



Europäische Union. Europäischer  
Fonds für regionale Entwicklung.  
Evropská unie. Evropský fond pro  
regionální rozvoj.



Ahoj sousede, Hallo Nachbar.  
Interreg V A / 2014–2020

Luboš Běhálek  
Jiří Habr

MODERNÍ PLASTY  
A VLÁKNOVÉ KOMPOZITY  
DÍL I.  
*VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ:  
MATERIÁLY A TECHNOLOGIE*



# Moderní plasty a vláknové kompozity

*Díl I. Vstříkování plastů: materiály a technologie*

---

Luboš Běhálek • Jiří Habr



Autoři: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.  
Ing. Jiří Habr, Ph.D.




Tato publikace byla vytvořena řešením projektu č. 100252772 „Přeshraniční kooperativní výuka technologií zpracování plastů Zittau – Liberec (GreK)“, který byl podpořen z prostředků Evropské unie (Evropského fondu pro regionální rozvoj) v rámci Programu spolupráce Svobodný stát Sasko – Česká republika 2014-2020.



Europäische Union. Europäischer  
Fonds für regionale Entwicklung.  
Evropská unie. Evropský fond pro  
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.  
Interreg V A / 2014 – 2020

*Partneři projektu:* Hochschule Zittau / Görlitz   
Technická univerzita v Liberci   
Technische Universität Dresden 

Recenzent: *doc. Ing. Jozef Dobránsky, Ph.D. – TU v Košicích (SR)*  
Editor: *Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.*  
Sazba, obálka: *Ing. Petr Weinlich, Ph.D.*

© Luboš Běhálek, Jiří Habr (Technická univerzita v Liberci) – 2019

**ISBN 978-80-7494-458-1**

# Předmluva

Plasty a jejich kompozity jsou materiály, které vznikly poměrně nedávno, rozšířily se neuvěřitelně rychle, jejich vývoj, společně s technologiemi jejich zpracování, pokračuje značným tempem a v řadě aplikací jsou jen velmi těžko nahraditelné. Plasty formují naši kulturu, hodnoty a schopnosti, přinesly revoluci v průmyslovém designu i umění, umožňují důmyslné aplikace, které by s klasickými kovovými materiály nebyly vůbec možné a v neposlední řadě se podílí i na lékařském pokroku a lidském zdraví. Jedná se o materiály, které se staly pojmem 20. století s progresivním přesahem do století současného. Hybnou silou jejich rozvoje se stalo dosažení nových materiálových limitů ve vlastnostech umožňujících jejich aplikaci i na vysoce mechanicky, tepelně a chemicky namáhané součásti ve strojírenství a biomedicíně. Odborné i mediální diskuse na téma plasty se stále více soustřeďují do oblasti ekologie, méně je zdůrazňován jejich přínos pro technický pokrok, zejména ve strojírenském a elektrotechnickém průmyslu. Ekologické námitky mají samozřejmě své opodstatnění a to zejména v obalovém průmyslu, v oblasti strojírenství nejsou příliš relevantní. Jedním z možných způsobů, jak přispět k řešení environmentálního hlediska v oblasti obalového a spotřebního průmyslu je vývoj polymerů s řízenou, resp. předurčenou dobou životnosti, tedy biologicky degradovatelných plastů.

S rozvojem plastů se ruku v ruce dynamicky rozvíjejí i technologie jejich zpracování. Nejrozšířenější technologií v tomto segmentu je vstřikování plastů, které je provázáno celou řadou inovativních způsobů.

První díl skript *„Moderní plasty a vláknové kompozity“*, který je určen pro studenty magisterského studia na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci a Vysoké školy v Žitavě/Zhořelci, se zabývá vlastnostmi, aplikacemi a technologií vstřikování perspektivních polymerních materiálů na bázi termoplastů. Cílem skript je rozšíření poznatků získaných v předcházející etapě studia, jejich obsahová náplň je výsledkem kooperace partnerských vysokých škol v oblasti výuky plastů a jejich kompozitů pro strojaře v Liberci a v Žitavě.

*Luboš Běhálek*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Polymerní materiály – úvod</b>	<b>1</b>
	<i>Luboš Běhálek</i>	
1.1	Speciální metalocenové polymery	5
1.2	Dodatečně síťované polymery	6
<b>2</b>	<b>Polymerní směsi</b>	<b>9</b>
	<i>Luboš Běhálek</i>	
<b>3</b>	<b>Vysoce výkonné polymery</b>	<b>16</b>
	<i>Luboš Běhálek</i>	
3.1	Fluoroplasty	16
3.2	Polyfenylensulfidy (PPS)	19
3.3	Polyftalamidy (PPA)	20
3.4	Aromatické polyamidy (MPIA; PPTA)	22
3.5	Polymery tekutých krystalů (LCP)	23
3.6	Polyaryletherketony (PAEK)	25
3.7	Polyfenylenethery (PPE)	27
3.8	Polysulfony (PSU)	28
3.9	Polyimidy (PI) a polyetherimidy (PEI)	29
3.10	Polyfenylensulfony (PPSU)	30
3.11	Polyamidimidy (PAI)	31
3.12	Polyethersulfony (PES), (PESU)	32
3.13	Polybenzimidazoly (PBI)	33
3.14	Elektricky vodivé (konjugované) polymery	34
<b>4</b>	<b>Biopolymery a biodegradovatelné plasty</b>	<b>38</b>
	<i>Luboš Běhálek</i>	
4.1	Polymery na bázi škrobu	40
4.2	Polyhydroxyalkanoáty (PHA)	41
4.3	Kyselina polymléčná (PLA)	42
4.4	Kyselina polyglykolová (PGA)	43
4.5	Syntetické oxo-biodegradovatelné polymery	43
4.6	Polyvinylalkohol (PVA)	44
4.7	Polykaprolakton (PCL)	45
<b>5</b>	<b>Technologie vstřikování</b>	<b>46</b>
	<i>Jiří Habr</i>	
5.1	Podstata technologie vstřikování	47

5.2	Vstřikovací stroj	49
5.2.1	Vstřikovací jednotka	50
5.2.2	Uzavírací jednotka	60
5.3	Výrobní proces vstřikovaného dílu	63
5.4	Procesní parametry vstřikování a jejich vliv na kvalitu dílu	66
5.4.1	Vstřikování a tlak v dutině formy	70
5.4.2	Vstřikovací tlak, dotlak, čas vstřiku a čas dotlaku	71
5.4.3	Plastikace materiálu	73
5.4.4	Bod přepnutí	78
5.4.5	Dotlak	80
5.4.6	Teplota formy	80
5.4.7	Doba chlazení	83
<b>6</b>	<b>Nekonvenční technologie vstřikování</b>	<b>85</b>
	<i>Jiří Habr</i>	
6.1	Technologie vstřikování strukturních pěn (lehčených dílů)	85
6.1.1	Vstřikování pomocí chemických nadouvadel	85
6.1.2	Vstřikování pomocí fyzikálních nadouvadel	88
6.2	Fluidní vstřikování	91
6.2.1	Vstřikování s podporou plynu	92
6.2.2	Vstřikování s podporou vody	94
6.3	Mikrovstřikování	96
6.4	Vícekomponentní vstřikování	98
6.5	Sendvičové vstřikování	104
6.6	Hybridní vstřikování – zastřikování	106
6.7	Vstřikování dílů s vysokým leskem	108
6.8	Vstřikování pevnostních dílů	110
6.9	Vstřikování práškových materiálů	113
6.10	Vstřikování tekutých materiálů	116
	<b>Použitá literatura</b>	<b>119</b>

## Poděkování

Zvláštní poděkování patří Ing. Pavlu Brdlíkovi, Ph.D. z Technické univerzity v Liberci za grafickou úpravu vybraných obrazových příloh v kapitole 5.

# 1

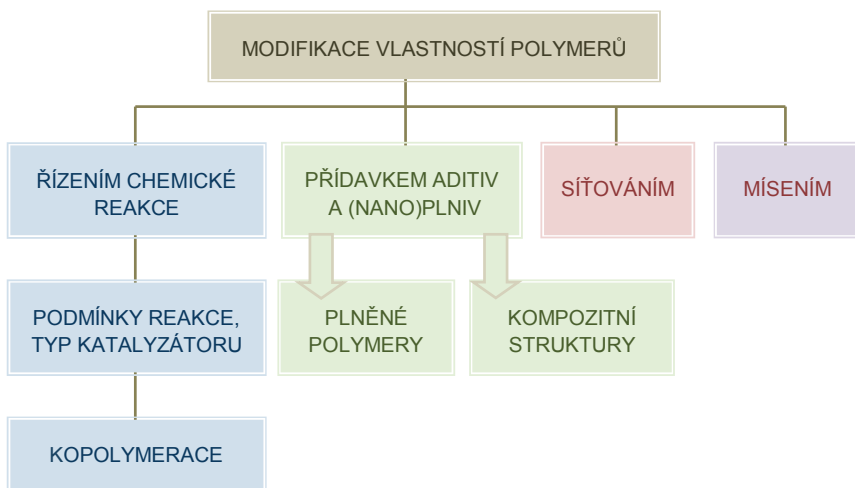
# POLYMERNÍ MATERIÁLY ÚVOD

**Polymerní materiály**, resp. *plasty* a jejich *kompozity* naplňují požadavky moderního strojírenství a díky svým vlastnostem nahrazují v mnoha případech kovové materiály. Vedle běžných typů plastů nacházejí stále větší praktické uplatnění *speciální inženýrské plasty*, označované také jako **vysoce výkonné konstrukční plasty**, určené pro náročné technické aplikace, a to i přesto, že jejich ceny jsou poměrně vysoké. Jejich klíčovým znakem je vynikající teplotní (> 250 °C) i chemická odolnost, dlouhá životnost, popřípadě biologická snášenlivost, přičemž s teplotní stabilitou polymeru jsou úzce spjaty také jeho mechanické vlastnosti. Patří sem např. *polysulfony* (PSU), *polyfenylsulfidy* (PPS), *polyetheretherketony* (PEEK), *polyimidy* (PI), *polybenzimidazoly* (PBI), *kapalně krystalické polymery* (LCP) ad. Mezi tyto materiály naopak nepatří reaktoplasty, jejichž teplotní odolnost nepřevyšuje 150 °C. Podrobněji o těchto materiálech pojednává kap. 3. Do praxe jsou zaváděny také stále více různé druhy polymerních směsí, odpovídající požadavkům současného strojírenství, nové typy aditiv a plniv, vyvíjeny jsou elektrovedivé plasty s vlastní vodivostí, cyklopolymery s vysokou teplotou skelného přechodu, biopolymery, polymery s tvarovou pamětí apod. Než se však začneme zabývat moderními a vysoce výkonnými polymery, připomeňme si vlastnosti běžných (komoditních) a inženýrských (konstrukčních) polymerů, o nichž jsou informace v odborných literaturách snadno dostupné.

V případě **komoditních plastů** jde v podstatě o čtyři skupiny: *polyethylen* (PE-HD, PE-MD, PE-LD, PE-LLD), *polypropylen* (PP), *polyvinylchlorid* (PVC) a *polystyren* (PS, PS-E). Podle údajů asociace zpracovatelů plastů „PlasticsEurope“ představují tyto čtyři skupiny 66 % roční produkce z celkového objemu výroby plastů v Evropě, který činí 50 mil. tun (ve světě 335 mil. tun). **Inženýrské plasty** jsou materiály, které mají výtečné mechanické vlastnosti i teplotní odolnost (> 150 °C) a oproti komoditním plastům jsou mnohem dražší (např. cena homopolymeru PP ve střední Evropě činila v roce 2018 průměrně 1,34 € za kilogram, zatímco cena nebarveného PA 6.6 ca 2,88 € za kilogram a PC ca 3,17 € za kilogram). Mezi inženýrské polymery patří jak reaktoplasty, tak termoplasty a to zejména *polyamidy* (PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12 ad.), *polymethylmethakrylát* (PMMA), *polyestery* (PET,

PBT), *polykarbonát (PC)*, *styrenové kopolymery (ABS, SAN, ASA)* ad. Typické fyzikální vlastnosti komoditních a inženýrských polymerů jsou uvedeny v tab. 1.1.

Hranice možného použití polymerů a jejich vlastnosti lze ve vztahu k aplikačním požadavkům rozšiřovat různými způsoby (viz obr. 1.1). Předně řízenou chemickou reakcí již při jejich výrobě s vhodnými typy katalyzátorů (tj. změnou molekulární struktury), viz příklad metallocenových polymerů (kap. 1.1), přípravou nových materiálů na bázi kopolymerů, přidavkem speciálních aditiv včetně nanoplniv, dodatečným síťováním řetězců lineárních a rozvětvených molekul polymerů (viz kap. 1.2), mísením stávajících polymerů (viz kap. 2), vytvářením kompozitních struktur, umožňující výrobu lehkých dílů s vysokými užitnými vlastnostmi nebo vývojem nových, tzv. vysoce výkonných plastů (viz kap. 3), které vyhovují náročným technickým aplikacím.



**Obr. 1.1** Možnosti modifikace vlastnosti polymerů v technické praxi





Tab. 1.1a Typické vlastnosti běžných (komoditních) a konstrukčních polymerů

Typ	Polymer	w (24 h) [%]	T <sub>g</sub> [°C]	T <sub>m</sub> [°C]	T <sub>p,max</sub> [°C]		ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	E <sub>t</sub> [MPa]	σ <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>bp</sub> [%]
					krátkodobá	dlouhodobá				
<b>Komoditní (běžné) polymery - termoplasty</b>										
K	PE-LD	< 0,01	-120	105 ± 115	80 ± 90	60 ± 75	0,914 ± 0,928	200 ± 500	8 ± 23	300 ± 1 000
	PE-HD	< 0,01	-120	130 ± 135	90 ± 120	70 ± 80	0,940 ± 0,960	700 ± 1 400	18 ± 35	100 ± 1 000
	PP'	0,01 ± 0,03	-15	160 ± 174	140	100	0,900 ± 0,907	1 100 ± 1 300	21 ± 37	20 ± 800
A	PVC-U	0,04 ± 0,40	60 ± 100	-	75 ± 100	65 ± 85	1,380 ± 1,550	1 000 ± 3 500	50 ± 75	10 ± 50
	PVC-P	0,15 ± 0,75	-50 ± -5	-	55 ± 65	50 ± 55	1,160 ± 1,350	1 ± 1 000	10 ± 25	170 ± 400
	PS	0,03 ± 0,10	95	-	60 ± 80	50 ± 70	1,050	3 200 ± 3 250	45 ± 65	3 ± 4
<b>Inženýrské (konstrukční) polymery – termoplasty</b>										
	PE-UHMW	< 0,01	-120	130 ± 135	90 ± 120	80	0,955 ± 0,960	550 ± 800	17 ± 35	50 ± 300
	POM	0,22 ± 0,25	-50	165 ± 185	110 ± 140	90 ± 110	1,410 ± 1,420	2 800 ± 3 200	62 ± 70	25 ± 70
	PET	0,30	75	250 ± 260	200	100	1,370	3 100	47	50 ± 300
	PBT	0,08	70	225 ± 230	165	100	1,310	2 000	40	15
K	PTFE	< 0,01	125 ± 130	327 ± 345	300	260	2,130 ± 2,200	410 ± 800	25 ± 36	300 ± 550
	ETFE	0,01 ± 0,03	-	255 ± 280	220	150	1,700	800 ± 1 100	35 ± 54	100 ± 350
	PA 6	1,30 ± 1,90	50	215 ± 225	140 ± 180	80 ± 100	1,130	1 400	70 ± 85	200 ± 300
	PA 6.6	1,20 ± 1,50	50	250 ± 260	170 ± 200	80 ± 120	1,140	2 000	77 ± 84	150 ± 300
	PA 11	0,30	45	188 ± 194	140 ± 150	70 ± 80	1,040	1 000	56	500
	PA 12	0,25	45	175 ± 180	140 ± 150	70 ± 80	1,020	1 600	56 ± 65	300
	SAN	0,20 ± 0,30	105	-	95	85	1,080	3 600	75	5
	ABS	0,20 ± 0,45	105	-	85 ± 100	75 ± 85	1,040 ± 1,060	1 900 ± 2 700	32 ± 45	15 ± 30
A	ASA	0,10 ± 0,40	110	-	85 ± 90	70 ± 75	1,040	1 800	32	40
	PMMA	0,10 ± 0,40	110	-	85 ± 100	65 ± 90	1,170 ± 1,200	2 700 ± 3 200	50 ± 77	2 ± 10
	PC	0,16	140 ± 150	-	160	135	1,200	2 100 ± 2 400	56 ± 67	100 ± 130
<b>Inženýrské (konstrukční) polymery – reaktoplasty</b>										
	PF	0,30 ± 1,20	> 150	-	140	110	1,400	5 600 ± 12 000	25	0,4 ± 0,8
	UF	0,40 ± 0,80	-	-	100	70	1,500	7 000 ± 10 500	30	0,5 ± 1,0
A	MF	0,10 ± 0,60	-	-	120	80	1,500	4 900 ± 9 100	30	0,6 ± 0,9
	UP	0,03 ± 0,50	> 60	-	200	150	2,000	14 000 ± 20 000	30	0,6 ± 1,2
	EP	0,05 ± 0,20	> 75	-	180	130	1,900	21 500	30 ± 40	4

A – amorfní polymer; K – semikrystalický polymer; w – absorpce vody za 24 hodin; T<sub>p,max</sub> – max. provozní teplota; T<sub>g</sub> – teplota skelného přechodu; T<sub>m</sub> – teplota tání; ρ – hustota; E<sub>t</sub> – modul pružnosti v tahu; σ<sub>m</sub> – pevnost v tahu; ε<sub>bp</sub> – poměrné prodloužení při přetžení (celková tažnost); 1 – komerční typ se stupněm izotakticity (90 ± 95) %

**Tab. 1.1b** Typické vlastnosti běžných (komoditních) a konstrukčních polymerů

Polymer (typ syntézy)	$a_{cu}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$a_{eA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Smiřštění [%]	LOI [%]	Cena <sup>4</sup> [€/kg]	Hlavní oblast použití
<b>Komoditní (běžné) polymery – termoplasty</b>						
Pm PE-LD	N	N	1,0 + 3,0	17 + 19	1,27 <sup>1</sup>	Fólie a desky (55%), domácí potřeby a hračky (16%)
Pm PE-HD	N	N	1,5 + 3,0	17 + 19	1,30 <sup>1</sup>	Latve (40%), domácí potřeby (35%), potrubi (10%)
Pm PP	N	3 + 17	1,3 + 2,5	17 + 18	1,34 <sup>2</sup>	Vlákna (30%), domácnost (15%), automotiv (15%)
Pm PVC-U	N	20 + 50	0,4 + 0,8	40 + 45		Potrubi (35%) fólie, desky (15%), podlahoviny (10%), izolace drátů a kabelů (5%), automotiv (5%)
Pm PVC-P	N		0,7 + 3,0	20 + 40		
Pm PS	5 + 20	2 + 2,5	0,4 + 0,7	17 + 18	1,47	Obaly, kontejnery (35%), domácnost, hračky (25%)
<b>Inženýrské (konstrukční) polymery – termoplasty</b>						
Pm PE-UHMW	N		4,0	17 + 18		Konstrukční díly s dobrými kluznými vlastnostmi
Pm POM	100	8	1,5 + 2,5	18	1,84	Ozubená kola, ložiska, šrouby, kryty přístrojů
Pk PET	N	4	1,6 + 2,0 (0,2 <sup>1</sup> )	23 + 25		Textil (61%), domácnost (18%), pneumatiky (10%)
Pk PBT	N	4	1,0 + 2,2	20 + 24		Strojní díly, elektrotechnika, drobné spotřebiče
Pm PTFE	N	13 + 15	0,01 + 0,06	95 + 96		Povlaky zařízení chemického průmyslu, izolace kabelů, elektrotechnika, povrchová úprava nádobí
Pm ETFE	N	N	0,02 + 0,06	30		
Pk PA 6	N	N	0,8 + 2,5	23 + 26	2,67	Strojní zařízení, automotiv, domácnost, textil, kord pneumatik, zdravotnictví
Pa PA 6.6	N	15 + 20	0,8 + 2,5	21 + 27	2,88	Automotiv (ovládací lanka, palivové vedení, rychlospojky), obaly, opláštění kabelů, zdravotnictví (katetry, krevní vaky)
Pk PA 11	N	30 + 40	1,0 + 2,0	21 + 26		
Pk PA 12	N	10 + 20	1,0 + 2,0	21 + 26		
Pm SAN	8 + 20	2 + 3	0,4 + 0,6	18 + 20	2,13	Domácí spotřebiče, elektrotechnika, automotiv
Pm ABS	70 + N	7 + 20	0,4 + 0,7	19	2,04	Potrubi (30%), automotiv (15%), kopírky, tiskárny
Pm ASA	N	18	0,4 + 0,7	19		Vnější části automobilů, venkovní aplikace, el. nářadí
Pm PMMA	18	2	0,3 + 0,8	19 + 20	3,09	Kryty přístrojů a svítidel, zasklívání, stavebnictví
Pk PC	N	20 + 30	0,6 + 0,7	30 + 34	3,17	Zasklení (37%), elektronika (15%), spotřebiče (15%)
<b>Inženýrské (konstrukční) polymery – reaktoplasty</b>						
Pk PF	> 6	> 1,5	0,2 + 0,8	-		Lepidla (34%), pojivo tkanin (19%), výlisky (8%)
Pk UF	> 6,5	> 2,5	0,5 + 0,8	-		Pojiva desek, papíru a tkanin (70%), výlisky (9%)
Pk MF	> 7,0	> 1,5	0,8 + 1,0	-		Nádobí, desky stůlů, pojiva, povlaky,
Pk UP	> 4,5	> 3,0	0,4 + 0,7	-		Galanterie, bižuterie, lepidla, nátěrové hmoty, pojivo
Pk EP	> 8	> 3,0	0,4 + 0,8	-		Povlaky (44%), kompozity (18%), podlahy (6%)

Pm – polymery; Pk – polykondenzace; Pa – polyadice; a<sub>cu</sub> – rázová houževnatost Charpy; a<sub>eA</sub> – vrubová houževnatost Charpy; LOI – limitní kyslíkové číslo; 1 – vsříkovací typ; 2 – homopolymer; 3 – amorfni podoba; 4 – průměrná cena ve střední Evropě (listopad 2018)

Pro **metallocenové katalyzátory** je typická přítomnost jednoho typu aktivních center (což se odráží v úzké distribuci molekulových hmotností polymerů) na rozdíl od běžných Ziegler-Nattových katalyzátorů (např. na bázi sloučenin Cr/SiO<sub>2</sub>, Ti/MgCl<sub>2</sub>), které obsahují více typů aktivních center s různou aktivitou a selektivitou. Vhodně volený metallocenový katalyzátor umožní připravit polymery se speciálními vlastnostmi, kontrolovat jejich mikrostrukturu (takticitu), molekulovou hmotnost a polydisperzitu, stejně tak jako další proměnné – například schopnost kopolymerovat jednotlivé komonomery, či jejich distribuci v polymerním řetězci.

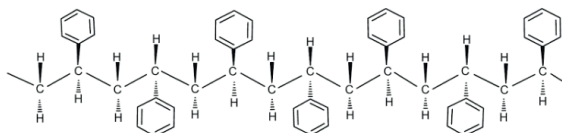


**Takticita** – uspořádání stereoizomerních center v hlavním řetězci polymeru (např. methylových skupin -CH<sub>3</sub> u polypropylenu nebo fenylových skupin C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>- u polystyrenu).

**Polydisperzita** – různá velikost makromolekul v polymeru.

Ke komerčním milníkům metallocenové katalýzy patří vývoj *lineárního nízkohustotního polyethylenu* (PE-LLD), *izotaktického a syndiotaktického polypropylenu* (iPP, sPP) a *syndiotaktického polystyrenu* (sPS), který se od standardního amorfního (ataktického) polystyrenu (PS-GP) liší tím, že fenylové kruhy se pravidelně střídají po stranách hlavního řetězce polymeru (viz obr. 1.2). Tato pravidelná struktura umožňuje jeho částečnou krystalizaci, což oproti standardnímu (amorfnímu) polystyrenu poměrně značně navyšuje jeho pevnost, tuhost, chemickou i teplotní odolnost ( $T_m = 270\text{ °C}$ ,  $T_g = 100\text{ °C}$ , dlouhodobá teplotní odolnost do  $130\text{ °C}$ ). Ve srovnání s konkurenčními plasty se vyznačuje nízkou dielektrickou konstantou (odpovídající fluoroplastům), která je v širokém rozsahu teplot a frekvencí prakticky konstantní a vysokou odolností plazivým proudům. Tyto vlastnosti jsou navíc dobře udržitelné ve vlhkém prostředí, což jej předurčuje pro konstrukční díly v automobilovém průmyslu i pro izolační materiál v elektrotechnice. První vyvíjený syndiotaktický polystyren na světě byl materiál pod obchodním označením *Xarec* (Idemitsu). Později byl na trh dodáván např. materiál *Questra* (Dow Chemical) a to i v podobě vyztužené skelnými vlákny (GF). Díky svým vlastnostem a příznivé ceně konkuruje PA 6.6, PBT, PET apod. Metallocenové katalyzátory umožňují také výrobu

téměř transparentního PP (např. *Metocene* od firmy LyondellBasell), u kterého se dosahuje (93 až 96) % transparence (vztaženo na transparentní PET, používaný pro výrobu nápojových lahví). V případě polyethylenu (PE) se metallocenových katalyzátorů používá pro jeho syntézu s úzkou distribucí molekulových hmotností (např. mLLDPE obchodního označení *Exceed* od firmy ExxonMobil). Materiál vykazuje mimořádnou pevnost, pružnost, odolnost a stabilitu při aplikaci v obalové technice.



**Obr. 1.2** Struktura syndiotaktického polystyrenu (sPS)

## 1.2

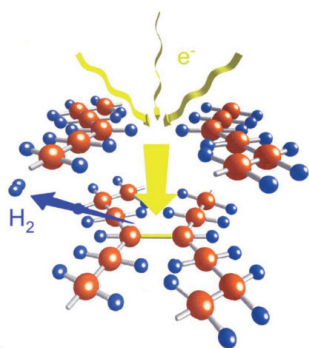
## Dodatečně síťované polymery

**Dodatečné síťování polymerů** je proces, při kterém se pomocí síťovacího činidla vytvoří příčné chemické vazby mezi lineárními nebo rozvětvenými makromolekulami za vzniku prostorové sítě. Vzhledem k ohromné délce makromolekul stačí přidavek zcela malého množství síťovacího činidla, aby molekulová hmotnost vzrostla nekonečně. Sesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost, tavitelnost, termoplastičnost a naopak získávají tvarovou stálost a vynikající mechanické vlastnosti na úrovni speciálních inženýrských polymerů. Molekuly síťovacího činidla mohou být součástí příčných vazeb, ale nemusí, v takovém případě síťující činidlo pouze přinutí reaktivní místa k vzájemnému spojení. První varianta nastává např. při síťování kaučuků sírou nebo při síťování polyethylenu silany a druhá při síťování termoplastů peroxidy (za zvýšené teploty se peroxid rozloží na volné radikály) nebo účinkem záření (UV záření, elektronového  $\beta$  nebo elektromagnetického  $\gamma$  záření).

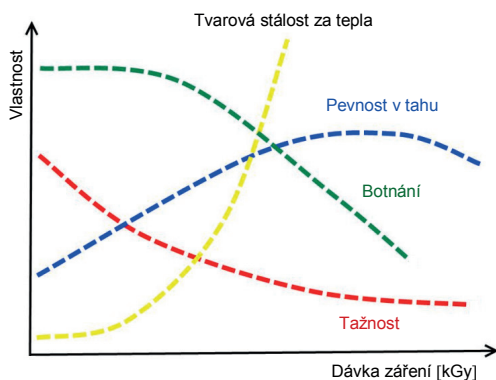
Při UV záření se úroveň síťování řídí přidáním fotoaktivních dopantů (na bázi mono- a dikarboxylových sloučenin), které vytvářejí volné radikály (převážně v amorfních oblastech) a následně sesíťovanou strukturu. Primární interakcí záření s polymerem je tvorba volných radikálů, která je následována sekundární reakcí,

zahrnující abstrakci atomu vodíku, tvorbu dvojných vazeb, síťování, štěpení řetězců apod. (základním předpokladem je, že bude převládat síťování).

Při radiačním síťování  $\beta$  zářením je polymer vystaven proudy emitovaných elektronů, dochází k aktivaci a ionizaci molekul v ozářeném materiálu. Pronikáním  $\gamma$  záření (paprsků fotonů) vznikají při interakci s prostředím sekundární (excitované) elektrony, které aktivují a ionizují molekuly ozářeného polymeru, dochází k rozpadu vazeb C-H, vznikají radikály, které spolu reagují a při následné chemické reakci vytvářejí očekávanou síťovanou strukturu spojováním volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C (viz obr. 1.3). Záření  $\gamma$  má oproti záření  $\beta$  vysokou schopnost penetrace při relativně nízké intenzitě dávky ozáření. Hlavním předpokladem je přítomnost tří a více funkčních monomerů. U některých polymerů je však potřebné síťovací činidlo. Ionizační záření při radiačním síťování upravuje vlastnosti komoditních a inženýrských polymerů a propůjčuje jim mechanické, tepelné a chemické vlastnosti vysoce výkonných konstrukčních plastů (viz obr. 1.4). K síťování dochází za standardní teploty a tlaku na hotových výrobcích, často bez nutnosti použití dalších přísad.



**Obr. 1.3** Princip radiačního síťování



**Obr. 1.4** Vlastnosti plastů v závislosti na dávce záření

Účinnost radiačního síťování je významně ovlivněna krystalickým obsahem, teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ) a chemickou strukturou polymeru, která určuje výtěžek polymerních radikálů. Jelikož k síťování dochází zejména v amorfních oblastech polymeru, zvyšuje se účinnost síťování s klesajícím stupněm jeho

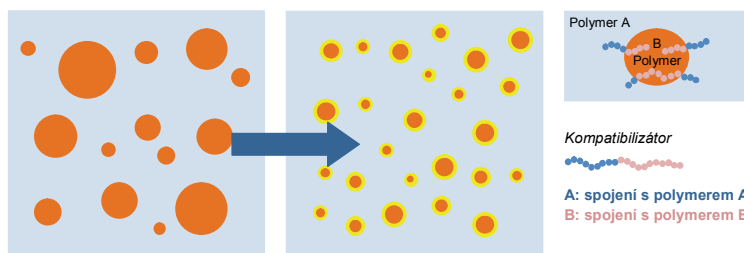
krystalinity. Obdobně se snadněji síťují flexibilní řetězce s dostatečnou vnitřní pohyblivostí. Zahřejeme-li polymer nad  $T_g$ , dostává se amorfni fáze do kaučukovitého stavu, kde dochází k vnitřním rotacím segmentů makromolekul a při ozařování snadněji k tvorbě příčných vazeb. Výtěžek volných radikálů, které vznikají štěpením postranního řetězce, závisí na pevnosti vazby (čím je vazba slabší, tím je výtěžek větší). Dalším důležitým faktorem je atmosféra při ozařování. Pokud jsou polymery ozařovány na vzduchu, může díky přítomnosti kyslíku a vlhkosti dojít k oxidaci polymeru, která podporuje jeho degradaci na úkor síťování. Proto je v některých případech nutné použít atmosféru bez kyslíku (vakuum nebo suchý inertní plyn), jako je tomu např. při síťování polytetrafluorethylenu (PTFE).

# 2

## POLYMERNÍ SMĚSI

**Polymerní směsi** tvoří podstatnou a stále rostoucí část polymerních materiálů a představují perspektivní způsob jak připravit materiál s unikátními kombinacemi vlastností na míru pro konkrétní aplikaci při optimálním poměru mezi cenou a vlastnostmi materiálu. Zavedení výroby nové polymerní směsi je podstatně méně nákladné a technologicky náročné než vývoj a zavedení výroby nového polymeru.

Základním předpokladem polymerních směsí je snadná mísitelnost materiálů. Mezi složkami směsi však většinou existuje velké mezifázové napětí, jedná se o tzv. *heterogenní směsi*, které jsou na rozdíl od *homogenních směsí* nemísitelné. Mezifázové napětí lze snížit pomocí vhodných *kompatibilizátorů*. Jedná se o látky, které zjemňují fázovou strukturu, zvyšují mezifázovou adhezi polymerních směsí a přispívají k jejich lepší homogenitě (viz obr. 2.1). **Kompatibilizátory** jsou obecně makromolekulární látky, jejichž řetězce obvykle obsahují objemnou strukturu, přičemž jedna část je mísitelná s jednou a druhá část s druhou složkou polymerní směsi (viz obr. 2.1). Tyto tzv. blokové struktury mohou být vytvořeny *in-situ* během procesu mísení nebo mohou být předpřipraveny a následně přidávány do nemísitelné polymerní směsi.



Obr. 2.1 Účinek kompatibilizátoru v polymerní směsi

První případ je vzorem **chemické kompatibilizace**, ve druhém případě se jedná o **fyzikální (aditivní) kompatibilizaci**. Chemické kompatibilizátory fungují na principu chemické reakce, příkladem je polymerní směs PET/PA, kdy dochází k reakci mezi esterovými konci PET a amidovými konci PA. K fyzikálním kompatibilizátorům patří

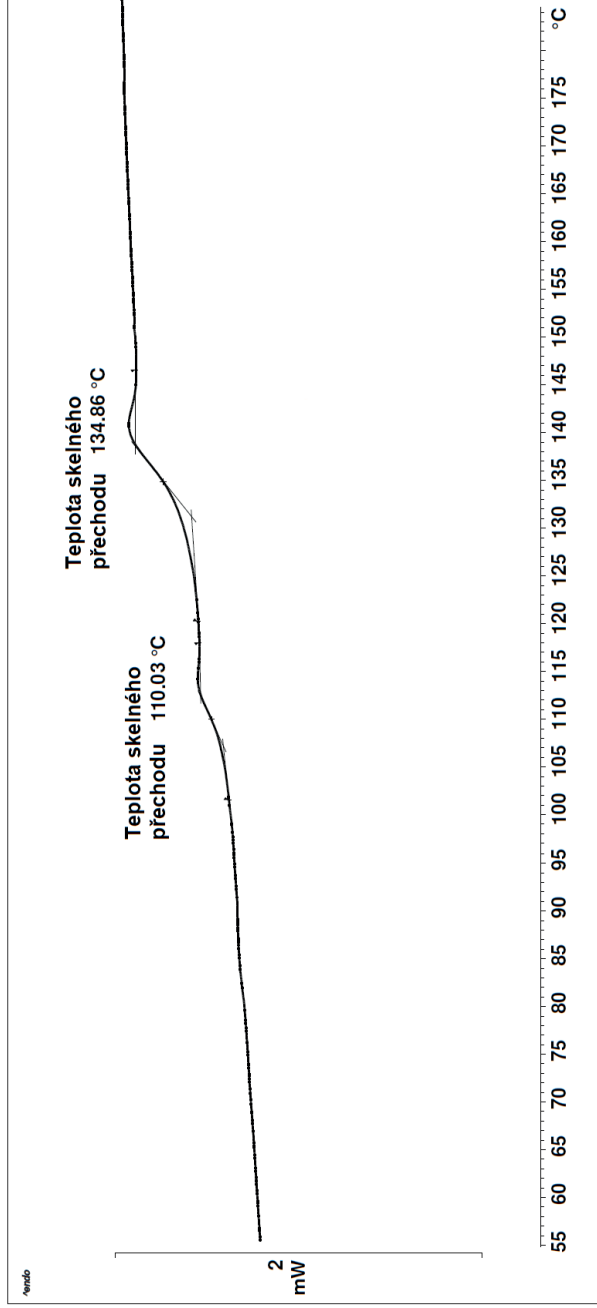
blokové nebo roubované kopolymery (polymer je roubován určitým monomerem), které v sobě obsahují bloky mísitelné se složkami směsi. Příkladem je polymerní směs PP/PA, kdy PP je nejdříve naroubován (graftován) monomerem, například anhydridem kyseliny maleinové, případně itakonové (PP-g-MA, resp. PP-g-IA), a až poté dochází k reakci s PA. Současný vývoj kompatibilizátorů umožňuje připravit směsi z nemísitelných polymerů, kombinovat polymery polární i nepolární, krystalizující i amorfní. Prostřednictvím větších mezimolekulárních sil v krystalických oblastech zajišťují semikrystalické polymery například vysoký modul pružnosti nebo dobrou chemickou odolnost, zatímco amorfní polymer může přispívat vysokou rázovou houževnatostí.

Podle vzájemné mísitelnosti lze polymerní směsi dělit do tří kategorií:

- **Směsi úplně mísitelných polymerů** s homogenní jednofázovou strukturou, jichž je menšina. Dobře známým příkladem je směs PS/PPO, která je mísitelná v širokém teplotním rozmezí. Tento typ směsi vykazuje pouze jednu teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ), která se nachází mezi teplotami  $T_g$  obou složek.
- **Směsi částečně mísitelných polymerů**, kde se malá část jedné složky směsi rozpustí v druhé (např. PC/ABS). Tento typ směsi, který vykazuje morfologii jemné fáze a vyhovující vlastnosti, je označován jako *kompatibilní*. Obě fáze směsi mají vlastní  $T_g$ , které jsou však posunuty z hodnot pro čistou složku směsi směrem k  $T_g$  druhé složky směsi, viz obr. 2.2.
- **Směsi nemísitelných polymerů** (heterogenní směsi) s ostrým rozhraním fázové struktury a špatnou adhezí mezi složkami ( $T_g$  odpovídá čistým složkám směsi). Příkladem jsou směsi PP/EPDM, PS/PP, PA/ABS, PA/PP, PA/EPDM, PA/PPO ad. Všechny tyto směsi se staly komerčně úspěšnými až po úspěšné kompatibilizaci.

Přehled komerčně významných polymerních směsí je uveden v tab. 2.1.





Obr. 2.2 Záznam DSC termogramu ve fázi ohřevu polymerní směsi PC/ABS (10 °C /min)


**Tab. 2.1a** Komerčně významné polymerní směsi

Směs	Charakteristika	Příklady aplikací
<b>Směs PP</b> – za účelem zvýšení rázové houževnatosti PP za nízkých teplot		
<b>PP/EPDM</b>	<p>Polypropylen (PP), který se vyznačuje teplotou skelného přechodu ca -15 °C, je reaktorově modifikován ethylen-propylenovým elastomerem (EPDM) za účelem poklesu <math>T_g</math> a tím zvýšení rázové houževnatosti za nízkých teplot při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti materiálu (<math>T_g</math> pro EPDM je ca -60 °C).</p>	
<b>PP/PE</b>	<p>Polyethylen (PE) se používá obdobně jako elastomer pro zlepšení rázové houževnatosti polypropylenu (PP) za nízkých teplot (PE má výrazně nižší teplotu skelného přechodu než PP, až -120 °C). Jedná se především o směsi PP s PE-LD nebo PE-LLD.</p>	
<b>PP/POM</b>	<p>Tato směs kombinuje dobrou rázovou houževnatost polypropylenu (PP), pevnost a tuhost polyoxymethylenu (POM). Obě dvě složky materiálu mají obdobnou viskozitu i teplotu tání (viz tab. 1.1).</p>	
<b>Směs PE</b> – za účelem zvýšení tuhosti PE		
<b>PE/PC</b>	<p>Polyethylen (PE) je mísen asi 5 hm. % polykarbonátu (PC), který se vyznačuje vysokým modulem pružnosti. Ve srovnání s PE získává polymerní směs vyšší tuhost, ale také vyšší odolnost vůči tepelné degradaci materiálu.</p>	
<b>Směs PS</b> – za účelem modifikací vlastností PS		
<b>PS/PP</b>	<p>Tato směs je především určena k výrobě dílů, kde se klade velký důraz na odolnost proti poškrábání, jednotný matný povrch a příjemný otmak (haptiku). Z ekonomického hlediska je výhodná náhrada lakovaných dílů z ABS nelakovanými díly ze směsi PS/PP, kde lakovací proces odpadá.</p>	
<b>PS/PPO</b>	<p>Směs kombinuje tepelnou odolnost a houževnatost polyfenylenoxidu (PPO) s dobrou zpracovatelností a nízkými náklady polystyrenu (PS). PS zlepšuje zpracovatelnost PPO. V kombinaci s plnivem se používá v konstrukci kancelářských zařízení.</p>	



Tab. 2.1b Komerčně významné polymerní směsi

Směs	Charakteristika	Příklady aplikací
<b>Směs PC</b>	– Za účelem eliminace sklonu ke korozi za napětí u PC a zvýšení jeho chemické i povětrnostní odolnosti	 
<b>PC/ABS</b>	Směs kombinuje velmi dobrou zpracovatelnost a odolnost proti korozi za napětí akrylonitril-butadien-styrenu (ABS) s vynikajícími mechanickými vlastnostmi, tepelnou a rázovou odolností polykarbonátu (PC). Vyváženost vlastností směsi se kontroluje poměrem PC a ABS ve směsi, molární hmotnosti PC a příslušnými aditivami. Směs vykazuje synergický efekt, který má za následek vynikající rázovou odolnost za nízkých teplot, která je lepší než rázová odolnost samotného ABS nebo PC. Směs se vyznačuje vysokou odolností proti korozi za napětí, která je u samotného PC velmi nízká.	
<b>PC/ASA</b>	Vlastnosti této směsi jsou obdobné jako u směsi PC/ABS, avšak díky akrylonitril-styren-akrylátu (ASA) se vyznačuje větší odolností vůči povětrnostním vlivům a UV záření, což ji předurčuje pro venkovní aplikace a také větší tepelnou stabilitou, která při jejím zpracování snižuje riziko degradace a žloutnutí materiálu.	  
<b>PC/PMMA</b>	Směs má díky přítomnosti polymethylmethakrylátu (PMMA) výbornou odolnost vůči povětrnostním vlivům a UV záření, ale sníženou rázovou a chemickou odolnost, která je jinak typická pro PC. Z praktického uplatnění obsahují směsi zpravidla 30 % PMMA a jejich vlastnosti jsou podobné směsi PC/ASA, avšak s tím rozdílem, že křipové vlastnosti a odolnost proti korozi za napětí jsou horší.	  
<b>PC/PBT (PET)</b>	Směs spojuje výhody polykarbonátu (30 + 70 % PC) s polyestery (20 + 60 % PBT nebo PET) a vyznačuje se výbornou rázovou odolností za nízkých teplot (vynikající absorpci energie při deformaci dílu), dobrou odolností vůči únavě, chemikáliím, palivům, olejem a dobrými elektrickými vlastnostmi. Vzhledem k nízké navlhavosti materiálu mají díly vynikající rozměrovou stabilitu.	  

Tab. 2.1c Komerčně významné polymerní směsi

Směs	Charakteristika	Příklady aplikací
<b>Směsi PA</b> – za účelem zvýšení houževnatosti, snížení vrubové citlivosti, teploty skelného přechodu a navlhavosti PA		
<b>PA/ABS</b>	<p>Polyamid (PA) poskytuje výbornou tepelnou a chemickou odolnost, dobré tahové vlastnosti, dobrou tekutost a výbornou lakovatelnost. Akrylonitril-butadien-styren (ABS) snižuje smršnění a navlhavost směsi, zlepšuje její rozměrovou stabilitu, zvyšuje houževnatost za nízkých teplot a odolnost korozi za napětí. Tepelná stabilita směsi je přibližně stejná jako u polykarbonátu (PC).</p>	
<b>PA/ASA</b>	<p>Akrylonitril-styren-akrylát (ASA) dodává polymerní směsi vyšší odolnost povětrnostním podmínkám a UV záření, zajišťuje rázovou houževnatost, barevnou stálost a vzhled matného povrchu.</p>	
<b>PA/EPDM</b>	<p>Jedná se o typ směsi na bázi polyamidu (PA) se zvýšenou houževnatostí, která je typická pro ethylen-propylenový elastomer (EPDM), přičemž se využívá vysoké tepelné a tvarové stability PA za vysokých teplot, jeho dobrých mechanických vlastností a odolnosti vůči radiálnímu záření. Komerčně využívané směsi PA/EPDM obvykle obsahují (10 ÷ 25) % elastomeru.</p>	
<b>PA/PP (PE)</b>	<p>Vlastnosti směsi jsou podobné polyamidům (vysoká pevnost a tuhost), avšak díky modifikaci polypropylenem (PP) nebo polyethylenem (PE-HD, PE-LLD) má zvýšenou houževnatost, nižší navlhavost i cenu. Vzhledem k nižší navlhavosti mají díly větší rozměrovou stálost, vyšší tuhost, odolnost vůči oděru a stále mechanické vlastnosti. Komerční směsi obsahují zpravidla kolem 30 % PE.</p>	
<b>PA 6 /PA 6.6</b>	<p>Směs kombinuje vlastnosti jednotlivých složek: výbornou rázovou houževnatost, tlumící vlastnosti, lepší zpracovatelnost, nižší smršnění a lepší kvalitu povrchu polyamidu 6 (PA 6) s nižší sorpcí vody, vyšší teplotní odolností, vyšší tuhostí, lepší odolností proti oděru a odolností hydrolytickému rozkladu polyamidu 6.6 (PA 6.6). Směs vykazuje nižší stupeň krystalinity než samotný PA 6.</p>	
<b>PA 6 / aPA</b>	<p>Směs polyamidu 6 (PA 6) s amorfním polyamidem (aPA) se komerčně využívá za účelem zlepšení transparentnosti materiálu a zvýšení jeho odolnosti vůči oxidaci a UV záření.</p>	

Tab. 2.1d Komerčně významné polymerní směsi

Směs	Charakteristika	Příklady aplikací
<b>PA / PPO</b>	Směs kombinuje výborné tokové vlastnosti polyamidu (PA) a jeho dobrou zpracovatelnost s nízkou absorpcí vlhkosti, tepelnou a rozměrovou stabilitou polyfenylenoxidu (PPO). Rázová houževnatost směsi nicméně není tak vysoká jako u směsi PC/PBT.	
<b>Směsi POM</b>	– za účelem zvýšení houževnatosti, snížení vrubové citlivosti, teploty skelného přechodu a navlhavosti POM	
<b>POM/PTFE</b>	Polymerní směs kombinuje výborné vlastnosti polyoxymethylenu (POM) a polytetrafluorethylenu (PTFE). POM je vysoce krystalický polymer a tomu odpovídají jeho vlastnosti: výborná tuhost, odolnost vůči únavovému namáhání, odolnost vůči rozpouštědům, odolnost křepu a vysokým teplotám. Přestože se POM vyznačuje vysokým součinitelem tření, lze jej dále snížit přidávkem PTFE, který navíc zvyšuje odolnost směsi proti opotřebení.	
<b>POM/EPDM (EVA)</b>	Polyoxymethylen (POM) vyniká výbornými pevnostními charakteristikami, avšak špatná odolnost proti rázům omezuje jeho rozsah použití. Mícháním s ethylen-propylenovým elastomerem (EPDM) nebo ethylen-vinylovým-acetátem (EVA) za přítomnosti kompatibilizátoru je vytvořena směs se zvýšenou houževnatostí, aniž by došlo k významnému ovlivnění typických vlastností POM.	
<b>Směsi polyesterů</b>		
<b>PET/PBT</b>	Směs vykazuje zvýšenou krystalizaci, lepší lesk, větší rázovou pevnost než samotný PET, který pomalu krystalizuje.	
<b>PET/PMMA</b>	Směs vykazuje nižší deformaci a smrštění než samotný polyethylentereftalát (PET) a nižší cenu než polymethylmethakrylát (PMMA). Použití nalézá v elektronice a elektrotechnickém průmyslu.	
<b>PBT/ASA</b>	Přidávkem akrylonitril-styren-akrylátu (ASA) se zlepšuje odolnost polybutylenotereftalátu (PBT) vůči povětrnostním vlivům a UV záření.	
<b>PBT/PPO</b>	Směs kombinuje vhodné vlastnosti obou materiálů, velkou pevnost, nízkou navlhavost a vykazuje vysokou tepelnou odolnost a rozměrovou stabilitu jako vysoce výkonný plast PPE.	

**Vysoce výkonné konstrukční polymery** jsou skupinou materiálů, která je předurčena především pro náročné technické aplikace. Netýká se to jen teplotní stability, mechanických vlastností a chemické odolnosti, ale také jejich funkčních vlastností, které jsou ovlivňovány přidávkou speciálních aditiv (např. kontrastními prostředky, které činí materiál nepropustným rentgenovému záření, uhlíkovými nanotrubičkami s grafitizovanou strukturou povrchu, zajišťující vysokou elektrickou vodivost polymeru při zachování výhodných vlastností matrice apod.). V následujícím textu je uveden přehled některých významných materiálů z této oblasti, které mohou být z hlediska nadmolekulární struktury v amorfním nebo semikrystalickém stavu. Největší podíl na trhu mají fluoropolymery (45 %), aromatické polymery obsahující síru (především PPS - 20 %), aromatický polyarylether, polyketony (10 %), zejména PEEK a polymerní kapalně krystalizující LCP (6 %). Největším průmyslovým zastoupením těchto materiálů je elektrotechnický (41 %) a automobilový (24 %) průmysl.

## 3.1

### Fluoroplasty

*Fluoroplasty* jsou **semikrystalické materiály**, které obsahují v makromolekulách atomy fluoru. Vyrábí se jich průmyslově celá řada, přesto převážnou část produkce zaujímá **polytetrafluorethylen (PTFE)**, který je vyráběn polymerací z *plynného tetrafluorethylenu* a vyznačuje se **nejnižším součinitelem tření** ze všech polymerů ( $\mu_s = 0,02$ ) a nejvyšší odolností vůči chemikáliím. Mezi další fluoroplasty patří např. *ethylen-tetrafluorethylen (ETFE)*, *polyvinylidenfluorid (PVDF)*, *polychlorotrifluorethylen (PCTFE)*, *tetrafluorethylen-perfluoralkylvinyleter (PFA)*, *tetrafluorethylenhexafluoropropylén (FEP)* a *tetrafluorethylen-perfluor-metylvinylether (MFA)*.

Pro všechny fluoroplasty je charakteristická vysoká **chemická odolnost**, **vynikající tepelná zatížitelnost** (až 290 °C), dobré elektroizolační vlastnosti a **vysoká odolnost hoření**, jsou samozhášivé (nejvíce ze všech polymerů; LOI = až 96 %). Mimořádná kombinace vynikajících vlastností je výsledkem molekulové

struktury. Základní porovnání vlastností komerčně dostupných fluoroplastů je zřejmé z tab. 3.1.

**Tab. 3.1** Typické vlastnosti fluoroplastů

Vlastnost	PTFE	ETFE	PCTFE	PVDF	PFA
Chem. složení	$[-C_2F_4-]_n$	$[-C_4H_4F_4-]_n$	$[-C_2F_3Cl-]_n$	$[-C_2H_2F_2-]_n$	$[-C_2F_4-]_n[-C_3F_6O-]_m$
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,14 ÷ 2,20	1,65 ÷ 1,70	2,09 ÷ 2,16	1,75 ÷ 1,80	2,12 ÷ 2,17
w (24 h) [%]	0,005 ÷ 0,01	0,01 ÷ 0,03	0,01 ÷ 0,05	0,01 ÷ 0,05	0,01 ÷ 0,03
$T_m$ [°C]	327 ÷ 345	255 ÷ 280	210 ÷ 212	170	300 ÷ 310
$T_p$ [°C]	-200 ÷ 260	-100 ÷ 150	-250 ÷ 175	-40 ÷ 150	-150 ÷ 260
$\sigma_m$ [MPa]	25 ÷ 36	35 ÷ 54	31 ÷ 40	35 ÷ 50	25 ÷ 31
$E_i$ [MPa]	400 ÷ 800	800 ÷ 1100	1200 ÷ 1600	1500 ÷ 2200	480 ÷ 800
$\epsilon_{tb}$ [%]	300 ÷ 550	100 ÷ 350	100 ÷ 250	20 ÷ 50	260 ÷ 300
$\mu_s$ [-]	0,02	0,4		0,2 ÷ 0,4	0,05 ÷ 0,08
LOI [%]	95 ÷ 96	30	90 ÷ 95	44 ÷ 83	95 ÷ 96
Sklon ke krípu	+++	+	+	+	++
Odolnost záření o vysoké energii	NE	ANO	ANO	ANO	ANO

+++ = vysoký stupeň; ++ = střední stupeň; + = nízký stupeň



Jedním z četných testů hodnocení hořlavosti polymerů je test na limitní kyslíkové číslo „LOI“, které vyjadřuje nejnižší potřebnou koncentraci kyslíku, která bude podporovat a udržovat jeho hoření. Vzduch obsahuje ca 21 % kyslíku, takže polymer s LOI < 21 % je na vzduchu silně hořlavý. Polymery s LOI > 21 % mají sníženou schopnost hoření a polymery s LOI > 28 % označujeme jako samozhášivé (nehořlavé).

Jedna z mála nevýhod PTFE je, že **neodolává vysokoenergetickému záření** (dochází k jeho depolymerizaci) a **nedá se zpracovávat běžnými technologiemi** pro plasty, ale zpracovává se lisováním prášku za standardní teploty při tlacích (15 ÷ 40) MPa s následnou sintrací v pecích za teplot (360 ÷ 380) °C (nad 400 °C dochází k jeho rozkladu). Rychlost chlazení vylisku po sintraci silně ovlivňuje jeho vlastnosti. Materiál se dá zpracovávat také vytlačováním prášku nebo pasty, která se vytvoří pomocí maziva, které je nutné před sintrováním odstranit účinkem tepla nebo vyextrahováním pomocí rozpouštědla. Tímto způsobem se vyrábí trubky nebo různé profily. PTFE se používá především na adhezni vrstvy, k antikorozní ochraně,

k výrobě trubek, těsnění, izolaci drátů a kabelů, pro konstrukční díly lékařských přístrojů a pro potravinářský průmysl.

**Kopolymer ETFE** se vyrábí polymerací *tetrafluorethylenu s ethylenem*. **Vykazuje vysokou transparentnost** (až 97 %, vyšší než PC či PMMA) a je velmi podobný sklu. Je dobře chemicky odolný, avšak **neodolává účinku kyselin, které obsahují v molekule chlor**. Ze všech fluoroplastů má nejnižší odolnost vůči hoření (LOI = 30 %). Na rozdíl od PTFE **odolává radiativnímu a UV záření** a lze zpracovávat běžnými technologiemi, především vstřikováním a válcováním. Tento polymer se používá převážně ve formě fólií a desek např. k zastřešování bazénů a sportovních center (nahrazuje plošné skla), pro ventily v chemickém průmyslu nebo jako izolační materiál v elektrotechnice ad.

**Lineární polymer PCTFE** se připravuje polymerací z *plynného chlortrifluorethylenu*, je mírně mléčně zakalený, má vysoký sklon ke křehnutí (nutno modifikovat), ve srovnání s PTFE lze zpracovávat běžnými plastikářskými technologiemi, je odolný vůči působení vysokoenergetickému záření, má vyšší tvrdost a pevnost a téměř srovnatelné antiadhezní vlastnosti. Používá se pro konstrukční díly potrubí, obložení nádrží, těsnění, ad. Využívají se i jeho disperze na vytvoření ochranných povlaků kovových materiálů.

**Kopolymer PFA** se vyrábí polymerací *tetrafluorethylenu s perfluoroalkylvinyletherem*, který je zde v malém množství (do pěti molárních procent). **Vlastnosti jsou podobné PTFE, odlišuje se hlavně zpracováním, neboť lze zpracovávat z taveniny**. Jedná se o **transparentní materiál** (až 93 %) s vysokou odolností korozi za napětí. Kopolymery PFA, ale také MFA a FEP sdružují v sobě všechny vynikající vlastnosti PTFE, pouze se liší teplotou trvalého použití: PFA (260 °C), MFA (250 °C) a FEP (205 °C). Tyto polymery se používají převážně ve formě fólií nebo trubek, lze je využít také k povlakování kovů a pro elektroizolace.



Obr. 3.1 Příklady aplikací fluoroplastů



Lineární polymer **PVDF** se získává polymerací z *vinylidenfluoridu*, má velmi dobré mechanické vlastnosti, **nejvyšší tuhost** (modul pružnosti) **ze všech fluoroplastů**, odolává povětrnostnímu stárnutí i vysokoenergetickému záření a to více než PCTFE. Ve srovnání s PTFE je nejen tužší, ale také tvrdší a zpracovává se běžnými technologiemi termoplastů. Ve srovnání s jinými fluoroplasty je jeho předností nízká hustota při velmi dobrých mechanických vlastnostech. Používá se k obložení ocelových nádrží a nádrží ze skelných laminátů, pro tělesa čerpadel, ventilů, pro kluzné součásti apod.

## 3.2

### Polyfenylensulfidy (PPS)

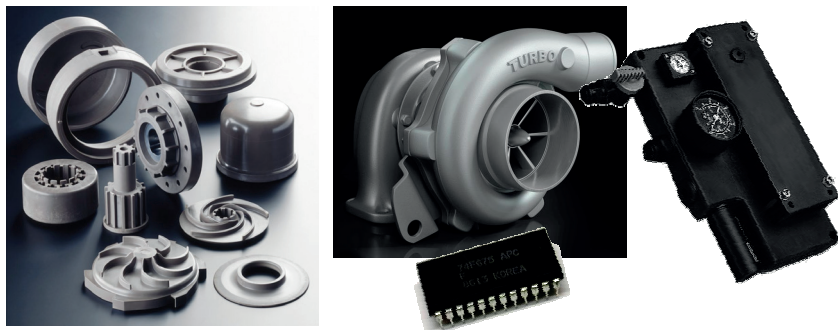
*Polyfenylensulfidy* (PPS) jsou **hydrofobní**, samozhášivé (LOI = 43 ÷ 47 %), **semikrystalické termoplasty**, které se vyrábí polykondenzační reakcí zpravidla za zvýšených teplot a tlaků z látek, kterými jsou *para-dichlorbenzen* a *sulfid sodný*. Reakce je prováděna obvykle v polárních rozpouštědlech, následně se pomocí hydrogenační reakce odstraňuje chlorid sodný.

Předností těchto materiálů je **vynikající teplotní** a především **chemická odolnost** (lepší než u oceli) a to i za zvýšených teplot. Dlouhodobě jej lze použít do teploty (200 ÷ 220) °C. Tepelná degradace začíná až při teplotách nad 430 °C. Rozpustné jsou pouze v aromatických chlorovaných uhlovodících (1-chlornaftalenu) za teploty nad 200 °C. Pod touto teplotou není známé žádné rozpouštědlo, které by narušilo jejich molekulární strukturu.

PPS jsou velmi dobré elektrické izolátory i při zvýšených teplotách, dielektrická pevnost je zachována až do 200 °C. Používá se proto především v oblasti elektrotechniky a elektronických součástí, pro díly pump, tiskáren, LCD projektorů, v automobilovém průmyslu na součástky motorů nebo k povlakování ocelových či hliníkových součástí čerpadel apod.

PPS vykazují dobré mechanické vlastnosti (viz tab. 3.4), výbornou odolnost proti oděru a nízký sklon ke krípu. Při dopadu dílu na zem vyvolá „kovový“ zvuk. Přídavek PPS k fluoroplastům zvyšuje jejich odolnost krípkovému chování a abrazi, při zachování jejich chemické a teplotní odolnosti. V této podobě je využíván při výrobě trubek či vysoce odolných bovdenů. Mezi další aplikace patří membrány palivových článků a filtrování ozonu práškem (sulfidové skupiny v kontaktu s ozonem oxidují

a neutralizují ozon). Při slunečním svitu PPS mírně degradují v důsledku UV záření, proto je nutné je stabilizovat činidly typu HALS (stericky stíněnými aminy).



**Obr. 3.2** Příklady aplikací polyfenylsulfidů (PPS)  
(stavební díly čerpadel, turbodmychadla, vývěvy, díly mikroelektroniky)

Vzhledem k **nízké viskozitě** PPS je lze snadno zpracovávat s vyztužujícími plnivý, viz tab. 3.4. Materiály PPS jsou s ohledem na jejich elektrickou vodivost, pevnost a rázovou houževnatost velmi efektivní v kombinaci s uhlíkovými nanotrubicemi, které zvyšují viskozitu taveniny a nelze je tak použít u polymerů s vysokou viskozitou.

Při zpracování PPS dochází k vývinu korozivních plynných produktů, což může mít negativní vliv na vybrané součásti zpracovatelských zařízení (formy, šneky, tavicí komoru apod). Antikorozní ochrana těchto součástí by byla příliš nákladná, proto se používá tzv. PAS polymerů - směsí PPS s různými antikorozními inhibitory v množství do 0,1 % (např. uhlíčanem vápenatým, oxidem zinečnatým ad.). Nejedná se ovšem o dokonalé řešení. Zpravidla platí, že čím vyšší antikorozní účinek, tím více se zhoršují jejich mechanické vlastnosti (pevnost, tuhost). PPS vykazují také vysokou adhezi k oceli, což má za následek problémy při odformování vstříkovaných dílů. Za tímto účelem se materiál aditivuje různými odformovacími činidly, estery mastných kyselin apod.

### 3.3

### Polyftalamidy (PPA)

*Polyftalamidy* (PPA) jsou **semiaromatické polyamidy** s aromatickými kruhy v páteřních řetězcích, což jim dává velkou mechanickou pevnost a teplotní odolnost.

Vyrábí se reakcí *aromatických kyselin s alifatickými diaminy*. Označení polyftalamid se používá obvykle tehdy, pokud je více než 60 mol. % kyselinové části opakující se jednotky v řetězci složeno z kombinace tereftalové (T) a isoftalové (I) kyseliny. Vzniklý PPA **může být amorfní nebo semikrystalický**, v závislosti na kombinaci použitých monomerů. Pokud je více než 55 % kyselinové části PPA složeno z isoftalové kyseliny, je vzniklý kopolymer (PA 6 I) amorfní. Semikrystalické PPA jsou založeny na PA 6T a získávají se kondenzací tereftalové kyseliny a hexamethylendiaminu. Ve srovnání s běžnými (alifatickými) polyamidy PA 6 a PA 6.6 mají obecně vyšší pevnost, lépe odolávají křípu a cyklickému namáhání, mají vyšší teploty skelného přechodu a tání (viz tab. 3. 2), lepší tepelnou stabilitu, chemickou i hydrolytickou odolnost. Teplota skelného přechodu stoupá se zvyšujícím se obsahem kyseliny tereftalové.

**Tab. 3.2** Typické vlastnosti alifatických PA a semiaromatických PPA

Polymer	T <sub>g</sub> [°C]	T <sub>m</sub> [°C]	w (24 h) [%]	T <sub>p,max</sub> [°C]	E <sub>t</sub> [°C]	σ <sub>m</sub> [°C]
PA 6	50	215 ÷ 225	1,3 ÷ 1,9	100	1400	70+85
PA 6.6	50	250 ÷ 260	1,2 ÷ 1,5	120	2000	77+84
PPA (*čistý PA 6T)	92 ÷ 140*	310 ÷ 370*	0,36 ÷ 0,75	140	3700	85
PPA + 45GF			0,11 ÷ 0,13	190	17 100+17 300	230

Vzhledem k jejich vlastnostem a ceně **představují jakýsi kompromis mezi tradičními konstrukčními plasty a speciálními materiály**. Uplatnění nachází v nejnáročnějších aplikacích automobilového průmyslu. Typickými příklady jsou díly chladicího okruhu, palivového systému, vzduchového sání a vytápění (viz obr. 3.3).



**Obr. 3.3** Příklady aplikací polyftalamidů (PPA) - díly automobilového průmyslu

Nejvýznamnějšími a nejrozšířenějšími typy polyamidů jsou polyamidy s alifatickými řetězci (PA 6, PA 6.6, PA 4.6, PA 11 apod.), které se uplatňují jako konstrukční plasty. Na trhu jsou však dostupné i *aromatické typy polyamidů*, dodávané především ve formě vláken a označované jako **aramidy**, které se získávají polykondenzací *chloridů aromatických dikarboxylových kyselin* a *aromatických diaminů*. Mohou být dodávány také ve formě aramidového papíru, „včelí“ plástve (pro aplikace v kosmonautice), nebo fólií.

Mezi aromatické polyamidy patří např. poly (m-fenylen isoftalamidy): tzv. **Meta-aramidy**, zkráceně MPIA, dodávané např. firmou DuPont pod obchodním názvem *Nomex*, či poly (p-fenylen tetraftalamidy): tzv. **Para-aramidy**, zkráceně PPTA, které dodává firma DuPont pod obchodním označením *Kevlar*.

*Nomex* je pevný materiál, který je dobře oteřuvzdorný. Nedá se zpracovávat běžnými technologiemi, protože netaje. Nad teplotou 370 °C dochází k jeho rychlému rozkladu. Zpracovává se pouze lisováním nebo přímo zvlákňováním z polymerního roztoku, který je výsledkem polykondenzační reakce monomerů při jeho syntéze. Z dlouhodobého hlediska je trvale odolný teplotám (200 až 250) °C, krátkodobě 300 °C.

*Kevlar* je krystalický polymer, který se dá trvale používat do 260 °C. Jeho zvláštností je, že nemá teplotu tání, pouze nad teplotou 400 °C dochází k jeho sublimaci. Absorpce rázové energie (způsobené např. střelou) je 4x vyšší než u běžných polyamidů. Para-aramidové aplikace zahrnují proto především balistickou ochranu, vyrábějí se z nich neprůstřelné vesty.

Díky plně aromatické struktuře se aromatické polyamidy vyznačují **výjimečnou tepelnou odolností, odolností vůči hoření i chemikáliím, ultravysokou pevností a tuhostí** (pevnost para-aramidových vláken v tahu je srovnatelná s některými typy ocelí nebo větší, viz tab. 3.3), proto se používají k výrobě ochranných obleků a neprořiznutelných rukavic. Aramidová vlákna odolávají ionizačnímu záření, vyznačují se minimálním krípem a při opakovaném namáhání v tlaku a ohybu si zachovávají svoji pevnost.

Uplatňují se např. jako izolační filmy v letecké a vojenské technice, aramidová vlákna jsou využívána jako výztuž pneumatik, dopravních pásů, pneumatických pružin a dalších vysokopevnostních kompozitů, používají se k výrobě lan, na stavbu

trupu lodí a letadel (např. kryogennické palivové nádrže – aplikace ve vesmíru), cyklistických kol, k výrobě startovacích kabelů, hnacích, převodových řemenů, high-tech sportovního náčiní a také jako optická vlákna, viz obr. 3.4. Aramidy slouží rovněž jako náhrada protihořlavého, karcinogenního azbestu.



**Obr. 3.4** Příklady aplikací aramidů (MPIA, PPTA)  
(aramidové příze se skleněnými nitěmi, optická vlákna, neprůstřelné vesty, výztuže při stavbě trupu letadel)

Stejně jako většina polymerů jsou i aramidy **citlivé na UV záření**, při dlouhodobé expozici dochází ke změně zbarvení (od žluté po hnědou) a ke ztrátě mechanických vlastností. Materiály **vykazují vysokou absorpci vlhkosti**.

**Tab. 3.3** Typické vlastnosti Kevlarových přízí

Para-aramidy	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_t$ [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_{tb}$ [%]	Absorpce vlhkosti [%]
Kevlar 29 (nízkomodulový)	1,44	83 000	3 600	3,6	3,5
Kevlar 49 (vysokomodulový)	1,44	124 000	3 600	2,4	7

### 3.5

### Polymery tekutých krystalů (LCP)

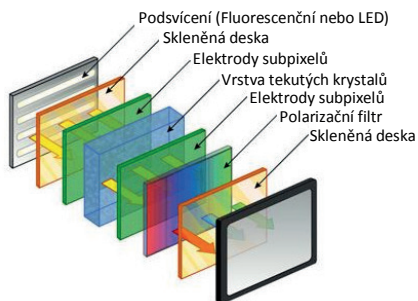
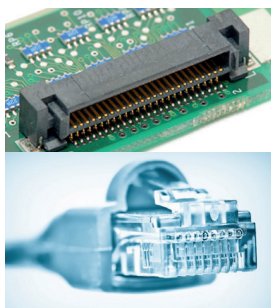
*Polymery tekutých krystalů* (LCP) se od standardních plastů liší svojí zvláštní molekulární strukturou v tavenině, která se sestává z **rigidních (tuhých) tyčinkovitých makromolekul** (s rostoucí tuhostí řetězce roste i teplota tání), jež jsou **ve fázi taveniny vysoce orientované** (na rozdíl od makromolekul běžných plastů) a vytvářejí struktury tekutých krystalů. Ochlazením taveniny se uskutečňuje její přechod do pevné fáze se zachováním kapalněkrystalického stavu (krystalický stav zvyšuje pevnost a tuhost materiálu). Prvním komerčně využívaným

kapalněkrystalickým polymerem byl aromatický polyamid Kevlar firmy DuPont. Materiály LCP lze zpracovávat běžnými metodami, které se u termoplastů používají.

Jedinečná molekulová struktura LCP má za následek několik výjimečných vlastností:

- výbornou rozměrovou stálost i za vyšších teplot (**nasákavost** za 24 hodin: **0,03 %**),
- **mimořádnou tepelnou odolnost** a to i při velmi malých tloušťkách stěny (teplotní oblast použití: -200 °C až 250 °C),
- vysokou odolnost vůči chemikáliím a to i za zvýšených teplot (neodolávají koncentrovaným minerálním kyselinám či zásadám),
- **velmi vysokou tuhost** a to i u tenkostěnných dílů (viz tab. 3.4),
- **nízký součinitel teplotní roztažnosti** ( $0,3 \div 0,7$ ) · 10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>, téměř jako skla nebo keramika,
- přirozené samozhášející vlastnosti (působí jako zpomalovače hoření).

Orientace tekutých krystalů může být ovlivněna elektrickým polem, to je velice zajímavé pro LCD displeje. Některé tekuté krystaly navíc v určitém teplotním intervalu spontánně elektricky polarizují za absence vnějšího elektrického pole – jedná se o tzv. ferroelektrika.



**Obr. 3.5** Příklady aplikací polymerních kapalných krystalů (LCP)  
(díly elektroniky, LCD displeje)

Typické vlastnosti LCP jsou uvedeny v tab. 3.4. Vzhledem k teplotě tání ca 330 °C jsou použitelné při dlouhodobém zatížení do teploty 250 °C, krátkodobě až 300 °C. Jedná se o nehořlavé polymery (LOI = 35 ÷ 50 %), které se používají k výrobě vláken, v automobilovém průmyslu pro palivové články, v elektrotechnice jako

tepelně odolný elektroizolační materiál, podložky tištěných obvodů, pro zásuvky, kostry cívek, spínače, spojky a svorky optických kabelů, konektory apod. (viz obr. 3.5). V lékařství nahrazují korozivzdornou ocel a jsou vhodné např. pro chirurgické nástroje, sterilní košíky ad. Vyznačují se excelentní odolností opakovaným cyklům sterilizace, obdobně jako PVDF, PFA, PI a PSU. Nevýhodou je jejich vysoká cena (ca 12 €/kg), která jej řadí mezi **jedny z nejdražších polymerů**.

### 3.6

## Polyaryletherketony (PAEK)

*Polyaryletherketony* (PAEK) jsou vysoce výkonné **semikrystalické termoplasty**, jejichž polymerní řetězec obsahuje *aromatické, etherové a ketonové skupiny*. Poměr a sekvence etherů a ketonů ovlivňuje především teplotu skelného přechodu a teplotu tání. Čím vyšší je podíl ketonů, tím pevnější je polymerní řetězec a vyšší teplota skelného přechodu i tání (viz tab. 3.4). Mezi polyaryletherové ketony patří:

PEK	polyetherketon,
PEEK	polyetheretherketon,
PEKK	polyetherketonketon,
PEEKK	polyetheretherketonketon,
PEKEKK	polyetherketonetherketonketon.

Polyaryletherketony se vyznačují:

- **vysokou pevností i za vyšších teplot** a vysokou odolností krípu (mez pevnosti a modul pružnosti je vyšší než u konstrukčních plastů PA, POM, PET). Pro další zvýšení mechanických vlastností jsou plněny uhlíkovými nebo skleněnými vlákny a nahrazují ocel, hliník, titan, hořčík, mosaz nebo bronz (při výrazně nižší hustotě materiálu),
- velmi dobrou rázovou houževnatostí,
- dobrou chemickou odolností,
- **dobrymi kluznými vlastnostmi** ( $\mu = 0,25$ ) a odolností proti opotřebení,
- **nízkou absorpcí vody** (0,02 % pro PEK),
- **dobrou odolností vůči radiačnímu záření**,
- nízkou odolností povětrnostním vlivům.

Díky svým výborným užitným vlastnostem se používají pro namáhané konstrukční díly a to i za vysokých teplot (trvale je lze použít v teplotním intervalu od -70 °C do

240 °C, při krátkodobém zatížení až 300 °C). Vyznačují se sníženou hořlavostí až samozhášivými vlastnostmi (LOI = 24 ÷ 35 %).

Polyaryletherketony (viz obr. 3.6) se používají např.:

- pro výrobu kluzných ložisek a pouzder, přidáním PTFE dochází k dalšímu zlepšení třecích vlastností,
- pro nabíjecí baterie (mincového typu – bezvodé): těsnící prvky jsou běžně z PP, který špatně odolává vysokým teplotám a protože některé prvky baterie jsou pájeny již za přítomnosti těchto polypropylenových dílů, je v důsledku zaneseného tepla při pájení (200 ÷ 230 °C) snížena kapacita baterie, významnou optimalizací v tomto směru přináší použití materiálu PEEK,
- pro palivové články jaderného průmyslu,
- v lékařské technice pro systémy postupného uvolňování léčiv, nástroje a přístroje, které lze sterilizovat všemi konvenčními metodami (párou, suchým ohřevem, ethylen-oxidem a gama zářením),
- v **ortopedické a traumatologické praxi**, neboť je to materiál, který se dobře snáší s živou tkání a je biologicky inertní. Díly z PEEK mohou být povlakovány diamantem pomocí plasmové imerzní iontové implantace a depozice za účelem zlepšení jakosti povrchu a jeho třecích vlastností,
- při povlakování nástrojů nebo letadel,
- k výrobě mikroporézních membrán pro filtraci a čištění vody.



**Obr. 3.6** Příklady aplikací polyaryletherketonů (PAEK)  
(stavební díly čerpadel, pásky a upevňovací prvky,  
chirurgické nástroje s uhlíkovou výztuží, klece ložisek, ozubená kola)



*Polyfenylenethery* (PPE) jsou **amorfní** hydrofobní **termoplasty** se sníženou hořlavostí (LOI = 22 ÷ 24 %), které se vyznačují vysokou teplotou skelného přechodu (ca 205 °C). Mezi jejich přednosti patří nízká hustota a navlhavost, vysoká rázová houževnatost, elektrická pevnost, chemická i teplotní odolnost (oblast trvalého použití: -50 °C ÷ 110 °C) a výborná rozměrová stabilita, která vychází také z nízkého koeficientu teplotní roztažnosti:  $(3 \div 7) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Mezi nevýhody patří naopak: **špatná odolnost UV záření a oxidačnímu stárnutí za teplot nad 100 °C**. Z tohoto důvodu jsou používány jako polymerní směsi s polystyreny (PS), jež zlepšují jejich zpracovatelnost, avšak zhoršují teplotní odolnost a způsobují hořlavost směsi. Pro průmyslové využití jsou za účelem zvýšení rázové houževnatosti kopolymerovány se styrenem, ethylenem, propylenem a butylenem nebo míseny s dalšími termoplasty, jako jsou např. PA 6, PA 6.6, PS-HI apod. Pevnost a tuhost PPE lze zvýšit vlákennou výztuží, ovšem dosažení kompatibility mezi vlákny a PPE matricí je velmi složité a vyžaduje např. použití vláken s vinylsilany nebo glicidoxypolytrimethoxysilany.



**Obr. 3.7** Příklady aplikací polyfenylenetherů (PPE)  
(díly elektrotechnického průmyslu)

Vzhledem k vynikajícím mechanickým a elektroizolačním vlastnostem jsou výrobky z tohoto materiálu používány především v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu (vysokonapěťové rozvodny, elektrospotřebiče, polymerní elektrety – permanentně polarizovaná tělesa), viz obr. 3.7. Významnou oblastí uplatnění PPE je oblast separace a výroba porézních membrán. Používají se pro nízkotlakou reverzní osmózu, nanofiltraci, separaci plynů a par nebo pro polymerní elektrolyty. Vhodnost

použití PPE při výrobě membrán je způsobena vysokým volným objemem, jednoduchou rotací fenylových skupin i vysokou difuzivitou a permeabilitou plynů.

### 3.8

## Polysulfony (PSU)

Klíčovými vlastnostmi těchto **amorních plastů** jsou jejich velmi dobré mechanické vlastnosti, **tepelná** i **chemická stabilita**. Materiály jsou vysoce odolné působení kyselin, zásad, roztoků solí, alkoholů a alifatických uhlovodíků, ale neodolávají působení éterů, ketonů a halogenovaným uhlovodíkům, dobře se rozpouští v dimethylformamidu a dimethylsulfoxidu. Stabilně se dají využívat při teplotách v rozmezí (-100 ÷ 160) °C. Materiály jsou samozhášivé (LOI = 32 %) a při hoření uvolňují velmi málo zplodin. Zároveň jsou **odolné proti působení radiačního záření**, ovšem **špatně odolávají povětrnostním podmínkám a UV záření**.

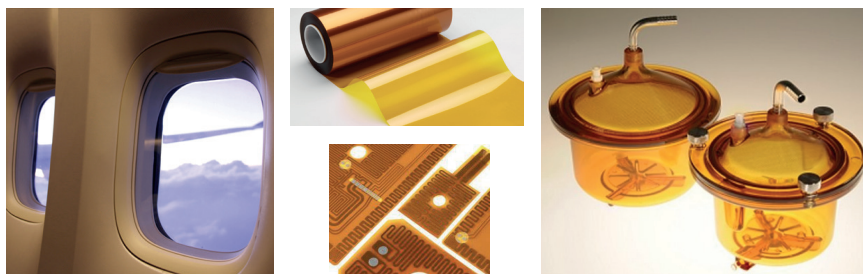
Vlastnosti PSU je předurčují pro automobilové aplikace, zejména v motorovém prostoru (např. nosiče pojistek), letecký a elektrotechnický průmysl (např. ochranné kontejnery průmyslových baterií) nebo lékařská zařízení a pomůcky, které je třeba sterilizovat za vyšších teplot (např. lahve odsávaček). Lze je využít také jako náhrady reaktoplastů, kovových, skleněných i keramických materiálů a to zejména v aplikacích, kde je předností nízká hustota materiálu. Polysulfony jsou používány také pro výrobu potrubí včetně jeho součástí, které jsou ve styku s horkou vodou a membrán pro separaci plynů (při úpravě vody a hemodialýzy).



**Obr. 3.8** Příklady aplikací polysulfonů (PSU)  
(díly lékařské techniky, potrubí, čerpadel)

**Polyimidy** (PI) jsou polymery, které mohou být na bázi termoplastů i reaktoplastů a jejich příprava je možná jen přes předpolymery (polyamidové prekurzory), které se připravují polykondenzací *aromatických dianhydridů s aromatickými diaminy*. **Vyznačují se nejlepší odolností UV záření ze všech polymerů** (společně s PAI), **vysokou pevností, výbornými dielektrickými vlastnostmi a vysokou tepelnou odolností**. Z dlouhodobého hlediska se mohou vystavovat pracovním teplotám od  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  až do  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , krátkodobě až  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . K dalším silným stránkám patří malá tepelná vodivost, **vynikající kluzné vlastnosti** ( $\mu < 0,35$ ), které lze podpořit přidávkem PTFE, grafitu nebo sulfidu molybdeničitého a samozhášivost ( $\text{LOI} = 47 \div 53\%$ ).

Jejich využití (viz obr. 3.9) je při náročných aplikacích v oblasti strojírenství (převodovky, ložisková pouzdra, vodící válečky, vakuová technika, membrány, čidla a potrubí v automobilu), mikroelektroniky (např. optická vlákna) a leteckého průmyslu, kde se polyimidové pryskyřice používají na tepelně namáhané součásti, jako jsou izolace a obraběče tahu proudových motorů, používají se také jako chránič prvek vesmírných lodí a izolace obleků pro astronauty.



**Obr. 3.9** Příklad aplikace polyimidů (PI) a polyetherimidů (PEI) (letecký, elektrotechnický a lékařský průmysl)

**Polyetherimidy** (PEI) jsou pod skupinou polyimidů a jedná se o **amorfní, samozhášivé termoplasty** ( $\text{LOI} = 47\%$ ), které vykazují výbornou tvarovou stálost při působení tepla a velmi dobře odolávají křípu. Materiály lze z dlouhodobého hlediska vystavit teplotám  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ , krátkodobě až do  $(190 \div 200)\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jsou stabilní vůči působení chemikálií, velmi dobře odolávají koncentrovaným kyselinám a zásadám,

halogenovým uhlovodíkům a olejům. Naopak jsou rozpustné v dichlormetanu a N-methylpyrrolidinu.

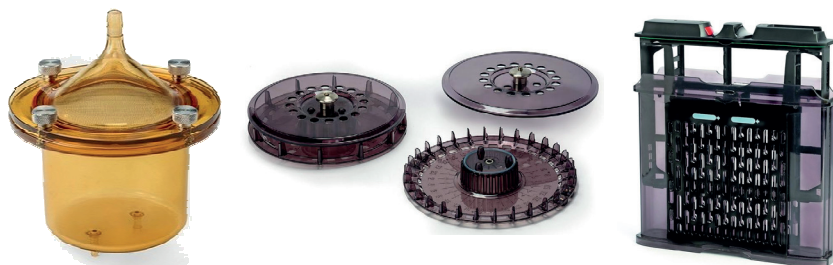
Vzhledem k jejich vlastnostem (viz tab. 3.4) se používají převážně v elektrotechnice, automobilovém, leteckém a lékařském průmyslu. V letadlech se používají např. k výrobě okenních rámců a panelů pro cestující, v automobilech pro výrobu senzorů a rozvodů v motorech, ale také pro pohledové díly reflektorů, v elektrotechnice jako izolační materiál integrovaných obvodů a tištěných spojů, k výrobě konektorů a povlakování měděných kabelů ad.

3.10

### Polyfenylensulfony (PPSU)

*Polyfenylensulfony* (PPSU) jsou **amorfní termoplasty** podobné polysulfonům (PSU), avšak vyznačují se vyšší chemickou odolností, odolností vůči hoření (LOI = 44 %) a neodolávají působení halogenových uhlovodíků. Trvale je lze použít do teploty 180 °C, krátkodobě až do 200 °C. Typické vlastnosti PPSU jsou uvedeny v tab. 3.4.

Polyfenylensulfony se používají v leteckém průmyslu na interiérové prvky letadel a konstrukce jídelních vozíků. V lékařské technice se používají především pro chirurgické a stomatologické nástroje a výrobky, které se mohou opakovaně sterilizovat chemicky, horkou parou nebo gama zářením (vyznačují se excelentní odolností opakovaným cyklem sterilizace). Využívají se také pro výrobu teplovodního potrubí včetně příslušenství.



**Obr. 3.10** Příklady aplikací polyfenylensulfonů (PPSU) v lékařství pro díly s opakovanou sterilizací

*Polyamidimidy (PAI)* jsou **amorfní**, samozhášivé termoplasty (LOI = 45 %), které se vyrábí polykondenzací z *anhydrid kyseliny trimellitové* a *aromatického diaminu*. **Představují spojení mezi aromatickými polyamidy** (označované také jako aramidy) a **polyimidy (PI)**. Materiály velmi **dobře odolávají vysokoenergetickému záření** a současně jsou odolné povětrnostním podmínkám a **UV záření**. Dobře odolávají působení chemikáliím, především aromatickým, alifatickým a halogenovým uhlovodíkům, esterům a ketonům, naopak špatně odolávají působení silných kyselin, zásad a alkoholů. Polyamidimidy mají velmi dobrou tepelnou odolnost, z dlouhodobého hlediska jsou použitelné v teplotním rozsahu (-200 ÷ 220) °C (v některých případech až 280 °C), krátkodobě až 400 °C. Odolávají křípu a opotřebení.

Polyamidimidy se nejvíce využívají v leteckém a automobilovém průmyslu, ale také ve zdravotnictví pro výrobu nosných částí protéz. Používají se na konstrukční a upevňovací díly letadel a raketoplánů, letecké kompresory, těsnící prvky a dále jako rotační a třecí díly v průmyslových aplikacích (viz obr. 3.11), k výrobě dutých vláken, mebrán, světlovodů (PAI dokáží přenášet světlo o vlnových délkách blízkých infračervenému záření, což běžné plasty vzhledem k optické ztrátě nedokážou), k tvorbě povlaků a adheziv.



**Obr. 3.11** Příklady aplikací polyamidimidů (PAI)  
(ozubená kola, protézy, konzoly, díly průmyslových aplikací)

*Polyethersulfony* (PES nebo PESU) jsou **amorfní**, samozhášivé termoplasty (LOI = 34 ÷ 38 %), které se vyrábí reakcí *bisfenolu A* a *4,4'-dichlordifenylsulfonu* za přítomnosti  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Vyznačují se **dobrymi mechanickými vlastnostmi**, **vyšokou tvarovou stálostí za zvýšených teplot** a **dobrou odolností proti křípu**. Teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) se pohybuje v rozmezí (220 ÷ 238) °C a teplota rozkladu v intervalu (400 ÷ 580) °C, v závislosti na výrobním procesu a čistotě výchozích látek. Dlouhodobá teplotní odolnost materiálů je 180 °C. Materiály chemicky dobře odolávají chloru, působení zředěnými kyselinami a zásadami, alkoholy a aromatických uhlovodíků. Špatně odolávají silným kyselinám, éterům a ketonům, jsou rozpustné v dimethylformaldehydu.

Díky svým vlastnostem jsou využívány v automobilovém průmyslu (pojistky, mlhová světla a olejové pumpy, viz obr. 3.12), v elektrotechnice (povlaky drátů, konektory optických vláken, desky s plošnými spoji) a v lékařské technice pro filtrační membrány, membrány pro reverzní osmózu (např. při destilaci vody, kde je výhodou vysoká odolnost materiálu chloru), nástroje, které lze snadno sterilizovat pomocí horké páry nebo jako bariéry proti zubnímu povlaku (povlak z anionty nabitého polymeru odpuzuje opačně nabitě mikroorganismy, které jsou zodpovědné za vznik zubního povlaku).



**Obr. 3.12** Příklady aplikací polyethersulfonů (PES)  
(díly světla, dvířka interiéru letadel Airbus vyztužená skleněnými vlákny, díly čerpadel)

*Polybenzimidazoly* (PBI) jsou **amorfní**, samozhášivé termoplasty (LOI = 58 %), které mají ze všech komerčně vyráběných polymerů největší teplotní odolnost s teplotou skelného přechodu  $T_g > 400\text{ }^\circ\text{C}$ . Krátkodobě vydrží až do  $760\text{ }^\circ\text{C}$ , dlouhodobě je lze využít od teploty  $-260\text{ }^\circ\text{C}$  téměř do teploty skelného přechodu. Kromě vysoké pevnosti a tvrdosti se vyznačují:

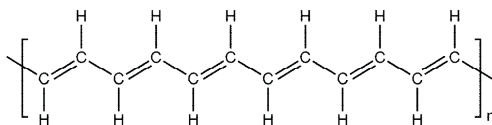
- velmi nízkým koeficientem tření ( $\mu = 0,16$ ),
- vysokou odolností proti opotřebení v širokém rozpětí provozních podmínek,
- velmi dobrou odolností křípu a to i za zvýšených teplot,
- dobrými elektroizolačními a dielektrickými vlastnostmi,
- **špičkovou odolností proti pronikavé radiaci**,
- **nejnižším součinitelem teplotní roztažnosti** ze všech neplněných polymerů,
- **nejvyšší pevností v tlaku** ze všech neplněných polymerů.

PBI jsou však **hydrofilní** a to limituje jejich použití pro aplikace ve vlhkém prostředí. Vzhledem ke svým vlastnostem jsou určeny pro velmi náročné tribologické aplikace. Lze jimi nahrazovat kovy při relativně nízké hustotě. Materiály mohou být využity v kosmickém, leteckém, jaderném, chemickém, automobilovém a elektrotechnickém průmyslu. Používají se pro součásti čerpadel, ozubená kola, sedla ventilů, ložiska, ale také pro výrobu vláken, z nichž jsou následně zhotoveny ochranné oděvy, viz obr. 3.13.



**Obr. 3.13** Příklady aplikací polybenzimidazolů (PBI)  
(vlákna pro výrobu ochranných prostředků, díly pro tribologické aplikace)

Polymery jsou obecně elektrickými izolanty, vyplývá to z charakteru vazeb uvnitř makromolekuly, avšak přidavkem sazí nebo práškového grafitu se podařilo jejich elektrickou vodivost výrazně zvýšit. Vedle těchto vodivých kompozitů existují i *konjugované polymery*, které mohou vykazovat vlastní vysokou elektrickou vodivost, která odpovídá polovodivým materiálům používaných v elektrotechnice. Elektrickou vodivost umožňuje pravidelné střídání jednoduchých a dvojných chemických vazeb (konjugace) v makromolekulárním řetězci (viz obr. 3.14). Kromě systému těchto vazeb je nezbytným předpokladem přítomnost nositelů náboje, které zprostředkovávají jeho transport po řetězci. Ty vznikají procesem dopování. Příkladem je strukturně nejjednodušší konjugovaný polymer: **polyacetylen**, který vzniká polymerací *acetylénu* ve formě tmavého prášku nepatrné vodivosti, avšak po oxidaci (dopování) parami jodu vzroste u tenkých polyacetylenových filmů elektrická vodivost přibližně milionkrát. Z polymerního řetězce je odejmut elektron, který je přenesen k molekule jodu, která se nabije záporně, polyacetylenová molekula poté nese kladný pohyblivý náboj. Měrná vodivost dopovaného polyacetyleny dosahuje hodnoty 550 S/cm. V případě orientace filmů dosahuje hodnot řádově až  $10^5$  S/cm.



Obr. 3.14 Struktura konjugovaného polymeru - polyacetyleny

Příkladem konjugovaných polymerů kromě polyacetyleny jsou také **polypyrrol**, **polyanilin**, **polyfenylen** apod. Vodivé polymery jsou ve srovnání s jinými polymerními materiály **obtížně zpracovatelné. V běžných rozpouštědlech se nerozpouštějí a nelze je převést do taveniny.**

Vodivé polymery se těší celé řadě použití, příkladem jsou součástky elektronických zařízení, antistatika pro podlahové krytiny, optické senzory indikující změnu pH, odporové topné elementy a slibné je i jejich využití v organických solárních článcích,



při tisknutí elektrických obvodů, v organických světlo vyzařujících diodách, pružných transparentních displejích, elektromagnetickém stínění apod., viz obr. 3.15.



**Obr. 3.15** Příklady aplikací vstříkovaných dílů z elektricky vodivých polymerů

**Tab. 3.4a** Typické vlastnosti vysoce výkonných polymerů a technologické podmínky při jejich zpracování vstříkovaním

Polymer	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	w (24 h) [%]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_{tb}$ [%]
PPS	90 + 150	278 + 280	0,01 + 0,07	1,35 + 1,36	65 + 90	3 400 + 15 100	0,6 + 25
PPA	92 + 140*	310 + 370*	0,36 + 0,75	1,10 + 1,26	62 + 80	2 100 + 15 600	1,5 + 5,0
LCP	120 + 155	330	0,03	1,40 + 1,51	110 + 180	7 000 + 24 300	1,5 + 6,0
PEK	150 + 160	350 + 375	0,02	1,30 + 1,32	80 + 115	4 300	2,0 + 25
PEEK	143 + 150	340 + 344	0,06 + 0,5	1,29 + 1,32	72 + 113	3 350 + 4 700	1,5 + 41
PEKK	155 + 163	300 + 360	0,2	1,28 + 1,31	90	3 450 + 4 500	
PPE	205	-	0,06 + 0,12	1,02 + 1,10	40 + 75	2 000 + 2 700	15 + 130
PSU	185 + 220	-	0,20 + 0,30	1,23 + 1,32	60 + 80	1 800 + 2 600	73 + 75
PI	360 + 410		1,34 + 1,43	1,31 + 1,52	100 + 150	3 100 + 10 500	2 + 19
PEI	194 + 233	-	0,20 + 0,30	1,27 + 1,30	93 + 113	2 800 + 3 500	6 + 9
PPSU	220	-	0,35 + 0,40	1,29 + 1,30	70 + 76	2 300 + 2 800	28 + 90
PAI	206 + 326	-	0,20 + 0,40	1,40 + 1,46	70 + 80	4 000 + 7 000	0,8 + 15
PES (PESU)	220 + 238	-	0,10 + 0,90	1,37 + 1,39	78 + 92	2 600 + 3 000	6 + 7
PBI	400 + 510	-	0,40	1,30 + 1,42	160	5 900	3

\* čistý PA 6T;  $T_g$  – teplota skelného přechodu;  $T_m$  – teplota tání; w – absorpce vody za 24 hodin  $\rho$  – hustota;  $\sigma_m$  – mez pevnosti v tahu;  $E_t$  – modul pružnosti v tahu;  $\epsilon_{tb}$  – jmenovité poměrné prodloužení při přetržení

Tab. 3.4b Typické vlastnosti vysoce výkonných polymerů a technologické podmínky při jejich zpracování vstříkovaním

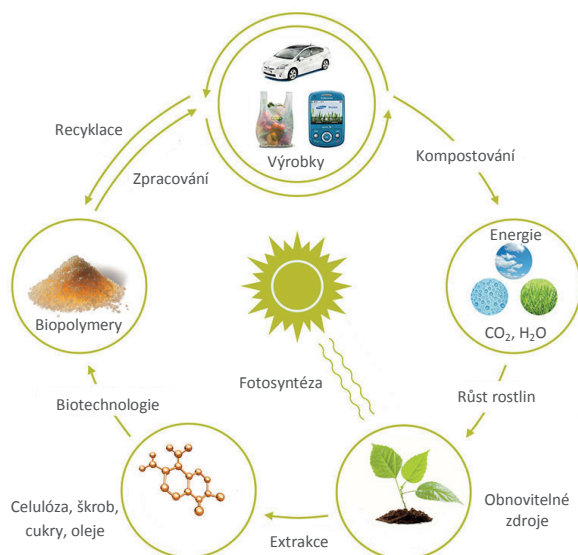
Polymer	Smrštění [%]	T <sub>vstříkování</sub> [°C]	T <sub>formy</sub> [°C]	Vláknenná výtlač	Odolnost gama záření	Odolnost UV záření
PPS	0,6 ÷ 1,4	315 ÷ 335	145 ÷ 160	G, C, A, M	++	++
PPA	1,5 ÷ 2,2	315 ÷ 330	80 ÷ 160	G, C, A, M	++	+
LCP	0,1 ÷ 0,6	290 ÷ 370	80 ÷ 140	G, C, M	++	++
PEK	1,0 ÷ 1,3	385 ÷ 425	180 ÷ 220	G, C		
PEEK	1,2 ÷ 1,5	375 ÷ 390	180 ÷ 190	G, C, A	+++	++
PEKK		320 ÷ 380	150 ÷ 240	C		
PPE	0,5 ÷ 0,8	275 ÷ 320	55 ÷ 100	G, C, M	+	+
PSU	0,7	350 ÷ 370	120 ÷ 150	G, C	++	+
PI	0,2 ÷ 1,2	395 ÷ 410	160 ÷ 165	C	+++	+++
PEI	0,7 ÷ 0,8	370 ÷ 395	150	G, C	++	+
PPSU	0,7 ÷ 1,0	360 ÷ 390	135 ÷ 160	G	+++	++
PAI	0,6 ÷ 1,0	304 ÷ 370			++	+++
PES (PESU)	0,6 ÷ 0,7	350 ÷ 365	135 ÷ 160	G, C	++	+
PBI					+++	

G – sklo, C – uhlík, A – aramid, M – minerál

# BIOPOLYMERY A BIODEGRADOVATELNÉ PLASTY

## 4

**Biopolymery** rozumíme makromolekulární látky organického charakteru **produkované biochemickými reakcemi u rostlin, zvířat a mikroorganismů** z nízkomolekulárních látek. Z chemického hlediska jde o *polysacharidy* (škrob, celulózu) produkované rostlinami, *proteiny - bílkoviny*, které jsou základem živých organismů a *polyestery* produkované mikroorganismy – bakteriemi (např. PHB, PHV), které jsou biologicky rozložitelné a po splnění své funkce se opět stanou součástí přírodního cyklu (viz obr. 4.1). Uvedené příklady patří do skupiny přírodních biopolymerů. Patrně nejznámějším příkladem přírodního biopolymeru je pro všechny čtenáře *celofán*, tenká průhledná fólie, vyráběná z chemicky regenerované celulózy.

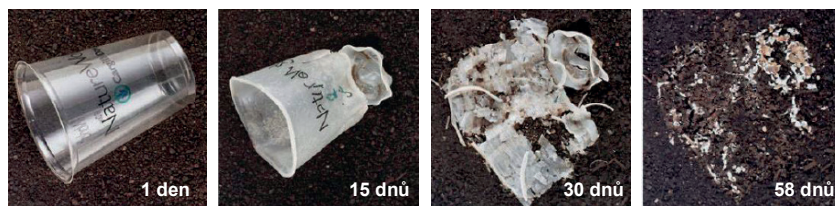


**Obr. 4.1** Model životního cyklu biopolymeru produkovaného rostlinami

Biopolymery se od syntetických polymerů liší chemickou stavbou molekulárního řetězce, v němž je na rozdíl od syntetických polymerů vždy obsažen *kyslík* nebo *dusík*, umožňující biologický rozklad. Dle původu je lze rozdělit do dvou skupin:

- **Biopolymery přírodního původu** – produkované živými organismy,
- **Syntetické biopolymery** – syntetizovány z biomolekul (monomerů), které se nacházejí v přírodě, ale nevykazují parametry makromolekulárních látek. Nejběžnějšími příklady jsou monomerní kyselina mléčná (laktidová) vyrobená fermentací cukrů, z níž je chemickou cestou vyráběna kyselina polymléčná (PLA), triglyceroly a různé aminokyseliny, z nichž lze vyrábět např. biodegradabilní polyamid.

**Biodegradovatelnými polymery** označujeme polymery, u kterých dochází k degradaci v důsledku působení mikroorganismů (bakterií, hub a řas, obsahující enzymy, které urychlují rozkladné reakce), neboť je vnímají jako zdroj potravy, ale také v důsledku chemických a fyzikálních vlivů. Jedná se o všechny biopolymery a vybrané polymery minerálního původu, ke kterým se často řadí i zvláštní skupina modifikovaných syntetických polyolefinů, viz kap. 4.5.



**Obr. 4.2** Biodegradace jednorázového pohárku z PLA (časová řada)

Produktem biodegradace jsou za specifických podmínek *oxid uhličitý* (případně *methan*), *voda* a *zbytková biomasa*, tj. látky, které přirozeně vstupují do koloběhu živin v přírodě. Tento rozkladný proces je označován jako *mineralizace*. Je-li při degradaci přítomen kyslík (např. při průmyslovém kompostování), jedná se o **aerobní degradaci** a výsledkem rozkladu je oxid uhličitý, v opačném případě hovoříme o **anaerobní degradaci** (příkladem je skládkování) a místo oxidu uhličitého vzniká methan (mohou však nastat případy, kdy vznikají oba plyny). Tyto dvě možnosti biodegradace mohou probíhat ve vodním i půdním prostředí (viz obr. 4.2) a jsou ovlivňovány dostupností živin, teplotou, vlhkostí, pH, UV zářením apod. Při extrémně nevýhodných podmínkách mikroorganismy odumírají a proces biodegradace se prakticky zastaví.

Biodegradovatelné polymery jsou vhodnou alternativou k syntetickým polymerům pro výroby v obalové nebo zemědělské technice na jedno použití, ale umožňují také zcela nové aplikace v oblasti biomedicíny (výrobu moderních obvazových materiálů, vstřebatelných šicích materiálů, speciálních ortopedických náhrad, které zajišťují mechanickou integritu poraněných kostí při jejich hojení apod.).

Mezi průmyslově využívané biopolymery přírodního původu patří polysacharidy na bázi škrobu a polyhydroxyalkanoáty (PHA), mezi syntetické biopolymery získané z přírodních zdrojů kyselina polymléčná (PLA) a kyselina polyglykolová (PGA) a mezi syntetické biodegradovatelné polymery (nikoliv však biopolymery) oxobiodegradovatelné plasty, polyvinylalkohol (PVA) a polykaprolakton (PLC), jejichž zdrojem jsou monomery získané z ropných surovin.

## 4.1

## Polymery na bázi škrobu

**Škrob** (přírodní biopolymer), který je ze všech biopolymerů nejlevnější, je získáván fotosyntézou cukrů kukuřice, pšenice, ječmene, brambor a dalších rostlin. V čisté formě je křehkým a sypkým materiálem se **silně hydrofilními vlastnostmi**. Po přidavku plastifikátorů za zvýšené teploty a tlaku (např. vody s glycerinem nebo polyethylenglykolem) se stává termoplastickým a lze zpracovávat běžnými technologiemi pro termoplasty (viz tab. 4.1). Limitujícím faktorem průmyslového využití jsou jeho nevyhovující fyzikální a chemické vlastnosti (nízká pevnost a nízká odolnost vůči vodě), viz tab. 4.2. V praxi se proto mísí s jinými syntetickými polymery, např. *nízkohustotním polyethylenem* (PE-LD), *polyvinylalkoholem* (PVA) nebo *polykaprolaktonem* (PCL). Poslední dva jmenované jsou zcela biodegradabilní. Pro vytvoření zcela biodegradabilní směsi PE/škrob je nutné zajistit biodegradaci polyethylenu vhodnými aditivami.

Materiály na bázi škrobu se používají pro výrobu kompostovatelných fólií a obalů na jedno použití, předmětů domácnosti, hygienických potřeb nebo speciálních pytlů pro sběr nemocničního prádla, které se během jeho praní rozpustí a k jejich biodegradaci dochází poté, co se dostanou do odpadních vod. Vyráběny jsou z něho také extrudované pěny pro obalový průmysl.

Tab. 4.1 Zpracovatelské postupy komerčně užívaných biodegradovatelných polymerů

Polymer	Vstřikování	Extruze	Vyfukování	Tvarování	Odlévání	Zvlákňování
Škrob	✓	✓	-	-	✓	-
Škrob/PVA	✓	✓	✓	-	✓	✓
PHB	✓	✓	✓	✓	✓	-
PHV	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PHBV	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PLA	✓	✓	✓	✓	-	✓
PVA	✓	✓	-	✓	✓	✓
PCL	✓	✓	✓	✓	-	✓
oxo- PE,PP	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tab. 4.2 Typické vlastnosti biodegradovatelných polymerů

Polymer	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_{tb}$ [%]	Smrštění [%]
Škrob	1,40+1,50	80+100	165+180	≥ 30	1 500	≤ 10	
PHA	1,25+1,40	2+15	160+180	15+40	1 000+2 000	1+15	1,2+1,6
PLA	1,21+1,25	45+65	150+165	21+60	350+3 500	2,5+6	0,3+1,1
PGA	1,50+1,53	35+40	220+225	70+890	6 000+8 400	15+30	
PVA	1,20+1,33	58+85	180+230	28+46	380+530	100+200	
PCL	1,11+1,15	-60	55+65	21+44	160+400	300+1 000	

4.2

Polyhydroxyalkanoáty (PHA)

*Polyhydroxyalkanoáty* (PHA) jsou **přírodní biopolymery na bázi polyesteru** produkované bakteriemi (v komerčních procesech jsou bakteriální kultury pěstovány v bioreaktorech na vhodných substrátech, které slouží jako jejich potrava). Patří sem *polyhydroxybutyrát* (PHB), *polyhydroxyvalerát* (PHV) a jejich kopolymer *polyhydroxybutyrát-valerát* (PHBV). Cenově se pohybují mezi ca (3 ÷ 14) €/kg. **Biopolymer PHB má podobné mechanické vlastnosti jako polypropylen (PP)**, odolává vlhkosti, UV záření a oxidaci, ve vodě je nerozpustný. Jeho nevýhodou je, že **poblíž teploty tání (180 °C) se rozkládá a tím se obtížně zpracovává**. Tento problém je odstraněn přípravou kopolymeru PHBV, který lze zpracovávat běžnými metodami pro termoplasty, viz tab. 4.1. K biodegradaci dochází v půdě, v sladké i mořské vodě a v kompostu. Rozklad probíhá působením bakterií nebo hub, které se usazují na povrchu polymeru a vylučují enzymy, které jej hydrolyticky

rozkládají. Polymer nachází uplatnění např. v lékařství při výrobě řízeně uvolňovaných léčiv, implantátů, fixačních pomůcek a chirurgických nití (viz obr. 4.3), dále v obalovém průmyslu nebo pro výrobu hygienických potřeb, jídelní servis apod.



Obr. 4.3 Příklady aplikací biopolymerů PHBV a PLA

### 4.3

## Kyselina polymléčná (PLA)

*Kyselina polymléčná* (PLA) je **lineární termoplastický polyester** vyráběný z *kyseliny mléčné*, kterou lze získat např. fermentací rostlinných cukrů obsažených v kukuřici, bramborách, cukrové řepě apod. Tento syntetický biopolymer má **mechanické vlastnosti odpovídající polyolefinům**, viz tab. 4.2. Je poměrně **vysoce transparentní**, nerozpustný ve vodě, odolný vůči UV záření, propustný pro plyny, což je výhodou pro balení potravin, ale nevhodné k výrobě lahví sycených nápojů. Na základě optické stereoisometrie kyseliny mléčné lze připravit **PLA s různým stupněm krystalinity**, hustotou, teplotou skelného přechodu i teplotou tání. U amorfního PLA jsou jeho aplikace za vyšších teplot omezeny nízkou teplotou skelného přechodu.

Polymer PLA je po škrobu cenově nejvýhodnějším biopolymerem (< 2 €/kg), používá se k výrobě fólií, kompostovatelných pytlů a spotřebního zboží, jako jsou přístroje, tácky nebo nápojové kelímky (viz obr. 4.2), ale také v lékařství pro výrobu fixačních pomůcek a implantátů, které zajišťují soudružnost kostí při jejich regeneraci a hojení, nebo pro technické aplikace. Nevýhodou PLA je **vyšší propustnost plynů**, která je 3x větší než u polypropylenu (PP) a 10x větší než u polyethylentereftalátu (PET) a není tak vhodná pro balení sycených nápojů. Komerční výrobky jsou biodegradovatelné v mořské vodě nebo za podmínek komunálního kompostování za zvýšené vlhkosti a teploty 60 °C.



*Kyselina polyglykolová* (PGA) je **termoplastický polyester** vyráběný z *kyseliny glykolové*, kterou lze získat fermentací např. z cukrové třtiny. Ve většině organických rozpouštědel je nerozpustná, ale je vysoce citlivá k působení vody a tedy k hydrolyze. Zpracovává se vstřikováním a vytlačováním. Uplatnění nachází zejména v lékařství pro výrobu speciálních implantátů, chirurgických šicích potřeb a pro řízení uvolňování léčiv. Vlastnosti tohoto polymeru, zejména doba jeho biologického rozkladu, lze rozšířit kopolymerací s kyselinou mléčnou (PLGA).

*Oxo-biodegradovatelné polymery* jsou speciálně upravené komerční, **syntetické polymery** (zejména na bázi *polyolefinů* a *polystyrenu*), **které jsou biodegradovatelné**. Tyto polymery neobsahují stabilizátory, které jsou běžně používány u komerčních polymerů, ale naopak jsou **modifikovány speciálními aditivy** (většinou soli přechodových kovů), označované jako **TDPA** (Totally Degradable Plastic Additives). Tato aditiva umožňují jejich degradaci, která je iniciovaná fotochemickou oxidací. Bakterie, plísňe a enzymy následně rozkládají produkty oxidační degradace polymeru na oxid uhličitý, vodu a zbytkovou biomasu. Přísady umožňují volit dobu rozpadu materiálu (od 3 do 12 měsíců), výrobky jsou plně ve shodě s požadavky na kontakt s potravinami. Materiály se používají na obaly potravin, nákupní tašky, zemědělské fólie, krycí fólie ve stavebnictví i medicínské aplikace.

Kromě fotooxidativní degradace je možné připravit i speciální polymery citlivé ke zvýšené teplotě, která způsobí destrukci polymerních řetězců.



*Tašky zhotovené z oxo-polyethylenu a skladované v původním balení (v krabici) rozkladu nepodléhají. Vlastní proces rozpadu je zahájen až v okamžiku vybalení, za působení světla, vlhkosti a mechanického pnutí – tedy běžným užitím tašky.*

Rovněž běžné aromatické polyestery: *polyethylentereftalát* (PET) a *polybutylentereftalát* (PBT), které odolávají hydrolyze, nejsou biodegradovatelné. Avšak jejich modifikací monomery, které jsou citlivé k hydrolyze (např. ethery, amidy

nebo alifatickými skupinami), je lze přeměnit na alifatico-aromatické polyestery s následnou schopností biodegradace.

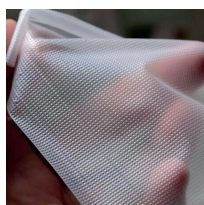


*Běžným omylem je, že všechny biodegradovatelné polymery se vyrábí z obnovitelných surovin. Rovněž nelze za biodegradabilní materiál považovat syntetický polymer, obsahující přírodní biodegradovatelná plniva (dřevitou moučku, lněná vlákna apod.).*

4.6

## Polyvinylalkohol (PVA)

*Polyvinylalkohol* (PVA) je **syntetický semikrystalický polymer plně biodegradovatelný a rozpustný ve vodě**, který je připravován polymerizací *vinylacetátu* (VAc) na *polyvinylacetát* (PVAc) a následně hydrolyzován na *polyvinylalkohol* (PVA). Biodegradace je možná díky přítomnosti hydroxylových skupin v řetězcích makromolekul, které ovlivňují hydrofilní povahu tohoto polymeru. Polymer PVA je **biologicky kompatibilní**, není toxický ani karcinogenní, má výborné chemické vlastnosti, a proto se kromě spotřebního zboží, fólií v zemědělství pro dodávání hnojiv, pesticidů, herbicidů a fungicidů (viz obr. 4.4), používá také v lékařství a farmacii. Zde je aplikován pro systémy řízeného uvolňování léčiv, obvazového materiálu, chirurgických nití, implantátů apod. V tkáňovém inženýrství je užíván jako nanovláknenný nosič pro regeneraci chrupavkových tkání. Používá se také při embolizační léčbě jako prostředek ke snížení krevního průtoku. Vzhledem k jeho hydrofilní povaze je často mísen s dalšími polymery, jako je kyselina polymléčná (PLA), kyselina polyglykolová (PGA) nebo polykaprolakton (PCL).



**Obr. 4.4** Příklady aplikací polyvinylalkoholu (PVA)

*Polykaprolakton (PCL) je podobně jako PVA lineární semikrystalický polymer plně biodegradovatelný, který se vyrábí z ropných surovin (polymerizací  $\epsilon$ -kaprolaktonu), avšak na rozdíl od PVA velmi dobře odolává vodě. Má velmi nízkou teplotu skelného přechodu ( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), vykazuje velkou tažnost, nízkou pevnost a relativně malý modul pružnosti (viz tab. 4.2). Ve srovnání s polymery PLA a PGA degraduje méně. Je používán v lékařství a tkáňovém inženýrství. Na obr. 4.5 je uveden příklad krční implantátu, který se po vystavení tělním tekutinám po 3 až 4 letech samovolně rozpouští.*



*Obr. 4.5 Krční implantát z polymeru PCL zhotovený 3D tiskem*

**Technologie vstřikování** má v odvětví průmyslu zabývající se zpracováním plastů nezastupitelnou roli. Jedná se o technologii, která se po dobu své existence pružně mění a reaguje na potřeby konstruktérů, technologů, výrobců polymerních materiálů a výrobců forem. Základ technologie – vstřikovací cyklus, byl utvořen přibližně ve čtyřicátých letech minulého století a jeho samotná podstata přetrvala dodnes. Za tu dobu se však změnilo strojní vybavení a zpracovávané materiály. Zejména změny v oboru zpracovávaných materiálů výrazně přispěly k rozvoji a utváření technologie vstřikování plastů.

Vstřikování je složitý technologický proces, který musí zohledňovat typické materiálové vlastnosti. Jelikož se tento proces ve své nejjednodušší podobě skládá ze tří základních částí: **tavení polymeru, plnění dutiny formy a tuhnutí taveniny**, musí technologie respektovat následující materiálové vlastnosti:

- *tokové vlastnosti taveniny*,
- *tepelné vlastnosti plastu* (teplotu tání, měrnou tepelnou kapacitu, součinitel tepelné vodivosti ad.),
- *nadmolekulární strukturu plastu* a její možné změny v důsledku zpracování.

*Reologie*, která popisuje tokové chování tavenin, odráží charakteristickou vlastnost polymerních materiálů – viskoelasticitu. Navíc taveniny polymerů mají tzv. zdánlivou viskozitu, a proto je nutné počítat se změnou tokového chování v důsledku změny teploty a změny smykové rychlosti. Viskozita tavenin polymeru se pohybuje v rozmezí (2 až 300) Pa·s. Rozdílnost v tokovém chování polymerů lze dobře vidět na příkladech nízkohustotního polyethylenu (PE-LD) a polyamidu (PA). Při zahřívání PE-LD materiál výrazně měkne a jeho viskozita se mění jen pozvolna, z tuhé látky se stává postupně vysokoviskózní hmota, která je schopná toku jen při dalším zahřátí. Oproti tomu materiál PA se zahříváním velmi rychle (skokově) mění z tuhého stavu na taveninu.

Polymerní materiály mají přibližně pětikrát větší měrnou tepelnou kapacitu než materiály kovové, navíc jejich součinitel tepelné vodivosti je mnohem menší. Tyto tepelné vlastnosti v podstatě určují energetickou a časovou náročnost tavení i tuhnutí polymerních materiálů při jejich zpracování. Každý materiál má navíc jiné

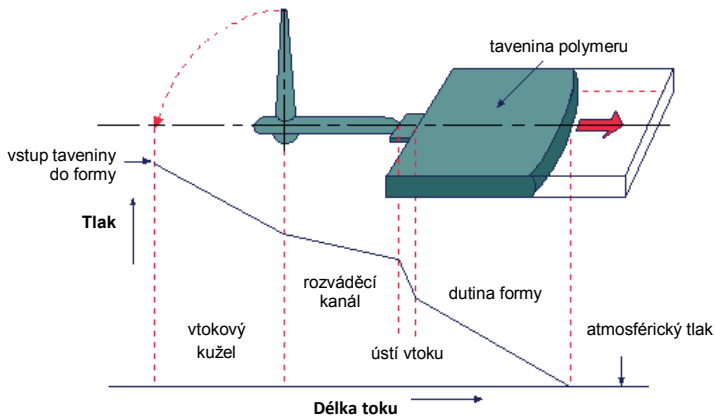
doporučené zpracovatelské teploty, které jsou stanoveny výrobcem na základě přechodových teplot: teploty tání ( $T_m$ ) v případě semikrystalických plastů a teploty viskózního toku ( $T_f$ ) u amorfních plastů. Doporučené teploty zpracování materiálů jsou minimálně o (20 až 30) °C vyšší než je teplota tání, resp. teplota viskózního toku. Čím je teplota polymeru vyšší, tím větší je pohyblivost makromolekul materiálu, jelikož mohou snadněji přizpůsobovat tvar smykovému namáhání, kterému jsou při vstřikování vystaveny. Zvyšováním teploty se tak snižuje viskozita taveniny, avšak při určité teplotě se polymery stávají tepelně nestabilní a začnou se rozkládat. Tento rozklad je označován jako **tepelná degradace** a nejčastěji se projevuje změnou barvy taveniny (žloutnutím až hnědnutím) a nevratnou změnou viskozity.

Podobné účinky jako teplo má na taveninu polymeru i smykové namáhání. *Smykové namáhání* způsobuje pokles viskozity taveniny. Při neúměrně vysokém smykovém namáhání dochází k mechanickému poškození makromolekulárních řetězců a dochází tak k degradaci polymerů. Pro technologii vstřikování je tak nezbytná dobrá tepelná stabilita materiálu, neboť kombinace působení tepla a smykového namáhání může způsobit jeho degradaci. Degradace polymerů se projevuje snížením jejich molekulové hmotnosti, přičemž na molekulové hmotnosti závisí jak viskozita taveniny, tak i mechanické vlastnosti polymerů. V neposlední řadě je nutné zohlednit i čas zdržení materiálu v tavící komoře vstřikovacího stroje, neboť hraje výraznou roli v degradačním procesu.

## 5.1

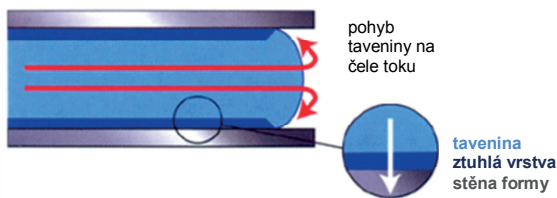
## Podstata technologie vstřikování

V první fázi je materiál plastifikován ve vstřikovací jednotce stroje. Při plastifikaci dochází k jeho tavení a následné homogenizaci. Po plastifikaci materiálu je dávka taveniny připravena ke vstřiku do dutiny formy. Aby však mohlo dojít ke vstřiku, musí tlak ve vstřikovací jednotce (před čelem šneku) překonat odpor taveniny vůči toku. Je-li tlak dostatečně vysoký, začne se tavenina pohybovat z oblasti vysokého tlaku (ve vstřikovací jednotce stroje) do oblasti nižšího tlaku (vtokové soustavy a dutiny formy), jak je znázorněno na obr. 5.1. Čím větší je tlakový gradient, tím rychlejší je tok taveniny.



**Obr. 5.1** Tlak taveniny v jednotlivých místech toku během procesu vstřikování

Při vstřiku je tavenina vystavena především smykovému namáhání a v menší míře je namáhána i podélně. K podélnému toku dochází zejména v místech s náhlým zmenšením rozměrů, jako například v ústí vtoků, avšak při toku taveniny smykové namáhání výrazně převažuje. Princip toku taveniny ve vtokové soustavě a v dutině formy je znázorněn na obr. 5.2.



**Obr. 5.2** Pohyb taveniny při toku v dutině formy

V prvním okamžiku vstřiku vstupuje materiál do formy při relativně nižším tlaku, při kontaktu s formou ztrácí teplo a začíná tuhnout, vytváří se ztuhlá vrstva, která postupně narůstá. Vlivem narůstající ztuhlé vrstvy se výrazně snižuje velikost tekutého jádra (mezery, kudy proudí tavenina) a smyková rychlost taveniny se tak v jádru výrazně zvyšuje. Smykové namáhání působící na taveninu způsobuje orientaci makromolekul, tavenina je zároveň příliš viskózní na to, aby mohlo dojít

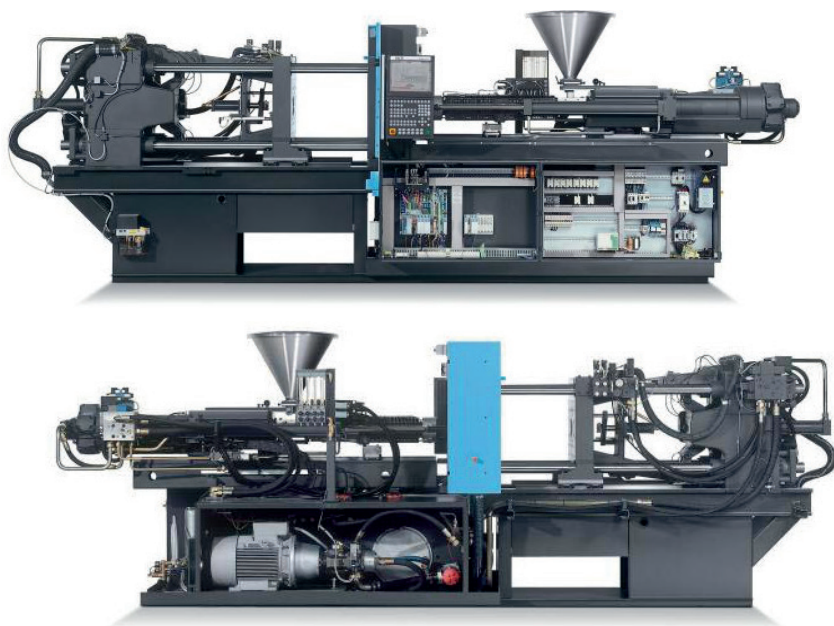
k úplnému uvolnění veškerého vnitřního napětí. V důsledku toho vykazují neplněné plasty větší podélné smrštění vůči smrštění příčnému.

## 5.2

### Vstřikovací stroj

K detailnímu pochopení procesu vstřikování je nezbytně nutné znát konstrukci a pracovní činnost jednotlivých částí vstřikovacího stroje. Nejdůležitější části vstřikovacího stroje (viz obr. 5.3) jsou:

- vstřikovací jednotka,
- rám stroje s hydraulickými či elektrickými pohony,
- řídicí a regulační jednotka,
- uzavírací jednotka.



**Obr. 5.3** Vstřikovací stroj bez krycích částí – přední a zadní pohled

### 5.2.1 Vstřikovací jednotka

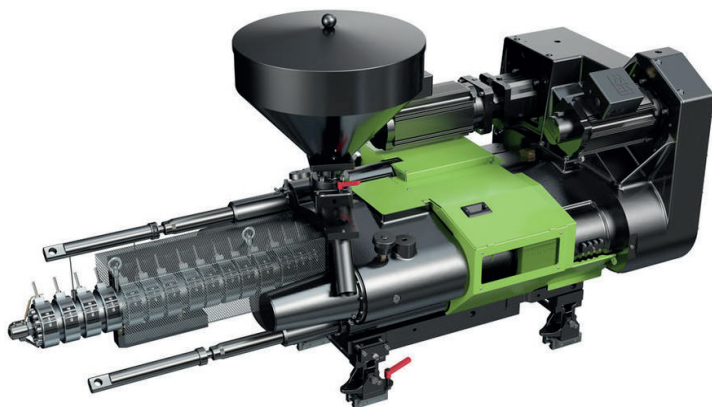
Prvním úkolem vstřikovací jednotky je *plastifikace materiálu*, to znamená jeho roztavení a homogenizace dávky taveniny. Ve chvíli, kdy je dávka taveniny připravena, dochází k jejímu *vstřiku do dutiny formy* a následně k *dotlaku*. Při vstřiku taveniny udržuje vstřikovací jednotka nastavenou rychlost a to až do dosažení tzv. bodu přepnutí. Od bodu přepnutí dochází k dotlaku, přičemž vstřikovací jednotka udržuje nastavený tlak ve zbývajícím množství taveniny. Při všech výše popsaných činnostech je s ohledem na kvalitu výstřiků prvořadá stabilita vstřikovací jednotky, tzn. přesnost a opakovatelnost nastavených parametrů, jako je např. rychlost vstřiku, tlak ve fázi dotlaku, obvodová rychlost šneku, a další.

V průběhu let došlo k výrazným změnám v konstrukci vstřikovacích jednotek. První generace vstřikovacích strojů používala *pístové vstřikovací jednotky*, kde byl materiál ohříván stykem s vyhřívaným válcem a nebyl nijak promícháván, proto byl čas ohřevu materiálu relativně dlouhý a tavenina nevykazovala vysoký stupeň homogenity. Následně byl materiál vstříknut do dutiny formy pomocí pístu. Tento typ vstřikovací jednotky byl postupně nahrazen šnekovou vstřikovací jednotkou, která má oproti pístové jednotce řadu výhod. Pístové vstřikovací jednotky se dnes používají jen v omezené míře, především u specifických aplikací, např. při zpracování materiálů, které jsou citlivé na smykové namáhání.

**Šneková vstřikovací jednotka** (viz obr. 5.4) je v současné době standardem vstřikovacích strojů. Její konstrukce má hned několik výhod. Zejména homogenita taveniny je výrazně vyšší, a to jak homogenita plniva (například pigmentu při barvení), tak i teplotní homogenita taveniny. Další výhodou je snížená viskozita taveniny vlivem smykového namáhání, kterému je materiál vystaven při průchodu drážkou šnekovice. V neposlední řadě je velkou výhodou výrazně nižší čas zdržení materiálu v tavicí komoře stroje a tím menší jeho tepelné namáhání a s tím spojené menší riziko tepelné degradace. Mezi vyloženě praktické technologické výhody patří tzv. samočisticí schopnost a menší riziko zapékání materiálu ve vstřikovací jednotce. Samočisticí schopnost je využívána při tzv. „přejezdu“ materiálu, kdy se zastaví přísun stávajícího materiálu a opakovaným dávkováním a vstřikem mimo formu se materiál tzv. „vyjíždí“. Ve chvíli kdy je jednotka prázdná, se začne dávkovat materiál nový, stejným postupem opakovaného dávkování a vstřiku. Díky tomu vytlačí nový



materiál z tavicí komory vstřikovací jednotky zbytky materiálu původního a to bez nutnosti demontáže.



Obr. 5.4 Vstřikovací jednotka

Každá šneková vstřikovací jednotka je charakterizována základními technickými parametry, mezi které patří:

- vstřikovací kapacita,
- plastifikační výkon,
- maximální vstřikovací tlak.

**Vstřikovací kapacita** je maximální množství materiálu, které dokáže stroj vystříknout z tavicí komory během jednoho vstřiku. Je udávána buď objemově v jednotkách  $\text{cm}^3$ , nebo hmotnostně, kdy tato hmotnost platí pro polystyren (PS). U jiného materiálu bude hmotnostní vstřikovací kapacita jiná, jelikož je nutné zohlednit rozdílnou hustotu materiálu (viz kapitola 1, tab. 1.1a).

**Plastifikační výkon** je maximální rychlost přípravy taveniny polymeru v jednotkách  $\text{kg/h}$  a opět se udává pro polystyren (PS). Zde je nutno počítat, že vstřikování je diskontinuální proces a proto je ve srovnání s extrudery tento výkon nižší. Plastifikační výkon závisí na velikosti dávky, průměru šneku, typu šneku, otáčkách a na výkonu topných pásem. Zároveň je však vždy nutno přihlídnout ke konkrétnímu typu materiálu a celkové době vstřikovacího cyklu.

**Maximální vstřikovací tlak** je tlak, na který je vstřikovací jednotka dimenzována, a kterému může stroj vystavit taveninu polymeru ve fázi vstřiku či dotlaku. Tuto hodnotu udávají výrobci strojů v jednotkách bar a běžně dosahuje velikosti (1 500 ÷ 2 500) bar.

Vstřikovací jednotka je složena z několika základních částí:

- násypky,
- tavicí komory (válce),
- šneku,
- zpětného ventilu,
- trysky,
- topných pásem,
- pohonu rotačního pohybu šneku,
- pohonu lineárního pohybu šneku.

### **Násypka**

Originální násypka umístěná na stroji od výrobce je nejčastěji nerezová nádoba, navržena tak, aby se z ní granulát sypal plynule do plnicího otvoru vstřikovací jednotky, přičemž by nikde neměly ulpívat granule. Tvar násypky může být různý a musí zajišťovat snadné čištění. Pro materiály, které vykazují rychlou absorpci vzdušné vlhkosti, může být násypka vybavena topením. Většina výrobců vstřikovacích strojů nabízí i násypky se zabudovaným sítem či s magnety pro zabránění vniknutí velkých částic a kovových nečistot do tavicí komory, což se týká zejména výroby z recyklátů.

### **Tavicí komora**

Tavicí komora (viz obr. 5.5) je válec s přesnou dírou (vyrobenou honováním), ve kterém je uložen šnek, a která je opatřena povrchovou úpravou pro zvýšení tvrdosti, popřípadě korozní odolnosti. Komora je z vnějšku opatřena topnými odporovými pásy, které jsou schopny dosáhnout u běžných strojů teploty až 350 °C a u strojů určených pro zpracování vysoce výkonných (high-tech) polymerů až 400 °C. Nicméně většina tepla potřebného pro roztavení polymeru (ca 2/3) je vyvinuta třením vlivem smykového namáhání, a to jak granulátu o stěny tavicí komory a šneku, tak i v granulátu samotném. Roztavený materiál je mezi šnekem

a komorou (z důvodu nízké tepelné vodivosti polymeru) jen v tenkých vrstvách, aby byl teplotně homogenizován.



*Obr. 5.5 Tavící komora vstříkovací jednotky*

### Šnek

Šnek vstříkovacího stroje je z pohledu kvality vstříkovaného dílu klíčovou součástí. V podstatě se dá říci, že na každý polymerní materiál by mohla být navržena jeho ideální geometrie. To by však znamenalo, že při každé změně materiálu ve výrobě, by muselo dojít i k výměně šneku. Proto se v praxi používají univerzální geometrie šneku, které jsou navrženy pro širokou paletu běžně používaných materiálů. Nejpoužívanějším typem šneku je **3zónový diferenciální šnek**, jehož geometrie je znázorněna na obr. 5.6. Geometrie tohoto typu se skládá ze tří zón a to:

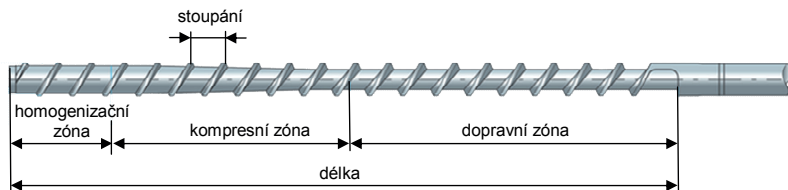
- dopravní,
- kompresní,
- homogenizační.

**Dopravní zóna** se vyznačuje hlubokou drážkou, která má za úkol nabírat velké množství granulátu z násypky stroje a postupně jej dopravit do kompresní zóny šneku. V této zóně je granulát vystaven smykovému namáhání jen velmi málo a v podstatě je postupně ohříván pouze od topných pásem.

**Kompresní zóna** šneku se vyznačuje postupným zvětšováním jádra šneku, čili zmenšováním hloubky závitů. Díky tomu je materiál stále více smykově namáhán, zvyšuje se teplo vyvinuté třením a materiál je intenzivně taven. Na konci kompresní zóny je hloubka závitů již velmi malá a veškerý granulát by měl být již roztaven.

Vzduch, který je na počátku kompresní zóny mezi granulátem, se díky stlačování materiálu vytlačuje proti směru pohybu granulátu.

**Homogenizační zóna** je poslední zónou šneku a zajišťuje promíchávání taveniny. V této části je hloubka závitů stejná jako na konci kompresní zóny čili velmi malá a to proto, aby byl materiál teplotně homogenní.



**Obr. 5.6** Geometrie 3zónového šneku

Mezi nejdůležitější technické parametry šneku patří:

- průměr šneku ( $D$ ),
- poměr délky a průměru šneku ( $L/D$ ),
- kompresní poměr.

**Průměr šneku** je základní rozměr šneku a musí mu odpovídat vnitřní průměr tavící komory (válce) vstřikovací jednotky. Průměr je vždy udáván v milimetrech a nejčastěji se pohybuje od 15 mm do 200 mm. Ve speciálních případech může být i výrazně větší, ca (200 + 300) mm (u velkých strojů pro výrobu výstřiků o hmotnosti několik desítek kilogramů).

Velmi důležitým parametrem šneku je jeho **poměr  $L/D$** . Jedná se o poměr mezi délkou šneku ( $L$ ) a jeho průměrem ( $D$ ). Pro zpracování termoplastů je tento poměr minimálně 20:1. Pro zpracování reaktoplastů, elastomerů a tekutých silikonů je přibližně 14:1. Dále se používají tzv. prodloužené šneky, kde se tento poměr pohybuje kolem 24:1. Tyto šneky jsou určeny pro zpracování materiálu s barevnými přísadami, nejčastěji u polypropylenu (PP) a polyethylenu (PE), jelikož zajišťují lepší promíchání barviva. Prodloužené šneky s vyšším poměrem  $L/D$  se hodí také pro vstřikování s krátkými výrobními cykly.

**Kompresní poměr** je definován jako poměr mezi hloubkou závitů v dopravní zóně šneku a hloubkou závitů v zóně homogenizační. Pro každý materiál je vhodný určitý

kompresní poměr a například pro polyamidy (PA) je doporučený poměr 3:1 (u šneku o průměru 30 mm a poměru  $L/D = 20:1$ ). Běžný kompresní poměr u termoplastů je však 2:1 a u materiálů citlivých na smykové namáhání, například polyvinylchloridu (PVC), je to ca 1,6:1. Požívají se také šneky bez komprese (čili 1:1) a to pro zpracování elastomerů a tekutých silikonů.

Jak již bylo uvedeno výše, pro výrobu dílů v krátkých cyklech je často použit šnek s vyšším poměrem  $L/D$ , čili *prodloužený šnek*. Dalším řešením je použití šneku se speciálními míchacími zónami. *Míchací zóny* se používají hlavně v případech, kdy je požadována vysoká homogenita taveniny z hlediska teploty a dispergace plniva. Stupeň homogenity pak závisí především na dvou kritériích:

- době zdržení taveniny v míchací zóně,
- četnosti rozdělení taveniny.

Důležitým kritériem míchacích zón je také tlaková ztráta, která by měla být co možná nejmenší, aby nedošlo ke snížení kvality plastifikace materiálu. Jednou z často používaných míchacích zón je tzv. rombická zóna, která je velmi podobná těm, které se používají u extruze. Tento typ míchací zóny se vyznačuje dobrým hnětením (promícháváním) taveniny při současném zachování určité dopravní účinnosti (materiál je nucen se vlivem otáček šneku pohybovat vpřed).

Použití *prodloužených plastifikačních šneků* je výhodné při zpracování následujících materiálů a podmínek:

- *plastů s velkou měrnou tepelnou kapacitou*, například PE, PP a PA a to za následujících podmínek:
  - ✓ krátké doby cyklu,
  - ✓ střední doby cyklu a vysoké hmotnosti výstřiku (více než 50 % objemu maximální dávky),
- *kompaundů citlivých na smykové namáhání* (smykové namáhání je menší a tudíž je nutné zvýšit podíl dodaného tepla pomocí topení),
- *plastů s přidaným barevným masterbatchem*, kde je vyžadována vysoká homogenita barviva,
- *při snížení teplot taveniny na minimum* z důvodu požadovaného zkrácení doby cyklu (resp. doby chlazení) nebo eliminace rizika tepelné degradace taveniny.

### Speciální typy šneků

Mezi speciální typy šneků patří *bariérový šnek* (viz obr. 5.7), který pracuje s neustálým oddělováním taveniny od pevných částic plastu. Základní odlišností je druhý chod závitu v tzv. bariérové zóně, která nahrazuje kompresní zónu. V této zóně jsou pevné částice plastu natlačovány ke stěnám vytápěné tavicí komory. Na počátku této zóny je začátek druhého chodu závitu na šneku, jehož bok (přepážka) je v porovnání s původním trochu ubrán – je nižší. Mezi čelem tohoto závitu a stěnou tavicí komory je definována mezera. Tím jsou vytvořeny dva kanály. Každý má jinou funkci: pevné části a tavenina plastu se oddělují bariérovou přepážkou. Stoupání v bariérové zóně je mnohem větší než v zóně plnění, abychom obdrželi potřebný objem v druhém závitu. Mezera bariérové přepážky je volena tak, aby přes ni nemohly přejít pevné části, ale aby se také nepřekročilo smykové namáhání plastu. Pevné části granulátu jsou neustále tlačeny na stěnu tavicí komory a bariérová překážka stírá vzniklou taveninu do druhého závitu. Druhý závit je postupně mnohem hlubší než první, protože již není potřeba promíchávat taveninu s pevnými částicemi, které jsou již roztavené. Je tak možné používat vyšší otáčky šneku než u 3zónového šneku. Zlepšuje se homogenizace materiálu a promísení s pigmenty a dalšími aditivami.



**Obr. 5.7** Bariérový šnek

Tento typ šneku se vyznačuje následujícími výhodami:

- vysokým plastikačním výkonem,
- nižší teplotou taveniny,
- dokonalým protavením granulátu.

Pro své výhody je bariérový šnek přednostně používán při výrobě větších dílů, kde je potřebný velký plastikační výkon. Naopak, tento šnek není zcela vhodný pro zpracování materiálu s vláknitým plnivem.

### **Zpětný ventil**

Zpětný ventil (viz obr. 5.8) je důležitou součástí vstříkovací jednotky, která je připevněna pomocí závitu na předním konci šneku. Konstrukce zpětného ventilu může být různá, avšak nejčastěji se skládá ze tří částí:

- špičky s kanály pro průtok taveniny,
- kroužku,
- podložky s těsnící dosedací plochou.



*Obr. 5.8 Zpětný ventil*

Zpětný ventil je nutné použít při vstříkávání téměř všech materiálů a jeho úkolem je zabránit zpětnému toku taveniny ve fázi vstříku, dotlaku a plastifikace. Zpětný ventil také zabraňuje nežádoucímu poklesu tlaku během procesu vstříkávání. Při plastifikaci materiálu nesmí konstrukce ventilu omezit průtok taveniny vpřed (před čelo šneku) a při vstříkávání taveniny do dutiny formy i ve fázi dotlaku musí zajistit maximální těsnost. Zpětný ventil je během procesu velmi namáhaný, a proto je u něj větší riziko opotřebení.

### **Tryska**

Tryska (někdy nazývána také jako špička) zajišťuje spojení mezi vstříkovací komorou a formou. Jejím úkolem je doprava materiálu do dutiny formy, resp. její vtokové soustavy s minimální tlakovou ztrátou. U trysek je také důležité, aby při kontaktu s chlazenou formou docházelo k minimálním tepelným ztrátám. Ohřev trysky je zajištěn pomocí topného odporového pásu a teplota je měřena pomocí termočlánku (obdobně jako u tavicí komory). Připevnění trysky k tavicí komoře je nejčastěji řešeno přírubově pomocí vysokopevnostních šroubů. Spojení mezi tryskou a komorou musí být těsné, aby nedocházelo k unikání taveniny do těsnicí plochy a její následné degradaci. Trysky se dělí na dva základní konstrukční typy:

- otevřené,
- uzavíratelné jehlou.

Ovládání uzavíratelných trysek jehlou je řešeno různě, nejčastěji pomocí pružiny, případně pákou, ovládanou pneumaticky nebo hydraulicky (zejména u velkých trysek). Dalším důležitým aspektem je tvar dosedací plochy trysky, která zjišťuje těsnost mezi tryskou a formou. Opět existují dvě provedení a to:

- dosedací plocha s rádiusem (viz obr. 5.9),
- plochá dosedací plocha.



**Obr. 5.9** Vstříkovací tryska

### **Opotřebení vstříkovací jednotky**

Vstříkovací jednotka a zejména některé její jednotlivé součásti jsou během procesu vstříkování silně namáhány, a proto se u nich mohou objevit příznaky opotřebení za relativně krátkou dobu. Těmito příznaky jsou zejména kolísající materiálový polštář, kolísající doba dávkování a kolísající hmotnost vstříkovaných dílů. Nestabilita procesu pak snižuje výslednou kvalitu vstříkovaných dílů. Nejčastějšími důvody opotřebení vstříkovací jednotky jsou:

- abrazivní plniva materiálu, jako jsou např. skleněná vlákna, kovová vlákna, keramický prášek atd. (viz obr. 5.10),
- chemické složení plastu (zejména u PVC, materiálů s některými typy retardérů hoření, materiálů obsahující fluoridy apod.),
- nesprávně zvolené technologické parametry (příliš vysoká rychlost plastifikace, příliš vysoký zpětný tlak, špatně nastavený teplotní profil apod.).





**Obr. 5.10** Abrazivní opotřebení dopravní zóny diferenciálního šneku

Vstříkovací komora a šnek jsou z důvodů zvýšení jejich životnosti opatřeny povrchovou úpravou pro zvýšení tvrdosti, popř. korozní odolnosti. Nejčastějším typem povrchové úpravy je *nitridace*. Povrchová vrstva nitridů je velmi tvrdá a zároveň hladká, což je pro správný pohyb materiálu komorou žádoucí, avšak nevýhodou nitridační vrstvy je její relativně malá tloušťka, která se pohybuje od 0,1 mm do maximálně 0,3 mm. Pod nitridační vrstvou skokově klesá tvrdost, a proto když dojde k poškození – vylomení nitridační vrstvy, dochází k dalšímu opotřebení šneku velmi zrychlenou formou. Při vstříkávání materiálů silně abrazivních, například s velkým obsahem skleněných vláken, je doporučeno používat *vstříkovací jednotky s bimetalickou komorou*.

### Výběr vstříkovací jednotky

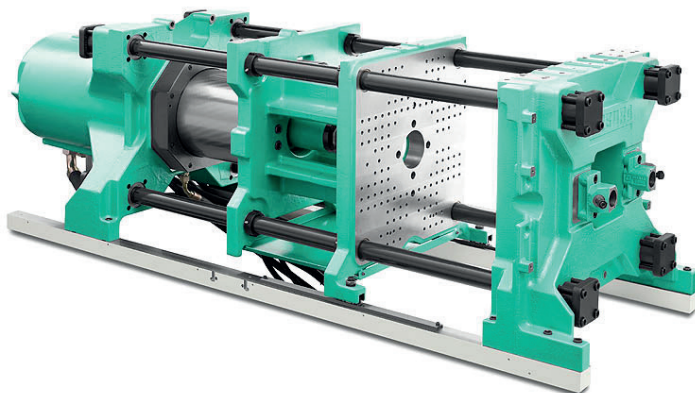
Při výběru správné vstříkovací jednotky je třeba zvážit následující faktory:

- **typ trysky:**
  - ✓ plochá,
  - ✓ s radiusem,
  - ✓ otevřená x uzavíratelná.
- **výběr šneku a komory s ohledem na zpracovávaný materiál:**
  - ✓ geometrii šneku,
  - ✓ povrchovou úpravu šneku a komory,
  - ✓ velikost vstříkovací jednotky (objem dávky by měl činit 20 ÷ 80 % maximální vstříkovací kapacity),
  - ✓ dostatečný plastikační výkon stroje.

## 5.2.2 Uzavírací jednotka

Uzávřací jednotka ovládá pohyb vstřikovací formy během otevírání a zavírání a zároveň zajišťuje zavření formy uzavřací silou během vstřikovacího cyklu. Uzavřací jednotka může být v několika provedeních. Nejčastějším typem je **hydraulická uzavřací jednotka** (viz obr. 5.11) s vodícími sloupky. Tato jednotka se skládá z několika základních částí:

- pevné upínací desky,
- pohyblivé upínací desky,
- vodících sloupků,
- hydraulického válce.

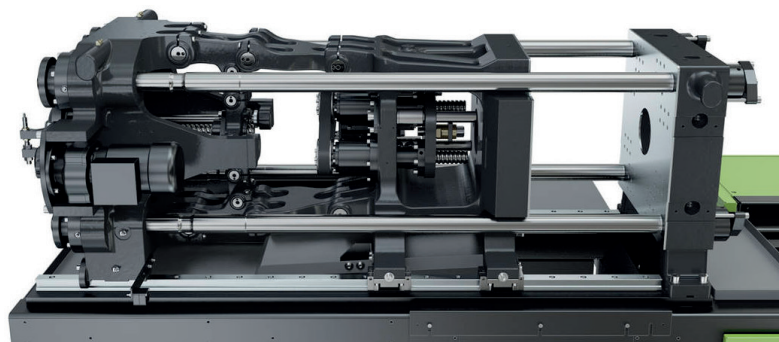


*Obr. 5.11* Hydraulická uzavřací jednotka

Pevná a pohyblivá deska je opatřena systémem děr se závitem, které slouží k upnutí formy a to buď pomocí šroubů, či pomocí upínek. Středová díra v těchto deskách je pro středící kroužek formy, který zajišťuje správnou polohu formy při jejím nasazování. Další částí jsou vodící sloupky, které spojují obě upínací desky. Jednak slouží k vedení pohyblivé desky při otevírání a zavírání a zároveň zajišťují tuhost uzavřací jednotky. Dimenzování sloupků vždy odpovídá velikosti maximální uzavřací síly, kterou je jednotka schopna vyvinout. Tato síla je vyvinuta pomocí hydraulického válce, díky čemuž se dá síla velmi přesně ovládat dle potřeb vstřikovacího cyklu.

Dalším častým typem uzavírací jednotky je **jednotka s kloubovým mechanismem** (viz obr. 5.12). Tato jednotka se používá u elektrických či hybridních strojů. Kloubový mechanismus je tvořen dvěma sloupky, které jsou spojeny otočným čepem. Jeden konec je připevněn k pevné a druhý k pohyblivé desce. Když je jednotka otevřena, sloupky jsou do tvaru písmene „V“, naopak při zavření tvoří přímku. Tento systém má několik výhod a to zejména:

- výrazně menší ovládací síly mechanismu,
- vysokou rychlost pohybů,
- při přetížení nedochází k otevření formy (tzv. „dýchnutí“ formy),
- menší spotřebu energie.



**Obr. 5.12** Kloubová uzavírací jednotka

### Velikost uzavírací síly formy

Uzavírací síla formy musí být dostatečně vysoká, aby zejména v počáteční fázi vstřiku nedošlo k tzv. „dýchnutí“ formy. K dýchnutí formy dochází ve chvíli, kdy tlak taveniny plní dutinu formy přetlačí uzavírací sílu. V důsledku toho dochází k vniknutí taveniny do dělicí roviny a vstříkované díly vykazují *přetoky* (zástříky). Uzavírací síla však zároveň nesmí být zbytečně vysoká, aby vstříkovací forma umožňovala únik vzduchu během plnění (tzv. „odvzdušnění“ formy), a aby nedocházelo k „vymačkávání“ (poškození) dělicí roviny. Správným nastavením uzavírací síly formy je tedy zajištěno plnění dutiny formy bez tvorby zástříků a zároveň dlouhá životnost nástroje. V rámci vstříkovacího cyklu je také nutné nastavit sílu, která přisouvá formu při jejím zavírání. K tomu obecně postačuje

relativně malá síla, avšak předtím musejí být nastavené veškeré ochranné funkce formy, aby nedošlo k poškození. U běžných forem postačuje tato síla ca 5 kN, ale v případě nutnosti je možné ji postupně zvyšovat na ca 25 kN.

### Nastavení uzavírací síly

Při prvotním nastavení uzavírací síly, kdy není známá potřebná hodnota, lze použít odhad dle jednoduchého výpočtu. Tento výpočet vychází z jednoduchého pravidla, že uzavírací sílu ( $F_u$ ) ovlivňuje plocha průmětu do dělicí roviny ( $S$ ) a tlak v dutině formy ( $p$ ). Jelikož tlak není dopředu znám, je nahrazen tzv. specifickou uzavírací silou – tlakem ( $p_s$ ), který je doporučen dle druhu materiálu, viz rovnice (1). Pro materiály PS, SB, SAN, ABS, PE-LD a PE-HD je tento specifický tlak (2,5 až 5) kN/cm<sup>2</sup>. Oproti tomu u materiálů PMMA, PPO, PC PVC, PP, PA, POM, PET, PBT a PPS činí (5 až 7) kN/cm<sup>2</sup>.

$$S \cdot p_s \leq F_u \quad (1)$$

Tato síla se nastavuje při prvním rozjezdu formy a dle konkrétních potřeb je dále upravena.

### Výběr uzavírací jednotky

Při výběru správné uzavírací jednotky je třeba zvážit následující faktory:

- **velikost vstřikovací formy**
  - ✓ rozměry,
  - ✓ středící kroužek,
  - ✓ připojení vyhazování,
  - ✓ hmotnost,
- **plochu průmětu vstřikovaného dílu do dělicí roviny** (ovlivňuje velikost uzavírací síly),
- **tloušťku stěny** (pro tenkostěnné výrobky je obecně zapotřebí větší uzavírací síla).

Při výběru uzavírací jednotky pro určitou formu je však nutné zvážit i jiné konstrukční specifikace, mezi které patří:

- maximální otevření formy,
- prostor mezi vodícími sloupky,

- maximální zdvih vyhazovače,
- rychlost upnutí formy.

Maximální otevření je dáno vzdáleností mezi deskami. Při tomto otevření je nutné počítat nejen s výškou formy, ale i s dráhou vyjetí vyhazovačů a vyhození výrobku, případně s manipulačním prostorem pro chapadlo robota, odkládající výrobek na pás dopravníku.

### 5.3

## Výrobní proces vstřikovaného dílu

Samotný výrobní proces vstřikovaného dílu se skládá z několika operací, přičemž technologie vstřikování je jen jednou z jeho částí. Před samotným vstřikováním je několik důležitých přípravných operací. Výrobní proces lze z hlediska materiálového toku seřadit následovně:

- přeprava granulátu,
- sušení granulátu,
- doprava granulátu ke strojům,
- míchání granulátu,
- vstřikování,
- případné dokončovací operace.

### **Přeprava materiálu**

Přeprava materiálu je řešena vždy na základě odebíraného množství granulátu. V případě, že je odebírané množství malé, je materiál dodáván v pytlích a to o hmotnosti 25 kg (nebo 20 kg). Středně velký odběr materiálu je řešen pomocí oktábinu. Tento kartonový obal na europaletě má obvykle hmotnost (400 až 1000) kg. Velký odběr materiálu je pak řešen pomocí přepravy materiálu v cisternách, granulát z cisteren je dopravován pomocí nasávačů do venkovních sil.

### **Sušení granulátu**

Operace sušení je z hlediska stability vstřikování a dosažení kvality dílů velmi důležitá. V podstatě všechny materiály kromě PP, PE a PS jsou navlhavé, a proto je nutné je před zpracováním důkladně vysušit. Důkladně vysušit granulát znamená snížit obsah vody v granulátu na úroveň označovanou jako minimální zbytková

vlhkost. Tuto hodnotu vždy předepisuje výrobce materiálů a běžně se pohybuje kolem 0,2 %. Většina materiálů v nepoškozeném originálním balení je dodávána v tzv. předsušeném stavu, který odpovídá zbytkové vlhkosti 0,4 %, proto je nutné vždy sušit před zpracováním. V průmyslové praxi jsou většinou sušeny i materiály nenavlhavé (PP, PE a PS) a to zejména z preventivních důvodů pro případné odstranění kondenzátu z povrchu granulátu.

Výrobce granulátu vždy doporučuje způsob sušení, to znamená teplotu a dobu sušení. Teplota je definována intervalem sušících teplot. V případě nutnosti rychlého sušení je doporučeno sušící zařízení nastavit na horní hranici doporučených teplot. Naopak v případě malého odběru materiálu ze sušícího zařízení jsou používány teploty na dolní hranici doporučené výrobcem. Některé typy polymerů lze jen obtížně vysušit na požadovanou zbytkovou vlhkost, a proto je nutné je pomocí standardních horkovzdušných sušáren (viz obr. 5.13) sušit po dlouhý čas. Při dlouhém sušení však hrozí riziko poškození (degradace) polymeru či jeho aditiv. V takových případech je výhodné použití alternativních způsobů sušení, jako například sušení pomocí vakua. Ve vakuové sušárně dojde nejprve k ohřevu granulátu na požadovanou teplotu pomocí horkého vzduchu (nejčastěji 80 °C) a poté k vytvoření silného podtlaku o velikosti 0,8 bar. Při tomto podtlaku odpovídá bod varu vody cca 54 °C, díky čemuž dochází k velmi rychlému a zároveň teplotně šetrnému sušení.



**Obr. 5.13** Stacionární horkovzdušné sušící zařízení

V případě, že materiál není dostatečně vysušen, má jeho vysoká zbytková vlhkost za následek technologické komplikace a snížení kvality vstřikovaného dílu. Mezi technologické komplikace lze řadit:

- zvýšenou tekutost taveniny a s ní spojené nebezpečí tvorby přetoků,
- kolísání doby dávkování,
- svévolné vytékání taveniny z trysky (v případě otevřených trysek).

Snížená kvalita dílu zahrnuje nejčastěji následující aspekty:

- vlhkostní šmouhy na povrchu dílu,
- přetoky,
- křehnutí materiálu v důsledku hydrolyzy (jen u některých materiálů, zejména PBT a PA).

Ve chvíli, kdy je u materiálu dosaženo požadované zbytkové vlhkosti, je možné ho dopravit ke vstřikovacímu stroji. Vzhledem k tomu, že sušení a navlhání granulátů je difuzní proces, je tento děj vratný a granulát je proto nutné zpracovat do určité doby.

**Tab. 5.1** Doporučené hodnoty technologických parametrů pro vybrané typy plastů

Plast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]	Vstřikovací tlak [bar]	Dotlak [bar]	Zpětný tlak [bar]
PS	250 ÷ 300	20 ÷ 60	600 ÷ 1 400	300 ÷ 800	60 ÷ 90
SAN	200 ÷ 260	40 ÷ 80	650 ÷ 1 600	350 ÷ 900	40 ÷ 80
ABS	210 ÷ 270	50 ÷ 85	650 ÷ 1 600	350 ÷ 900	40 ÷ 80
PVC	160 ÷ 180	20 ÷ 60	1 000 ÷ 1 600	400 ÷ 900	40 ÷ 80
PMMA	220 ÷ 250	20 ÷ 90	1 000 ÷ 1 400	500 ÷ 1 200	80 ÷ 120
PC	290 ÷ 320	85 ÷ 120	1 000 ÷ 1 600	600 ÷ 1 300	80 ÷ 120
PE	210 ÷ 250	20 ÷ 40	600 ÷ 1 400	300 ÷ 800	40 ÷ 80
PP	210 ÷ 290	20 ÷ 60	800 ÷ 1 400	500 ÷ 1 000	60 ÷ 90
PA 6	230 ÷ 260	40 ÷ 120	500 ÷ 1 600	350 ÷ 1 100	40 ÷ 80
PA 6.6	270 ÷ 310	20 ÷ 120	500 ÷ 1 600	350 ÷ 1 100	40 ÷ 80
POM	180 ÷ 210	80 ÷ 120	700 ÷ 2 000	500 ÷ 1 200	40 ÷ 80
PET	260 ÷ 290	20 ÷ 140	800 ÷ 1 500	500 ÷ 1 200	80 ÷ 120
PBT	230 ÷ 270	20 ÷ 60	800 ÷ 1 500	500 ÷ 1 200	80 ÷ 120
PPS	300 ÷ 360	60 ÷ 200	750 ÷ 1 500	500 ÷ 1 200	40 ÷ 80

### **Doprava granulátu ke strojům**

Vysušený granulát je v případě malé spotřeby dopravován ke strojům buď ručně, či přímo z vedlejší sušárny pomocí nasávače. U velkoobjemových sušáren je materiál dopravován ke zpracování pneumaticky.

### **Proces vstřikování**

Proces vstřikování je řízen mnoha parametry, které se navíc v závislosti na vstřikovaném materiálu značně liší (viz tab. 5.1). Technologické parametry vstřikování a jejich vliv na kvalitu dílu jsou popsány v kap. 5.4.

## 5.4

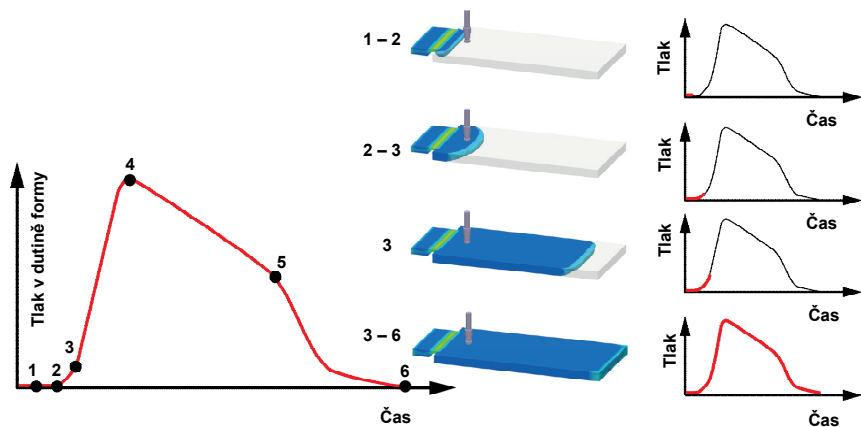
### Procesní parametry vstřikování a jejich vliv na kvalitu dílu

Rozhodující vliv na rozměry a hmotnost dílu má tlak uvnitř dutiny formy. Proto je důležité tento tlak udržovat rovnoměrně v každém vstřikovacím cyklu. Na tlak v dutině formy má ale vliv celá řada faktorů, jako například:

- teplota taveniny,
- viskozita taveniny,
- stabilita stroje,
- tlaková ztráta ve vtokovém systému atd.

*Tlak v dutině formy* lze sledovat pouze v případě, je-li forma vybavena tlakovými čidly uvnitř dutiny (viz obr. 5.14). Při použití těchto čidel je zřejmé, že tlak uvnitř dutiny formy tvoří ca 1/3 tlaku, který působí na taveninu uvnitř tavicí komory. Z pohledu kvality dílů by tedy bylo výhodné a přesné řídit vstřikovací proces (přepínání na dotlak) pomocí tlaku v dutině formy. Není-li forma vybavena tlakovými čidly, lze vstřikovací proces řídit také pomocí tlaku v tavicí komoře (např. systém SPC firmy Krauss Maffei). Díky tomu jsou vyloučeny tzv. tlakové špičky, jelikož přepnutí na dotlak probíhá při dosažení nastavené hodnoty tlaku. Tento způsob přepnutí na dotlak tak zaručuje optimální a zejména stabilní udržení tlaku v dutině formy a snižuje vliv negativních faktorů, které mohou stabilitu ovlivnit (např. změna viskozity taveniny).





Obr. 5.14 Průběh tlaku v dutině vstříkací formy

Tlak v dutině formy není konstantní, ale je charakterizován tlakovou křivkou (viz obr. 5.14). Vliv na tuto křivku má spousta parametrů, nejdůležitější jsou následující z nich:

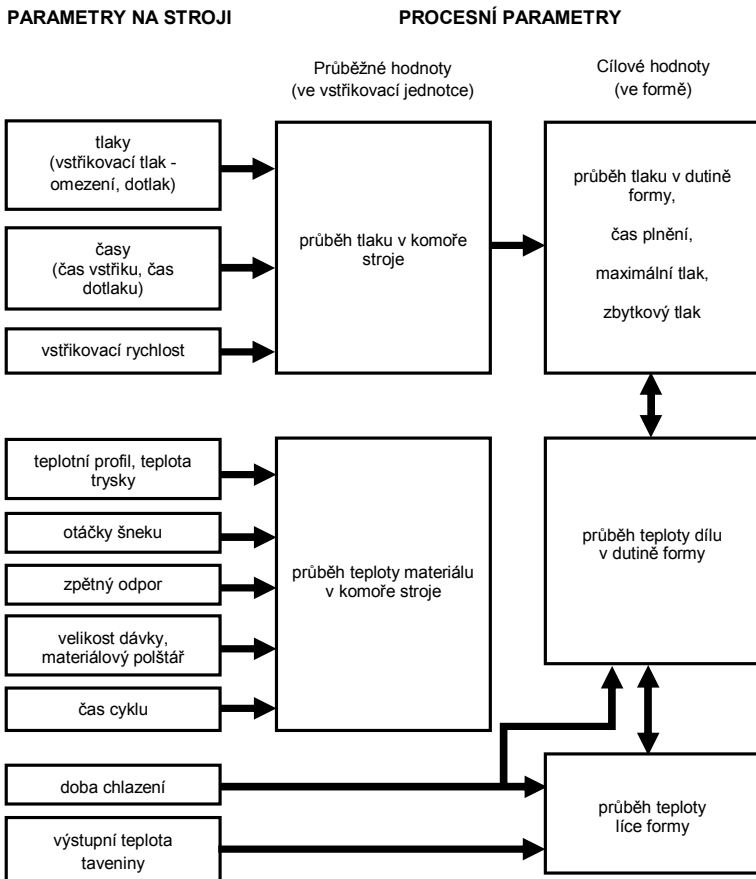
- **Ve fázi vstříku**
  - ✓ vstříkovací rychlost,
  - ✓ odpor vůči toku taveniny,
  - ✓ teplota taveniny,
  - ✓ teplota formy.
- **Ve fázi dotlaku**
  - ✓ teplota taveniny,
  - ✓ teplota formy,
  - ✓ velikost dotlaku,
  - ✓ doba dotlaku.
- **Ve vztahu k maximálnímu tlaku uvnitř dutiny**
  - ✓ vstříkovací rychlost,
  - ✓ teplota taveniny,
  - ✓ bod přepnutí na dotlak,
  - ✓ viskozita taveniny.

Tvar tlakové křivky může ovlivňovat následující aspekty kvality dílu:

- **Ve fázi vstříku**
  - ✓ vzhled dílu,
  - ✓ kvalitu povrchu dílu,
  - ✓ orientaci makromolekul,
  - ✓ stupeň krystalinity.
- **Ve fázi dotlaku**
  - ✓ tvorbu přetoků,
  - ✓ hmotnost dílu,
  - ✓ rozměry dílu
  - ✓ smršťení dílu
  - ✓ tvorbu lunkrů,
  - ✓ tvorbu propadlin.

Z hlediska samotné technologie vstříkovaní je kvalita dílů ovlivněna tlakovými a teplotními cykly v dutině formy. V ideálním případě by veličiny tlaku a teploty byly v každém bodě dutiny stejné. V takovém případě by ve vstříkovaných dílech nebylo vnitřní napětí a díly by nevykazovaly deformace. Takto rovnoměrné rozložení tlaku a teploty však u vstříkovaní není možné, jelikož při plnění dutiny formy dochází vždy k poklesu tlaku kvůli odporu vůči tečení taveniny. Stejně tak teplotní rozdíly, které vznikají, jsou způsobeny postupným ochlazováním taveniny během plnění dutiny a to i v případě, že je čas plnění obvykle velmi krátký. Při snaze o dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení tlaku a teploty v dutině formy je nutné co nejvíce snížit odpor vůči tečení taveniny během fáze plnění. Čím je tento odpor menší, tím rychlejší je plnění dutiny formy. Tlakové rozdíly v dutině jsou pak nižší díky menší tlakové ztrátě. Tento faktor je důležitý při návrhu formy, zejména její vtokové soustavy a při volbě procesních parametrů. Co se týče vlivu geometrie formy, obecně platí, že pro dosažení menší tlakové ztráty během plnění musí být vtoková soustava zbavena ostrých hran a náhlých změn směru toku taveniny, protože právě v těchto místech dochází k výrazným tlakovým ztrátám. Z pohledu nastavení procesních parametrů platí, že vstříkovací rychlost a teplota taveniny by měly být co možná nejvyšší. Tyto parametry mají za následek nízkou viskozitu taveniny, menší tlakové ztráty a krátký čas plnění dutiny formy. V reálném nastavení technologických parametrů však pochopitelně existují limity, které budou podrobně rozebrány v následujících odstavcích.

Vstřikovací rychlost lze zvyšovat do maximální možné hodnoty, kterou je schopen stroj vyvinout, avšak se zvyšující se rychlostí vstřiku, se zároveň zvyšuje riziko povrchových vad vstřikovaných dílů, které je označováno jako „*Jetting*“, neboli plnění volným paprskem taveniny. Pokud tedy konstrukce vtokové soustavy neumožňuje vysokou rychlost plnění dutiny formy, musí být nastavena nižší rychlost vstřikování.



**Obr. 5.15** Důležité procesní parametry ovlivňující kvalitu vstřikovaných dílů

Další omezení představuje teplota taveniny. Ta musí být taková, aby nedocházelo k termickému rozkladu polymeru. Čím je polymer teplotně citlivější, tím větší by měla

být teplotní rezerva k horní hranici doporučených teplot. Avšak tuto rezervu je nutné volit s ohledem na velikost intervalu doporučených teplot. Příliš nízká teplota přináší naprostý opak – vyšší viskozitu a vyšší tlakovou ztrátu. Navíc vlivem vyšší viskozity dochází v tavenině k velkému vnitřnímu tření během toku, což uvolňuje velké množství tepla. To znamená, že v krajním případě může nastavení nízkých teplot na vstřikovací jednotce vést k vyšším teplotám materiálu během toku.

Také teplota formy má jistá omezení, a to zejména proto, že čím vyšší je teplota formy, tím delší je doba chlazení a delší celková doba vstřikovacího cyklu. Teplota formy se tedy volí tak, aby vyhovovala materiálu a byly splněny požadavky na kvalitu dílu. Zbytečně vysoká teplota formy pak vede k nevhodné výrobě.

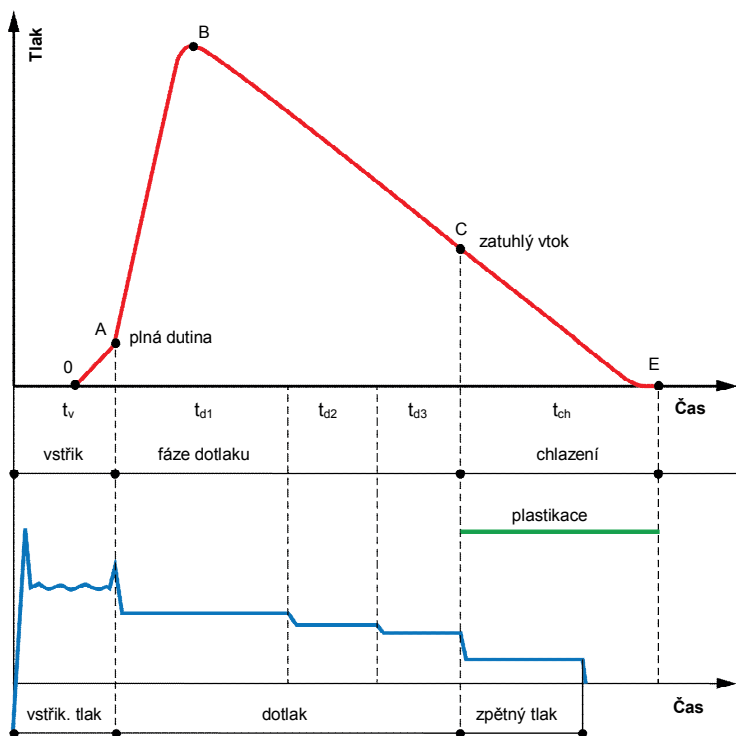
Na obr. 5.15 je uvedeno shrnutí důležitých parametrů ovlivňující kvalitu vstřikovaných dílů.

#### 5.4.1 Vstřikování a tlak v dutině formy

V předchozím odstavci bylo řečeno, že tlaková křivka ve formě má rozhodující vliv na kvalitu dílu. V této části kapitoly bude popsána spojitost mezi *vstřikovacím tlakem* a *tlakem v dutině formy*. Díky této spojitosti lze ovlivňovat tlakový cyklus v dutině formy při vstřiku a tím i kvalitu dílu.

Hydraulický tlak (působící v hydraulickém válci – pohon šneku) a specifický tlak (působící na taveninu před čelem šneku) jsou během vstřiku v podstatě úměrné, zanedbáme-li ztráty vlivem tření při pohybu šneku vpřed. Oproti tomu tlak v dutině formy je výrazně nižší vlivem tlakových ztrát a závisí na viskozitě taveniny, rychlosti vstřiku a konstrukci vtokového systému. Na obr. 5.16 je zobrazen vstřikovací tlak a křivka tlaku v dutině formy.

Z obr. 5.16 je zřejmé, že tlak uvnitř dutiny formy reaguje na vstřikovací tlak s určitým zpožděním. V bodě A je dutina již objemově naplněna a mezi body A a B dochází k natlačení taveniny do dutiny formy, aby bylo dosaženo maximálního tlaku. I ve chvíli, kdy se vstřikovací tlak nemění, tlak uvnitř dutiny formy se mírně snižuje v důsledku smrštění a to až do bodu C. Od tohoto bodu již tlak klesá rychleji, protože veškerá hmota je ztuhlá a tlak v dotlakové fázi nemá dále na tlak uvnitř dutiny vliv. Tlak postupně klesá až do otevření formy. Tlak, který je v dílu při otevření formy se nazývá zbytkový tlak.



**Obr. 5.16** Průběh tlaku v dutině formy (nahore) a ve vstříkacím stroji (dole)

0-A: dynamická fáze plnění; A-B: kompresní fáze plnění; B-C: dotlaková fáze; C-E: fáze chlazení (veškerý objem hmoty je ztuhlý a nyní dochází pouze ke snižování teploty až na teplotu vhodnou pro odformování);  $t_v$ : čas vstříku;  $t_{d1-3}$ : jednotlivé časy profilovaného dotlaku;  $t_{ch}$ : čas zbývajícího chlazení (po dotlaku)

## 5.4.2 Vstříkací tlak, dotlak, čas vstříku a čas dotlaku

Vstříkací tlak a dotlak musí být tak vysoký, aby bylo zajištěno dostatečně rychlé a účinné vyplnění dutiny formy. Na druhé straně by zejména dotlak neměl být příliš vysoký, aby díly nevykazovaly neúměrně vysoký zbytkový tlak, který vede k velkému vnitřnímu napětí výstřiku a jeho následným deformacím. U amorfních termoplastů je doporučeno používat menší dotlak a to za účelem získání dílů s co nejmenším vnitřním napětím. V opačném případě díly vykazují značnou křehkost a to zejména

v oblasti vtoků. Navíc vlivem vysokého dotlaku je natolik kompenzováno smrštění materiálu ve fázi tuhnutí taveniny, že mohou nastat problémy s odformováním dílů. U semikrystalických plastů je výhodné udržovat stálý a časově dostatečně dlouhý dotlak, aby byl zajištěn odpovídající proces krystalizace materiálu.

*Doba účinku vstřikovacího tlaku* (tzn. čas vstřiku a čas dotlaku) by měla být volena tak, aby odpovídala době, kdy dojde k zatuhnutí materiálu v ústí vtoku. Je-li tedy zejména čas dotlaku krátký, může dojít k zpětnému proudění taveniny z dutiny formy do vtokové soustavy. To vede k tvorbě propadlin a k rozměrovým odchylkám dílu. Naopak příliš dlouhá doba dotlaku (čas překračující zatuhnutí vtoku) je neefektivní a zbytečně prodlužuje vstřikovací cyklus, navíc v oblasti vtoku bude velké vnitřní napětí. Přístup v určení správné doby dotlaku závisí na druhu výrobku. U pohledových dílů, kde je prvořadá kvalita povrchu, je odpovídající doba dotlaku určena dobou, kdy povrch nevykazuje žádné propadliny. U ostatních dílů a zejména u dílů pevnostních se správná doba dotlaku určuje pomocí hmotnosti dílu. Při době dotlaku, která je větší nebo rovna době zatuhnutí vtoku, zůstává hmotnost dílu stejná (nezvyšuje se). Naopak při době kratší, hmotnost dílu klesá.

### **Vstřikovací rychlost**

Vstřikovací rychlost by měla být co nejvyšší, aby byla dutina formy co nejrychleji zaplněna taveninou plastu o minimální teplotní a tlakové ztrátě. Zároveň nesmí docházet k tzv. „Jettingu“ (plnění volným paprskem taveniny). U tenkostěnných dílů je vhodné použít vyšší rychlost vstřikování než u tlustostěnných dílů, aby bylo dosaženo rovnoměrného plnění dutiny formy. Nízká rychlost plnění má za následek velké teplotní rozdíly v oblasti vtoku oproti vzdálenějším místům od vtoku. Vyšší viskozita ochlazené taveniny pak vyžaduje vyšší vstřikovací tlaky, což klade vysoké nároky na uzavírací sílu formy.

Příliš vysoká vstřikovací rychlost má za následek vysokou smykovou rychlost působící mezi ztuhlou povrchovou vrstvou a plastickým jádrem. Smykové namáhání může v krajním případě vést k poškození (degradaci) polymeru. K tomuto poškození dochází nejčastěji při toku taveniny v náhlých změnách průřezu dílu či vtokové soustavě. Náchylné jsou zejména bodová ústí vtoku, kde dochází k vysokému vzrůstu smykové rychlosti a zvýšení vnitřního tření polymeru, což má za následek jeho termický rozklad. V konkrétních případech závisí na typu polymeru. Například

PP a PA snáší smykové namáhání velmi dobře, oproti tomu PMMA a PC jsou materiály citlivé vůči smykovému namáhání.

Při vysokých vstřikovacích rychlostech je obzvláště důležité účinné odvzdušnění dutiny formy. Pokud tomu tak není, vzduch, který z počátku vyplňuje dutinu formy, nestačí vlivem jejího rychlého plnění taveninou plastu unikát a je stlačován. Stlačený vzduch se výrazně zahřívá, což vede k termickému poškození taveniny, která vzduch obklopuje. Tento jev je označován jako tzv. „Diesel efekt“.

Pro správné nastavení vstřikovací rychlosti je několik doporučení, která jsou však u pohledových dílů značně individuální a vždy záleží na konkrétním typu plastu, konstrukci dílu a konstrukci vstřikovací formy. Doporučené hodnoty pro nastavení vstřikovací rychlosti uvádí ve většině případů výrobce materiálu v materiálovém či technologickém listu.

### **Orientační efekt makromolekul vlivem vstřikovací rychlosti**

Při plnění dutiny formy může nastat orientační efekt a to zejména vlivem vnitřního tření makromolekul. Makromolekuly, které v tavenině zaujímají náhodnou polohu, jsou při působení smykového namáhání orientovány ve směru proudění. Orientace makromolekul vede k nerovnoměrnému smrštění materiálu a anizotropii vlastností výstřiku. Čím vyšší je smyková rychlost, tím větší je orientace makromolekul. To znamená, že při vyšších vstřikovacích rychlostech je orientace makromolekul vyšší. Tento efekt lze potlačit vyšší teplotou taveniny a vyšší teplotou formy, které podporují relaxaci makromolekul po skončení plnění dutiny formy taveninou plastu. Tím, že je snížena orientace makromolekul, jsou eliminovány i její negativní účinky (vnitřní napjatost dílu a jeho anizotropie vlastností). Proto je vhodné pro snížení orientace makromolekul (pokud to proces dovoluje) volit vyšší teplotu taveniny a teplotu formy, a až teprve poté snižovat vstřikovací rychlost.

## **5.4.3 Plastifikace materiálu**

### **Teplota taveniny**

Teplota taveniny je základním technologickým parametrem, který je specifický pro každý materiál. Při plastifikaci je granulát roztaven a ohřát na předepsanou teplotu taveniny a to ideálně homogenně v celém objemu dávky. O teplotě taveniny

rozhoduje na první pohled teplotní profil, který je nastaven na tavicí komoře vstřikovacího stroje, avšak přímý vliv na tuto teplotu má více faktorů, mezi které patří:

- obvodová rychlost šneku,
- zpětný tlak při dávkování,
- doba zdržení materiálu v tavicí komoře.

Teplota taveniny se po opuštění vstřikovací jednotky mění, zejména v důsledku:

- tření materiálu ve fázi vstřiku,
- teploty formy.

Při příliš nízké teplotě taveniny může u vstřikovaných dílů nastat problém v podobě neprotavených částic a naopak při příliš vysoké teplotě taveniny může dojít k termickému rozkladu materiálu. Ovšem nastavení nízkých hodnot teplot na tavicí komoře ještě nemusí znamenat nízkou teplotu taveniny v dutině formy. Silné tření materiálu v důsledku vyšší viskozity taveniny může vést k prudkému zvýšení její teploty a paradoxně i k místnímu tepelnému poškození materiálu.

### **Teplota tavicí komory**

Pro nastavení teploty taveniny, resp. topných těles (pásů) na tavicí komoře vstřikovacího stroje je nejlepší využít doporučení výrobce materiálu. Výrobce vždy doporučuje určitý interval teplot a teplota spadající do tohoto intervalu by měla být nastavena na prvním topném pásu komory ze strany trysky. V případě, že doporučené teploty nejsou známy, lze použít obecně doporučené hodnoty pro jednotlivé typy polymeru. Teplota nastavená na topném pásu odpovídá teplotě vnitřní stěny tavicí komory, popřípadě teplotě v místě termočlánku. Pokud nezohledňujeme teplo vyvolané třením při plastifikaci, dosáhne tavenina této teploty za relativně dlouhou dobu. Avšak právě díky tření materiálu je ohřev relativně rychlý a jeho rychlost se zvyšuje se stoupajícím zpětným tlakem a zvyšováním obvodové rychlosti ve fázi plastifikace materiálu. Při změně nastavení těchto parametrů je proto důležité mít na zřeteli i jejich přímý vliv na teplotu taveniny. Hodnoty teplot na dalších topných pásech směrem k násypce by měly být sestupné. Pro většinu běžně používaných termoplastů je ideální rozdíl mezi teplotou prvního a posledního pásu (20 až 30) °C. Avšak například u materiálu PA 6.6 je pro plastifikaci vhodnější volit menší teplotní rozdíl. Teplotu v místě vstupu granulátu z násypky k dopravní zóně šneku je nutné udržovat na relativně nízké úrovni, a proto je místo vstupu granulátu vybaveno chladicími kanály, které udržují teplotu na hodnotě (30 až 40) °C, neboť zde nesmí



dojít k předčasnému natavení granulátu, který by znemožnil jeho pohyb dále do tavicí komory. Tato teplota však nesmí být ani příliš nízká, aby se nevytvářel vodní kondenzát. Chlazení pod násypkou je zvláště důležité pro polymethylmethakrylát (PMMA), které jsou zvláště citlivé na jejich na předčasné natavení.

### **Teplota trysky**

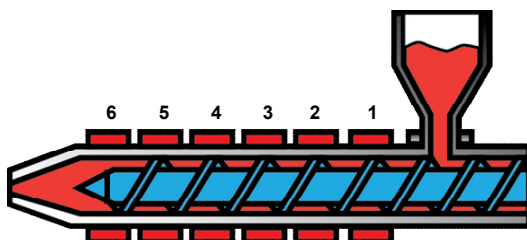
Teplota na vstřikovací trysce je důležitá pro snadné proudění taveniny tryskou do dutiny formy ve fázi vstřiku a dotlaku a měla by být nastavena na hodnotu odpovídající teplotě posledního topného pásu tavicí komory (směrem od násypky), popřípadě může být o něco málo vyšší či nižší, dle potřeb materiálu a nutnosti kompenzace tepelných ztrát v důsledku dotyku trysky s chlazenou formou. Teplota trysky je na malých a středně velkých vstřikovacích strojích v podstatě určena teplotou tavicí komory, ke které je připevněna, jelikož měrná tepelná kapacita trysky je oproti komoře velmi malá.

Je-li tryska vybavena termočlánkem (standardní řešení) je celkem snadné určit optimální nastavení teploty. Jedná se v podstatě o teplotu, která se během vstřikovacího cyklu vlivem průtoku taveniny, ani vlivem tepelných ztrát při dotyku s formou, nemění. Je-li teplota trysky příliš vysoká, dochází při dotyku s formou k jejímu poklesu a naopak, je-li příliš nízká, dochází vlivem protékající taveniny k následnému jejímu zvýšení. Z technologických důvodů je nastavení nižší teploty trysky oproti teplotě tavicí komory mnohem lepší, hlavně v případě otevřených trysek. Zajistíme tím, aby nedocházelo k vytékání materiálu z trysky a s tím i kolísání tzv. „materiálového polštáře“.

### **Teplotní profil tavicí komory**

Jak už bylo uvedeno, teplota na tavicí komoře vstřikovacího stroje se nastavuje zejména podle zpracovávaného materiálu, délky cyklu, umístění topného pásu a také dle konkrétní geometrie šneku. Nastavení jednotlivých topných zón je dáno tzv. teplotním profilem. Existují obecně čtyři typy teplotních profilů, jejichž příklad je uveden na obr. 5.17 :

- plochý,
- stoupající,
- klesající,
- stoupající s klesáním na trysce.



Topná zóna	6	5	4	3	2	1	
Nastavená teplota [°C]	280	280	280	280	280	280	- plochý
	280	275	270	260	250	240	- stoupající
	280	280	285	290	295	300	- klesající
	270	280	270	260	250	240	- stoupající s klesáním na trysce

Obr. 5.17 Příklady teplotních profilů tavicí komory

### **Plochý teplotní profil**

Tento teplotní profil s konstantní teplotou na všech topných pásech (včetně trysky) je výhodné použít při velmi krátkých cyklech s využitím velké až maximální vstřikovací kapacity. Výhoda tohoto profilu spočívá ve vysoké teplotní homogenitě taveniny a spolehlivosti protavení granulátu. Plochý profil se doporučuje také při zpracování plastu se skleněnými vlákny za účelem snížení opotřebení šneku a tavicí komory.

### **Stoupající teplotní profil**

Stoupající teplotní profil je v praxi nejčastější. Rozdíl teplot je většinou (20 až 30) °C, avšak může být i větší, dle materiálu a délky cyklu. Tento profil je přednostně používán u tepelně citlivých materiálů, jako například POM a PVC.

### **Klesající teplotní profil**

Jedná se o speciální teplotní profil, který se na třízónovém diferenciálním šneku používá jen ve výjimečných případech a to zejména při zpracování materiálu PA 6.6. Naopak pro bariérový šnek se jedná o standardní nastavení, které zajišťuje jeho správnou funkci.

### **Stoupající teplotní profil s klesáním na trysce**

Tento teplotní profil se běžně používá u otevřených trysek pro zabránění tvorby vláken u vtoku a proti vytékání taveniny z trysky. Při příliš nízké teplotě trysky však

hrozí zatuhnutí materiálu v trysce, případně vstříknutí částečně ztuhlého materiálu do formy.

Použití určitého typu teplotního profilu závisí na celé řadě faktorů a přes veškerá doporučení platí, že nejvhodnějšího nastavení lze dosáhnout hlavně na základě praktických zkušeností s příslušným typem materiálu.

### **Obvodová rychlost šneku**

Rychlost (doba) plastifikace (tvorba nové dávky) je velmi ovlivněna otáčkami šneku. Vhodnějším parametrem pro popis rychlosti otáčení šneku je obvodová rychlost. Obvodová rychlost šneku je úzce spjata s třením v materiálu během jeho plastifikace. Výrobci materiálu mohou doporučit optimální obvodovou rychlost nebo otáčky šneku, avšak v případě nastavení stejných otáček na šnecích o různém průměru se jejich obvodová rychlost může výrazně lišit. Optimální obvodová rychlost je taková, při které je tavenina homogenní a není poškozována nadměrným třením (a to jak tepelně, tak mechanicky). Při příliš vysoké obvodové rychlosti šneku není zajištěna dostatečná homogenita materiálu. Při zpracování plastu se skleněnými vlákny navíc dochází k výraznému opotřebení šneku a tavicí komory.

V případě, že celkový čas cyklu není ovlivněn dobou chlazení, ale dobou plastifikace a je požadováno její zkrácení, musí dojít k výraznému zvýšení obvodové rychlosti šneku nebo v optimálním případě přesunutí výroby na stroj o větším průměru šneku, aby bylo možno plastifikovat pomocí nižší obvodové rychlosti.

V průmyslové praxi se doba plastifikace materiálu a s ní spjatá obvodová rychlost šneku přizpůsobuje době chlazení, respektive je naší snahou, aby doba plastifikace nepřesáhla dobu chlazení a nebyla tak prodlužována celková doba cyklu. Naopak v případě, kdy doba chlazení je velmi dlouhá a dávka materiálu (při krátké plastifikaci) by zbytečně dlouho setrvala v tavicí komoře, je před fází plastifikace nastavena odpovídající časová prodleva.

### **Zpětný tlak**

Zpětný tlak při plastifikaci materiálu je důležitým technologickým parametrem, který zajišťuje kvalitní promíchání (homogenitu) taveniny. Toto promíchání je důležité pro dosažení vysoké teplotní homogenity a zároveň zamezuje přítomnosti vzduchových či plynových bublin v dávce materiálu. Úroveň zpětného tlaku

(protitlaku) záleží na viskozitě taveniny a na její tepelné odolnosti. Zpětný tlak je důležitý především u materiálu, který obsahuje barevné pigmenty, zde zpětný tlak napomáhá dispergaci pigmentu v tavenině. Zpětný tlak bývá doporučenou hodnotou výrobcem materiálu a běžně se nastavuje v rozmezí ca od 0 bar do 100 bar. Při velmi nízkém protitlaku se v dílech mohou objevovat vzduchové bubliny (zejména při plastikaci velké dávky materiálu) a u barevných materiálů také barevné šmouhy. Při zvyšování zpětného tlaku se prodlužuje doba plastifikace (dávkování) materiálu, zvyšuje se jeho vnitřní tření a tím i jeho vnitřní ohřev. Je-li zpětný tlak příliš velký, dochází k problémům při vytvoření nové dávky materiálu (plastifikaci) a výrazně se zvyšuje riziko jeho tepelné degradace.

#### 5.4.4 Bod přepnutí

Bod přepnutí je v podstatě přepínací polohou, kde končí fáze vstřiku a začíná fáze dotlaku. Volba tohoto bodu je pro nastavení správného plnění dutiny formy taveninou plastu zcela zásadní, jelikož má vliv na tlak v dutině formy (jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách). Způsobů přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak je několik:

- podle dráhy šneku,
- podle hydraulického tlaku,
- podle tlaku v dutině formy,
- podle času.

**Přepnutí podle dráhy šneku** je v praxi nejčastější. Nastavuje se poloha (v jednotkách milimetrů), ve které se pohyb šneku přestane řídit vstřikovací rychlostí (fáze vstřiku) a začne v tavenině před sebou udržovat nastavenou hodnotu dotlaku. Například, je-li dávka (vzdálenost šneku od trysky) 100 mm a bod přepnutí 20 mm, je pomocí vstřiku (axiálního pohybu šneku vpřed) dopravena do dutiny formy tavenina odpovídající dráze šneku 80 mm. V místě 20 mm od trysky je přepnuto na dotlak, přičemž v této fázi je do formy stále dopravována tavenina, která zajistí 100 % vyplnění její dutiny a zároveň kompenzuje smrštění při jejím tuhnutí. Po skončení dotlaku se šnek zastaví na určité nenulové poloze (například 7 mm od trysky), to znamená, že má před sebou ještě určité množství taveniny. Tomuto zbytkovému množství říkáme „*materiálový polštář*“. Jedná se v podstatě o jeden z nejdůležitějších údajů, který vypovídá o stabilitě výrobního cyklu. Zároveň je možné používat

absolutní jednotky pro určení polohy šneku. V takovém případě jsou dávka, poloha bodu přepnutí a materiálový polštář určeny v jednotkách  $\text{cm}^3$ , nikoli v milimetrech.

**Přepnutí podle hydraulického tlaku** je výrazně méně používaný způsob, přičemž bod, na kterém dochází k přepnutí mezi vstřikem a dotlakem, je dán mírou hydraulického tlaku, čili v jednotkách bar. To znamená, že je stanovena určitá hranice hydraulického tlaku a při jejím dosažení se šnek přestane řídit vstřikovací rychlostí, ale řídí se dále nastaveným tlakem v dotlakové fázi. Nevýhodou tohoto způsobu je, že hydraulický tlak a tlak v dutině formy se výrazně liší, přičemž o kvalitě dílu rozhoduje především tlak v dutině formy.

**Přepnutí podle tlaku v dutině formy** je nejpřesnější metodou. Tento způsob však vyžaduje přítomnost tlakového čidla v dutině formy (v ideálním případě umístěného v 1/3 tokové dráhy). Opět jako v předchozím případě je nastavena tlaková hranice a při jejím dosažení je přepnuto na dotlak. Výhodou je, že dutina formy je plněna vždy ve stejných tlakových cyklech, což je pro stabilitu a opakovatelnost výroby stěžejní.

**Přepnutí podle času** je technicky nejjednodušší, ovšem zároveň nejméně přesné. V tomto případě je nastavena pouze hodnota času (v sekundách), která je odpočítávána od počátku vstřiku, při kterém dojde k přepnutí na dotlak. V praxi je tento způsob relativně málo používán a vzhledem ke stabilitě výrobního procesu nelze doporučit.

Bez ohledu na konkrétní způsob přepnutí je doporučeno přepínat na dotlak ve chvíli, kdy je dutina formy naplněna z (95 až 98) %. Při rozjezdu nové formy se dotlak zcela vypne a bod přepnutí se nastaví na hodnotu ca (50 ÷ 65) % nastavené dávky (vstřikovaného množství taveniny). Díky tomu, že je dotlak vypnutý, se tavenina zastaví přesně v místě bodu přepnutí. Podle toho je pak bod přepnutí postupně snižován až do optimálního místa. Poté je zapnut dotlak. Po dotlaku by měl zůstat před čelem šneku materiálový polštář o velikosti (3 ÷ 10) mm dráhy šneku (v závislosti na průměru šneku). Je-li polštář menší nebo větší, posune se odpovídajícím způsobem o stejnou hodnotu velikost dávky a bod přepnutí. Tomuto postupu se v praxi říká různě, například: „technologický nástřik“, „studie plnění“, „základní zkouška“ apod.

### 5.4.5 Dotlak

Jak již bylo uvedeno výše, dotlaková fáze začíná na bodě přepnutí. V této fázi udržuje šnek nastavený tlak ve zbývajícím množství taveniny před svým čelem. V počáteční chvíli zajišťuje dotlak úplné vyplnění dutiny formy taveninou plastu, následně pak kompenzuje smrštění taveniny během chladnutí a tuhnutí. Nastavení dotlaku se řídí podle dvou parametrů a to výší tlaku a dobou dotlaku. V případě nastavení tlaku se přihlíží k dosaženému vstřikovacímu tlaku na bodu přepnutí. Počáteční tlak dotlaku se obecně volí ve výši 2/3 vstřikovacího tlaku na bodu přepnutí. Poté je tlak buď konstantní po celou dobu dotlaku, nebo může mírně klesat. V případě vstřikování pohledových dílů, či dílů s cílem dosažení minimálního vnitřního napětí, se tlak ve fázi dotlaku nastavuje malý, cca 1/4 vstřikovacího tlaku na bodu přepnutí a poté se postupně zvyšuje až do doby, kdy díly nevykazují propadliny. Čas dotlaku ( $t_d$ ) je silně závislý především na tloušťce stěn dílu ( $s$ ). Pro běžné vstřikované díly s tloušťkou stěny od 1 mm do 4 mm platí empirický vzorec (2):

$$t_d = 0,3 \cdot s \cdot (1 + 2 \cdot s) \text{ [s]} \quad (2)$$

Rovnice (2) platí pro vstřikování do formy o teplotě do 60 °C. Při teplotě formy nad 60 °C se vypočítaná doba dotlaku prodlužuje ca o 30 %. V praxi se doba dotlaku nejčastěji nastavuje dle pohledových vad - propadlin na díle. Při krátkém dotlaku se nejčastěji vyskytují propadliny v okolí vtoků a s postupným prodlužováním doby dotlaku se tyto propadliny zmenšují. Nejdelší účinný dotlak lze vyzorovat dle axiálního pohybu šneku. Dotlak je účinný jen v případě pohybu šneku vpřed (během dotlaku), a proto ve chvíli zastavení šneku již další dotlak nemá smysl, jelikož veškerý materiál je již ztuhlý.

### 5.4.6 Teplota formy

Teplota formy je parametr, který výrazným způsobem ovlivňuje kvalitu výrobku i jeho výrobní náklady. Z pohledu kvality dílu je lepší volit vyšší teplotu formy, především u semikrystalických materiálů. Vyšší teplota formy má za následek:

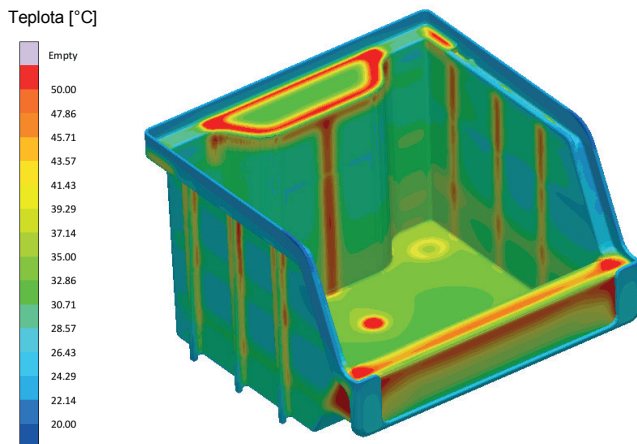
- nižší tlakové ztráty při plnění dutiny formy,
- kvalitnější strukturu materiálu (vyšší stupeň krystalinity),
- vyšší kvalitu povrchu dílu (vyšší lesk),

- menší orientaci makromolekul a tím i menší vnitřní napětí a anizotropii výstřiku,
- menší orientaci vláknitého plniva,
- stabilnější rozměry dílu (menší dodatečné smrštění materiálu),
- menší riziko vzniku studených spojů.

Teplota formy je technologický parametr, který je doporučován výrobcem materiálu v materiálovém listu a ve většině případů je udávána intervalem teplot. Spodní mez je určena především tokovými vlastnostmi taveniny, kvalitou dosažené nadmolekulární struktury (u semikrystalických plastů) a kvalitou povrchu dílu. Oproti tomu horní mez je ovlivněna především maximální teplotou, při které může být výrobek odformován. Pro amorfní termoplasty je to minimálně 10 °C pod teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ). Vždy je však třeba mít na paměti, že vyšší teplota formy vede také k pomalejšímu chlazení a tím k prodlužování doby chlazení a celého výrobního cyklu. Volba teploty formy je tak v podstatě volbou mezi vyšší kvalitou výrobku a jeho výrobními náklady, proto se často volí kompromis, který zajišťuje odpovídající kvalitu při ekonomicky přijatelných výrobních nákladech.

Teplota formy se nastavuje na temperačním přístroji a v podstatě představuje teplotu temperačního media (vody, teplotnosného oleje či glykolu), které cirkuluje v temperačních kanálech formy. Během proudění v temperačních kanálech formy se médium ohřívá a vystupuje z formy o vyšší teplotě. Jeho teplotní rozdíl na vstupu a výstupu by měl být ca do 5 °C. Proudění temperačního média musí být vždy turbulentní a v odpovídajícím objemovém množství. V případě vody se běžně teplota může nastavit mezi (20 ÷ 95) °C. Při teplotách nad 100 °C se používají temperační jednotky, které pracující s vyšším tlakem, jelikož nesmí dojít k varu vody. Tlaková voda se běžně používá do teploty formy 140 °C (ve výjimečných případech do 160 °C). Naopak nejnižší možná teplota na vstupu do formy je dána dostupností chladné vody. Při potřebě co nejintenzivnějšího chlazení se do formy pouští tzv. systémová voda (voda z centrálního chlazení), její teplota se pohybuje kolem 13 °C. Při chlazení pomocí systémové vody je vždy nutno sledovat rosný bod v prostředí vstřikovny, jelikož hrozí vznik kondenzátu na povrchu forem. V případě temperace forem pomocí teplotnosného oleje se jeho teploty mohou pohybovat v rozmezí mezi (30 ÷ 250) °C, avšak ve většině případů se používají až nad teplotou 95 °C. Pro regulaci teploty je olej méně vhodný, jelikož má oproti vodě menší měrnou tepelnou kapacitu. Olej se používá zejména pro svou tepelnou odolnost a přednostně pro

nástroje o vysoké pracovní teplotě. Jako příklad lze uvést vstřikování některých vysoce výkonných (high-tech) polymerů, např. PPSU, PI nebo PES, kde by teplota formy měla být ca 160 °C, viz tab. 3.4b.



**Obr. 5.18** Teplotní pole na povrchu výstřiku

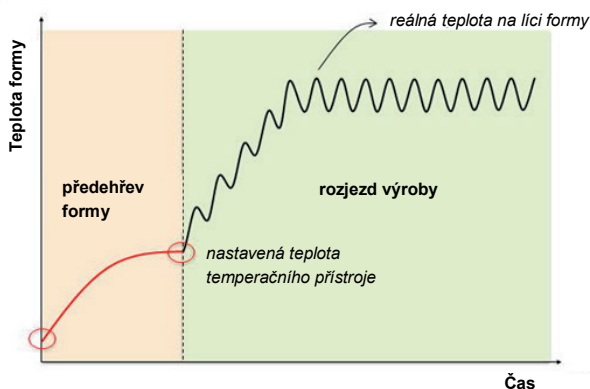
Skutečná teplota na povrchu dutiny formy je však během vstřikovacího cyklu vyšší a kolísá v určitém rozmezí v závislosti na teplotě taveniny a době cyklu. Navíc tato teplota není v každém místě dutiny stejná (viz obr. 5.18). Tyto lokální teplotní rozdíly ovlivňují smrštění dílu a s tím spojenou jeho deformaci. Rovnoměrnost teplot v dutině je dána provedením temperačního systému formy. Vždy platí, že doba chlazení musí být tak dlouhá, aby nejteplejší místo na dílu bylo dostatečně vychlazené. Zjednodušeně řečeno, při chlazení se čeká na zchlazení nejteplejší části dílu. Proto by konstrukce temperačního systému měla být navržena tak, aby teplotní pole bylo co nejvíce rovnoměrné a odvod tepla byl dostatečně rychlý.

Opakovatelnost stabilního teplotního cyklu během výroby je podmíněna dodržením pravidla, že odvedené teplo z formy musí být rovno přivedenému teplu do formy. Množství tepla, které vstupuje do formy je dáno hmotností vstřikované dávky, typem materiálu (měrnou tepelnou kapacitou), teplotou při odformování, vedením tepla z trysky stroje a rychlostí cyklu. Teplo, které z formy vystupuje, je částečně odváděno vedením do upínacích desek stroje, sáláním či konvekcí do okolí a především



pomocí temperačního systému formy. Z výše uvedeného je patrné, že jediná možnost, jak zajistit teplotní stabilitu formy, je kvalitní regulace temperačního přístroje.

Při rozjezdu formy by měl být postup následující. Forma se buď před nasazením, nebo po nasazení na stroj temperuje na pracovní teplotu. Poté se uvede do automatického režimu vstřikování a během několika cyklů se teplotní cyklus v dutině formy ustálí (viz obr. 5.19). Během těchto několika prvních cyklů je tavenina vstřikována do dutiny formy o rozdílné teplotě a vyrobené díly vykazují zpravidla rozdílné smrštění, proto je vhodné tyto „rozjezdové“ díly vyřadit. Teprve po ustálení teplotního cyklu formy je zajištěna opakovatelnost výroby a díly vykazují srovnatelnou rozměrovou stabilitu. V praxi je počet „rozjezdových cyklů stroje“ individuální, závisí především na geometrii dílu a druhu plastu a běžně se pohybuje od 3 do 10 kusů.



Obr. 5.19 Příklad teplotních profilů

### 5.4.7 Doba chlazení

Doba chlazení ( $t_{ch}$ ), stejně jako doba dotlaku, je závislá především na tloušťce stěny dílu. Začátek doby chlazení je dán okamžikem, kdy je dutina formy zcela vyplněna taveninou, tzn. počátkem fáze dotlaku. Celková doba chlazení je tedy složena z doby dotlaku a doby chlazení po dotlaku do okamžiku otevření formy. Pro

odhad celkové doby chlazení je v průmyslové praxi používán empirický vzorec (3), který opět platí pro díly o tloušťce stěny (s) od 1 do 4 mm a teplotě formy do 60 °C.

$$t_{ch} = s \cdot (1+2 \cdot s) \text{ [s]} \quad (3)$$

V případě teploty formy nad 60 °C se výsledný čas prodlužuje ca o 30 %. Takto odhadnutá celková doba chlazení lze rozdělit na dobu dotlaku a zbývající dobu chlazení po dotlaku a to přibližně v poměru (30:70) %. Například v případě vstřikování dílů z polypropylenu (PP) o tloušťce stěny 3 mm, bude odhad doby chlazení následující: celková doba chlazení  $t_{ch} = 21$  s, z toho čas dotlaku činí 6,5 s a zbývající čas chlazení po dotlaku 14,5 s.

**Celková doba vstřikovacího cyklu** se skládá z následujících částí:

- strojního času souvisejícího s pohybem formy při zavírání,
- strojního času pro přisunutí vstřikovací jednotky,
- doby vstřiku,
- doby dotlaku,
- zbývající doby chlazení po dotlaku (současně probíhá plastifikace nové dávky plastu),
- strojního času pro otevření formy,
- doby vyhození výrobku,
- manipulační doby (např. při zakládání kovových zálisků do formy apod.).

Individuální nastavení parametrů jednotlivých částí vstřikovacího procesu ovlivňuje nejen dobu dílčích částí procesu, ale i celkový čas výrobního cyklu, proto je vždy nutné zvážit jejich vliv na efektivitu výroby i celkový ekonomický dopad.

Technologie vstřikování se po celou dobu své existence dynamicky vyvíjí a to zejména na základě požadavků průmyslu. Tyto požadavky, jako například výroba ultra tenkých, dutých, či napěněných dílů, jsou mnohdy za hranicí možností konvenční technologie vstřikování. Díky tomu dochází neustále k větším či menším modifikacím základní technologie vstřikování, které nezní jen jako změny, ale i výraznou obměnu strojního zařízení – vstřikovacího stroje, formy, přídavných zařízení apod. Nekonenčních metod vstřikování je velké množství a následující kapitoly se zabývají popisem nejdůležitějších z nich.

**Technologie vstřikování strukturních pěn** umožňuje výrobu napěněných dílů, které se vyznačují nízkou hustotou a přinášejí tak úsporu hmotnosti. Toho lze docílit dvěma základními způsoby, a to buď *pomocí chemických*, nebo *fyzikálních nadouvadel*, přičemž oba způsoby jsou technologicky výrazně odlišné. U obou způsobů je cílem dosáhnout dílu s napěněným jádrem a celistvým povrchem.

### 6.1.1 Vstřikování pomocí chemických nadouvadel

Vstřikování s přídavkem chemického nadouvadla je velmi jednoduchý způsob, který se provádí na běžném vstřikovacím stroji a nevyžaduje žádné konstrukční úpravy strojního zařízení. Nadouvadlo je běžně v podobě granulátu, který obsahuje chemickou expanzní složku. Množství nadouvadla je různé (v závislosti na požadovaném stupni napěnění) a pohybuje se nejčastěji od 0,5 % až 3 %. Nadouvadlo je promícháno se základním materiálem v dávkovacím zařízení a tato směs je poté plastifikována v tavicí komoře vstřikovacího stroje. Za působení teploty dochází k aktivaci nadouvadla – chemickému rozkladu a tvorbě plynů (oxidu uhličitého nebo dusíku). Teplota rozkladu chemického nadouvadla (viz tab. 6.1) musí být podobná teplotě tání plastu. Tím je zajištěno, že nedojde k rozkladu nadouvadla dříve, než je plast roztaven. Celá dávka taveniny je následně vstřikována do dutiny

formy, přičemž objem dutiny formy by měl být vyplněn z 80 % až 90 %. Úplného vyplnění dutiny formy je následně dosaženo expanzí plynů. Fáze dotlaku je nahrazena tlakem, který je způsoben expanzí nadouvadla. Další odlišností výrobního cyklu je prodloužená doba chlazení, neboť tepelně izolační vlastnosti napěněného materiálu jsou mnohem vyšší.

**Tab. 6.1** Příklady chemických nadouvadel

Nadouvadlo	Zkratka	Druh reakce	Teplota rozkladu [°C]	Uvolněný plyn
Kyselina citrónová		Endotermická	160 ÷ 210	CO <sub>2</sub>
Azodikarbonamid	ADCA	Exotermická	205 ÷ 215	N <sub>2</sub>
Benzensulfonyl hydrazid	OBSH	Exotermická	158 ÷ 160	N <sub>2</sub>
p-Toulen sulfonyl hydrazid	TSH	Exotermická	110 ÷ 120	N <sub>2</sub>
p-Toulen sulfonyl semikarbazid	TSS	Exotermická	228 ÷ 235	N <sub>2</sub>
Dinitrosopentamethylentetramid	DNPT	Exotermická	190	N <sub>2</sub>
5 phenyltetrazol	5PT	Exotermická	240 ÷ 250	N <sub>2</sub>

Doporučené strojní zařízení:

- vstříkovací stroj s uzavíratelnou tryskou (zamezuje předčasné expanzi plynů v tavicí komoře),
- samostatné vytápění vtokových kanálů.

Specifické technologické nastavení procesu vstříkování:

- vysoká rychlost vstříku,
- fáze „bez“ dotlaku,
- prodloužená doba chlazení.

Uvedená technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

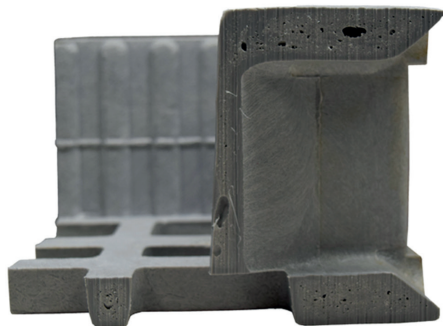
**Výhody:**

- jednoduchost procesu,
- zařízení bez nutnosti speciálního strojního vybavení,
- možnost výroby dílů s velkou tloušťkou stěny bez propadlin (až 20 mm),
- nižší vnitřní napětí výstřiku,
- díly s nízkou hustotou – hmotností (snížení hustoty ca o 5 % až 35 %),
- dobré akustické vlastnosti dílů,

- nižší tlaky během procesu vstřikování a tím i nižší uzavírací síla stroje.

**Nevýhody:**

- vzhledové vady na povrchu dílu vlivem nadouvadla (vzduchové šmouhy),
- nerovnoměrné rozložení napěněné struktury (velikost dutin je různá) – ztráta mechanických vlastností dílu (viz obr. 6.1),
- omezená teplotní odolnost chemického nadouvadla,
- poměrně dlouhý čas pro vytékání zbytku nadouvadla (až 48 hodin) – doplňkové operace (např. lakování) mohou být časově posunuty.



*Obr. 6.1 Řez napěněným dílem*

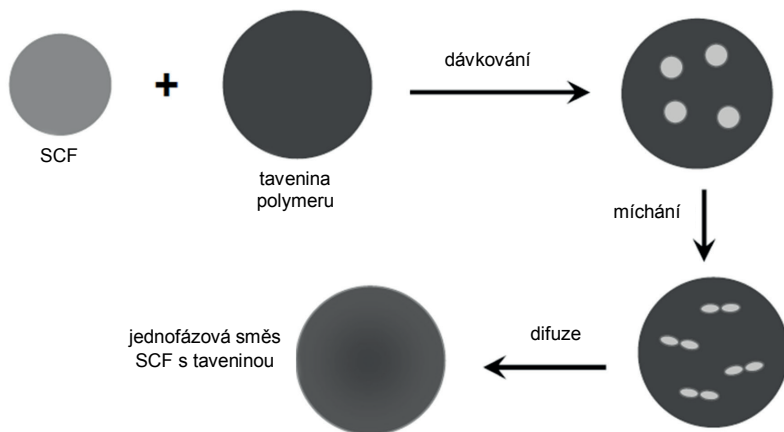
Výrobky zhotovené touto technologií mají široké spektrum využití (viz obr. 6.2) a nalézají uplatnění v automobilovém i spotřebním průmyslu, ve stavebnictví i při výrobě hraček.



*Obr. 6.2 Příklady lehčených plastových dílů*

## 6.1.2 Vstřikování pomocí fyzikálních nadouadel

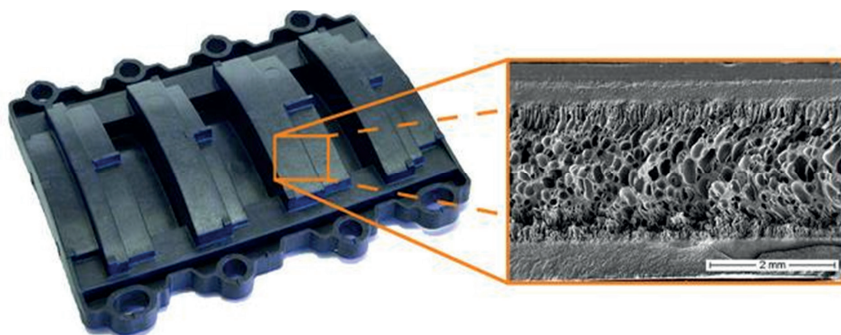
Nejnámější technologií využívající princip vstřikování plastů s fyzikálními nadouadly je technologie **MuCell** (mikrobuněčné vstřikování). Jedná se o technologii vyvinutou firmou Trexel. Princip procesu je založen na dávkování plynu: dusíku ( $N_2$ ) nebo oxidu uhličitého ( $CO_2$ ) v superkritickém stavu (označovaný jako SCF) přímo do taveniny polymeru ve fázi plastifikace pomocí speciálního injektoru, který je součástí vstřikovací jednotky stroje. Superkritického stavu plynu je dosaženo pomocí odpovídajícího tlaku a teploty v dávkovacím zařízení. Superkritickým fluidním médiem je označována látka, která se nachází nad svou kritickou teplotou a svým kritickým tlakem (oxid uhličitý dosahuje superkritických podmínek již při teplotě  $31\text{ °C}$  a tlaku  $7,3\text{ MPa}$  a dusík při teplotě  $-147\text{ °C}$  a tlaku  $3,4\text{ MPa}$ ). Superkritický stav média vykazuje viskozitu plynu a současně hustotu odpovídající kapalině. Superkriticky stlačený plyn je při dávkování do taveniny intenzivně míchán pomocí šneku v tavící komoře, než dojde k jeho úplné difuzi do taveniny polymeru. Výsledkem je homogenní směs (viz obr. 6.3), která je připravena pro vstřikování do dutiny formy.



**Obr. 6.3** Tvorba homogenní směsi taveniny polymeru s SCF

Tato směs je v tavící komoře stroje udržována po celou dobu pod tzv. pracovním tlakem, aby nedošlo k předčasné nukleaci plynu. Při poklesu tlaku (v okamžiku otevření vstřikovací trysky) je dávka taveniny vstříknuta do dutiny formy, kde dochází

k nukleaci plynů – tvorbě zárodků dutin v tavenině plastu. Díky homogennímu obsahu plynu v tavenině dochází k rovnoměrné tvorbě dutin v jádru výrobku o velikosti  $< 100 \mu\text{m}$  (zpravidla  $5 \div 10 \mu\text{m}$ ). Vlivem rychlého ochlazení taveniny nedochází téměř k tvorbě dutin na povrchu dílu. Mikrobuňčná struktura jádra je tak „zapouzdřena“ v pevné slupce materiálu, jak je patrné z obr. 6.4. Množství a velikost dutin jsou ovlivněny viskozitou taveniny, dobou chlazení, vstřikovacím tlakem, množstvím plynu a tloušťkou dílu.

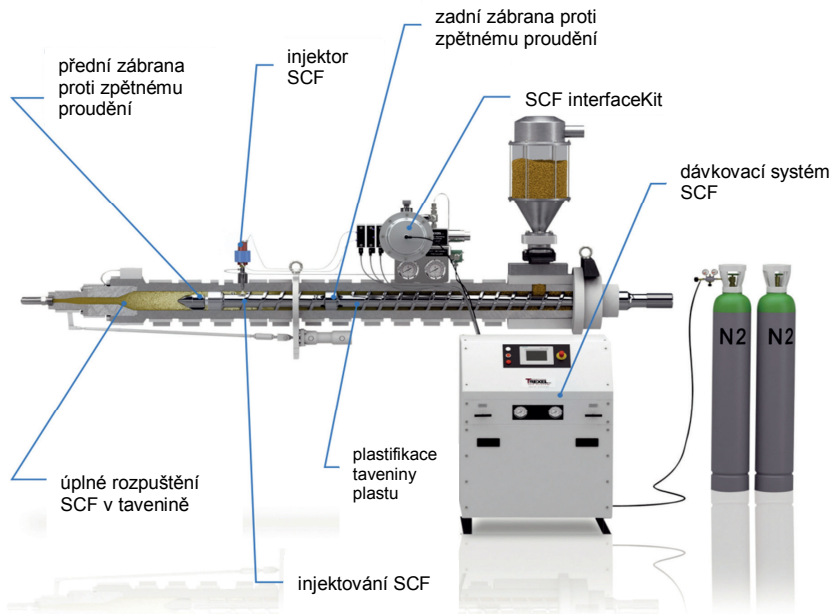


**Obr. 6.4** Ukázka struktury dílu vyrobeného technologií MuCell

Specifické strojní zařízení:

Vzhledem k principu technologie, která využívá vysoké tlaky, je zapotřebí speciálního strojního vybavení (viz obr. 6.5):

- tlakové lahve s plynem,
- SCF modul (dávkovací systém SCF),
- injektor pro SCF, který je ovládán pneumaticky,
- vstřikovací jednotka se speciální geometrií šneku, který je navíc vybaven stírací a míchací částí, dvěma zpětnými ventily, prodlouženou komorou s otvorem pro injektor a uzavíratelnou tryskou.



**Obr. 6.5** Sestava strojního vybavení technologie MuCell

Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- teplotní profil je směrem od násypky k injektoru standardní, dále směrem k trysce plochý,
- vysoký zpětný tlak – pracovní tlak,
- vysoká rychlost vstřiku,
- vystříknutí celé dávky – nulový materiálový polštář,
- nulový nebo velmi malý dotlak,
- množství SCF je dávkováno dle typu polymeru.

Uvedená technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

**Výhody:**

- díly s nízkou hustotou – hmotností (snížení hustoty ca o 5 % až 30 %),
- minimální ztráta mechanických vlastností (při napětí ca do 15 %),
- výrazné snížení deformací dílů,

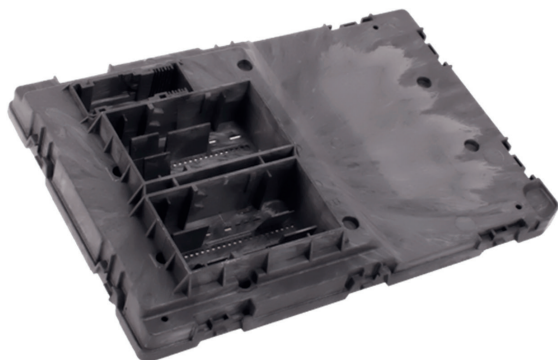


- minimální sklon k tvorbě propadlin,
- vysoká tekutost taveniny – nižší tlak v dutině formy, nižší uzavírací síla (až o 60 %),
- minimální vnitřní napětí ve výrobku,
- minimální omezení v konstrukci tloušťek stěn výrobku,
- neomezená teplotní odolnost plynu – napěňovat lze jakýkoli polymer,
- zpravidla kratší doba cyklu (až o 20 %).

#### **Nevýhody:**

- vzhledové vady na povrchu dílu (vzduchové šmouhy),
- poměrně dlouhý čas pro vytékání zbytku nadouvadla.

*Typickými aplikacemi* jsou tvarově složité a geometricky přesné nepohledové díly pro automobilový průmysl a elektrotechniku (viz příklad na obr. 6.6).



**Obr. 6.6** Konektor vyrobený technologií MuCell (PBT GF20)

## 6.2

### Fluidní vstřikování

**Technologie fluidního vstřikování** umožňuje výrobu tlustostěnných dílů (s uzavřenou dutinou) bez tvorby propadlin a bez extrémně dlouhého času chlazení (odpadá nutnost chlazení velkého množství plastu). K tomuto účelu jsou používány dvě základní technologie: *vstřikování s podporou plynu* (GIT – Gas Injection Technology) a *vstřikování s podporou vody* (WIT – Water Injection Technology).

## 6.2.1 Vstřikování s podporou plynu

Princip technologie je založen na přívodu inertního plynu do určitých míst tvarové dutiny formy, která je částečně nebo zcela vyplněné taveninou plastu, za účelem vytvoření uzavřené dutiny ve výstřiku. Nejčastěji používaným plynem je vysoce čistý dusík (čistota min. 99,8 %) s možností jeho stlačování v rozsahu (10 ÷ 40) MPa. Proces vstřikování plastů s podporou plynu je obdobný jako u konvenční technologie vstřikování a je založen na zavření formy, vstřiku, dotlaku a chlazení taveniny plastu, otevření formy a vyhození výrobku. Funkci dotlaku však přebírá plyn (způsoby přepínání vstřikovacího tlaku na dotlak jsou shodné se způsoby u konvenční technologie vstřikování). Protože tlak plynu je ve všech místech vytvářené dutiny stejný (u injektoru plynu, tak i v posledních místech vytvářené dutiny), není potřeba tak vysokých tlaků, jako u konvenční technologie vstřikování. Redukce tlaku je (40 ÷ 80) %. Plyn se přivádí z počátku o nižším tlaku, aby došlo k vytvoření dutiny a nedošlo ke vzniku povrchových vad. Po úplném naplnění tvarové dutiny formy se tlak plynu zvýší, aby se dosáhlo přesného tvaru plastového dílu. Zjednodušeně platí, že pro tekutější plasty je potřeba nižší tlak a naopak.

Z technologického hlediska jsou možné dva způsoby vytvoření uzavřené dutiny v plastových dílech:

**Krátký vstřík a dofukovací způsob:** jedná se o technologický proces, při kterém je dutina vstřikovací formy naplněna taveninou plastu jen částečně (dutina formy je zaplněna z 50 ÷ 90 %) a následně je tlakem plynu tlačena do zadních míst dutiny formy, čímž se ve výstřiku vytvoří uzavřená plynová dutina. Největším problémem procesu je volba objemu vstříknuté dávky taveniny plastu do formy. Při malém objemu vstříknuté taveniny plastu a následné injektáží plynu dochází k průchodu plynu čelní stěnou taveniny během vyplňování dutiny formy. Při velké dávce taveniny plastu není vytvořena vnitřní uzavřená dutina po celé délce výrobku. U této metody je typické, že tloušťka stěny výstřiku se snižuje se vzdáleností dráhy plynu.

**Dlouhý vstřík a vyfukovací způsob:** jedná se o technologický proces, při kterém se plyn vstříkuje do dutiny formy až v okamžiku, kdy tavenina plastu vyplní zcela tvarovou dutinu vstřikovací formy. Přebytečná tavenina plastu je během tvorby vnitřní dutiny vytlačována buď do vedlejší pomocné dutiny vstřikovací formy, anebo zpět před čelo šneku. Technologickým problémem tohoto způsobu vstřikování je velikost tlaku plynu, která se zkouší experimentálně pro dané technologické parametry

(teplotu taveniny, teplotu formy, dobu prodlevy materiálu v tavící komoře apod.). Začíná se u nižšího tlaku plynu a kontroluje se velikost vytvořené plynové dutiny. V případě potřeby se tlak plynu zvyšuje. U tohoto způsobu vstřikování je tloušťka stěny výstřiku po délce tvarové dutiny formy rovnoměrnější.

Specifické strojní zařízení:

- injektor plynu či speciální vstřikovací tryska uzavíratelná dutou jehlou pro přívod plynu,
- tlakové lahve s plynem,
- tlaková jednotka.

Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- časová prodleva mezi vstřikováním taveniny plastu a plynu (ca 1 ÷ 2 s, s rostoucí prodlevou se zvyšuje tloušťka stěny výstřiku),
- nižší dotlak pomocí plynu,
- nižší potřebná uzavírací síla stroje (vytvarování dutiny plynem o nízkém tlaku).

Uvedená technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

**Výhody:**

- úspora hmotnosti (díl s uzavřenou vnitřní dutinou),
- tlustostěnné díly s vnitřní dutinou bez propadlin,
- nižší uzavírací síla,
- nižší deformace ploch dílu a minimalizace vzniku staženin,
- kratší doba chlazení vlivem zmenšení tloušťky stěny výstřiku při zachování chladící plochy formy,
- technologie je vhodná pro integrované díly s kombinací tenkých a tlustých stěn.

**Nevýhody:**

- vyšší cena strojního zařízení (formy, stroje),
- problematické chlazení v místech vnitřní dutiny dílu,
- zhoršená kvalita vnitřního povrchu uzavřené dutiny,
- omezená realizace vícenásobných forem,
- nevhodné pro výroby deskovitého tvaru.

Typickými aplikacemi jsou především madla a kliky pro automobilový průmysl (viz obr. 6.7) nebo tlustostěnné díly, ideálně kruhového průřezu a dutá žebra vyztužující ploché výstřiky.



Obr. 6.7 Díl s uzavřenou vnitřní dutinou (technologie GIT)

## 6.2.2 Vstřikování s podporou vody

Technologický proces vstřikování plastu s podporou vody je obdobný jako u vstřikování s podporou plynu. Voda, stejně jako plyn, přebírá funkci dotlaku. A stejně jako u plynu, tak i u vody je tlak plynu ve všech místech vytvářené dutiny stejný. Při volbě tlaku vody se postupuje od nižšího tlaku k vyššímu. Po úplném naplnění tvarové dutiny formy se tlak vody zvýší, aby se dosáhlo přesného tvaru plastového dílu. A stejně jako u plynu je i u vody velmi důležitá prodleva mezi vstřikováním taveniny a přívodem vody. Nakonec může být voda z plastového dílu vytlačena tlakovým vzduchem, nebo odsáta zpět, anebo se vylévá do zásobníku mimo formu.

### Specifické strojní zařízení:

- injektor vody či speciální vstřikovací tryska uzavíratelná dutou jehlou pro přívod vody,
- tlaková jednotka.

Specifické technologické nastavení procesu vstříkování:

- časová prodleva mezi vstříkem taveniny a vody,
- nižší dotlak pomocí vody,
- nižší potřebná uzavírací síla stroje.

**Výhody:**

- úspora hmotnosti dílu,
- tlustostěnné díly s vnitřní dutinou bez propadlin,
- možnost výroby větší vnitřní dutiny než u technologie GIT,
- hladký povrch stěn vnitřní dutiny dílu (viz obr 6.8),
- čas chlazení je výrazně kratší než u technologie GIT (až o 80 %),
- nižší potřebná uzavírací síla,
- nižší deformace ploch dílu a minimalizace staženin.

**Nevýhody:**

- vyšší cena strojního zařízení (formy, stroje),
- dodatečné odstranění vody,
- nebezpečí částečného vytvarování vnitřní dutiny parou (důsledek nedostatečného množství vody, která se rychle ohřeje a vypaří),
- omezená realizace vícenásobných forem.

Vhodnými aplikacemi jsou především pevnostní duté výrobky, jako např. pedály (viz obr. 6.8), ale také různé potrubí pro rozvod vzduchu či kapalin, případně různé kliky a úchyty.



**Obr. 6.8** Díl s uzavřenou vnitřní dutinou (technologie WIT) a rozdíl v kvalitě povrchu vnitřní dutiny

**Technologie mikrovstříkování** umožňuje výrobu miniaturních dílů s hmotností méně než 1 gram (viz obr. 6.9). K mikrovstříkování se používají vstříkovací stroje se speciální vstříkovací jednotkou (plastikace materiálu šnekem, vstříkování pístem, viz obr. 6.10). Systém vstříkování pomocí pístu umožňuje vyšší vstříkovací tlak, který je pro naplnění dutin s velmi tenkou stěnou nutný. Výroba forem je vzhledem k rozměrům plastových dílů velmi náročná a vyhazování dílů z formy je vzhledem k velikosti plastových výrobků velmi specifické. Kontrola rozměrů vyrobených plastových dílů se obvykle provádí pod mikroskopem.



**Obr. 6.9** Díl vyrobený technologií mikrovstříkování

Specifické strojní zařízení:

- speciální vstříkovací jednotka (kombinace šneku pro plastifikaci materiálu a pístu pro vstříkování taveniny).

Specifické technologické nastavení procesu vstříkování:

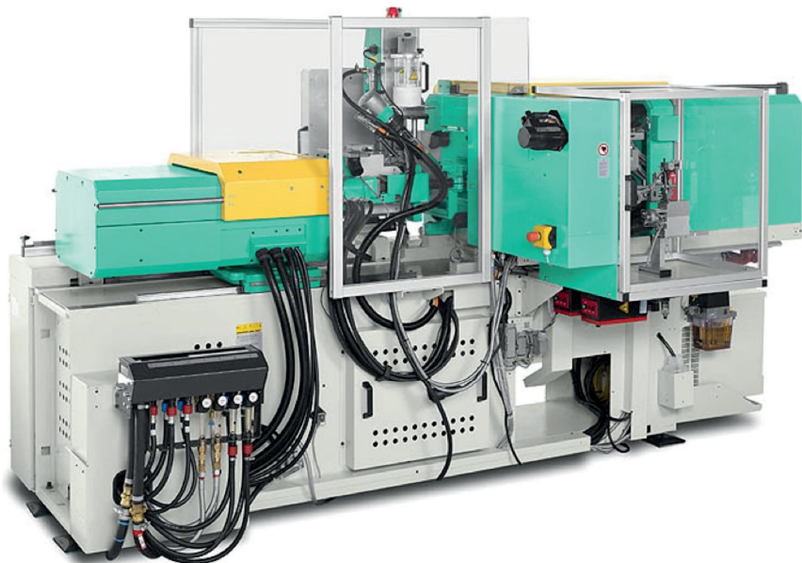
- vysoký vstříkovací tlak,
- vysoká vstříkovací rychlost.

**Výhody:**

- možnost výroby velmi malých dílů (ca od 0,004 g).

**Nevýhody:**

- vyšší cena strojního zařízení (formy, stroje).



**Obr. 6.10** Stroj vybavený vstřikovací jednotkou pro mikrovstřikování

Obdobnou technologií je technologie **X-melt** (technologie fy. ENGEL), která je rovněž určena pro vstřikování malých dílů, popřípadě dílů s velmi tenkou tloušťkou stěny. Technologie využívá částečnou stlačitelnost taveniny a vysoký vstřikovací tlak. Na začátku procesu je tryska stroje, která je vybavena pneumatickou jehlou, uzavřena a plastikační jednotka stroje plastifikuje polymer stejně, jako u technologie vstřikování. Po skončení plastifikaci je tavenina plastu stlačována mezi uzavřenou tryskou a čelem šneku pohybem šneku vpřed do dosažení předem stanovené pozice. Tlak v tavenině plastu je v rozsahu  $(100 \div 250)$  MPa a je závislý na tvaru a velikosti výrobku. Současně nastává zmenšení objemu a dochází k teplotní homogenitě taveniny plastu. Nakonec je tryska otevřena, tavenina plní tvarové dutiny vstřikovací formy, zvětšuje svůj objem, expanduje a relaxuje z hlediska vnitřního napětí.

Vstřikování dílů o tloušťce stěny v řádech desetin milimetru nebylo dříve možné pomocí běžných vstřikovacích strojů, ale bylo řešeno pomocí speciálních technologií. V současné době to vzhledem k vývoji plastů není nutné, jelikož na trhu existují

speciální materiály určené pro vstřikování dílů s velmi tenkou tloušťkou stěny. Tyto materiály jsou většinou na bázi polyamidu PA 4.6.

*Typickými aplikacemi* jsou velmi malé díly pro zdravotnictví, elektroniku a jemnou mechaniku (viz obr. 6.11).



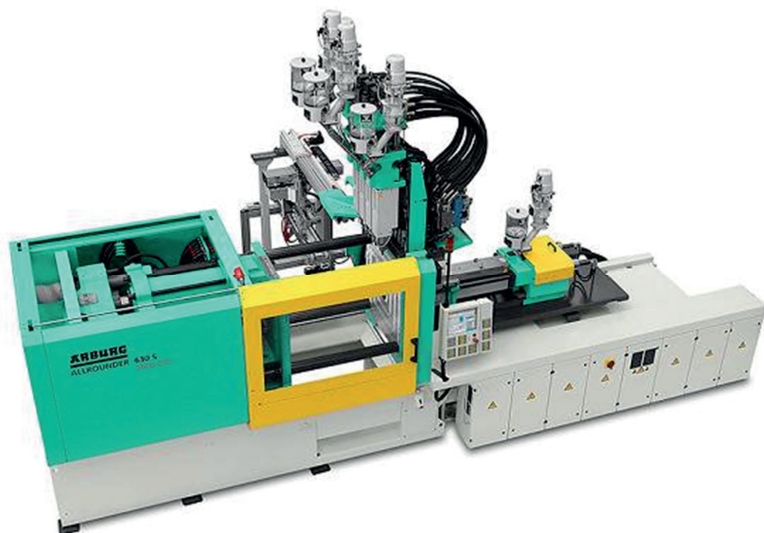
**Obr. 6.11** Díly vyrobené technologií X-melt

## 6.4

### Vícekomponentní vstřikování

**Technologie vícekomponentního** nebo **vícebarevného vstřikování** je dnes již standardní technologií, která na jednom plastovém výrobku kombinuje (spojuje) dva nebo více polymerních materiálů, nebo dvě či více barev od jednoho druhu plastu. Spojení polymerů je na bázi chemických, kohezních i adhezních vazeb, které lze také podpořit vhodnou konstrukcí spoje. Technologie vícekomponentního nebo vícebarevného vstřikování se liší od konvenční technologie tím, že vstřikovací forma musí umožnit vstřik rozdílných plastů nebo barev v jednotlivých dutinách vstřikovací formy během jednoho vstřikovacího cyklu. Dále jsou ke vstřikovací formě připojeny dvě (dvoukomponentní / dvoubarevné vstřikování) nebo tři (tříkomponentní / tříbarevné vstřikování), resp. čtyři vstřikovací jednotky (čtyřkomponentní / čtyřbarevné vstřikování), viz obr. 6.12. Vstřikovací jednotky mají samostatně ovládané vytápění, dávkování a technologické parametry. Umístění vstřikovacích jednotek je konstrukčně odlišné podle druhu a počtu vstřikovaných komponent.



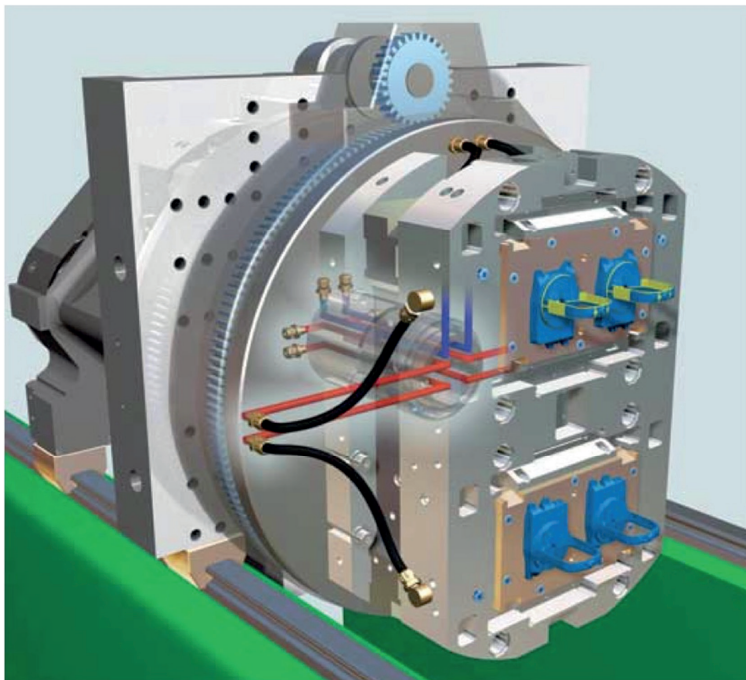


**Obr. 6.12** Vstřikovací stroj s jednou horizontální a třemi vertikálními vstřikovacími jednotkami

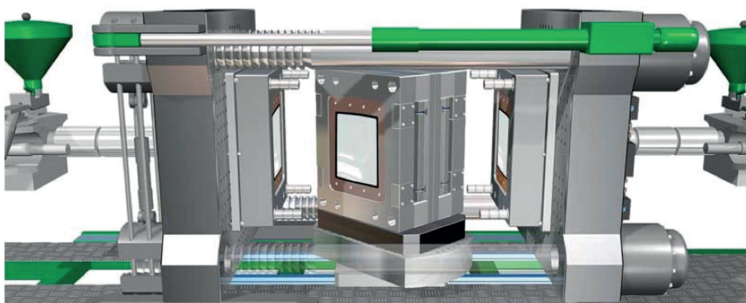
Mezi nejdůležitější pracovní činnosti u technologie vícekomponentního nebo vícebarevného vstřikování patří **překládání výstřiků** během vstřikovacích cyklů z jedné tvarové dutiny formy do druhé. V praxi existují následující možnosti:

- rotace poloviny vstřikovací formy kolem vodorovné osy,
- rotace poloviny vstřikovací formy kolem svislé osy,
- rotace části vstřikovací formy kolem vodorovné osy (systém indexové desky),
- použití pohyblivého tvárníku nebo tvárnice,
- použití posuvných částí formy – tvarových jader (tzv. šoupátková technika),
- použití robotu.

V případě **rotace vstřikovací formy kolem vodorovné osy** je jedna polovina formy rotačně pohyblivou částí vstřikovací formy, která se natáčí k jednotlivým vstřikovacím jednotkám podle nastavených technologických časů (viz obr. 6.13). Rotační pohyby mohou být buď alternující (dvoupolohová vstřikovací forma), nebo spojitě (třípolohová vstřikovací forma). Osy otočné části formy musí odpovídat osám pevné části formy v toleranci 0,05 mm.



**Obr. 6.13** Příklady formy s rotací kolem vodorovné osy

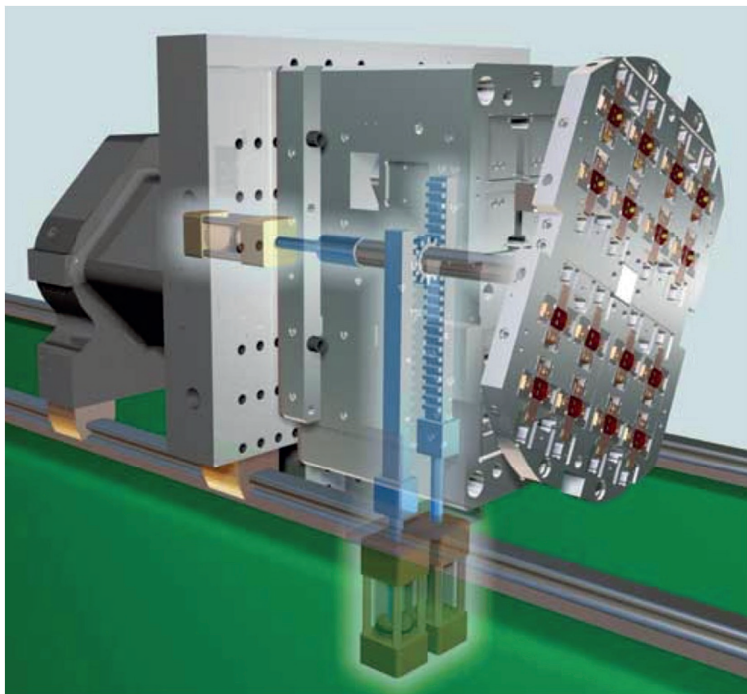


**Obr. 6.14** Příklad formy s rotací kolem svislé osy

V případě **rotace vstříkací formy kolem svislé osy** dochází k otočení střední desky formy k druhé polovině vstříkací formy (viz obr. 6.14). K bezproblémovému otočení je nutné dimenzovat velikost otevření formy. Vstříkací jednotky vstříkují

proti sobě a odděluje je jen tloušťka otočné desky, čímž dochází ke snížení uzavíracích sil ca o (30 + 50) %, protože vstřikovací tlaky na taveniny polymerů působí proti sobě. Nevýhodou tohoto řešení je nadměrná velikost (délka) vstřikovacích strojů.

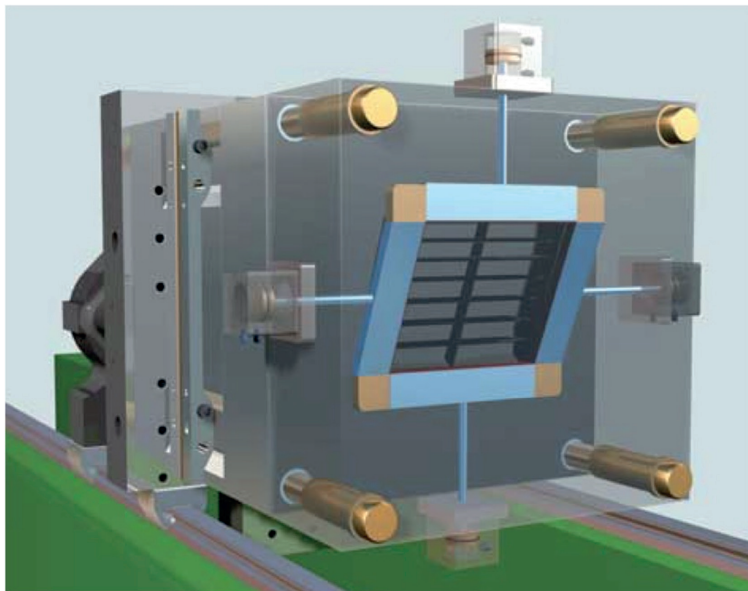
V případě **rotace pouze části vstřikovací formy kolem vodorovné osy** je otočná pouze část pohyblivé poloviny vstřikovací formy, tzv. indexová deska (viz obr. 6.15). Princip a ovládání jsou shodné s rotačně otočnou částí vstřikovací formy kolem vodorovné osy.



**Obr. 6.15** Příklad indexové desky

V případě použití **posuvné části formy – tvarových jader** (viz obr. 6.16), se použití pohyblivých jader využívá hlavně u plastových dílů buď při místním nástřiku druhého plastu, anebo při nástřiku měkkého plastu (např. termoplastického elastomeru nebo silikonu) na tvrdý plast (např. PP, PC, PA apod.). Posuvná tvarová

část vstřikovací formy uzavírá nebo otevírá tu část dutiny formy, která se má zaplnit taveninou plastu. Nevýhodou je někdy delší vstřikovací cyklus, protože se jednotlivé komponenty vstřikují postupně a nikoliv najednou, jako tomu bylo u předchozích případů. Oba materiály tvoří většinou tupý spoj.



**Obr. 6.16** Příklady posuvné části formy

Výhodou doposud uvedených způsobů překládání výstřiků je jejich plný kontakt s tvárníkem formy v každém cyklu, který zabraňuje volnému smršťování výstřiků. Uzavřený kontakt mezi díly a jejich tvárníky znamená optimální vedení tepla.

Použití **robotů** (viz obr. 6.17) se aplikuje hlavně u větších plastových dílů nebo u plastových dílů vstřikovaných na dvou strojích. Nasazení robotů obvykle vede k prodloužení celkové doby vstřikovacího cyklu v důsledku delšího času potřebného k přemístění. Na druhé straně je použití robotů jedním z nejčastěji používaných způsobů překládání výrobků z jedné pozice do další pozice.

#### Specifické strojní zařízení:

- stroj s odpovídajícím počtem vstřikovacích jednotek,

- forma pro vícekomponentní vstřikování,
- ve většině případů robot.

Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

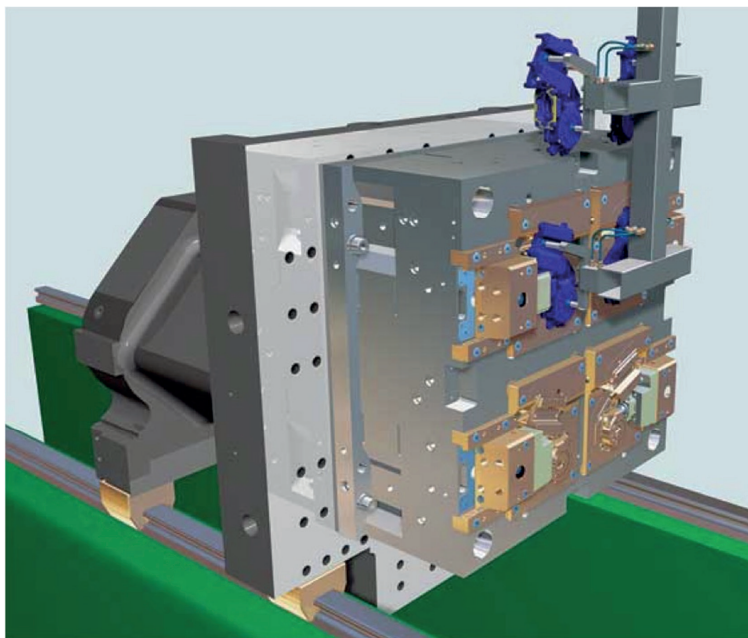
- nastavení je standardní, jen pro každou vstřikovací jednotku zvlášť.

**Výhody:**

- možnost výroby vícekomponentních dílů.

**Nevýhody:**

- vyšší cena strojního zařízení (formy, stroje, přídatná zařízení).



**Obr. 6.17** Příklad překládání pomocí robotu

*Typickými aplikacemi* jsou např. těsnící klapky, rukojetě, madla, náradí, kapsa hrdla palivové nádrže a mnoho dalších (viz obr. 6.18).



Obr. 6.18 Příklady vícekomponentních dílů

## 6.5

## Sendvičové vstřikování

**Sendvičové vstřikování** umožňuje výrobu dílů, které mají rozdílný materiál na povrchu a v jádru výstřiku. Materiály mohou být rozdílné, ale musí být vzájemně mísitelné a měly by mít podobné technologické parametry vstřikování (např. teplotu taveniny). Sendvičové díly jsou konstrukčně srovnatelné se standardními výstřiky a mohou být tenkostěnné i tlustostěnné.

Proces sendvičového vstřikování je z hlediska jednotlivých jeho fází shodný se standardním vstřikováním. Technologický postup je rozdělen do dvou nebo tří kroků:

- do vstřikovací formy je nejdříve vstříknuta tavenina plastu (přesně definované množství), ze které vzniknou v další fázi povrchové vrstvy výstřiku,
- vzápětí je do plastického jádra vstříknuta tavenina plastu, která vytváří jádro výrobku (dvoustupňový proces), resp. nakonec se vstříkne ještě tavenina plastu, která tvoří povrch plastového dílu, který se tím uzavře (třístupňový proces).

Povrchová vrstva plastu po prvním vstřiku se po ochlazení (dotykem se stěnou vstřikovací formy) již dále neposunuje. Směrem ke středu stěny výstřiku však materiál chladne pomaleji a uchovává si vyšší teplotu, umožňuje tak tok druhého plastu do dutiny formy a také dokonalé spojení obou materiálů. Posun taveniny plastu nastává pouze ve vrstvách, které ještě nezduhly. Tím dojde k doplnění tvarové dutiny formy po celé ploše povrchu výrobku a materiál jádra je tak „uzavřen“ do materiálu povrchu. Následuje fáze dotlaku jako při standardním (konvenčním) způsobu vstřikování, neboť taveniny obou plastů jsou ještě dostatečně plastické.

Specifické strojní zařízení:

- stroj s dvěma vstřikovacími jednotkami,
- speciální tryska stroje, která spojuje dvě vstřikovací jednotky s tvarovou dutinou formy a dávkuje taveninu plastu do formy pomocí tlakově řízených mechanismů ovládajících jehlu v trysce tavicí komory v závislosti na tlakových poměrech v dutině formy.

Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- nastavení je standardní, jen pro každou vstřikovací jednotku zvlášť,
- dotlak zajišťuje poslední vstřik.

Uvedená technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

**Výhody:**

- vhodné pro tenkostěnné i tlustostěnné díly,
- úspora materiálu – jádro výstřiku může být z recyklátu nebo napěněné (viz obr. 6.19),
- snížení uzavírací síly – v případě napěněného jádra s nadouvadly,
- integrace funkčního materiálu dovnitř výrobku – stínění, bariérové vlastnosti, atd.,
- vyztužené výrobky s výbornou kvalitou povrchu – jádro z plastu plněného vláknou, povrch z neplněného plastu.

**Nevýhody:**

- vyšší cena stroje.

*Typickými aplikacemi* této technologie jsou převážně designové výrobky s vysokým leskem povrchu a vyztuženým či napěněným jádrem.



**Obr. 6.19** Sendvičový díl s napěněným jádrem

**Technologii zastříkování** materiálů plasty je několik a liší se zejména v tom, jakým způsobem či jaký materiál je vkládán do formy k následnému zastříknutí. Základní princip je vždy stejný, do dutiny formy je před uzavřením vložen materiál (kov, textilie, fólie apod.), který je poté zastříknut taveninou plasty, přičemž dojde k vytvoření pevného spojení.

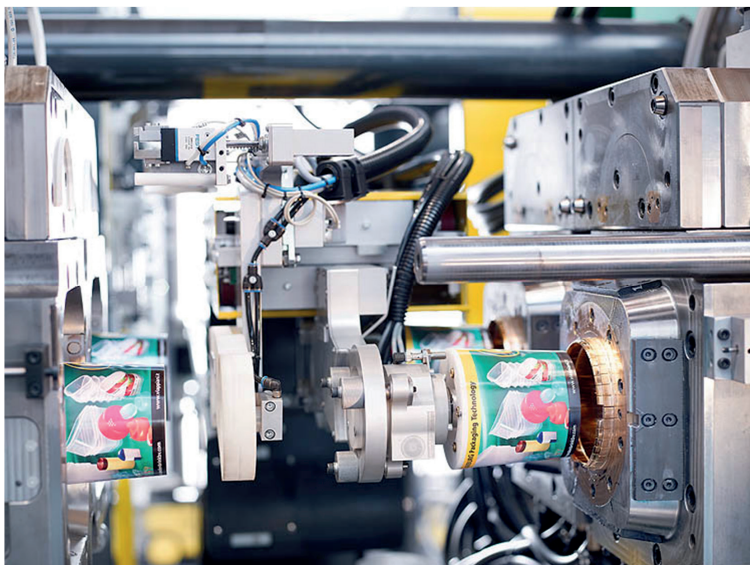
**In-Mould technologie** – do dělicí roviny formy je pomocí robotu vložen nejčastěji přetvarovaný díl, který je následně uzavřen ve formě a zastříknut taveninou nosného plasty, tím dochází k pevnému spojení (přitavení) obou materiálů. Typickým výrobkem této technologie jsou cyklistické přilby (viz obr. 6.20). Jejich výroba spočívá ve vkládání polykarbonátové skořepiny a výztuh do dutiny formy, do nichž se následně za působení teploty a tlaku vstříkuje expandovatelný polystyren (PS-E). Výsledkem je kompaktní, bezpečná a velmi odolná přilba.



Obr. 6.20 Příklad výrobku vyráběného technologií InMould

**In-Mould Labeling (IML)** – tato technologie je určena k etiketování výrobků přímo ve formě. Před zavřením formy je pomocí robotu, který si odebírá tvarově uzpůsobenou etiketu ze zásobníku, tato vložena do předem určeného místa v dutině formy (viz obr. 6.21). Fólie etikety je vícevrstvá a po zavření formy a vstříknutí taveniny plasty dochází k pevnému spojení etikety a základního materiálu výrobku. Typickými výrobky jsou kelímky, kyblíky a obaly v potravinářství.





**Obr. 6.21** Zakládání etikety do dutiny vstřikovací formy

**In-Mould Decoration (IMD)** – v tomto případě je vkládaným materiálem dekorační fólie, která se mezi vstřikovacími cykly odvíjí přes dělicí rovinu formy. Poté fólie pomocí předehřevu (topnými panely z keramických článků nebo IR trubicemi) a vakua okopíruje povrch formy (vakuum zabraňuje mimo jiné shrnutí fólie), následně je forma uzavřena, dochází ke vstřiku taveniny a následnému dotlaku a chlazení plastu v dutině formy. V místě kontaktu taveniny s fólií dochází k pevnému přitavení a při otevření formy je přitavená plocha od zbytku nosné fólie oddělena. K dekorování dochází tedy pomocí tištěného tenkého filmu, který je přenášen na díl z nosné fólie (zpravidla na bázi PET) během vstřikování. Kompozice IMD fólie je založena na nosné fólii o tloušťce ( $30 \div 75$ )  $\mu\text{m}$ , oddělovací vrstvě (tzv. release layer), která po aktivaci teplem umožní oddělení tištěného tenkého filmu na výrobku od nosné fólie, dále průhledné ochranné vrstvě (ochrana před poškrábáním), dekorační vrstvě (o tloušťce ca. 10  $\mu\text{m}$ ) a adhezni vrstvě, která zajišťuje po aktivaci teplem adhezi mezi tištěným filmem a plastovým dílem. Typickými výrobky jsou ovládací panely přístrojové desky, ozdobné lišty apod. (viz obr. 6.22).



Obr. 6.22 Příklad dílu technologie IMD

Specifické strojní zařízení:

- upravená vstřikovací forma,
- robot,
- odvíjecí zařízení.

Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- nízký vstřikovací tlak.

**Výhody:**

- designové díly (velké množství dekoračních fólií).

**Nevýhody:**

- vyšší cena formy a přídavného zařízení.

6.7

Vstřikování dílů s vysokým leskem

U výroby dílů s vysokou povrchovou kvalitou je nutné, aby tavenina plastu byla schopna co možná nejvíce kopírovat povrch dutiny formy. Tato schopnost taveniny je úzce spjata s její viskozitou a tudíž i teplotou. U běžného vstřikování je pak k dosažení vyšší kvality povrchu nutné zvýšit teplotu formy, což neúměrně prodlužuje vstřikovací cyklus. Proto bylo vyvinuto několik technologií, které jsou založeny na tzv. *dynamickém ohřevu formy*. Tyto technologie buď ohřívají celou formu, nebo pouze

část (líc formy) a zdroj tepla může být vnější (např. infrazářič) nebo je součástí formy.

Podle způsobu ohřevu se pak tyto technologie dělí na:

- RHCM (Rapid Heat Cycle Moulding),
- IHM (Induction Heating Moulding),
- EM (Electricity Heating Mold).

**RHCM** – ohřev formy je realizován pomocí kanálu pro proudění páry, o chlazení formy se starají konvenční chladicí kanály, v průběhu cyklu dochází k přepínání proudění v jednotlivých kanálech.

**IHM** – součástí formy je cívka, která má přizpůsobený tvar dutině formy a před vstříkem zahřívá dutinu pomocí elektromagnetického pole a vzniku vířivých proudů. Chlazení je pomocí standardních chladicích kanálů, přičemž chladicí médium proudí kontinuálně.

**EM** – forma je vytápěna pomocí vnitřních odporových těles, které jsou rozmístěny ve formě dle potřeby.

Všechny tyto metody vedou k vysoké teplotě v tenké vrstvě líce formy, čímž je umožněno dokonalé okopírování povrchu formy taveninou plastu, jak je patrné z obr. 6.23.



**Obr. 6.23** Příklad výroby technologie IHM

Specifické strojní zařízení:

- speciální vstřikovací forma,
- uzpůsobené temperační zařízení,
- robot.

Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- vysoká rychlost vstřiku.

Uvedené technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

**Výhody:**

- vysoký povrchový lesk dílu (bez nutnosti dodatečného lakování),
- díly bez studených spojů a propadlin,
- menší deformace dílu,
- vysoká kvalita povrchu dílu i u materiálů s vláknitým plnivem,
- vysoký povrchový lesk i u napěněných dílů (odstraňuje nedostatky nadouvadel včetně technologie MuCell),
- technologie je ideální pro tenkostěnné díly,
- zkrácení doby cyklu u tlustostěnných dílů.

**Nevýhody:**

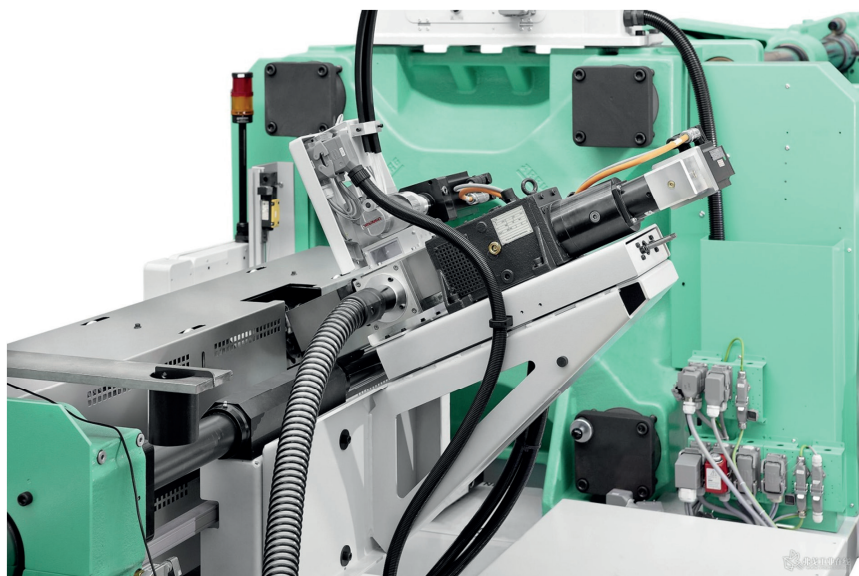
- vyšší cena nástroje.

6.8

## Vstřikování pevnostních dílů

**Vstřikování pevnostních dílů** je vždy založeno na materiálech vyztužených vláknitým plnivem, např. skleněnými, uhlíkovými, aramidovými, kovovými nebo jinými vlákny. Nejčastěji používaná vlákna jsou skleněná vlákna a to buď krátká (o délce 0,2 ÷ 0,6 mm) nebo dlouhá (o délce 8 ÷ 16 mm), která jsou obsažena v granulátu. Materiál se zpracovává na standardních vstřikovacích strojích běžným způsobem vstřikování. V současné době ale existují způsoby, které z hlediska pevnosti dílů umožňují dosáhnout mnohem vyšší vyztužující účinek. Jedním z nich je například technologie FDC (přímá kompaundace vláken) nebo tzv. zastřikování organických plechů.

**U technologie FDC (Fibre Direct Compaunding)**, někdy označovaná také LFDI (Long Fiber Direct Injection Moulding), vstupují do procesu vstřikování plastů nekonečná vlákna (skleněná nebo uhlíková), která se odvíjejí ze zásobníku a pomocí bočního servoelektrického podavače a nože (viz obr. 6.24) jsou sekána na konečnou délku ( $15 \div 50$  mm) a dávkována přímo do taveniny v tavící komoře vstřikovacího stroje. Vstřikovací jednotka je vybavena šnekem s dvoustupňovou kompresí, to znamená, že v první části šneku dochází k přípravě taveniny a v druhé jsou do ní přidávána vlákna, která jsou v tavenině pomocí šneku promíchána. Tento způsob je k vláknům výrazně šetrnější s ohledem na jejich lámavost. Délku vláken, podíl vláken a kombinaci materiálů je možno nastavit individuálně. Výchozí materiály (plast a přásty ze skelných vláken) jsou cenově výhodnější než granuláty vyztužené dlouhými vlákny.

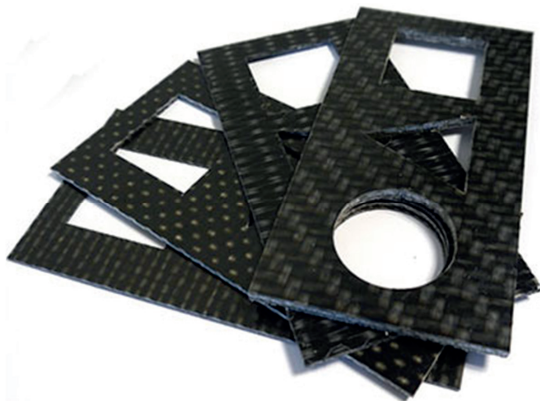


**Obr. 6.24** Boční podavač nekonečných vláken

Specifické strojní zařízení:

- zásobník vláken,
- boční podavač a dělič vláken,
- speciální šnek s dvoustupňovou kompresí.

**Zastříkování organických plechů** – tato technologie se označuje také jako *Organomelt* nebo *FibreForm* a jedná se o technologii, využívající polotovary – vrstvené přístřihy navinutých skleněných nebo uhlíkových vláken impregnovaných nejčastěji PA 6 nebo PP (případně PA 6.6, PA 12, PPS, TPU nebo PC). Tyto přístřihy obsahují ca 50 % vláken a vyrábějí se v různých tloušťkách (viz obr. 6.25).



**Obr. 6.25** Přístřihy PA 6 s 50 % skelných vláken (TEPEX)

Polotovary jsou ze zásobníku odebírány robotem a přenášeny k topnému tělesu, který je rychlým ohřevem zahřeje na teplotu ca 300 °C (pro případ impregnace přístřihů polyamidem). Poté jsou vloženy do formy, zavřením formy jsou vytvarovány a následně zastříknuty taveninou stejného polymeru s obsahem vláken (30 ÷ 50) %. Výsledkem jsou velmi lehké a pevné díly. Výrobní proces kombinuje tedy technologii vstříkování a tepelného tvarování termoplastických kompozitních materiálů. Nechybí ani možnost integrace přídatných výtuh pomocí žeber nebo funkčních prvků, které slouží např. k upevnění konečného dílu, jež nabízí vysoký potenciál pro nahrazení kovových materiálů.

**Specifické strojní zařízení:**

- speciální forma,
- zásobník na polotovary,
- zařízení na ohřev polotovarů,
- termokamera pro kontrolu prohřátí polotovarů,

- robot.

### **Výhody**

- vysoká pevnost a tuhost dílů při nízké hmotnosti.

### **Nevýhody:**

- vyšší cena strojního vybavení.

*Příkladem aplikací* jsou lehké pevnostní díly pro automobilový a letecký průmysl, elektroniku a sportovní pomůcky (viz obr. 6.26).



**Obr. 6.26** Pevnostní díly v automobilovém průmyslu vyráběné technologií Organomelt

6.9

## Vstřikování práškových materiálů

**Technologie vstřikování práškových materiálů** (PIM – Powder Injection Moulding) se zabývá zpracováním materiálu o vysokém obsahu kovového nebo keramického prášku a umožňuje tak výrobu plně kovových (MIM – Metal Injection Moulding) či keramických dílů (CIM – Ceramic Injection Moulding).

Vstupním materiálem je granulát obsahující jemný prášek kovu či keramiky o velikosti (1,5 ÷ 45)  $\mu\text{m}$ , který je rozmíchán v polymerní matici (PE, PP, POM, PA,

PMMA nebo speciální vosk). Podíl polymerní matrice v granulátu je (35 ÷ 55) obj. %. Granulát je zpracován obdobným způsobem jako u standardního vstřikování s tím rozdílem, že odebrání dílů z formy je řešeno pomocí robotu, jelikož díl je v této části výrobního procesu relativně křehký. Po vyjmutí výstřiku z formy následuje odstranění plastu (pojiva), které může být provedeno rozpuštěním (např. u PA), katalickou chemickou reakcí (u POM) nebo tepelným rozkladem při teplotě (400 ÷ 450) °C (u polymerů na bázi PE, PP, PMMA a vosku). V tomto stavu jsou díly stabilní pouze díky minimálnímu zbytku pojiva a malým Van der Waalsovým silám. V poslední fázi výrobního procesu dochází ke spékání (sintraci) kovového nebo keramického prášku při teplotách (1450 ÷ 2000) °C, dle druhu použitého prášku. Výsledné díly jsou homogenní a vykazují větší smrštění než je tomu u standardní technologie vstřikování (ca 20 %). Hustota dílu se přibližuje 99,9 % teoretické hodnotě hustoty práškového materiálu. Anizotropie smrštění dílu je do značné míry ovlivněna nejen typem, ale také tvarem prášku. Největší anizotropii smrštění vykazují díly vyráběné z materiálu s plochým tvarem prášku, zatímco díly z materiálu s práškem kulovitého tvaru mají smrštění menší a především izotropní.

#### Specifické strojní zařízení:

- vstřikovací jednotka, ale také forma, s povrchovou úpravou pro zvýšení odolnosti vůči opotřebením,
- robot pro vyjímání výstřiků z formy,
- sintrační pece (v případě MIM s ochrannou atmosférou).

#### Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- velmi malý nebo nulový dotlak ve fázi vstřikování.

Uvedená technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

#### **Výhody:**

- vysoká produktivita výroby kovových nebo keramických součástí,
- izotropní vlastnosti dílu (v závislosti na tvaru prášku),
- vysoká kvalita povrchu (při použití jemného prášku),
- vysoká rozměrová přesnost oproti technologii přesného lití,
- vhodné i pro velmi malé díly (ca 1 gram).



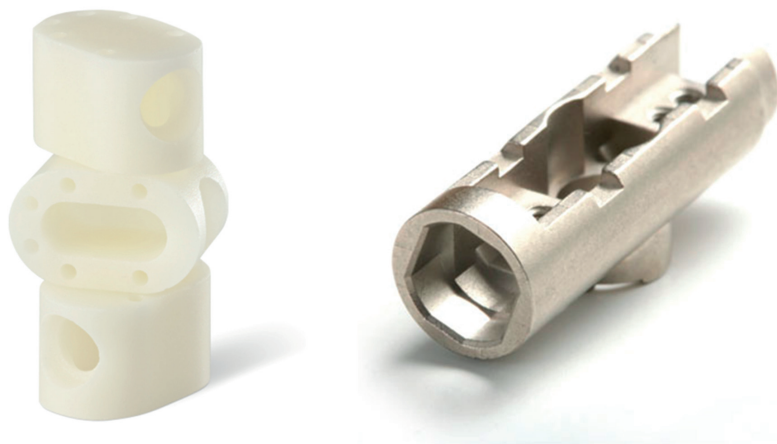
**Nevýhody:**

- vyšší cena strojního vybavení,
- zrychlené opotřebení vstřikovacího stroje a formy,
- energetická náročnost procesu.

Technologie MIM má s ohledem na náklady formy a provoz zařízení, délku výrobního cyklu i minimalizaci výrobních vad, následující doporučení omezení tvaru a velikosti dílů:

- největší rozměr dílu ca do 100 mm,
- hmotnost dílu < 100 g,
- tloušťka stěny dílu < 10 mm,
- díly bez vnitřních uzavřených dutin,
- díly bez ostrých hran,
- díly s malou změnou tloušťky stěn,
- díly bez zápichů a odlehčení na vnitřních plochách.

*Aplikačními příklady* jsou především díly ve zdravotnictví, v automobilovém, potravinářském, textilním a zbrojním průmyslu, vyráběné ve velkých sériích, které by bylo obtížně (náročně) zhotovit (viz obr. 6.27).



**Obr. 6.27** Příklad keramického a kovového dílu vyrobeného technologií PIM

*Technologie LIM* (Liquid Injection Moulding) označuje vstřikování tekutých materiálu a od běžné technologie vstřikování je výrazně odlišná, jelikož vstupním materiálem je tekutina. Významným zástupcem těchto technologií je technologie vstřikování tekutých silikonů (LSR).

**LSR (Liquid Silicon Rubber)** je nejrozšířenější technologií pro zpracování tekutého silikonu. Silikon je standardně dodáván v dvousložkové kapalně formě a v první fázi procesu je pomocí pístu dávkován ze sudů o různých objemech do plastikační jednotky vstřikovacího stoje (nejpoužívanějším objemem je 100 l, ale mohou být i objemově mnohem menší). Zde dochází ke smíchání obou složek a následnému vstříknutí do dutiny vstřikovací formy. Silikony jsou ve vstřikovací jednotce promíchávány za studena při teplotách ( $20 \div 30$ ) °C, přičemž současně je díky platinovému katalyzátoru v jedné ze složek silikonu zahájen proces vulkanizace (zesíťování makromolekul). Tento proces by však trval extrémně dlouho a ke ztuhnutí by došlo až za několik dní, proto je vstřikovací forma vyhřívána na vulkanizační teplotu: ( $160 \div 220$ ) °C (dle druhu silikonu), která tuhnutí výrazně urychluje.



**Obr. 6.28** Vstřikovací stroj pro technologii LSR

Konstrukce vstřikovacího stroje (viz obr. 6.28) je oproti běžnému vstřikování výrazně odlišná a to zejména v podobě dávkovacího zařízení, absence topení na

vstřikovací jednotce, geometrie šneku a konstrukce zpětného ventilu. Tato technologie klade vysoké požadavky také především na nástroj. Forma je vyhřívána na pracovní teplotu buď pomocí vysokotlaké vody, oleje nebo pomocí odporových topení. Přitom silikon musí vulkanizovat pouze v dutině a nikoli ve vtokové soustavě, proto jsou používány speciální chlazené vtoky. Dalším požadavkem je lícování formy v dělicí rovině. Silikon při kontaktu s vyhřívanou formou na okamžik výrazně snižuje svou viskozitu a v tomto okamžiku nejvíce hrozí nebezpečí tvorby přetoků, proto je doporučeno pro vstřikování silikonu lícovat formu tak, aby největší nepřesnost v dělicí rovině byla  $(0,003 \pm 0,005)$  mm. To znamená, že vyhazování výrobku nemůže být řešeno klasickými vyhazovacími kolíky, jelikož ty ke svému pohybu potřebují větší vůli v uložení. Takto přesné lícování neumožňuje přirozené odvodu vzduchu během jejího plnění a je nutné použít nucené vakuování dutiny formy. Další nástrahou je odformování výrobku. Silikon má velkou přilnavost k povrchu formy a je proto nutné opatřit líc formy speciálním dezémem.

#### Specifické strojní zařízení:

- dávkovací zařízení (sudy),
- vstřikovací jednotka pro LSR,
- speciální forma pro LSR,
- speciální temperační zařízení pro ohřev formy,
- nucené vakuování formy.

#### Specifické technologické nastavení procesu vstřikování:

- míchání složek silikonu za studena,
- vysoká teplota formy pro vulkanizaci materiálu.

Uvedená technologie sebou přináší řadu výhod a nevýhod, které jsou uvedeny níže.

#### **Výhody:**

- zdravotní nezávadnost dílů,
- vysoká tepelná odolnost dílů,
- vysoká tvarová stabilita dílů,
- vysoká produktivita výroby,
- vysoká přesnost dílů.

**Nevýhody:**

- vyšší cena strojního zařízení,
- velmi vysoká cena nástroje.

Typickými výrobky technologie LSR (viz obr. 6.29) jsou především zdravotnické pomůcky, díly pro automobilový průmysl, součástky v optice, atd. Technologii lze použít jak pro výrobu samostatných výstřiků, tak i pro výrobu vícekomponentních dílů (příkladem je např. rozeta sprchovací armatury na bázi PBT a silikonu).



**Obr. 6.29** Příklady silikonových dílů vyrobených technologií LSR



# POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BRYCE, Douglas M. *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN 978-0872634725.
- [2] BUGNICOURT, E. a kol. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *eXPRESS Polymer Letters* 11 (8), 791-808 (2014).
- [3] CARAMITU, Alina Ruxandra a kol. PA6/EPDM Blends for electrical insulations, preliminary characterization. In *Advanced Topics in Electrical Engineering*. Bucharest, 2013.
- [4] COUSIN, Thibault a kol. Molecular modelling of polyphalamides thermal properties: Comparison between modelling and experimental results. *Polymer* 53 (15), 229-234 (2012).
- [5] *Damit bei hohen Temperaturen das Kunststoffteil nicht schmilzt. Hitzebeständige Thermoplaste.*  
Dostupné z: [<https://www.kern.de/de/hochleistungskunststoffe>]
- [6] *Diabetes: Neue Ricordi-Kammer aus PPSU anstelle PEI.*  
Dostupné z: [<https://www.k-zeitung.de>]
- [7] DIER, Paul a Richard GORALSKI. *Gas assist injection molding*. Norfolk: Bauer Compressors, 2000. ISBN 978-1893677050.
- [8] DOMININGHAUS, Hans. *Plastics for engineers: materials, properties, applications*. Munich: Hanser, 1993. ISBN 3-446-15723-9.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [10] *Engineering plastics for extreme applications.*  
Dostupné z: [<http://plasticperspectives.com>]
- [11] GOODSHIP, Vanessa. *Practical guide to injection moulding*. Shawbury: Rapra Technology, 2004. ISBN 18-595-7444-0.
- [12] GOODSHIP, Vanessa. *Troubleshooting injection moulding*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapra Technology, 2004. ISBN 978-185-9574-706.
- [13] GORDON, M. Joseph. *Total quality process control for injection molding*. Hoboken: Wiley, 2010. Wiley series on plastics engineering and technology. ISBN 978-0470229637.
- [14] GREENER, Jehuda a Reinhold. WIMBERGER-FRIEDL. *Precision injection molding: process, materials, and applications*. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-1569904008.
- [15] HEANEY, Donald F. *Handbook of metal injection molding*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0857090669.

- [16] Hochleistungskunststoffe - Polyphenylensulfid und Polyarylsulfone. *Kunststoffe.de*
- [17] *Honeycomb heroes: making composites for aerospace*. Dostupné z: [<http://advancedmanufacturing.org>]
- [18] CHANDA, Manas a Salil K. ROY. *Industrial polymers, specialty polymers, and their applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN-13:978-1-4200-8059-9.
- [19] *Injection molding troubleshooting guide*. Corvallis: Advanced Process Engineering, 2011. ISBN 978-146-6414-341.
- [20] J. M. MALLON. *Advances in automation for plastics injection moulding*. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Technology, 2001. ISBN 978-185-9572-832.
- [21] JOHANNABER, Friedrich. *Injection molding machines: a user's guide*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 978-1569904183.
- [22] *Kevlar aramid fiber (technical guide)*, DuPont.
- [23] KROSCWITZ, Jacqueline I. *High performance polymers and composites*. New York: Wiley, 1991. ISBN 0-471-54366-7.
- [24] KUTZ, Myer. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. Boston: Elsevier/William Andrew, 2011. ISBN 978-1-4377-3514-7.
- [25] MICHAELI, Walter. *Training in injection molding a text- and workbook*. Munich: Hanser, 2001. ISBN 978-344-6214-187.
- [26] *Moderní materiály*. Liberec: TU v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-154-2.
- [27] Motor aus Kunststoff. *K-magazin*, Oktober 2016.
- [28] MUTSUDDY, C. Beebhas. *Ceramic injection molding*. London: Chapman and Hall, 1995. ISBN 978-041-2538-100.
- [29] NIAOUNAKIS, Michael. *Biopolymers: applications and trends*. Elsevier, 2015. ISBN 978-0-323-35399-1.
- [30] OLMSTED, Bernie A. a Martin E. DAVIS. *Practical injection molding*. New York: Marcel Dekker, 2001. 63. ISBN 978-0824705299.
- [31] OSSWALD, A. Tim, TURNG, Lih-Sheng a Paul J. GRAMANN. *Injection molding handbook*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 978-1569904206.
- [32] OTHMER, Kirk. *Encyclopedia of chemical technology*, Edition: 6, Chapter: Bioplastics - Biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics, Publisher: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 9780471485179.
- [33] PAJAK, Jolanta, ZIEMSKI Michal a Božena NOWAK. Poly(vinyl alcohol) – biodegradable vinyl materiál. *CHEMIK* 2010 (64), 7-8, 523-530.
- [34] *Plastics – the Facts 2017, An analysis of European plastics production, demand and waste data*.
- [35] PROKEŠ, Jan, STEJSKAL, Jaroslav a Mária OMASTOVÁ. Polyanilin a polypyrrol – dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy* (95), 484-492 (2001).
- [36] RANDALL M. German. *Powder injection molding: design and applications*. State College, Pa: Innovative Material Solutions, 2003. ISBN 978-097-2764-209.

- [37] REES, Herbert a Bruce CATOEN. *Selecting injection molds: weighing cost versus productivity*. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-1569903896.
- [38] ROSATO, Dominick V., ROSATO, V. Donald a Marlene G. ROSATO. *Injection molding handbook*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. ISBN 978-079-2386-193.
- [39] ROSATO, Donald V., ROSATO, G. Marlene a Dominick V. ROSATO. *Concise encyclopedia of plastics*. Boston: Kluwer Academic, 2000. ISBN 978-0792384960.
- [40] ROSATO, V. Dominick a Donald V. ROSATO. *Injection molding handbook: the complete molding operation : technology, performance, economics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. ISBN 978-044-2278-151.
- [41] RUDNIK, Ewa. *Compostable polymer materials*. Boston: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-045371-2.
- [42] SHONAIKE, Gabriel O. a George P. SIMON. *Polymer blends and alloys*. New York: Marcel Dekker, 1999. ISBN 0-8247-1980-8.
- [43] *Silicones*. S.l.: General Books, 2010. ISBN 978-115-6027-950.
- [44] SPE, Society of Plastics Engineers a Plastics Design Library. Ed. by Hans-Peter Heim. PDL. *Specialized molding techniques*. Norwich: Plastics Design Library, 2001. ISBN 18-842-0791-X.
- [45] STEIDL, Josef. O plastech v kontrastech. *MM Průmyslové spektrum* (4), 2017.
- [46] *The universal selection source: plastics and elastomers*. Dostupné z: [<https://omnexus.specialchem.com>]
- [47] UTRACKI, L. A. *Polymer blends handbook*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 1-4020-1110-5.
- [48] V. GOODSHIP a J. C. LOVE. *Multi-material injection moulding*. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Technology, 2002. ISBN 978-185-9573-273.
- [49] WHELAN, Tony a John GOFF. *Injection molding of thermoplastics materials*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. ISBN 978-147-5755-022.
- [50] XU, Jingyi. *Microcellular injection molding*. Hoboken: Wiley, 2010. ISBN 978-0470466124.
- [51] ZHENG, Rong, ROGER, I. Tanner a Xi-Jun FAN. *Injection molding integration of theory and modeling methods*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2212-635.
- [52] *3D tištěné krční implantáty zachránily život malým dětem*. Dostupné z: [<http://veda.stoplusjednicka.cz/3d-tistene-krcni-implantaty-zachranily-zivot-malym-detem>]

#### Technické (firemní) materiály:

ANC Chemicals Co.,Ltd. | ARBURG GmbH & Co. KG | Australasian Bioplastics Association | Autodesk Inc. | BASF | Bond-Laminates GmbH | Calsak Corporation | Cole-Parmer | Corporation | Diener electronic GmbH & Co. KG | DimeLika Plast GmbH | DuPont | ELMET Elastomere Produktions- und Dienstleistungs GmbH |

EMS-CHEMIE AG | ENGEL AUSTRIA GmbH | Evonik Industries | Fluorotherm Polymers Inc. | FTP plastics s.r.o. | FYTOVITA s.r.o. | Solvay | Granitol a.s. | Hardie Polymers Ltd. | HellermannTyton Group plc | Cheirón a.s. | INEOS Styrolution Group GmbH | Kistler Holding AG | KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG | Lep Engineering Plastics Ltd | KraussMaffei Technologies GmbH | Kunststoff-Technik Kuhn GmbH | Motan – Colortronic GmbH | PBI Performance Products Inc. | Piab | Piovan Central Europe GmbH | PolyOne Corporation | Reiloy Westland Corporation | RESINEX Czech Republic s.r.o. | RICO Elastomere Projecting GmbH | RocTool | Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH | Texpack Srl | The Dow Chemical Company | The Chemours Company | Thermo Fisher Scientific | Threadsindia Ltd. | Total Plastics Inc. | Trexel Inc. | WACKER CHEMIE AG | Wire Belt Company | Wittmann Battenfeld GmbH

*Materiálové databanky:*

Campus | Plastics prospector



Název	<b>Moderní plasty a vláknové kompozity Díl I. Vstřikování plastů: materiály a technologie</b>
Autoři	<b>Ing. Luboš Běhálek, Ph.D. Ing. Jiří Habr, Ph.D.</b>
Určeno pro	<b>studenty Fakulty strojní TU v Liberci a HS Zittau/Görlitz</b>
Vydavatel	<b>Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2, Liberec</b>
Schváleno	<b>Rektorátem TUL dne 15. 2. 2019, čj. RE 5/19</b>
Vyšlo	<b>v březnu 2019</b>
Počet stran	<b>127</b>
Vydání	<b>první</b>
Číslo publikace	<b>55-005-19</b>
Tiskárna	<b>Vysokoškolský podnik Liberec, s.r.o. Studentská 2, CZ-Liberec</b>

**Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.**

**ISBN 978-80-7494-458-1**



9 788074 944581