hranu, provedu z hlediska kompletnosti v dalším textu i srovnání pro odebraná zkušební tělesa ze zadních výztužných žeber (viz. obr. 4.58) na zadním nárazníku (viz. obr. 4.33), které mají označení č. 34 a 35 (spodní výztužné žebro), resp. 36, 37, 38 (horní výztužné žebro).

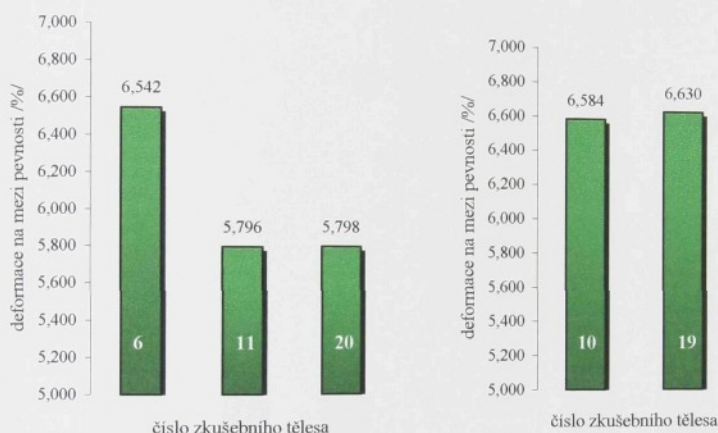


Obr. 4.58: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 34 a 35 (vlevo - spodní výztužné žebro), resp. č. 36, 37 a 38 (vpravo - horní výztužné žebro) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Pro tělesa, odebraná z výztužných žeber, platí podobný závěr jako v předchozím případě, a to, že zkušební vzorky odebrané ze společného výztužného žebra mají shodné hodnoty deformace na mezi pevnosti. Jinak z obr. 4.58 je patrné, že horní výztužné žebro má v průměru o 0,27 % deformaci vyšší, než-li jsou hodnoty na spodním výztužném žebře, což je procentuální změna necelých 5 % oproti spodnímu výztužnému žebře a odebraným zkušebními tělesům.

V následujícím textu bude provedeno srovnání zjištěných hodnot deformace na mezi pevnosti v jednotlivých částech zadního nárazníku pro všechna odebraná zkušební tělesa z těchto míst, a to jak z levého boku, tak i z pravého boku, jak z přední části vyústění středového vtoku a vtoků, tak i z přední části ve svislé rovině vyústění středového vtoku a z oblastí mezi vyústěním obou vtoků. Jinak řečeno, nebudu srovnávat deformaci na mezi pevnosti pro zkušební tělesa ve shodných místech odběru nebo změnu ve vodorovném směru, ale rozložení deformace na hodnocené oblasti a také změnu ve vertikálním směru.

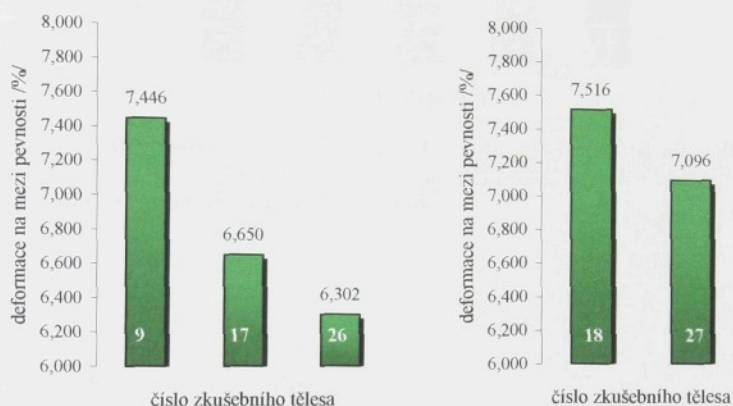
8. Při porovnání hodnot deformace na mezi pevnosti pro všechna odebraná zkušební tělesa (označení č. 6, 10, 11, 19 a 20) z levého boku zadního nárazníku (viz. obr. 4.30) je ze zjištěných hodnot patrné (viz. obr. 4.59), že v zadní oblasti levého boku není ve svislém směru téměř žádný rozdíl mezi deformací, naměřenou pro zkušební těleso č. 10 a 19. To samé však již nelze říci o přední oblasti levého boku, kde jsou sice zjištěné hodnoty deformace na mezi pevnosti pro zkušební tělesa č. 11 a 20 téměř shodné, ale v místě odběru zkušební vzorku č. 6 (tvarové řešení pro umístění ozdobné lišty) je zjištěná deformace vyšší o 0,75 % hodnoty, což představuje změnu téměř o 13 %. Na druhé straně byla zjištěná hodnota deformace na mezi pevnosti v místě č. 6 také srovnatelná s místy odběru zkušebních těles v zadních oblastech levého boku (č.10 a 19).



Obr. 4.59: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 6, 11, 20, 10 a 19 (levý bok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

9. Při stejném porovnání hodnot deformace na mezi pevnosti pro všechna odebraná zkušební tělesa (označení č. 9, 17, 18, 26 a 27) na druhém boku, tedy z pravého boku zadního nárazníku (viz. obr. 4.31) je ze zjištěných hodnot patrné (viz. obr. 4.60), že v zadní oblasti pravého boku, zřejmě vlivem vyšších povrchových teplot, již neplatí to, co u levého boku ve stejných místech, neboť ve svislém směru je mezi místy odběru zkušební tělesa č. 18 a 27 rozdíl 0,42 % deformace ve prospěch výše odebraného zkušební vzorku (č.18), kde byly naměřeny i vyšší povrchové teploty, což představuje rozdíl 6 % z hodnoty 7,096 %. V přední oblasti pravého boku jsou zjištěné hodnoty deformace na mezi pevnosti nejvyšší pro zkušební těleso č. 9 - hodnoty deformace na mezi pevnosti nejvyšší (7,446 %) a nejnižší pro tvarové řešení pro umístění ozdobné lišty (6,302 %) a tedy naměřená deformace klesá od horní části směrem ke spodní části zadního nárazníku. Rozdíl mezi

hodnotami deformace pro zkušební těleso č. 9 a 26 je potom 1,14 %, což je více jak 18 % z hodnoty napětí v místě č. 26. Je to zajímavé, protože, stejně jako u levého boku, tak i u pravého boku, byly v místě odběru zkušebního tělesa termovizně naměřeny výrazně nižší povrchové teploty (viz. obr. 4.17) oproti místům nad a pod tvarovým řešením se všemi důsledky rozdílného ochlazování, rozdílného smrštění, apod. V místě uprostřed (zkušební těleso č. 17) byla zjištěná deformace na mezi pevnosti vyšší o 0,35 % oproti vzorku č. 26, což je rozdíl 5,5 % oproti nižší hodnotě. Na druhé straně je rozdíl vůči zkušebnímu tělesu č. 9 necelých 0,8 % a představuje skoro 12 % hodnoty deformace, zjištěné při měření zkušebního tělesa č. 17. Srovnáním vertikálních oblastí mezi zadní a přední částí pravého boku zadního nárazníku lze zkonstatovat, že přibližně shodné napětí na mezi pevnosti mají vzorky č. 9, 18 a 27 na druhé straně také zkušební tělesa č. 17 a 26.



Obr. 4.60: Srovnání deformace na mezi pevnosti ϵ_B pro místa odběru vzorků č. 9, 17, 26, 18 a 27 (pravý bok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

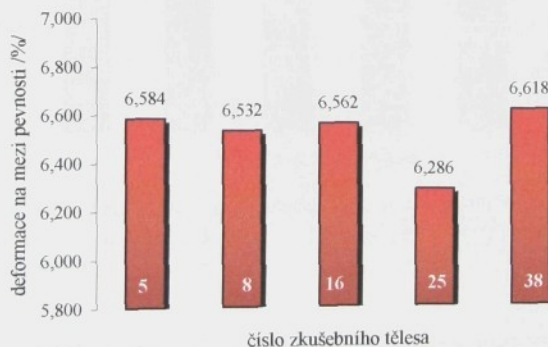
10. V tomto bodě bude provedeno srovnání deformace na mezi pevnosti ve vertikální rovině v blízkosti vyústění bočního vtoku pro zkušební tělesa č. 1, 7, 12, 21 a 36 (viz. obr. 4.30), které je graficky srovnáno v diagramu na obr. 4.61 a také pro zkušební tělesa č. 5, 8, 16, 25 a 38 (viz. obr. 4.31), které je ukázáno na obr. 4.62.

A potom tedy pro levou polovinu přední části zadního nárazníku a pro zkušební tělesa č. 1, 7, 12, 21 a 36 je patrné, že deformace na mezi pevnosti klesá od horní hrany směrem ke spodní části zadního nárazníku a ani v oblasti tvarového řešení pro umístění ozdobné lišty (zkušební těleso č. 7) není zjištěná hodnota nejvyšší tak, jako tomu bylo na obou bocích. Nejvyšší rozdíl je potom mezi zkušebním vzorkem č. 1 a 21, který činí 0,32 % a z hodnoty deformace v místě č. 21

představuje tento rozdíl něco více, jak 5 %. Pro přehlednost je zde uvedena i hodnota deformace na mezi pevnosti pro horní žebro (zkušební těleso č. 36) ve stejné vertikální oblasti a tato hodnota je srovnatelná se zkušebními vzorkem č. 1, 7 a 12 a tedy nijak výrazně se neliší od naměřených hodnot deformace na mezi pevnosti z přední plochy zadního nárazníku.



Obr. 4.61: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 1, 7, 12, 21 a 36 (levá strana přední části – boční vtok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

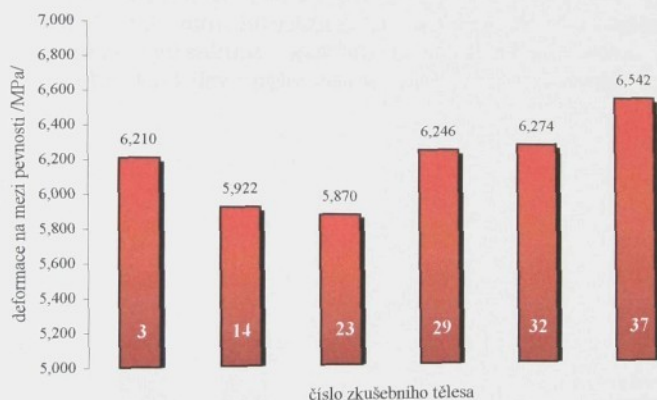


Obr. 4.62: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 5, 8, 16, 25 a 38 (pravá strana přední části – boční vtok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Na druhé polovině, tedy na pravé polovině přední části zadního nárazníku a pro okolí vyústění pravého bočního vtoku a pro zkušební tělesa č. 5, 8, 16, 25 a 38 je předem nutné zkonstatovat, že zde byly na

zkušebních tělesech naměřeny vyšší hodnoty deformace na mezi pevnosti, i když jen nepatrně. Dále, stejně jako v blízkosti vyústění levého bočního vtoku, tak i zde dochází od horního okraje směrem ke spodní polovině zadního nárazníku k poklesu hodnoty deformace na mezi pevnosti a ani zde, v oblasti tvarového řešení pro umístění obdobné lišty (zkušební těleso č. 8) nebyla naměřena vyšší hodnota oproti zkušebnímu vzorku pod označením č. 5. Nejvyšší rozdíl je mezi zkušebním vzorkem č. 5 a 25, který činí 0,3 % a z hodnoty deformace v místě č. 25 představuje tento rozdíl 4,8 %. Pro přehlednost je i zde uvedena hodnota deformace na mezi pevnosti pro horní žebro ve stejné vertikální oblasti (zkušební těleso č. 38) a tato hodnota je téměř srovnatelná s hodnotou v místě odběru č. 1, a zároveň se nijak výrazně neliší od naměřených hodnot z přední plochy zadního nárazníku.

11. Stejně jako pro místa v okolí vyústění bočních vtoků, tak i pro oblast vyústění středového vtoku bude provedeno srovnání deformace na mezi pevnosti ve vertikální ose pro zkušební tělesa č. 3, 14, 23, 29, 32 a 37 (viz. obr. 4.30, 4.32 a 4.33), které je ukázáno na obr. 4.63.

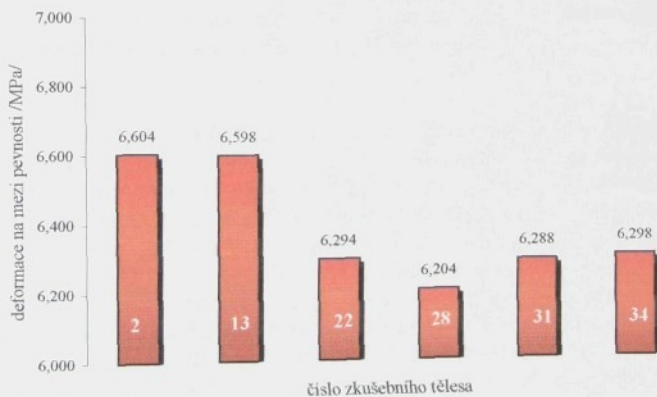


Obr. 4.63: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 3, 14, 23, 29, 32 a 37 (středový vtok) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Z obr. 4.63 je patrné, že nejnižší hodnota deformace na mezi pevnosti je v místě odběru zkušebního tělesa č. 14 a 23, což jsou místa nejbližší vyústění středového vtoku. Potom rozdíl mezi těmito místy a mezi horní hranou (zkušební těleso č. 3) je 0,31 %, což je nárůst o více jak 5 % oproti místu č. 14 resp. 23 a rozdíl mezi spodní hranou (zkušební těleso č. 32) je 0,37 %, což je nárůst o více jak 6 %. Nebo-li s rostoucí vzdáleností od vyústění středového vtoku roste i naměřená hodnota deformace na mezi pevnosti. Pokud srovnám horní a spodní hranu mezi sebou, tak deformace na mezi pevnosti je na spodní hraně

i na horní hraně srovnatelně. Nejvyšší hodnota deformace na mezi pevnosti byla naměřena na horním žeburu (zkušební těleso č. 37) a to i přesto, že i toto místo je v těsné blízkosti vyústění středového vtoku. Potom tedy nárůst deformace oproti místu č. 14, resp. 23, je 0,64 % a tento nárůst představuje 10,87 % z hodnoty deformace, zjištěné v místě č. 14, resp. 23. A změna mezi horní hranou zadního nárazníku (zkušební těleso č. 3) resp. spodní hranou (zkušební těleso č. 32) a hodnotou deformace, zjištěnou na horním žeburu je potom 0,33 % resp. 0,27 %, což představuje nárůst o 5,35 % resp. 4,3 % oproti zkušebním tělesům, odebraným z horní resp. spodní hrany. Zbýlé místo v této vertikální ose (zkušební těleso č. 29) má hodnotu deformace na mezi pevnosti téměř shodnou s deformací pro zkušební těleso č. 3 a 32 a odpovídající umístění zkušební tělesa ve vzdálenosti od středového vtoku. A co je zřejmé, tak naměřené hodnoty deformace na mezi pevnosti jsou v okolí vyústění středového vtoku mnohem nižší, než-li hodnoty deformace, naměřené v okolí vyústění bočních vtoků.

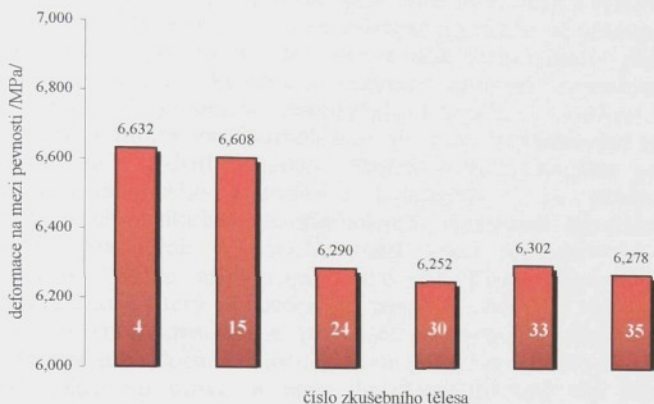
12. Poslední srovnání naměřených hodnot deformace na mezi pevnosti bude provedeno jak pro levou polovinu (zkušební tělesa č. 2, 13, 22, 28, 31 a 34 – viz. obr. 4.30, 4.32 a 4.33), tak i pro pravou polovinu (zkušební tělesa č. 4, 15, 24, 30, 33 a 35 – viz. obr. 4.31, 4.32 a 4.33) přední části zadního nárazníku pro vertikálně umístěná tělesa uprostřed mezi vyústěním bočního a středového vtoku, které je ukázáno na obr. 4.64 (levá polovina) a 4.65 (pravá polovina).



Obr. 4.64: Srovnání deformace na mezi pevnosti ϵ_B pro místa odběru vzorků č. 2, 13, 22, 28, 31 a 34 (levá strana přední části – mezi vtoky) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Potom pro levou polovinu přední části zadního nárazníku a pro zkušební tělesa č. 2, 13, 22, 28, 31 a 34 je patrné, že deformace na mezi pevnosti klesá od horní hrany směrem ke spodní části zadního nárazníku s tím, že srovnatelné hodnoty deformace na mezi pevnosti

mají zkušební tělesa č. 2 a 13, ale také č. 22, 28 a 31. Rozdíl mezi průměrnými hodnotami je potom 0,34 %, což představuje změnu 5,4 % z nižších hodnot deformace. Pro přehlednost je zde uvedena i hodnota deformace na mezi pevnosti pro spodní žebro (zkušební těleso č. 34) ve stejné vertikální oblasti a tato naměřená hodnota deformace je téměř shodná s hodnotami deformace na mezi pevnosti ve spodní polovině (zkušební těleso č. 22, 28 a 31).



Obr. 4.65: Srovnání deformace na mezi pevnosti ε_B pro místa odběru vzorků č. 4, 15, 24, 30, 33 a 35 (pravá strana přední části – mezi vtoky) ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

Na druhé polovině, tedy na pravé polovině přední části zadního nárazníku a pro střed mezi vyústěním středového a pravého bočního vtoku a pro zkušební tělesa č. 4, 15, 24, 30, 33 a 35 je předem nutné zkonstatovat, že zde byly naměřeny téměř shodné hodnoty deformace na mezi pevnosti, jako u levé poloviny. Dále, stejně jako v levé polovině přední části, tak i zde dochází od horního okraje směrem ke spodní polovině zadního nárazníku k poklesu hodnoty deformace na mezi pevnosti a shodné hodnoty jsou u zkušebních těles č. 4 a 15, resp. 24, 30 a 33. Potom rozdíl mezi průměrnými hodnotami je 0,34 %, což představuje rozdíl 5,4 %. Pro přehlednost je i zde uvedena hodnota deformace na mezi pevnosti pro spodní žebro ve stejné vertikální oblasti (zkušební těleso č. 35) a tato naměřená hodnota deformace je téměř shodná s hodnotami deformace na mezi pevnosti ve spodní polovině (zkušební těleso č. 24, 30 a 33).

5. SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole habilitační práce bude provedena diskuse o výsledcích z provedených experimentů a simulace, které přináší dílčí poznatky o technologii vstřikování, aplikované do automobilového průmyslu, a to zvláště do oblasti zvyšování kvality vyráběných plastových dílů, dále do oblasti zvyšování účinnosti prováděných simulací procesu a v neposlední řadě i do oblasti problematiky temperace vstřikovacích forem pro velkoplošné výlisky s vyhodnocením účinku rozložení teplotních polí na velikost a průběh napěťových polí.

Musíme si uvědomit, že vstřikování termoplastů představuje nestacionární děj, při kterém je polymer vystaven neizotermickému tváření a materiál je složitě mechanicky i tepelně namáhán, a to jak v plastikační jednotce vstřikovacího stroje, tak i ve vtokovém systému a ve vlastní tvářecí dutině formy. Složitost vstřikovacího procesu – tepelně mechanického namáhání polymeru – se projevuje jak v nehomogenitě fyzikálně mechanických vlastností výstřiku, tak i v kolísání výsledných makrovlastností mezi jednotlivými výrobky v dané sérii. Přitom anizotropie vlastností úzce souvisí s vnitřním stavem výstřiku, který je určen především orientací makromolekul, krystalickou strukturou a je předurčen tokem taveniny do tvarové dutiny formy a teplotní historií plastu při jeho změně z tekutého do viskózně tekutého stavu a zpět do stavu tuhého při ochlazování taveniny ve formě.

Při vstřikování termoplastů je konečná kvalita výstřiku závislá velkou měrou na rychlosti a průběhu ochlazování. Proces chlazení začíná již během procesu vstřikování a pokračuje během dotlaku, což je časový úsek, kdy dodáváme taveninu plastu do dutiny formy, abychom kompenzovali smrštění plastu, až do okamžiku vyhození výrobku. V celém procesu chladnutí dochází ke značným časovým i místním změnám stavových veličin polymeru, tj. tlaku, měrného objemu a teploty. Průběh stavových veličin je v různých místech výstřiku odlišný a je ovlivněn tvarem výrobku, tloušťkou stěny, vstřikovacím talkem, vstřikovací rychlostí, teplotou taveniny a teplotním a napěťovým polem formy. A právě znalost rozložení teplotních polí umožňuje již předem určit možné vady na výrobku, protože změny stavových veličin ovlivňují hmotnost výrobku, strukturu a rozměry výstřiku. Vzhledem k rychlým časovým změnám stavových veličin „zůstávají“ jednotlivá místa nástroje a výstřiku v nerovnovážném stavu a nelze se těmto rozdílům vyhnout. Můžeme se však snažit, aby tyto jevy byly v prakticky přijatelných mezích a aby byly co možná přesně reprodukovány v každém cyklu. Pro dosažení optimální kvality by bylo ideální, kdyby se hmota v dutině formy ochlazovala ve všech místech stejnou rychlostí a aby teplotní a napěťové pole ve výrobku byla homogenní. To je však ideální případ a v praxi jej nelze dosáhnout. Ve skutečnosti forma pracuje v opakujících se teplotních cyklech (je-li forma v činnosti dostatečně dlouho) a tento teplotní systém vytváří cyklické třírozměrné teplotní pole, které je nejvíce ovlivnitelné umístěním, tvarem a parametry temperačních kanálů.

Rozborem sledované problematiky a provedených experimentů lze zkonstatovat, že při hodnocení kvality plastu, namodelovaných simulací a při hodnocení rozložení teplotních a napěťových polí se jedná o složitý problém, který je ovlivňován spoustou faktorů, které se vzájemně ovlivňují a prolínají, takže je velmi obtížné vyhodnotit to podstatné a zajímavé. Je nutné si uvědomit, že sledované parametry mají fyzikální nebo chemickou podstatu, která ovlivňuje nejenom „chování“ plastu, vstřikovací formy, ale i tuhnutí hmoty, krystalizaci apod. A navíc se odlišným způsobem mění s teplotou a s časem. Proto bych zde chtěl podotknout, že provedení závěrů ze získaných hodnot bylo dosti obtížné, přesto jsem se snažil o zkonkretizování výsledků a o jejich shrnutí a také o co nejvyšší přínos pro výrobní praxi, hlavně z ekonomického hlediska.

Předem, než-li se dostanu k vlastním závěrům, bych chtěl vysvětlit, proč je v tzv. obvykle uváděné „teoretické části“ proveden kompletní postup od návrhu plastového dílu až po recyklaci a ne „klasická“ řešerže řešených problémů u technologie vstřikování a u hodnocení kvality plastových dílů s rozborem jednotlivých parametrů. Nechtěl jsem v dané kapitole „přepsat“ stávající teoretické informace z literatury, které je na našem trhu u plastikářského průmyslu v České republice stále nedostatek, i když v první verzi tomu tak bylo, ale napsat a vytvořit něco, co by bylo přínosem odborné veřejnosti i ostatním, což byl jeden z hlavních důvodů, proč jsem se k tomuto kroku rozhodl. Na druhé straně jsem přesvědčen, že obsah uváděných publikací postihuje dostatečný teoretický záběr řešené problematiky a je tedy jakýmsi obhájcem mého rozhodnutí ohledně této kapitoly.

Co tedy bylo mým hlavním záměrem při tvorbě a psaní této kapitoly habilitační práce? Chtěl jsem v kostce ukázat jednotlivé oblasti a problémy při výrobě plastových dílů, a to hlavně pro technologii vstřikování, které na sebe postupně navazují a tyto oblasti jasným a stručným způsobem popsat a shrnout v jeden komplex, který by dával tomu, kdo by si uvedené kapitoly přečetl, jednak představu o složitosti a rozmanitosti plastikářské výroby, ale i návod, možnosti a rady, jak postupovat při řešení jednotlivých problémů a nebo celku. A to vše aplikovat na, v současnosti moderní a úspěšný, automobilový průmysl, který je nositelem nejmodernějších technologií, s výhledem na nejbližší období (přibližně do roku 2003).

Tato úvodní kapitola byla časově velmi náročná a proto bych ji chtěl v nejbližší budoucnosti ještě rozšířit a dopracovat a následně vydat jako novou publikaci pro průmysl zpracování plastů, zaměřenou do oblasti výroby osobních automobilů a tím rozšířit literární základnu na našem odborném trhu.

5.1. SHRUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH Z HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ PLASTU, POUŽITÉHO PRO VSTŘIKOVÁNÍ

Materiál plastu charakterizuje celá spousta parametrů, které se podílejí na jeho vlastnostech jednak požadovaných trhem a jednak

požadovaných konečnou aplikací. Použitý plast, tj. jeho molekulární vlastnosti, nadmolekulární struktura, složení hmoty, makrostruktura a vnitřní stav materiálu jsou výsledkem tepelně mechanické historie, již byla hmota vystavena během procesu zpracování. Konečně užité vlastnosti materiálu jsou tedy jednak dány jeho základní fyzikální a chemickou strukturou a jednak výrobním a zpracovatelským procesem.

Z provedených zkoušek indexu toku taveniny, zkoušek hustoty, zkoušek obsahu popela a ze zkoušky tahem (pevnost, tažnost) nebylo ani tak důležité zjištění, že šarže č. 2 má z hodnocených šarží nejhorší hodnoty, což při odběru jiných druhů šarží bude nepochybně jiné, ale naopak zjištění, že hodnoty napětí a tažnosti při přetržení se výrazně liší od materiálových hodnot. U ostatních hodnocených materiálových parametrů jsem neměřil výrazný rozdíl od tabulkových hodnot, udávaných výrobcem, proto se budu v dalším textu věnovat jenom těm veličinám, které se výrazně lišily od tabulkových „etalonů“ a které, dle mého názoru, mají vliv na zmetkovitost výroby.

Napětí i tažnost (deformace) jsou u krystalických plastů závislé na stupni krystalinity a na obsahu amorfni oblasti, protože amorfni oblast působí jako klouby, které umožňují natačení krystalitů do směru působícího napětí. Nebo-li s rostoucím obsahem krystalické fáze stoupá pevnost a tuhost a klesá tažnost. Zároveň jsem z provedených experimentů a z měření ve výrobě zjistil zajímavou skutečnost, že s výraznou změnou napětí a tažnosti při přetržení od tabulkových hodnot se výrazně mění i procento zmetků, a to negativním způsobem (viz. obr. 5.1) se strmou křivkou nárůstu (viz. str. 167 - zvýšení tažnosti z hodnoty 115 % na hodnotu 125 % vede ke zvýšení počtu zmetků z 2,5 % na 8 %, zvýšení tažnosti ze 115 % na hodnotu 150 % vede ke zvýšení počtu zmetků z 2,5 % na 20 %).



Obr. 5.1: Zobrazení nárůstu počtu zmetků /ks/ na základě změny tažnosti při přetržení

Tento výsledek z provedených experimentů mě velmi překvapil a proto si dovoluji tvrdit, že po provedení mnohem většího počtu měření a ověření výše napsaného závěru, by tento údaj byl důležitou zpětnou vazbou pro výrobu už na začátku celého procesu technologie vstřikování (vstupní kontrola) při použití krystalického polypropylenu plněného talkem, neboť jak je patrné z naměřených hodnot ostatních vlastností, tak tyto se výrazně neliší od tabulkových.

Ve svém důsledku je z hlediska kvality výroby akceptovatelná hodnota počtu zmetků do 3 %, což zpětně dovoluje změnu tažnosti při přetržení o 15 % na hodnotu 115 %. Nad touto hranicí je, díky závěrům z experimentálních měření, nutné šarží nedoporučit do výroby kvůli velkým finančním ztrátám, které jsou v tomto případě ještě umocněny případným lakováním. A změny parametrů jednotlivých šarží nemohou být stále kompenzovány jenom přestavováním parametrů stroje.

Závěrem se tedy potvrdilo, že na základě provedených experimentálních měření, je vstupní kontrola při výrobě nezbytně nutná a to i přesto, že výrobce materiálů vlastní certifikáty o kvalitě plastu. Zvláště u výrobců, kteří zpracovávají plasty, někdy vyráběné přímo na zakázku, na kvalitní a cenově náročné díly je nutné provést kontrolu na vstupu výrobního procesu, a to i přes poměrně vysoké náklady. Ale cena, ušetřená ve výrobě při použití vhodného plastu, dokáže tyto náklady plně vyrovnat a nebo dokonce snížit vliv vstupního materiálu na konečnou cenu výrobku, což by mělo být prvořadé. U takto složitých dílů, při dnešních cenách plastů, cenách vstřikovacích forem a cenách strojů, jsou ekonomické ztráty při větším procentu zmetků velmi vysoké.

5.2. SHRUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH ZE SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ

Je nepochybné, že pro co největší přesnost předpovědi možných vad a problémů, případně pro hodnocení a srovnání stávajících výrobních problémů, je simulace technologie vstřikování nezbytným a mocným nástrojem, která svou rychlostí a objemem zpracovaných dat vysoce předčí analytické řešení nebo odhady dle zkušeností konstruktérů.

Složitost analytických rovnic, sestavených pro popis jednotlivých oblastí technologie vstřikování (tečení, chlazení, strukturní změny, ...) je už tak velká, že je nelze řešit klasickými způsoby. A také díky cyklickým změnám a nestacionárnímu charakteru jednotlivých částí vstřikovacího procesu jsou algoritmy analytické a časově téměř neřešitelné. Proto se aplikují různé výpočetní metody (metoda konečných prvků, metoda sítí, metoda hraničních prvků, ...), které usnadňují a umožňují numerické řešení s přesností, závislou na přesnosti zadání počátečních a okrajových podmínek. Musíme si však uvědomit, že na jedné straně co nejpřesnější vstupní data (okrajové a počáteční podmínky) a jejich závislost na teplotě, na tlaku a na čase,

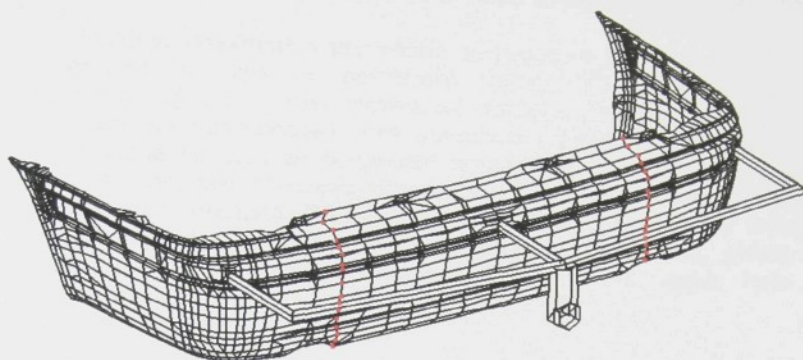
sice zvyšují přesnost výpočtu, na druhé straně však zvyšují i jeho složitost a časovou náročnost.

Simulační programy, aplikované do oblasti zpracování plastů, získávají v dnešní době nezastupitelné místo v oblasti návrhu a řešení konstrukce nástrojů pro zpracování plastů pro zvolený tvar výrobku, zvolený materiál a stroj. Na druhé straně existuje však i nepochybně dost veličin nebo oblastí, které nemůže simulace bezpečně postihnout (stav povrchu temperačních kanálů, vliv vzduchové mezery mezi výstřikem a formou, ...). Výhody simulací jsou však nesporné a nespočívají jenom v předpovědi možných problémů, ale i v rychlosti návrhu a v předávání dat výrobci forem, a to i přesto, že jejich cena není zrovna nejnižší (prodejní cena *STRIMFLOW* v roce 1995 byla kolem jeden a půl miliónu korun) a výpočty často probíhají na nákladných pracovních stanicích (v mém případě na stanici *Silicon Graphics SC 5000* o pořizovací ceně kolem půl miliónu korun). Proto je ze strany průmyslu ohromný tlak na co nejvyšší kvalitu a přesnost konečného výpočtu.

Je samozřejmě nemožné, aby přesnost simulačního výpočtu byla stoprocentní a tak je z hlediska zpětné vazby z výroby pro řešitelský kolektiv nutné znát kvalitu simulace, a tedy kvalitu zadávaných počátečních a okrajových podmínek, aby bylo možné neustále zlepšovat výkon a přesnost software. U středně složitých a středně rozměrných dílů se v literatuře /19,33/ mluví o přesnosti zhruba v rozmezí 92 až 95 %. U takto členitých a velkoplošných dílů není přesnost obecně zkonkretizována a proto se budu hlavně snažit o její vyhodnocení a o doplnění statistiky v této oblasti. Je zde ještě nutné zkonstatovat, že porovnávány budou pouze výsledky z analýzy chlazení pro čas 80 s po otevření vstřikovací formy a informativně i pro okamžik otevření formy (experimentální hodnota byla graficky aproximována).

1. Výsledné diagramy z analýzy plnění byly získány na základě zadaných vstupních dat o materiálu (*PP KELTAN TP 2550/3*) včetně jejich teplotních, tlakových a smykových závislostí, o vstřikovacím stroji (*Battenfeld BA 27000/16000*) včetně časových závislostí vstřiku a dotlaku a o tvaru, umístění a rozměrech vtokového systému, které byly nastaveny přesně podle stávající výroby. Výsledky jenom potvrdily a byly srovnatelné s výsledky provedené simulace firmou *DSM*, a to ať už se jednalo o čas vstřiku (viz. obr. 3.8), o tlak po naplnění (obr. 3.9), o teplotu v tavenině plastu po naplnění (viz. obr. 3.10) a o procento ztuhlé vrstvy po naplnění (viz. obr. 3.11), které jenom potvrdily, že navržený vtokový systém bude zajišťovat bezproblémové plnění tvarové dutiny formy, což se děje i ve výrobě.

Mohl by zde být konzultován snad jenom jeden problém, a to problém tvorby linie studeného spoje v oblasti mezi oběma vtoky (viz. obr. 5.2). Tento vznik studených spojů se však ve výrobě neobjevuje, což je dáno nejenom konstrukcí vtokového systému (vytápěné kanály) a vysokou rychlostí plnění, ale i teplotou taveniny v tomto místě po naplnění, která je srovnatelná s teplotou taveniny na vstupu do vstřikovací formy (tryska).



Obr. 5.2: Možné linie vzniku studených spojů při styku dvou čel taveniny plastu při plnění tvarové dutiny formy

2. Při cenách prováděných simulací stále ještě většina objednatelů ctí názor, že důležitá z hlediska výroby a konstrukce vstříkovací formy je pouze analýza plnění a analýza chlazení resp. strukturní nebo pevnostní (napěťová) analýza není nutná a rozmístění, tvar a rozměry temperačního systému se potom navrhnou dle zkušenosti konstruktérů a nebo podle podobných, „spolehlivě“ fungujících nástrojů a to do míst vstříkovací formy, kam dovoli její konstrukce. Nebo-li tam, kde „zbude“ místo po návrhu a konstrukci vtokového a vyhazovacího systému. Myslím si, že to není dobrý názor, který vede k problémům ve výrobě, což potvrdí i následující text.

Stejný případ nastal i u tohoto nástroje, u kterého, dle získaných informací, nebyla simulace chlazení a strukturní analýza provedena, což byla dle mého názoru výrazná chyba u takto konstrukčně složitého a rozměrově velkého dílu. Proto jsem tyto oblasti namodeloval jako nadstavbu pro výsledky z analýzy plnění a to jednak z hlediska kompletnosti a jednak z hlediska možnosti srovnání výsledků s experimentálním měřením a uvedl jsem je ve třetí kapitole své habilitační práce. V tomto bodě této kapitoly provedu vyhodnocení porovnání výsledků ze simulace a z experimentu (viz. tab. 5.1 a 5.2) a to jednak pro okamžik otevření formy (viz. obr. 3.17 a viz. obr. 4.19 a 4.20) a jednak pro čas měření a simulace 80 s po otevření vstříkovací formy (viz. obr. 3.23 až 3.25 a viz. obr. 4.23 a 4.28).

Vzhledem k tomu, že v okamžiku otevření vstříkovací formy nebylo možné naměřit povrchové teploty, které byly určeny jenom graficky, bude provedeno pouze vyhodnocení a diskuse zjištěných rozdílů mezi experimentem a simulací pro čas 80 s po otevření vstříkovací formy (viz. tab. 5.1). Tab. 5.2 je zde uvedena pouze pro kompletnost a přehlednost a výsledky z ní jsou sami o sobě patrné a

dají se vyhodnotit shodným způsobem, jako tomu bude v následujícím textu.

Rozdíly, vypočtené a převedené na procenta jsou vypočteny vždy z experimentálně zjištěné povrchové teploty. Černá barva písma představuje zjištěné vyšší povrchové teploty pomocí experimentu, tmavě červená barva naopak vyšší povrchové teploty, zjištěné simulací.

Obecně lze říci, že povrchové teploty tvárníku a tvárnice jsou téměř shodné, což platí pro přední část i oba boky a že i zde se projevila nižší intenzita chlazení na vzdálenějším boku (pravý bok při pohledu zepředu) a ve spodní části zadního nárazníku, avšak se zhruba pouze polovičním rozdílem teplot, než-li tomu bylo u experimentu.

Tab. 5.1: Porovnání zjištěných povrchových teplot pomocí měření a simulace v čase 80 s po otevření vstřikovací formy

místo odectu	levý bok			pravý bok			přední část - pravá polovina		
	experiment	simulace	rozdíl / %/	experiment	simulace	rozdíl / %/	experiment	simulace	rozdíl / %/
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	53,1	55,8	5,08	64,4	60,3	6,37	65,9	57,8	12,29
2	42,9	50,2	17,02	51,2	53,6	4,69	54,9	62,6	14,02
3	51,2	52,6	2,73	61,4	56,2	8,47	56,7	63,1	11,29
4	51,2	51,6	0,78	61,4	57,5	6,35	52,7	50,4	4,36
5	51,2	50,2	1,95	61,4	56,2	8,47	50,1	50,4	0,60
6	42,9	52,7	22,84	51,2	53,9	5,27	46,0	47,0	2,17
7	47,2	50,2	6,26	51,2	50,4	1,56			

Tab. 5.2: Porovnání zjištěných povrchových teplot pomocí měření a simulace v okamžiku otevření vstřikovací formy

místo odectu	levý bok			pravý bok			přední část - pravá polovina		
	experiment	simulace	rozdíl / %/	experiment	simulace	rozdíl / %/	experiment	simulace	rozdíl / %/
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	67,2	95,8	42,56	77,1	103,6	34,37	100,1	91,1	8,99
2	65,8	83,4	41,95	85,6	87,6	2,34	90,8	95,6	5,29
3	86,6	82,1	5,20	95,2	99,5	4,52	95,2	89,1	6,41
4	86,6	85,1	1,73	95,2	102,3	7,46	80,9	77,7	3,96
5	72,1	77,4	7,35	88,4	92,4	4,52	77,4	77,7	0,39
6	66,8	86,7	29,79	76,9	94,8	23,28	70,8	84,1	18,79
7	74,0	73,1	1,21	83,1	84,2	1,32			

Rozdíly mezi experimentem a simulací jsou u *pravého boku* max. necelých 9 %, což je, dle mého názoru, velmi dobrá hodnota shody. Jinak experiment odhalil intenzivní chlazení oblasti tvarové lišty na boku u přechodu do přední části zadního nárazníku a velké rozdíly povrchových teplot mezi místy nad a pod tvarovým řešením pro umístění ozdobné lišty, což simulace nepotvrdila a i rozdíly nad a pod tvarovým řešením nejsou žádné, proto jsou u některých vypočtených rozdílů v tabulce červená čísla ve prospěch vyšších teplot u simulace. Toto místní intenzivní ochlazení se dá jednoduše vysvětlit tím, že bylo stoprocentně způsobeno manipulátorem, který odebírá vystříknuté zadní nárazníky po otevření vstřikovací formy a přenáší je na místo obsluhy (viz. obr. 4.14). Proto musím opravit mé předchozí tvrzení o zjištěných rozdílech, protože se dá předpokládat, že povrchová teplota by v těchto místech byla jinak shodná s teplotami, v místech č. 3 a 4. Potom by na pravém boku nebyl zjištěný rozdíl mezi experimentem a simulací 4,69 %, ale vyšších 10,7 %.

Naproti tomu u *levého boku* vlivem nižším povrchových teplot byly vypočteny i nižší procentuální rozdíly (pokud pominu místo č. 2 a 6, kde je jednak velký rozdíl již ve zmiňované oblasti tvarového řešení pro umístění lišty a jednak ve spodní části v blízkosti přechodu do přední oblasti, kde bylo experimentem zjištěno mnohem vyšší ochlazení výrobku, než-li tomu bylo u simulace), které jsou kolem 5 %. Pro místo č. 2 můžu uvažovat shodný předpoklad o vlivu manipulátoru na povrchovou teplotu, který byl uvažován i u pravého boku a potom vypočtený rozdíl mezi experimentálním měřením a simulací není vysokých 17,02 %, ale pouhých 1,95 %. Dále velmi zajímavé zjištění je ta skutečnost, že zatímco u pravého boku byly vyšší povrchové teploty naměřeny pomocí experimentu, tak u levého boku je tomu přesně naopak, nebo-li vyšší povrchové teploty byly zjištěny většinou simulací.

V *přední části* zadního nárazníku byly jak experimentálním měřením, tak i simulací zjištěny shodné povrchové teploty, a to jak u levé poloviny, tak i u pravé poloviny. To samé však již nelze říci spodní a horní polovině přední části. Zatímco v horní polovině jsou rozdíly něco málo přes 14 %, tak ve spodní polovině jsou pouze něco málo přes 4 %. Toto se dá vysvětlit tvrzením, že díky větší vzdálenosti temperačního systému v horní polovině od povrchu tvarové dutiny vstřikovací formy (viz. obr. 3.13) byly u simulace zjištěny vyšší povrchové teploty, což na druhé straně, i přes téměř shodné průtočné množství v temperačních kanálech (viz. tab. 3.1), experiment nepotvrdil. Opakem je spodní polovina, kde simulace nenaznačovala žádné problémy se vzdáleností a proto je zde výrazná shoda zjištěných povrchových teplot.

Je tedy patrné, že s rostoucí teplotou u experimentu roste i procentuální rozdíl při srovnání experiment – simulace u zadního nárazníku *Škody Felicie Combi* a tedy klesá účinnost simulace. Úspěšnost provedené simulace pro analýzu chlazení se tedy pro tak rozměrný a konstrukčně složitý díl pohybuje v rozmezí 85 % a více, což je, myslím si, velmi dobrá a vysoká hodnota, která konečné výsledky z provedené simulace může brát jako směřovací a zavazující pro

konstrukci formy. Díky této vysoké procentuální úspěšnosti dává simulace vstřikování i u takovýchto výrobků konstruktérům a technologům mocnou zbraň do ruky v oblasti konstrukce a návrhu vstřikovacích forem s velmi dobrou možností předpovědi možných nedostatků.

3. Poslední částí simulace procesu vstřikování byla strukturní analýza, která byla směřována do grafického výstupu rozložení vnitřních pnutí na výrobku (viz. obr. 3.25). Experimentálně byly naměřeny hodnoty napětí na mezi pevnosti (pro maximální sílu) a pro všechna odebraná zkušební tělesa jsou uvedeny v tab. 4.10. Tabulkově uváděná hodnota napětí na mezi pevnosti (viz. tab. 4.1) je 16 MPa a průměrná hodnota pro tři měřené šarže z tab. 4.5 až 4.7 je 15,71 MPa.

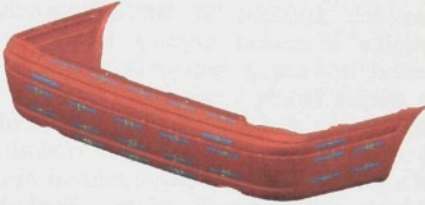
Srovnání zjištěné hodnoty napětí na mezi pevnosti a vnitřního pnutí je ukázáno v tab. 5.3 a to pro předpoklad vysoké úspěšnosti (chyba kolem 10 %) při stanovení hodnoty vnitřního pnutí pomocí simulačního výpočtu, proto, aby bylo možné získané výsledky brát jako seriózní výstupy. Vnitřní pnutí беру jako superpoziční hodnotu ze všech možných typů vnitřních pnutí (ochlazovací, krystalizační, ...), která snižuje skutečné napětí na mezi pevnosti od působení jednotlivých účinků technologie vstřikování na mechanické hodnoty a proto je v tab. 5.3 proveden součet obou dvou hodnot. Nebo-li jinak řečeno, nebýt vlivu technologie vstřikování a tím vzniklých a rozdílných vnitřních pnutí, tak předpokládám, že hodnota pod označením „součet“ by byla skutečnou hodnotou napětí na mezi pevnosti.

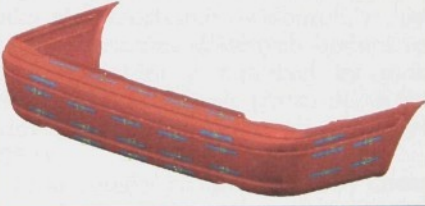
Z tab. 5.3 pro *pravý bok* je vidět, že vlivem vyšší teploty na povrchu po vyhození výlisku z formy jsou i zjištěné hodnoty celkového napětí po součtu napětí na mezi pevnosti a vnitřního pnutí mnohem vyšší, než-li pro levý bok a pro přední část, což je zřejmě způsobeno vyšším stupněm krystalinity a jemnější nadmolekulární strukturou. Celkové napětí potom nabývá přibližně hodnot od 18 MPa do 19,5 MPa (průměr 18,78 MPa) a je o 17,35 % vyšší, než-li je udávaná tabulková hodnota a o 19,54 % vyšší, než-li je střední hodnota pro všechny tři zkoušené šarže. Nejnížší hodnoty celkového napětí byly zjištěny pro okolí vyústění bočního vtoku pod tvarovým řešením (místo č. 11 a 20), což je o to zajímavější, že v místě odběru zkušebního tělesa č. 6 (tvarové řešení) bylo intenzivní ochlazení povrchu od manipulátoru v okamžiku otevření formy a přitom tam nebyly nízké hodnoty celkového napětí vůbec naměřeny. Dá se to zřejmě vysvětlit tím, že vnitřní struktura plastu je již vytvořena během chlazení v dutině formy a proto místní ochlazení nemůže mít výrazný vliv na mechanické hodnoty a vnitřní pnutí. O to vyšší vliv bude mít však vyústění bočního vtoku v okolí odběru zkušebních těles č. 11 a 20, které negativně ovlivňuje rozložení napětového pole rozdílným smrštěním jednotlivých vrstev během plnění a ihned po naplnění tvarové dutiny formy.

Pro *levý bok* je patrné, na rozdíl od pravého boku, že zjištěné hodnoty celkového napětí po součtu napětí na mezi pevnosti a vnitřního pnutí jsou srovnatelné s přední částí a s tabulkově uváděnou hodnotou. Celkové napětí potom nabývá hodnot od 15,81 MPa do 17,23 MPa (průměr 16,68 MPa) a je pouze o 4,25 % vyšší, než-li je

Tab. 5.3: Porovnání experimentálně zjištěného napětí na mezi pevnosti a vnitřního pnutí ze simulace včetně součtu obou parametrů

levý bok						
místo odečtu	6	10	11	19	20	
napětí na mezi pevnosti MPa/	15,942	16,550	13,776	16,616	14,072	
vnitřní pnutí /MPa/	0,81	0,68	2,03	0,73	2,19	
součet /MPa/	16,752	17,230	15,806	17,346	16,262	

pravý bok						
místo odečtu	9	17	18	26	27	
napětí na mezi pevnosti MPa/	18,352	16,746	18,692	15,902	17,526	
vnitřní pnutí /MPa/	0,81	2,12	0,73	2,16	0,84	
součet /MPa/	19,162	18,866	19,422	18,062	18,366	

přední část (levá polovina)						
místo odečtu	1	2	3	7	12	
napětí na mezi pevnosti MPa/	16,414	16,665	15,114	16,040	15,824	
vnitřní pnutí /MPa/	0,63	0,95	1,84	0,86	0,89	
součet /MPa/	17,044	17,615	16,954	16,900	16,714	
místo odečtu	13	14	21	22	23	
napětí na mezi pevnosti MPa/	16,004	13,920	15,420	15,518	14,212	
vnitřní pnutí /MPa/	0,67	2,49	1,01	0,95	1,63	
součet /MPa/	16,674	16,410	16,430	16,468	15,842	
místo odečtu	28	29	31	32		
napětí na mezi pevnosti MPa/	15,452	15,450	15,634	15,644		
vnitřní pnutí /MPa/	0,95	0,95	0,95	0,95		
součet /MPa/	16,402	16,400	16,584	16,594		

udávaná tabulková hodnota a o 6,17 % vyšší, než-li je střední hodnota pro všechny tři zkoušené šarže a o 11,18 % nižší oproti pravému boku. Nejnížší hodnoty celkového napětí byly opět zjištěny pro okolí vyústění bočního vtoku pod tvarovým řešením (místo č. 17 a 26) a to i přesto, že v místě odběru zkušební tělesa č. 9 (tvarové řešení) bylo, shodně jako u pravého boku, intenzivní ochlazení povrchu od manipulátoru v okamžiku otevření formy. Vysvětlení těchto rozdílů bude obdobné, jako tomu bylo u pravého boku.

A pro *přední část*, kdy z hlediska velmi shodných hodnot na levé a pravé polovině přední části bylo provedeno vyhodnocení celkového napětí pouze pro levou polovinu včetně středových míst odběru zkušebních těles (místa č. 3, 14, 23, 29 a 32) a odečtu nasimulovaných uváděných hodnot lze zkonstatovat, že celková hodnota napětí nabývá rozsahu od 15,84 MPa do 17,61 MPa a průměr je potom 16,65 MPa, který je o 4,06 % nižší, než-li je výrobcem udávaná tabulková hodnota a o 5,98 % nižší, než-li je střední hodnota napětí pro všechny tři zkoušené šarže polypropylenu *KELTAN TP 2550/3*, což potvrzuje shodnost hodnot celkového napětí s levým bokem a s hodnotami, udávanými výrobcem. Co se týče porovnání s pravým bokem, tak zjištěné celkové napětí je o 11,34 % nižší vůči hodnotě napětí, zjištěné pro pravý bok. Nejnižší hodnoty celkového napětí byly zjištěny pro okolí vyústění středového vtoku (místo odběru zkušebních těles č. 3, 14 a 23) a také lze zkonstatovat, že hodnota vnitřního pnutí roste s klesající vzdáleností od vyústění středového vtoku. Vysvětlení je shodné, jako pro okolí bočních vtoků, kdy rozdílné ztuhlé vrstvy a efekt proudění vytvářejí „příznivé“ podmínky pro vznik a zvyšování vnitřního pnutí.

Hodnocení, ať už se týká rozložení povrchových teplot nebo rozložení napěťových polí, bylo provedeno pouze pro vybraná místa na zadním nárazníku, které jsou přehledně označeny v jednotlivých tabulkách a z tohoto hlediska si samozřejmě uvědomují, že by někdo mohl namítnout, že přesnost a porovnání zjištěných hodnot teploty a napětí mezi experimentálním měřením a simulací by mohlo být v jiných místech odlišné. S tímto lze souhlasit pouze do určité míry, protože na druhé straně si dovoluji tvrdit, že pro tato místa by přesnost neklesla pod zmiňovaných 85 %.

Závěrem lze tedy říci, že simulační programy patří v dnešní době k nezbytným pomocníkům v oblasti návrhu a konstrukce vstřikovací formy, ale i v použití při hledání nedostatků již nainstalovaných a problémových forem a že svou procentuální úspěšností simulace se blíží téměř k dokonalosti, což je patrné i na úspěšnosti pro tak složitý díl, jakým byl zadní nárazník *Škody Felicie Combi*.

5.3. SHRNTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH Z TERMORIZNÍHO MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ NA POVRCHU VÝROBKU

Pro hodnocení správně navrženého temperačního systému vstřikovací formy a pro hodnocení jeho správné funkce, byla použita metoda termovizního měření, kterou byly „sejmuty“ barevné mapy

rozložení teplotních polí na povrchu plastového zadního nárazníku v jednotlivých časech měření po vyhození z formy (80 s, 300 s, 900 s a 1800 s), které byly provedeny v důsledku požadavků výroby pro odstranění s tímto souvisejících výrobních vad na výrobku (vady z rozjždění, deformace a kroucení, ...) teplotních deformací tvarových částí formy (přesazení čelistí, ...) příp. vad, které se projeví po lakování a které měly po vyhodnocení a po konečném řešení vést k doporučením pro výrobu tohoto dílu a k odstranění problémů.

Z výsledků termovizního měření, které je podrobně vyhodnoceno v kapitole 4.2.1. (pokles povrchových teplot ve vybraných místech za čas resp. srovnání povrchových teplot mezi vybranými místy pro zvolený čas měření) - proto zde nebudu již uvádět číselné údaje - a z naměřených povrchových teplot, které jsou shrnuty v tab. 5.4, lze učinit následující celkové závěry, které se dotýkají nejenom samotných teplotních polí, ale i následujícího hodnocení rozložení napětových polí po vstřikování a ochlazení na teplotu okolí:

- ♦ shodné povrchové teploty byly zjištěny jak na tvárníku, tak i na tvárnici, a to pro všechny časy měření,

- ♦ obecně nejvyšší povrchové teploty byly zjištěny v místech vyústění vtoků na výrobku, což se dalo očekávat, a to jak ze strany vtoku, tak i z opačné strany pro všechny časy měření, což je závěr, který už tak samozřejmý není, ale u takto tenkostěnného výstřiku nezbytný;

- ♦ středový vtok má povrchové teploty pro jednotlivé časy vždy vyšší, než-li oba boční vtoky a to i přesto, že mají shodné rozměrové ústí vtoku a jsou vytápěny, a také svým umístěním a vyústěním ovlivňuje mnohem větší plochu, než-li je tomu u bočních vtoků;

- ♦ povrchové teploty na levém boku zadního nárazníku jsou mnohem nižší (viz. tab. 5.4), než-li povrchové teploty na pravém boku (při pohledu zepředu) a to zhruba o 10 °C v horní polovině a zhruba v průměru o 6 °C ve spodní polovině pro první čas měření;

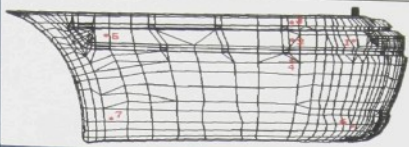
- ♦ povrchové teploty na pravém boku jsou srovnatelné s naměřenými povrchovými teplotami v přední části;

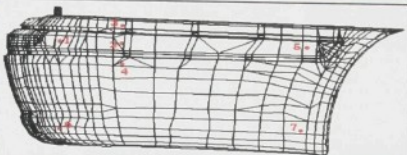
- ♦ z diagramů rozložení teplotních polí je jasně vidět, že povrchová teplota v oblasti tvarového řešení pro umístění ozdobné lišty se mezi středovým a bočním vtokem vyrovná s časem s povrchovou teplotou obou vtoků;

- ♦ v oblasti tvarového řešení v přední části i na bocích existuje linie nejvyšších povrchových teplot pro všechny časy měření rozložení teplotních polí na povrchu výrobku;

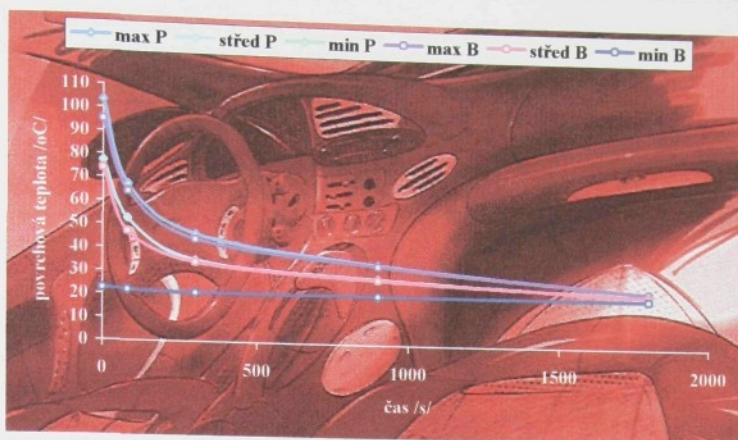
- ♦ graficky byly aproximovány hodnoty povrchových teplot do okamžiku otevření vstřikovací formy (viz. obr. 5.3), které jsou uvedeny a vyhodnoceny v bodě 2. kap. 4.2.1., aby se potvrdil předpoklad, že velmi malá vzduchová mezera (u zadního nárazníku *Škody Felicie Combi* je smrštění kolem 1 %, což odpovídá šířce mezery 0,04 mm), vzniklá smrštěním plastu, mezi tvarovou dutinou formy a povrchem výrobku působí jako tepelným izolant a tím pádem se zastavuje přenos tepla z plastu do kovové formy;

Tab. 5.4: Porovnání experimentálně zjištěných povrchových teplot pro vybraná místa odečtu a pro zvolené časy měření

levý bok				
	povrchová teplota /°C/ v čase měření			
místo odečtu	80 s	300 s	900 s	1800 s
boční vtok	58,2	42,4	27,0	22,7
1	53,1	42,4	26,4	22,5
2	42,9	33,8	25,0	22,3
3	51,2	41,5	26,4	22,5
4	51,2	41,5	26,4	22,5
5	51,2	38,6	25,0	22,3
6	42,9	32,0	24,3	21,9
7	47,2	34,3	24,3	21,8

pravý bok				
	povrchová teplota / °C/ v čase měření			
místo odečtu	80 s	300 s	900 s	1800 s
boční vtok	64,4	44,2	29,6	22,9
1	64,4	44,2	27,7	22,6
2	51,2	36,5	25,0	22,1
3	61,4	42,4	27,7	22,7
4	61,4	42,4	27,7	22,7
5	61,4	40,5	26,4	22,4
6	51,2	36,5	25,0	22,0
7	51,2	36,5	25,0	21,9

přední část					
	místo odečtu	povrchová teplota /°C/ v čase měření			
		80 s	300 s	900 s	1800 s
střed. vtok		67,5	46,6	35,0	24,4
1		65,9	45,5	31,4	23,5
2		54,9	40,3	28,7	23,2
3		56,7	42,3	27,6	22,9
4		52,7	37,2	26,7	22,2
5		50,1	36,3	26,2	22,0
6		46,0	32,9	23,7	21,5



Obr. 5.3: Ukázka graficky aproximovaných povrchových teplot pro přední část a boky zadního nárazníku Škody Felicie Combi (max P, střed P, min P – maximální, středová a minimální povrchová teplota na přední části, max B, střed B, min B – maximální, středová a minimální povrchová teplota na bocích)

♦ dále je z obr. 5.3 patrné, že vyhození zadního nárazníku nastává při teplotách vyšších, než-li je teplota 80 °C (teplota, pod kterou u polypropylenu nenastávají deformace a tvarové změny, příp. otisky vyhazovacího systému), což může vést k vzhledovým vadám; na druhé straně však předpokládám, že výrazně vyšší povrchové teploty, než-li 80 °C, budou mít zřejmě pouze oblasti kolem vtoků, neboť rozložení teplotních polí v okamžiku otevření vstřikovací formy není známe a nemohlo být změřeno;

♦ povrchových teplot, odpovídajících teplotě formy, bylo dosaženo až v čase 80 s po otevření formy;

♦ v čase měření 1800 s jsou již teplotní rozdíly mezi změřenými povrchovými teplotami minimální a lze konstatovat, že v tomto čase bylo ukončeno chlazení a krystalizace;

♦ nejvyšší pokles povrchových teplot je v časovém úseku od 80 s do 300 s;

♦ shodný rozdíl poklesu mezi naměřenými povrchovými teplotami je jak pro vyšší teploty a kratší čas (rozdíl mezi časem měření 80 s a 220 s), tak i pro nižší povrchové teploty a kratší čas (rozdíl mezi časem měření 300 s a 900 s) a to jak pro přední část, tak i pro oba boky zadního nárazníku;

♦ pro poslední časový úsek (rozdíl mezi časem měření 900 s a 1800 s) je zjištěn teplotní rozdíl zhruba polovinou v předchozím bodě uváděného teplotního rozdílu;

♦ povrchové teploty na bocích zadního nárazníku byly ovlivněny uchopením výrobku manipulátorem a díky této skutečnosti došlo

k ovlivnění povrchových teplot, které však, jak je vidět z termovizních diagramů, nemělo vliv na okolní povrchové teploty;

- horní a spodní polovina, ať už na přední části nebo na obou bocích, si udržují s časem mezi sebou nadále své teplotní rozdíly.

Závěrem tohoto shrnutí bych chtěl ještě říci, že hodnocení rozložení teplotních polí na zadním nárazníku *Škody Felicie Combi* po vyhození ze vstřikovací formy se týkalo povrchových teplot a proto nelze tvrdit, že shodné teploty jsou i uvnitř výrobku, a to i přesto, že se jedná o tenkostěnný výrobek, neboť teploty ve středu vylisku jsou vyšší, než-li na povrchu, což platí bezezbytku pro chlazení výrobku ve formě. Naproti tomu po vyhození výrobku z formy nastává vyrovnávání teplot mezi středem a povrchem a k současněmu ochlazování a tedy k poklesu teplot na povrchu, což je jiný případ, než-li chlazení v uzavřené dutině formy a právě tímto sledováním povrchových teplot v závislosti na čase jsem se zabýval v jedné ze svých kapitol habilitační práce. Rychlost poklesu povrchové teploty s časem po vyhození z formy je potom dána celkovou dobou chlazení ve vstřikovací formě na základě účinnosti temperačního systému, teplotou okolního prostředí a tloušťkou stěny výrobku.

A ještě jedna zajímavá informace na závěr: temperační systém musí uchlazení taveninu plastu o hmotnosti 4,65 kg v čase temperace 44 s pro celkový cyklus 80 s.

5.4. SHRUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÍSKANÝCH Z HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Při měření mechanických vlastností jsem vycházel z předpokladů a závěrů, které jsem provedl na základě již dříve naměřených rozložení teplotních polí na povrchu výrobku. Zajímalo mě, jaký vliv na napětí a tažnost (deformaci) na mezi pevnosti krystalického plastu, u kterého se zvyšujícím stupněm krystalinity rostou i mechanické hodnoty a na druhé straně rozdílné účinky temperace snižují mechanické vlastnosti, budou mít odlišné hodnoty experimentálně zjištěných povrchových teplot.

Při hodnocení mechanických vlastností jsem, díky již známým zkušenostem, očekával, že:

- v místech s vyšší povrchovou teplotou bude vyšší stupeň krystalinity, který se projeví změnou mechanických vlastností k vyšším hodnotám;

- v okolí vyústění vtoků se projeví vliv vnitřního pnutí od rozdílného smrštění a ochlazení jednotlivých vrstev, který bude naopak mechanické hodnoty snižovat;

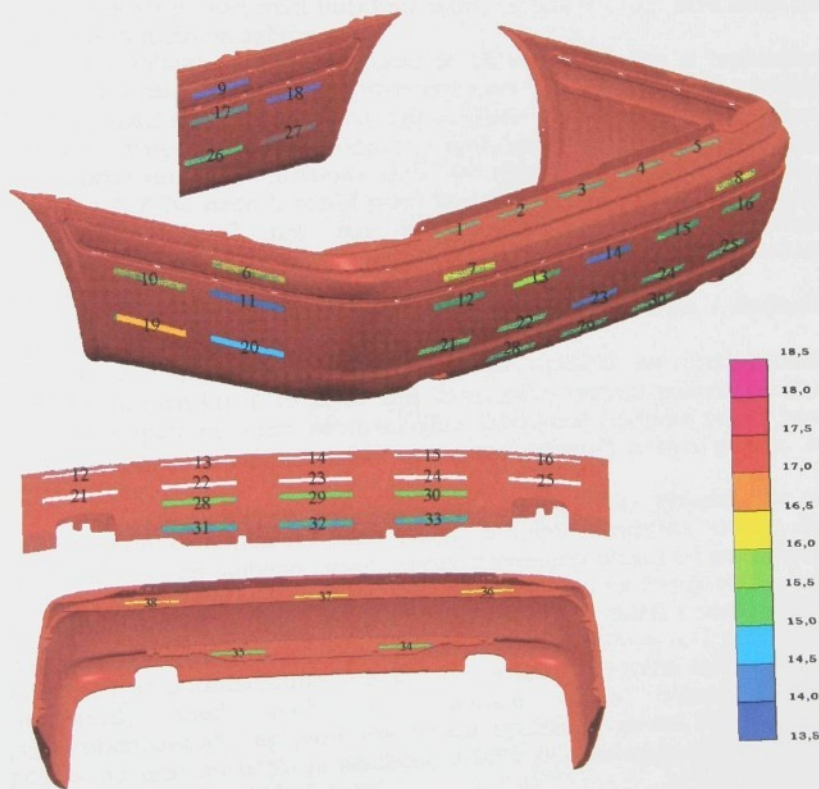
- v horní a spodní polovině budou naměřeny rozdílné hodnoty mechanických vlastností;

- s rostoucí vzdáleností (ve vertikálním směru) od vyústění vtoků v místech v okolí vyústění vtoků resp. v místech mezi nimi se budou zvyšovat mechanické hodnoty;

ale chtěl jsem ověřit, jak se tato rozložení teplotních polí a jejich rozdílná velikost budou podílet na změnách mechanických hodnot a na rozložení napětových polí, což tedy bylo předmětem experimentálních měření, uvedených v kapitole 4.2.2..

Kompletní vyhodnocení naměřených mechanických hodnot z odebraných zkušebních těles je provedeno v kapitole 4.2.2. (srovnání napětí na mezi pevnosti je v tab. 4.10 a deformace na mezi pevnosti je v tab. 4.11) a proto v následujícím textu provedu pouze shrnutí zjištěných hodnot a výsledků a to u napětí na mezi pevnosti, protože deformace na mezi pevnosti kopíruje hodnotami napětí a shrnutí by tak bylo provedené vlastně dvakrát.

Na následujícím obrázku (obr. 5.4) jsou graficky převedeny zjištěné hodnoty napětí na mezi pevnosti do míst, odkud byly odebrány zkušební tělesa a dávají určitý přehled o napětových polích na zadním nárazníku Škody Felicie Combi, z kterého lze učinit následující závěrečné shrnutí:



Obr. 5.4: Ukázka graficky převedených hodnot napětí na mezi pevnosti σ_B /MPa/ do míst odběru zkušebních těles ze zadního nárazníku Škody Felicie Combi

• v přední části a v horní polovině zadního nárazníku měla většina odebraných zkušebních těles hodnoty napětí na mezi pevnosti kolem 16 MPa a odpovídají tedy hodnotám, uváděným výrobcem resp. hodnotám, zjištěným u tří experimentálně zkoušených šarží a lze tedy zkonstatovat, že proces plnění a proces chlazení nemá výrazný vliv na mechanické hodnoty;

• napětí na mezi pevnosti klesá od horní poloviny směrem ke spodní polovině a hraně zadního nárazníku, i když jen velmi nepatrně (cca o 0,5 MPa), což je pro rozdíl povrchových teplot 10 °C a vyšší při čase měření 80 s překvapivé, neboť jsem očekával nižší hodnoty ve spodní polovině; na druhé straně zde zřejmě není výrazné vnitřní prnutí od vyústění vtoků vzhledem k větší vzdálenosti od místa ústí a proto jsou hodnoty napětí na mezi pevnosti pouze nepatrně nižší;

• na horním výztužném žeburu byly naměřeny shodné hodnoty se stejně umístěnými zkušebními tělesy v přední části zadního nárazníku a na spodním žeburu byly také opět zjištěny shodné hodnoty pro stejně horizontálně umístěná místa odběru zkušebních těles, když napětí na mezi pevnosti je opět vůči hornímu žeburu přibližně o 0,5 MPa nižší na spodním výztužném žeburu;

• v oblasti středového vtoku je vlivem tepelného a teplotního ovlivnění a také vlivem tečení taveniny s rozdílným smrštěním výrazný pokles napětí na mezi pevnosti, kdy nejbližší umístěné zkušební těleso (zkušební vzorek č. 14) má hodnotu napětí na mezi pevnosti o 2,1 MPa nižší oproti tabulkové hodnotě, ale i ostatním místům, což představuje pokles o 8,7 %; nebo-li rozdíl povrchových teplot mezi horní a spodní polovinou (15 °C pro čas měření 80 s), včetně působení nerovnoměrného vlivu tečení, způsobí pokles napětí vzhledem k převážujícím naměřeným hodnotám změnu téměř o 9 %;

• s rostoucí vzdáleností od středového vtoku roste i hodnota napětí na mezi pevnosti;

• v místech kolem bočních vtoků neklesá na přední části zadního nárazníku, a to ať už pro levou nebo pravou polovinu, nijak výrazně napětí na mezi pevnosti vůči tabulkové hodnotě (snad jsou hodnoty napětí poněkud vyšší na pravé polovině) a to i přesto, že teplotní rozdíly v této oblasti jsou značné;

• oproti předchozímu tvrzení mají boční vtoky výrazný vliv na pokles hodnoty napětí na obou bocích zadního nárazníku, což je, dle mého názoru, způsobeno tlakem přitéklé taveniny plastu od středového vtoku a její účinek na taveninu, která byla do dutiny formy vstříknuta z bočních vtoků; potom pokles napětí na mezi pevnosti v přední části levého boku oproti zadní části je zhruba o 2,5 MPa a to i přesto, že tento vliv se u zkušebního tělesa č. 6 v oblasti tvarového řešení vůbec neprojevil, snad kvůli vyšší teplotě v této oblasti, která „vykompenzovala“ negativní vliv tečení vyšším stupněm krystalinity; pokles na pravém boku je přibližně 2 MPa se shodnými závěry, které byly uvedeny u levého boku;

• na pravém boku byly naměřeny nejvyšší hodnoty napětí na mezi pevnosti, což je zřejmě dáno vyššími teplotami, které byly na pravém boku experimentálně a termovizně naměřeny a které jsou

příznivější pro krystalizaci použitého polypropylenu *KELTAN TP 2550/3*;

♦ levý bok má v zadní části vůči srovnatelnému místu na pravém boku napětí na mezi pevnosti nižší zhruba o 1,5 MPa a pro přední část je rozdíl ještě vyšší a představuje hodnotu o 2,5 MPa nižší; nebo-li rozdíl povrchových teplot kolem 8 °C pro čas měření 80 s v zadní části obou boků vede ke snížení hodnoty napětí na mezi pevnosti o 1,5 MPa a rozdíl povrchových teplot o 10 °C pro čas měření 80 s vede k poklesu hodnoty napětí o 2,5 MPa.

Vzhledem ke stále častěji vznikajícím problémům ve výrobě, které budou vždycky, pouze se dá omezit jejich objem, v důsledku zpracování speciálních druhů plastů na složité a rozměrné díly, které jdou někdy s obtížemi vůbec zaformovat, byla během posledních dvou let vypracována metodika ke zvyšování kvality u výrobků z plastů a ke snižování zmetkovitosti, která byla z větší části prezentována v této habilitační práci a jejíž struktura se skládá z následujících částí:

- ♦ kontrola materiálu na vstupu do procesu,
- ♦ simulace technologického procesu vstřikování,
- ♦ experimentální měření teplot, napětí a rozměrových změn.

Záleží jen na oblasti vznikajících vad a možnostech dané měření provést a samozřejmě na přístupu k řešení problémů.

Tato metodika vznikla na základě spolupráce *katedry tváření a plastů* s výrobcí plastových dílů, kteří zpracovávají plasty na výrobky o vysoké přesnosti a kvalitě nebo na konstrukčně složité výrobky a nebo na výrobky velkých rozměrů, u kterých jsou ceny na zmetek příliš vysoké a i pořizovací cena vstřikovacích forem je mnohdy vyšší, než-li je cena vstřikovacího stroje. Proto se snažíme ve spolupráci s průmyslem tímto způsobem odstranit vzniklé chyby a problémy, než-li použít nákladné opravy nástrojů nebo řešit recyklaci. Předložená metodika byla poprvé aplikována na zadní nárazník *Škody Felicie Combi* a po jejím ekonomickém přínosu následně i na několik dílů z automobilu *Škoda Octavia* a v současnosti i na vybraný díl z vozu *Škoda Fabia*.

Závěrem lze celou habilitační práci, která svým obsahem pokrývá širokou oblast průmyslu zpracování plastů, shrnout do několika následujících bodů:

♦ vždy je nutné kontrolovat materiál na vstupu, neboť jakákoliv změna parametrů od tabulkových hodnot, od plochy „pavouka“, nepochybně povede ke zvýšení zmetkovitosti a tedy k mnohem vyšším nákladům, než by byly náklady, vynaložené na zkoušky materiálů;

♦ zajímavým zjištěním byla ta skutečnost, že hodnota tažnosti při přetržení u polypropylenu *KELTAN TP 2550/3* a její změna výrazně ovlivňuje počet zmetků ve výrobě a to přímo výrazným způsobem;

♦ v případě složitějších dílů doporučuji použít simulační program, např. mnou používaný systém *STRIMFLOW*, pro jeho vysokou přesnost i při řešení složitých dílů a pro jeho širokou možnost

grafických výstupů, protože je všeobecně známo, že cena za vzorkování formy, její sundání, úprava a znovu seřízení je vyšší, než-li je cena simulací;

- termovizní měření, sledující rozložení povrchových teplot v čase, s vyhodnocením teplot na straně tvárnice, tvárniku a na výrobku je nejenom rychlé, ale hlavně důležité z hledisky kontroly správné funkce temperačního systému vstřikovací formy (v mém případě vedlo k několika doporučením pro změnu parametrů temperačního média, protože zásah do tak rozměrné a drahé formy není možný);

- rozdílné rozložení teplotních polí na povrchu ve svém důsledku vedlo k poklesu nebo ke zvýšení mechanických hodnot podle toho, zda se teploty mění rovnoměrně nebo skokem a zda i rychlost ochlazování je rovnoměrná;

- experimentální měření potvrdily vliv vzduchové mezery mezi povrchem výrobku a tvarovou dutinou, která působí jako izolant a také vliv vyústění vtokových systému na teplotu a na mechanické hodnoty.

Cíl dalších prací v této oblasti vidím v konfrontaci výsledků experimentu a simulací, kterých je stále nedostatek, dále v rozvoji metodiky pro zvyšování kvality plastových dílů, protože spolupráce univerzit a průmyslu je nutná a v hodnocení vlivu teplotních polí na napětové stavy a rozměrové změny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- /1/ Štěpek, J. a kol.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. SNTL, Praha, 1989.
- /2/ Wagner, M., H.: Wärmeübergang an nicht newtonschen Flüssigkeiten. VDI – Verlag, Düsseldorf, 1991.
- /3/ Sova, M., Krebs, J.: Termoplasty v praxi. Verlag Dashófer, Praha, 1999.
- /4/ Mann, D.: Automotive plastics and composites. Elsevier Science, Oxford, 1995.
- /5/ Sommer, B.: Soubor materiálů – tvrdý podnět ke zdokonalování oceli. Sborník přednášek, 1. díl, METAL 98, Ostrava.
- /6/ Lausen, G.: Werkstofftechnik I. Der junge Karosserie und Fahrzeugbauer. VEB Verlag, Juni 1997.
- /7/ Materiály fy DuPont: Engineering Polymers, Juni 2000.
- /8/ Tadmor, E., Godos, K.: teoretické osnovy pererabotky polymerov. Chimija, 1984.
- /9/ Broy, W.: Handbuch der Plasttechnik. VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 1985.
- /10/ Wübken, G., Conrad, J.: Rationalisation in the injection moulding shop. VDI Verlag, Düsseldorf, 1981.
- /11/ Henges, C.: Anleitung für den Bau Spritzgiesswerkzeugen. Hanser, München, 1983.
- /12/ Brown, R., Read, B.: Measurement Technigues for Polymeric Solids. EASP, London, 1984.
- /13/ Kolouch, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. SNTL, Praha, 1986.
- /14/ Kolouch, J.: Strojní součásti z plastů. SNTL, Praha, 1981.
- /15/ Neuháusl, E.: Vstřikování plastických hmot. SNTL, Praha, 1973.
- /16/ Hartmann, W., Wübken, G.: Injection moulds. VDI – Verlag, Düsseldorf, 1980.
- /17/ Weiss, K.: Die Berechnung des Wärmeüberganges zwischen Phasen grenzen mittels der Methode der immernen Rander. VDI Aachen, 1995.
- /18/ Edward, R., Champion, J.: Finite element analysis in manufacturing engineering. McGraw –Hill, 1992.
- /19/ Flether, A.: Thermal Stress and Strain generation and Heat Treatment. EASP, London, 1989.
- /20/ Wheran, A., Craff, J.: Developments in Plastic Technology – 3. EASP, London, 1986.
- /21/ Pritchard, G.: Developments in Plastic Technology – 5. EASP, London, 1986.
- /22/ Weichert, L.: Temperaturmessung in der Technik. Expert Verlag, Würth, 1981.
- /23/ Agassant, J. a kol.: Polymer Processing. Publishers Hausers, 1986.
- /24/ Gorbach, P.: Handbuch der Temperaturregelung mittels flüssiger Medien. Materiál fy Regloplas, Schweiz, 1986.
- /25/ Phuhař, J., Koritta, J.: Strojírenské materiály. SNTL, Praha, 1987.

- /26/ Krebs, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů. Skripta VŠST Liberec, 1991.
- /27/ Jenčík, J.: Technická měření. Skripta ČVUT Praha, 1981.
- /28/ Nová, I.: Měření teplotních polí a sledování hodnot termofyzikálních vlastností litinových slévarenských forem. Habilitační práce, TU Liberec, 1995.
- /29/ Nedess, Ch., Kosin, T.: Spritzgussteile schneller produzieren durch Simultaneous Engineering. Kunststoffe 11, 1992, s. 871 – 874.
- /30/ Thienel, P., Jehn, P.: Werkzeuge rechnerisch auslegen. Kunststoffe 4, 1992, s. 301 – 305.
- /31/ Schenk, R., Schroiff, V.: Deformation von Einlegeteilen beim Umspritzen simulieren. Kunststoffe 3, 1994, s. 244 – 246.
- /32/ Thienel, P., Schmidt, V.: Bei der Konstruktion von Spritzgiesswerkzeugen für thermoplastische Formteile. Kunststoffberater 5, 1993, s. 26 – 30.
- /33/ Nedess, Ch., Kosin, T.: Simulationsprogramme für Spritzgiessen auswählen. Kunststoffe 6, 1992, s. 464 – 468.
- /34/ Rahner, S.: Auffällige Aussenverkleidungen. Kunststoffberater 11, 1999, s. 23 – 28.
- /35/ Reisner, K.: Eine Frage der Systeme. Kunststoffberater 11, 1999, s. 31 – 33.
- /36/ Ferreti, M.: Spritzpress – simulationsverfahren verkürzt Entwicklungszeiten. Kunststoffberater 12, 1996, s. 12 – 14.
- /37/ Knauder, E., Langecker, R.: Simulationsprogram. Kunststoffe 11, 1995, s. 1894 – 1898.
- /38/ Bourdon, R.: Qualität beim Spritzgiessen planen und optimieren. Kunststoffe 10, 1991, s. 960 – 965.
- /39/ Blažek, Z., Hladík, J.: Galvanicky pokovované plasty. Plasty a kaučuk 5, 1999, s. 138 – 139.
- /40/ Walter, G.: Kunststoffe im Automobil. Kunststoffe 12, 1992, s. 1315 – 1317.
- /41/ Speckenheuer, G., Stracke, A.: Thermische Simulation eines Kunststoffhauses. Kunststoffe 5, 1993, s. 35 – 37.
- /42/ Reichert, P., Vlase, I.: Druckgeiervverfahren rechnergestützt optimieren. Kunststoffe 9, 1992, s. 840 – 843.
- /43/ Rossbach, R.: Temperierkanäle in Spritzgiesswerkzeugen auslegen. Kunststoffe 6, 1994, s. 713 – 716.
- /44/ Materiály fy Single: Regulování teploty nástrojů pro výrobu součástek z termoplastů. Wernau, 1978.
- /45/ Materiály fy Simcon: Injection Moulding. Aachen, 1991.
- /46/ Materiály fy Cisigraph: STRIM 100.
- /47/ Popovič, Š.: Současný stav českého průmyslu a jeho vyhlídky. Technický týdeník 36, 1999, s. 1, 3.
- /48/ Hermoso, G.: Hračka století. Quo 10, 1999, s. 135 – 142.
- /49/ DIN 53 455: Zkouška tahem plastů.
- /50/ PP KELTAN 2550/3: Materiálový list.
- /51/ Materiály fy Škoda Auto a.a.s.+ internetová stránka
- /52/ Materiály fy Engel a Arburg: Vstřikovací stroje a periferie.

Poděkování

Děkuji všem, kteří měli se mnou trpělivost, kteří mi věřili a kteří mi pomohli vytvořit velmi dobré pracovní podmínky pro vypracování mé habilitační práce.

Zároveň bych chtěl svou habilitační práci věnovat své dceři, která byla občas tím odříkaným a až druhým, svým rodičům a v neposlední řadě i panu Prof. Mikešovi.