



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
Pavel Brdlík
Martin Borůvka
Irena Lenfeldová

ÚVOD DO TECHNOLOGIÍ ZPRACOVÁNÍ PLASTŮ

Úvod do technologií zpracování plastů

Luboš Běhálek • Pavel Brdlík • Martin Borůvka • Irena Lenfeldová



Autoři: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.
Ing. Martin Borůvka
Ing. Irena Lenfeldová, 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.



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

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

© Běhálek, Brdlík, Borůvka, Lenfeldová (Technická univerzita v Liberci) – 2019

ISBN 978-80-7494-460-4

Předmluva

V průběhu historie lidské civilizace bychom těžko hledali jiný materiál, jako je plast, který za poměrně krátkou dobu svojí existence expandoval do tolika oborů lidské činnosti. Plasty jsou jedny z nejpoužívanějších materiálů současnosti a jejich využitelnost neustále roste. Oproti jiným materiálům mají výhodu v široké rozmanitosti a variabilitě jejich vlastností, ať už jde o pevnost, pružnost, tepelnou nebo chemickou odolnost apod. Jednou z mnoha předností plastů, kromě celé řady jejich výhod (nízké hustoty, dobrých izolačních vlastností, korozní odolnosti ad.), je jejich dobrá zpracovatelnost energeticky nenáročnými technologiemi vhodnými pro sériovou výrobu. Možností, jak plasty zpracovávat, je celá řada. Jedním z nejrozšířenějších způsobů je technologie vstřikování, dále vytlačování, vyfukování nebo tepelné tvarování. Plasty lze zpracovávat také rotačním tvářením, odléváním, válcováním, laminováním nebo pomocí aditivních technologií. Dále je lze lepit, svařovat, obrábět nebo povrchově upravovat.

Rozsah skript nemůže pokrýt plně všechny uvedené oblasti a ani není možné vše popsat vyčerpávajícím způsobem. To ostatně není jejich záměrem. Skripta jsou určena především pro studenty bakalářského studijního programu na Vysoké škole v Žitavě/Zhořelci a Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci a jejich cílem je uvést studenty do problematiky plastů a jejich základních technologií zpracování, zejména technologií pro zpracování termoplastů. Svým rozsahem pokrývají témata sedmi přednáškových cyklů, které jsou realizovány souběžně pro studenty v Žitavě i v Liberci. Získané vědomosti budou dále rozvíjeny a doplněny novými poznatky v dalších předmětech navazujícího magisterského studia.

Luboš Běhálek

Obsah

1 Úvod do plastů (polymerů)	1
<i>Luboš Běhálek</i>	
1.1 Syntéza polymerů	1
1.2 Chemická a molekulová struktura polymerů	5
1.3 Nadmolekulární struktura polymerů	8
1.4 Základní rozdělení polymerů	11
1.5 Přísady do polymerů	14
1.6 Teplotní chování polymerů	18
1.7 Přehled základních polymerů	22
2 Přípravné operace	24
<i>Pavel Brdlík</i>	
2.1 Doprava materiálu	24
2.2 Míchání a dávkování materiálů	26
2.3 Granulace a recyklace	28
2.4 Sušení	30
3 Technologie vstřikování	33
<i>Irena Lenfeldová</i>	
3.1 Podstata a princip technologie vstřikování	35
3.2 Technologické parametry procesu vstřikování	43
3.3 Smrštění plastových dílů	44
3.4 Vstřikovací stroje	45
3.5 Vstřikovací formy	48
4 Speciální technologie vstřikování	53
<i>Irena Lenfeldová</i>	
4.1 Vstřikování reaktoplastů	53
4.2 Vstřikování pryží, kaučuků	55
4.3 Vstřikování silikonů	56
4.4 Vstřikování vláken plněných termoplastů	58
4.5 Vstřikování s podporou plynu	59
4.6 Vstřikování s podporou vody	62
4.7 Sendvičové vstřikování	64
4.8 Vícekomponentní vstřikování	66
4.9 Intervalové vstřikování	72
4.10 Mramorové vstřikování	72
4.11 Vstřikování plastů s prášky	73

4.12	Vstřikování slitin kovů	75
4.13	Reakční vstřikování	76
4.14	Kompresní vstřikování	79
4.15	Tandemové vstřikování	80
4.16	Vstřikování taveninou o vysokém tlaku	81
4.17	Vstřikování strukturních pěn	83
4.18	Technologie zastřikování	86
4.19	Technologie výroby organoplechů	88
4.20	Mikrovstřikování	89
4.21	Vstřikování se svařováním	90
4.22	Ostatní speciální technologie vstřikování	90
5	Technologie vytlačování	93
	<i>Pavel Brdlík</i>	
5.1	Výroba trubek a profilů	98
5.2	Výroba desek a fólií	103
5.3	Vyfukování fólií	106
5.4	Oplášťování	108
5.5	Koextruze	110
6	Technologie vyfukování	111
	<i>Pavel Brdlík</i>	
6.1	Vytlačovací vyfukování	112
6.2	Vstřikovací vyfukování	117
6.3	Vyfukování s dloužením	121
7	Technologie rotačního tváření	122
	<i>Pavel Brdlík</i>	
7.1	Dávkování materiálu	124
7.2	Ohřev materiálu a formy	124
7.3	Tváření dílu – rotace formy	125
7.4	Chlazení materiálu	126
7.5	Odformování dílu	126
8	Technologie tepelného tvarování	127
	<i>Pavel Brdlík</i>	
8.1	Ohřev polotovaru	128
8.2	Tvarování	130
8.3	Chlazení dílu	135
8.4	Ořez dílu a tvarovací stroje	136

9 Spojování plastových dílů	138
<i>Martin Borůvka, Luboš Běhálek</i>	
9.1 Svařování plastů	138
9.1.1 Svařitelnost materiálů	140
9.1.2 Svařování horkým tělesem	141
9.1.2.1 Svařování na tupo	144
9.1.2.2 Polyfúzní svařování	145
9.1.3 Svařování ultrazvukem	145
9.1.4 Vibrační (třecí) svařování	148
9.1.5 Rotační (třecí) svařování	150
9.1.6 Vysokofrekvenční svařování	151
9.1.7 Svařování horkým plynem a přídavným materiálem	153
9.1.8 Extruzní svařování	155
9.1.9 Svařování laserem	157
9.2 Lepení plastů	158
9.2.1 Vliv plastů na pevnost lepeného spoje	160
9.2.2 Typy lepidel	161
9.2.3 Konstrukce lepených ploch	162
9.2.4 Aplikace lepených spojů	164
Použitá literatura	165

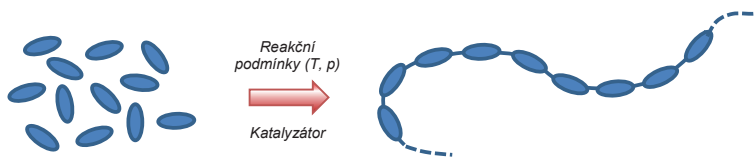
Poděkování

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

ÚVOD DO PLASTŮ (POLYMERŮ)

1

Plasty jsou materiály **polymerní povahy**. Jedná se o látky s velkými molekulami, tzv. **makromolekulami** (z řeckého macros = veliký, dlouhý), v nichž se jako článek řetězce mnohokrát opakuje základní **konstituční jednotka** „mer“ jednoho nebo více druhů (viz obr. 1.1). Řecká předpona *poly-* znamená *mnoho* nebo *více*. Z chemického hlediska jsou polymery především látky **organické** povahy, **přírodního** nebo **syntetického** původu (mohou být i anorganické, např. silikonový kaučuk). Typickými příklady organických látek jsou dřevo, rostliny, ropa, zemní plyn a řada dalších. To co je však odlišuje od plastů, resp. polymerů je to, že mají malé molekuly. Velikost (délku) makromolekul vyjadřujeme **molární hmotností** a za makromolekulární látku považujeme sloučeninu s molární hmotností vyšší než 10^3 g/mol, v případě polymerů vyšší než 10^4 g/mol. Mezi přírodní polymery patří přírodní kaučuk, škrob, celulóza, šelak nebo také jantar (mineralizovaná pryskyřice z třetihorních jehličnanů), který je vůbec nejstarším polymerem.



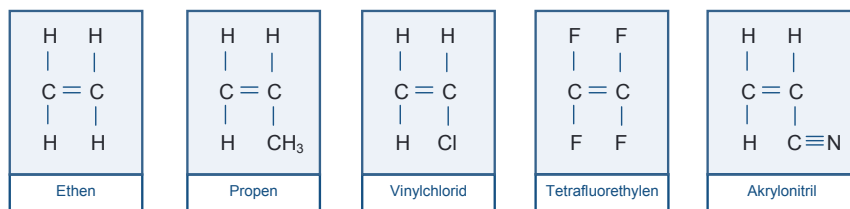
Obr. 1.1 Schéma tvorby makromolekuly

1.1

Syntéza polymerů

Syntetické polymery, plasty, se vyrábějí z nízkomolekulárních organických (případně anorganických) sloučenin, tzv. **monomerů**, které se získávají převážně z ropy, resp. ropných frakcí, **zemního plynu**, ale také z **rostlinných a živočišných produktů**, např. kukuřičného škrobu, řepného cukru (z nichž je získávána např. kyselina mléčná, která je základní surovinou pro bioplast PLA, kyselinu polymléčnou), ricinového oleje (kyselina ricinolejová je základní surovinou pro PA 11) apod. Inspirací pro výrobu syntetických polymerů byla snaha o napodobení dobrých vlastností přírodních polymerů.

Pro přípravu syntetických makromolekulárních látek používáme tři základní postupy: *polymeraci* (řetězová reakce), *polykondenzaci* a *polyadici* (stupňovité reakce). Jedná se o chemické reakce, tzv. *polyreakce*, které se mnohokrát opakují, takže původně nízkomolekulární sloučenina *monomer* přechází v makromolekulární látku *polymer*. K polyreakci může dojít tehdy, obsahuje-li monomer v molekule alespoň dvě funkční skupiny schopné reakce. *Vícefunkčnost monomeru* může být způsobena přítomností násobných vazeb v molekule monomeru (viz obr. 1.2). Díky těmto vazbám jsou monomery reaktivní a schopné vytvářet řetězovité makromolekuly. Základními chemickými prvky makromolekulárních látek jsou C a H, často také N, O, F, S a Cl.

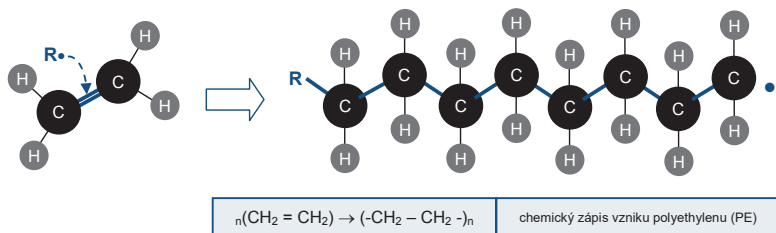


Obr. 1.2 Strukturní vzorce nízkomolekulárních látek (monomerů) pro přípravu polymerů

- **Polymerace** je chemická reakce, při které spolu reagují molekuly monomeru, chemici říkají, že si „rozevřou“ dvojné vazby (z monomeru se stane monomerní jednotka) a propojí se do dlouhých řetězců polymeru, které mohou být složeny až z několika miliónů atomů. Polymer, který se takto utvoří, obvykle dostane jméno odvozené od výchozího monomeru přidáním předpony *poly-*, například *polyethylen* (PE), *polypropylen* (PP), *polystyren* (PS), *polyakrylonitril* (PAN), *polyvinylchlorid* (PVC), *polytetrafluorethylen* (PTFE) apod.

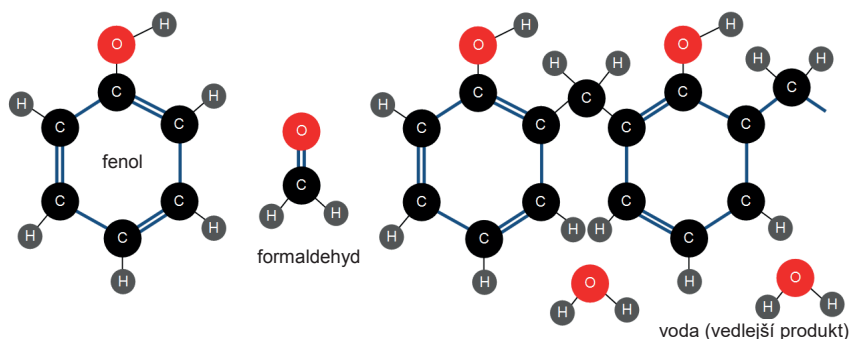
Polymeraci zahajují reaktivní látky, tzv. iniciátory (I), případně produkty jejich rozkladu, ke kterým dochází např. účinkem tepelné energie, UV záření apod. Jedná se o radikály (R•) nebo u polarizovaných monomerů ionty (kationty a anionty), které rozštěpí násobnou vazbu v molekule monomeru. Tomuto ději říkáme *iniciace*. Iniciátorem mohou být peroxidy, alkalické kovy, organokovy aj. Po rozštěpení násobné vazby vznikne nový objemnější radikál nebo iont, který opět reaguje s další molekulou monomeru a dochází k růstu řetězce, tuto fázi označujeme jako *propagaci*. K ukončení růstu makromolekulárního řetězce dochází např. spojením

dvou radikálů nebo spotřebováním veškerého monomeru a o tomto ději hovoříme jako o *terminaci*. Příklad radikálové polymerace *polyethylenu* (PE) je znázorněn na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Schéma radikálové polymerace polyethylenu (PE) z nízkomolekulárních molekul ethenu (ethylenu)

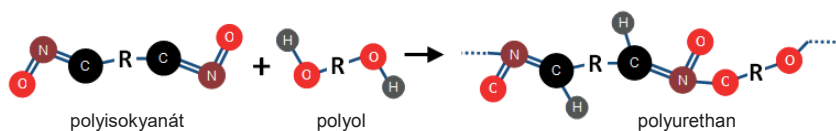
- **Polykondenzace** je označení pro chemickou reakci, při které vznikají makromolekuly postupnou kondenzací stejných nebo různých *monomerů* a *oligomerů* (nízkomolekulárních látek s krátkými řetězci složených z několika merů; oligos = několik), které obsahují dvě nebo více reakčních atomových skupin. V průběhu reakce nevzniká jenom polymer, ale i vedlejší nízkomolekulární produkt (např. voda, methanol, amoniak ad.), který se odštěpí při každém dalším připojení monomerní jednotky. Takto vznikají polymery s určitou charakteristickou chemickou skupinou, např. *amidovou*, *esterovou*, *éterovou*.



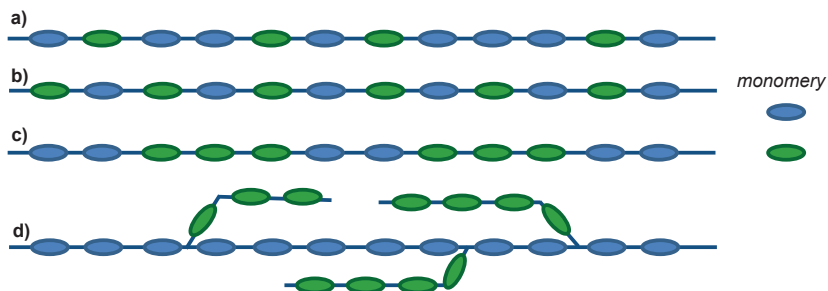
Obr. 1.4 Schéma kondenzace fenolu a formaldehydu

Polyamidy, polyestery (např. *polyethylentereftalát* - PET) a také polyétery (např. *polyetheretherketon* - PEEK) se tedy tvoří polykondenzací, která vytváří amidové, esterové nebo éterové vazby. Vůbec poprvé bylo chemické reakce použito v roce 1907 při výrobě *fenol-formaldehydové pryskyřice* (PF) kondenzací fenolu a formaldehydu, viz obr. 1.4. Rychlost polykondenzace je oproti polymeraci, která může trvat zlomky sekund, podstatně menší. Reakci je možné v libovolném stádiu přerušit a opět v ní pokračovat např. až při zpracování materiálu na finální výrobek.

- **Polyadice** je označení pro chemickou stupňovitou reakci, při které spolu reagují dva odlišné druhy monomerů obsahující v molekule reaktivní atomové skupiny, viz příklad na obr. 1.5. Nevzniká však při tom žádný štěpný produkt, ale vodíkový atom se přesouvá z jedné reaktivní skupiny na jinou (z jednoho monomeru na druhý), čímž probíhá slučování (adice). Polyadicí vznikají např. *polyurethany* (PUR) a *epoxidové pryskyřice* (EP).



Obr. 1.5 Schéma přípravy polyurethanu (PUR) polyadicí
(poznámka: R= polyether; polyester)



Obr. 1.6 Schéma makromolekul kopolymerů
a) statistický; b) alternující (střídavý); c) sledový; d) roubovaný

Syntéza polymerů může probíhat v reakčním prostředí za přítomnosti jednoho typu monomeru, výsledný produkt je označován jako **homopolymer** nebo se reakce

účastní dva či více monomerů a v tomto případě je výsledný produkt označován jako **kopolymer**, případně *terpolymer* (vzniká-li ze tří druhů monomerů) nebo *multipolymer* (vzniká-li ze čtyř a více druhů monomerů). Kopolymerace má v technické praxi značný význam, neboť umožňuje upravovat fyzikální vlastnosti polymeru žádoucím směrem. Dle reakčních podmínek může být výsledkem kopolymerace *statistický kopolymer* (monomerní jednotky se v řetězci střídají nahodile), *alternující*, resp. *střídavý kopolymer* (monomerní jednotky se v řetězci střídají pravidelně), *blokový kopolymer* (monomerní jednotky tvoří souvislé úseky řetězce) nebo *roubovaný kopolymer* (na základní řetězec monomerních jednotek jednoho druhu jsou naroubovány postranní řetězce monomerních jednotek jiného druhu), viz obr. 1.6. Výsledné vlastnosti kopolymeru jsou dány typem monomerních jednotek, jejich množstvím a uspořádáním v makromolekulách. Příkladem kopolymeru je např. *styren-akrylonitril* (SAN). Jedná se o styrenový plast, který nevzniká pouze polymerací styrenu, jejímž výsledkem je křehký polystyren (PS), ale reakce se účastní také akrylonitril. Konečným produktem je styren-akrylonitril, který řeší základní nedostatek standardního polystyrenu - jeho značnou křehkost.

1.2

Chemická a molekulová struktura polymere

Polymery jsou makromolekulární látky, které se liší *složením*, *velikostí molekul*, jejich *tvarem* a v neposlední řadě také *uspořádáním* celých molekulárních řetězců (nadmolekulární strukturou), případně jejich orientací.



Hlavním surovinovým zdrojem pro výrobu polymerů je v současnosti ropa. Na petrochemické produkty se ji používá ca 10 %, zbylých 90 % se používá na rafinérské produkty. Ročně se spotřebuje ca 4 mld. tun ropy, k výrobě plastů v Evropě se používá pouze (4 až 6) %.

Jak jsme si již ukázali, makromolekula je vybudována z velkého počtu malých, poměrně jednoduchých monomerních jednotek. Hlavní řetězec makromolekul je většinou tvořen atomy uhlíku, mohou se v něm vyskytovat i jiné prvky, jako kyslík, dusík, křemík ad. Na atomy, které vytváří hlavní řetězec, se váží další atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku, chloru a fluoru. **Chemická struktura** makromolekul určuje

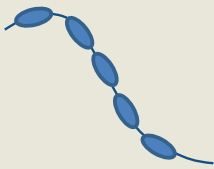
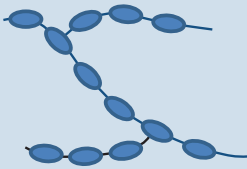
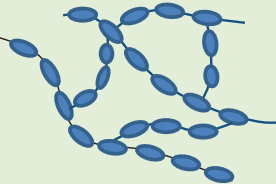
všechny základní vlastnosti polymerů: *fyzikální, mechanické, chemické, tepelné, elektrické*, dále jejich *hořlavost, míru navlhavosti* apod. Například přítomnost atomu chloru v makromolekule *polyvinylchloridu* (PVC) zabraňuje hoření polymeru za běžných podmínek. U fluorovaných plastů, jako je např. *polytetrafluorethylen* (PTFE), jsou atomy fluoru příčinou jejich vysoké teplotní a chemické odolnosti (chemická vazba C-F je jedna z nejpevnějších vazeb v makromolekule) a obdobně by bylo možné uvést další příklady.

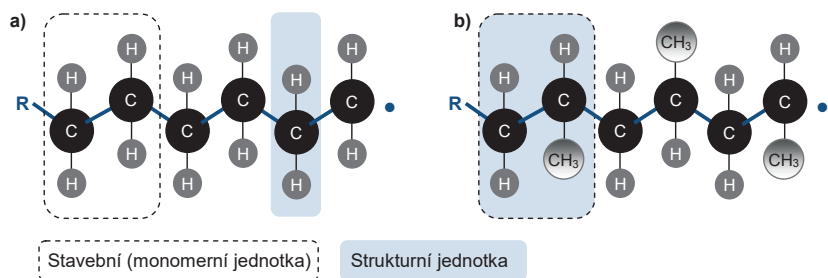
Vznikají-li polymery z monomerů tvořených polárními atomy, pak se makromolekuly těchto látek silně přitahují a jsou schopny přijímat vlhkost z okolního prostředí. V důsledku vyšších mezimolekulárních sil mají např. vyšší pevnost, vyšší modul pružnosti i teplotu tání. Fyzikální vlastnosti polymerů jsou však značně závislé na obsahu vlhkosti (s vyšším obsahem vlhkosti klesá pevnost, tuhost a naopak se zvyšuje tažnost a rázová houževnatost). Jedná se zejména o polymery obsahující silně elektronegativní prvky, jako je: *kyslík –O, dusík –N, chlor –Cl, křemík –Si* a další, v důsledku nichž vzniká v makromolekule elektrický dipól, tedy soustava nábojů o stejné velikosti, opačného znamení (+) a (-), který podmiňuje vznik dipólového momentu a přitažlivých sil. Tyto polymery nazýváme **polární**. Naopak u **nepolárních** polymerů, které nemají elektrický dipól, jsou náboje rozloženy symetricky. Jedná se o *polyethylen* (PE), *polypropylen* (PP), *polystyren* (PS) a *polytetrafluorethylen* (PTFE).

Syntézou polymerů vznikají makromolekulární řetězce, které mohou být **lineární** (jako nitky nebo šňůra perel), z prostorových důvodů se přibližují dostatečně jedna ke druhé (polymery mají vyšší hustotu), **rozvětvené** (jako kořeny stromu) nebo **sesíťované**, vzájemně propojené do souvislé trojrozměrné struktury, vlastně jediné obrovské molekuly (viz tab. 1.1). Avšak i lineární makromolekuly mají zpravidla určitý malý počet rozvětvení o krátké délce.

Lineární makromolekuly se vytvářejí během reakce spojováním monomerů s dvěma funkčními skupinami, v případě vícefunkčních monomerů vznikají rozvětvené nebo síťované makromolekuly. Sesíťovaná struktura však může vzniknout také dodatečně a to zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené makromolekuly (typické pro vulkanizaci kaučuků, případně síťování termoplastů). Sesíťováním makromolekul se omezí jejich pohyblivost jako celku. Takovéto polymery ztrácí rozpustnost, tavitelnost, zhoršuje se jejich houževnatost a naopak zvyšuje se tvrdost, modul pružnosti a teplotní odolnost.

Tab. 1.1 Schématické znázornění tvaru makromolekul polymerů a jejich vlastnosti

Lineární	Rozvětvené	Sít'ované
 ▪ Vyšší hustota ▪ Vyšší pevnost ▪ Vyšší modul pružnosti ▪ Nižší tažnost ▪ Nízká viskozita taveniny ▪ Snadná krystalizace	 ▪ Nižší hustota ▪ Nižší pevnost ▪ Nižší modul pružnosti ▪ Vyšší tažnost ▪ Nižší teplotní odolnost ▪ Vyšší viskozita ▪ Horší krystalizace	 Vlastnosti závisí na hustotě sítě. S vyšší hustotou se materiál zpravidla vyznačuje: ▪ vysokou pevností, ▪ vysokým modulem pružnosti, ▪ teplotní odolností, ▪ velmi malou tažností.



Obr. 1.7 Schéma růstu makromolekulárního řetězce (a) polyethylenu, (b) polypropylenu

Tvar makromolekul, ale také jejich délka a distribuce má vedle chemických a strukturních charakteristik polymeru značný vliv na jeho fyzikální vlastnosti. Vliv tvaru makromolekul na vlastnosti polymeru je uveden v tab. 1.1 a také na příkladu nejběžnějšího materiálu ze všech polymerů, kterým je polyetylen, viz v tab. 1.2. Makromolekula vysokohustotního (lineárního) polyethylenu je vůbec nejjednodušší mezi všemi molekulami polymerů. Vzniká polymerací z nízkomolekulárního ethenu, jehož molekula obsahuje dva atomy uhlíku s dvojnou vazbou, na nichž jsou po obou stranách připojeny jednoduchou vazbou atomy vodíku (viz obr. 1.3). Ethen je plynný produkt s teplotou tání $-169,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a molární hmotností 28 g/mol . Během polymerace dochází k rozštěpení násobné vazby a spojování monomerních jednotek. Teplota

tání rostoucího řetězce uhlovodíku přitom postupně roste od 28 °C pro osmnáct uhlíků v řetězci přes 105 °C pro sedmdesát uhlíků až k hodnotě 132 °C pro uhlovodík s pěti tisíci atomy uhlíků v řetězci, který má molární hmotnost 70 000 g/mol. Uhlovodík s molární hmotností 100.000 g/mol je už běžný polyethylen. Další zvětšování molekul již teplotu tání (T_m) prakticky neovlivní, ale má podstatný vliv na viskozitu taveniny. Molární hmotnost a její distribuce však neovlivňuje pouze teplotu tání a tekutost taveniny, ale také fyzikální vlastnosti polymeru, jako je jeho pružnost, pevnost, tepelná stálost, rozpustnost a další vlastnosti (s vyšší molární hmotností se zvyšuje pevnost (σ_m), modul pružnosti (E_t) a tvarová stálost polymeru, snižuje se jeho tažnost a rozpustnost). Vedle **molární hmotnosti** se velikost makromolekul vyjadřuje **polymeračním stupněm**, který udává počet strukturních jednotek tvořící makromolekulu, viz obr. 1.7.

Tab. 1.2 Vlastnosti polyethylenu v závislosti na tvaru makromolekul

Typ polyethylenu	Tvar makromolekul	ρ [g/cm ³]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	T_m [°C]
PE-HD	Lineární	0,940 ÷ 0,960	18 ÷ 35	700 ÷ 1400	105 ÷ 115
PE-LD	Rozvětvené	0,914 ÷ 0,928	8 ÷ 23	200 ÷ 500	130 ÷ 135

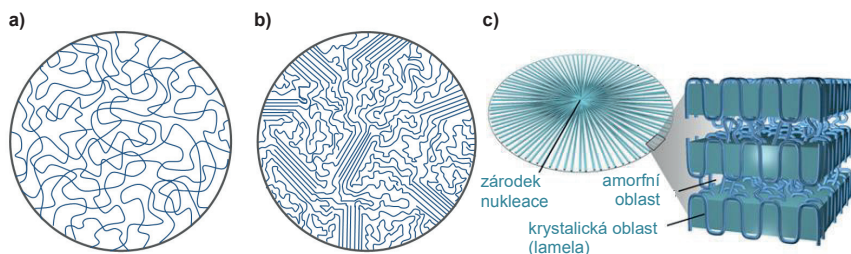
Průmyslově vyráběné plasty jsou vytvářeny směsí různě velkých makromolekul o nestejně molekulové hmotnosti (resp. polymeračním stupni). Je to dáno různými podmínkami, především výběrem katalyzátorů. Můžeme se tak setkat s plasty s úzkou nebo širokou distribucí molekulových hmotností. Podle šířky distribuce se materiály od sebe velice znatelně odlišují. Tak např. materiály se širokou distribuční křivkou jsou pružné a odolné proti vzniku a šíření trhlin. Materiály s úzkou distribucí jsou vysoce houževnaté a dobře se svařují. Například u polyethylenu nabízejí výrobcí materiály obojího druhu.

Lineární makromolekulu jsme si zjednodušeně představili ve tvaru nitky nebo šňůry perel o délce až 2 500 nm. Ve skutečnosti tvoří vazby mezi atomy uhlíku v hlavním řetězci makromolekuly úhel asi 109°, jak je znázorněno např. na obr. 1.7. Se zvyšující se teplotou mohou segmenty makromolekuly kolem těchto vazeb

neomezeně rotovat a jejím nejpravděpodobnějším útvarem v oblasti taveniny je kulovitý útvar, zvaný *klubko*. V tavenině jsou makromolekuly vůči sobě uspořádány tedy nepravidelně, tento stav odpovídá amorfnímu stavu a lze přirovnat špagetám na talíři (pro běžný optický mikroskop jsou rozměry i té největší makromolekuly příliš malé).

Při ochlazování taveniny mohou nastat následně dva případy uspořádání makromolekul: *amorfní* a *(semi)krystalické*. To je velmi důležité pro vnější vlastnosti polymeru.

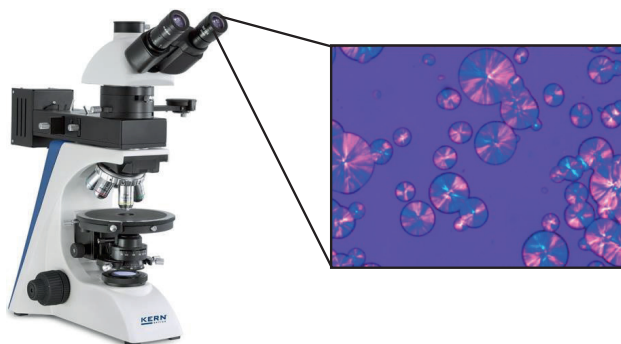
- **Amorfní strukturou** rozumíme strukturu bez jakékoliv uspořádanosti (chaotickou), makromolekuly zůstávají náhodnými klubky, která mohou být vzájemně propletena (viz obr. 1.8a). Amorfní strukturu mohou mít všechny standardní typy polymerů.



Obr. 1.8 Nadmolekulární struktura polymerů

(a) amorfní; (b) semikrystalická; (c) model sférolitu tvořený krystalickými lamelami

- **(Semi)krystalická struktura** se vyskytuje pouze u termoplastů (viz kap. 1.4) a vyznačuje se určitým stupněm uspořádanosti makromolekul, to znamená, že do krystalických oblastí se uloží jen část polymeru. Zbytek tuhne do amorfní fáze, která obklopuje krystalické domény (tzv. *krystality*) ze všech stran (viz obr. 1.8b). Krystalické oblasti tvoří snadněji makromolekuly s jednoduchým pravidelným řetězcem, případně s krátkými, pravidelně umístěnými vedlejšími řetězci. Podíl krystalické fáze ve struktuře polymeru, který je závislý nejen na strukturních podmínkách, ale také na kinetických podmínkách při jeho zpracování (rychlosti chlazení), nazýváme *stupněm krystalinity*. Úplné krystalizace (monokrystalu) v reálných podmínkách zpracování polymerů nedocílíme, je možné jej připravit pouze v laboratorních podmínkách ze zředěných roztoků.



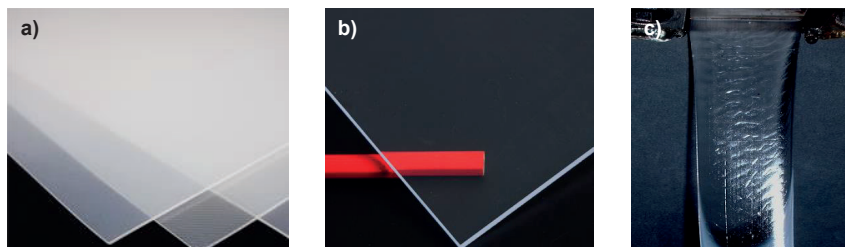
Obr. 1.9 Sférolitická struktura polymeru při studiu jeho struktury optickou mikroskopií

Obraz vnitřní struktury tak, jak se jeví např. v elektronovém mikroskopu, se nazývá morfologie. Základním morfologickým útvarům semikrystalického plastu je *krystalická lamela*, viz obr. 1.8c. V lamelě, právě tak jako v monokrystalu, jsou molekuly poskládány kolmo k její největší ploše. Na rozdíl od monokrystalu však z lamely některé molekuly vystupují, procházejí amorfni fází a mohou se zapojit ještě do dalších lamel. Přítomnost takových vazebných molekul je důležitá pro soudružnost polymerního materiálu. Jestliže má tavenina při tuhnutí dostatek času, krystalické lamely se seskupí do složitějších středově souměrných útvarů, kterým se říká *sférolity*. Vznikají tak, že z centrálního zárodku rostou všemi směry krystalické lamely jako úzké stuhý někdy pravidelně vrtulovitě stočené. Mezi nimi zůstává amorfni polymer. Průnikem mnoha sférolitů vzniká *sférolitická struktura*, kterou lze již pozorovat pomocí světelného mikroskopu s polarizačním světlem (viz obr. 1.9). Hlavní prvky nadmolekulární struktury se utvářejí v průběhu chladnutí polymeru. Je-li krystalizace spojena s přeměnou fáze (polymer přechází z taveniny do tuhého stavu) hovoříme o tzv. *primární krystalizaci*. Ta však ještě může pokračovat ve stavu tuhém (často i několik dní) a nazývá se *sekundární krystalizací*. Jsou s ní spojeny změny rozměrů dílů, ale i jeho vlastností a je tak nežádoucím jevem.

Vnější projevy krystalizace:

- Zvýšení *hustoty*, *pevnosti*, *modulu pružnosti*, *tvrdosti*, *chemické a tepelné odolnosti* polymeru vlivem těsnějšího uspořádání makromolekul v krystalických oblastech.

- *Snížení tažnosti a rázové houževnatosti polymeru.*



Obr. 1.10 Optické vlastnosti polymerů

a) mléčný zákal semikrystalického PP; b) čistý vzhled amorfního PS; c) postupná ztráta průhlednosti taveniny PP v důsledku chlazení (krystalizace) na vzduchu

- **Zakalení polymeru.** Krystalická fáze má totiž jiný index lomu světla než fáze amorfní a při průchodu světla materiálem dochází k jeho rozptylu na rozhraní obou fází (standardní amorfní polymery jsou čiré, průhledné – světlo prochází materiálem beze změny), viz obr. 1.10. Intenzita zakalení závisí na stupni krystalinity. Při zahřátí nad teplotu tání krystalických oblastí se materiál opět stane průhledným, neboť při roztavení se krystalická struktura zruší a obnovuje se podle konkrétních podmínek ochlazování, viz obr. 1.10c.

1.4

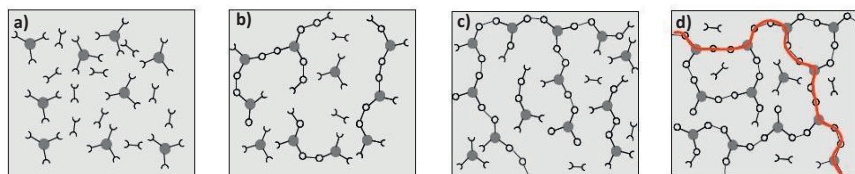
Základní rozdělení polymerů

Makromolekulární látky rozdělujeme podle chování za zvýšených teplot na *termoplasty*, *reaktoplasty*, *elastomery* a *termoplastické elastomery*.

- **Termoplasty** jsou materiály s *lineárními* nebo *rozvětvenými* makromolekulami, které jsou za standardní teploty okolí tuhé, teplem přechází do plastického stavu a lze je snadno tvářet. Ochlazením ztuhnou a tím si zachovávají udělený tvar. Při zahřívání neprobíhá chemická reakce a během zpracování se nemění jejich chemická struktura (jedná se pouze o fyzikální děj). Převedení do plastického stavu lze opakovat, avšak opakovaným zahříváním se mohou jejich vlastnosti (v důsledku degradace – štěpení makromolekul) zhoršovat. Patří sem např. PE, PP, PS, PVC, POM, PET, PBT ad.

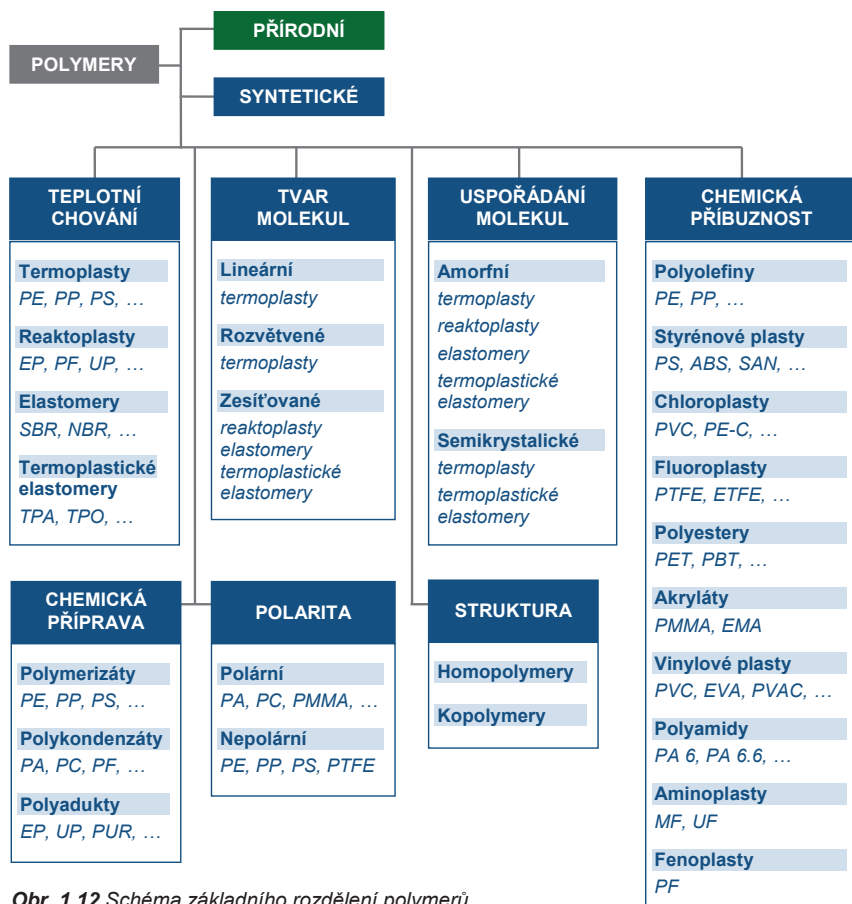
- **Reaktoplasty** jsou materiály, které prvním zahřátím přecházejí do plastického stavu a lze je snadno tvářet. Trvá-li zahřívání déle, dochází postupně k *síťování*

makromolekul (vytvrzování), až zcela ztuhnou, a tím si zachovají udělený tvar, viz obr. 1.11.



Obr. 1.11 Strukturní změny při vytvrzování polymerů

a) molekuly monomerů; b) tvorba krátkých řetězců (tzv. oligomerů); c) lineární růst a větvení makromolekul; d) sesíťovaná struktura s některými nezreagovanými skupinami a reaktanty

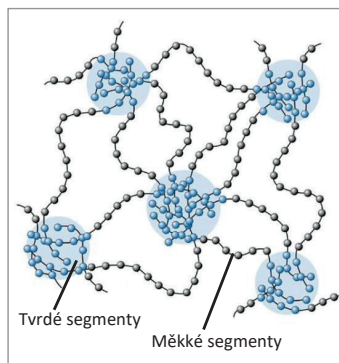


Obr. 1.12 Schéma základního rozdělení polymerů

K vytvrzování může docházet nejen působením teploty, ale také působením síťovacích činidel (tvrdidel), případně oběma těmito faktory. Opakovaným zahřátím už do plastického stavu nepřecházejí, jsou netavitelné, nerozpustné a nelze je svařovat (vytvrzování je nevratná chemická reakce). Síťování makromolekul má za následek velkou pevnost, ale současně také značnou křehkost materiálu. U reaktoplastů se produkt v nevytvrzeném stavu obvykle nazývá pryskyřice. Patří sem PF, EP, UF, MF, UP ad.

- **Elastomery** jsou vysoce pružné (elastické) materiály s nízkou tuhostí, které lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Typickým představitelem jsou kaučuky, z nichž se vulkanizací (*řádkým sesítěním* makromolekul, nejčastěji sírou) vyrábí pryže – vysoce pružný materiál, odolný trvalé deformaci. Pryž je vulkanizovaný elastomer a je charakterizována chemickými (příčnými) vazbami mezi makromolekulami, které tvoří uzly prostorové sítě. Vulkanizované elastomery nelze působením tepla převést do kapalného stavu. Typické kaučuky jsou např. IR, SBR, NBR, CR, EPDM, ad.

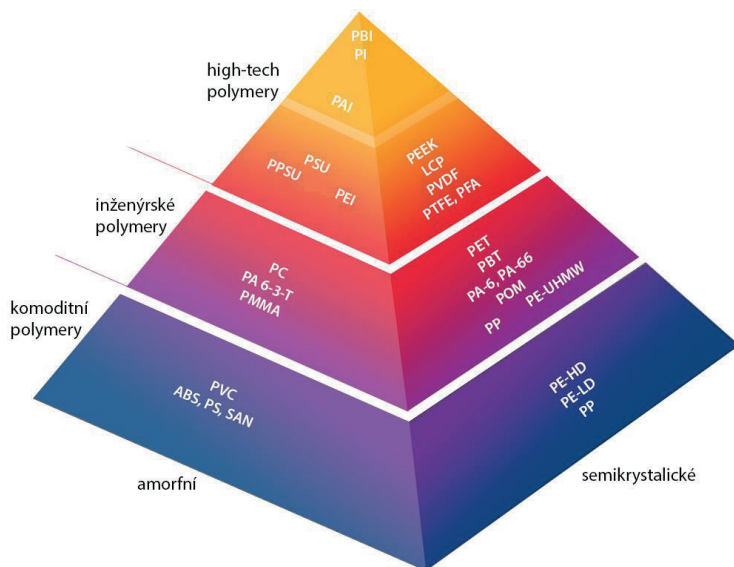
- **Termoplastické elastomery (TPE)** jsou materiály, které mají vlastnosti pryže (pružnost) a současně vlastnosti termoplastů (teplem přecházejí opakovaně do plastického stavu). Jejich struktura je tvořena měkkými (elastomery) a tvrdými segmenty (termoplasty), které vytváří uzly sítě, viz obr. 1.13. Hlavní rozdíl mezi termoplastickými elastomery a pryžemi je ve vlastnostech uzlů sítě, které jsou u pryží (po vulkanizaci kaučuku) chemické povahy, zatímco u TPE jsou povahy fyzikální a vytváří je obvykle určité množství nemísitelných termoplastických segmentů rozptýlených ve spojitě elastomerní fázi. Termoplastické elastomery nedosahují sice takových elastických vlastností jako pryže, jejich výhodou je ale možnost zpracování na běžných strojích určených pro termoplasty a také možnost jejich opětovného zpracování (recyklace).



Obr. 1.13 Struktura TPE
připraveného kopolymerací

Z doposud uvedeného je zřejmé, že polymery lze dělit podle různých kritérií, viz obr. 1.12. Jiná možnost klasifikace vychází z jejich postavení na trhu. Podle toho se

rozlišují tři velké třídy plastů: **komoditní plasty**, určené pro široké použití, které představují největší objem výroby i spotřeby, **konstrukční (inženýrské) plasty**, které nabízejí mnohem lepší užité vlastnosti a **vysoce odolné (high-tech) polymery**, které nabízejí unikátní vlastnosti určené pro špičkové aplikace. Tyto třídy lze schematicky sestavit do pyramidy, viz obr. 1.14. Směrem odzdoila nahoru roste kvalita materiálu, jeho teplotní odolnost, ale také cena.

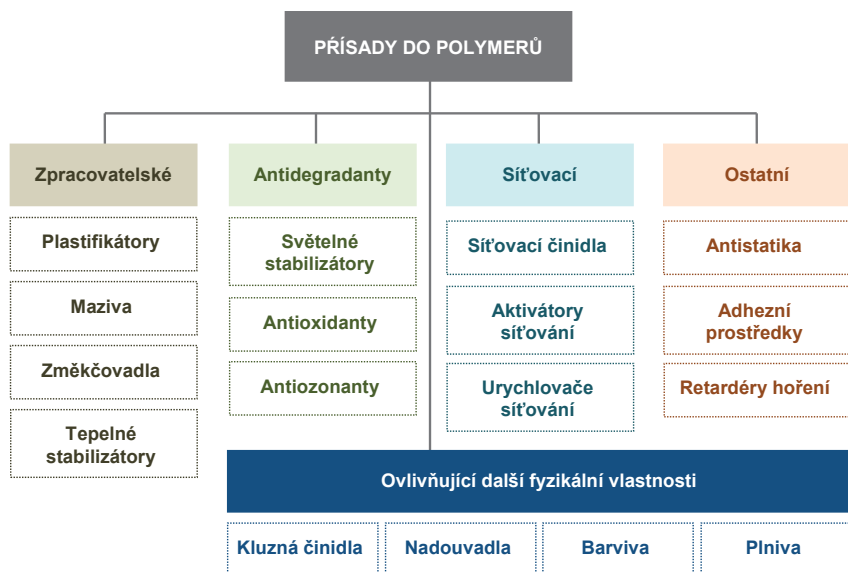


Obr. 1.14 Rozdělení polymerů dle postavení na trhu

1.5

Přísady do polymerů

V průmyslové praxi obsahují polymery zpravidla různé **přísady**, pomocí nichž lze modifikovat jejich vlastnosti a přizpůsobit je požadavkům pro konkrétní aplikace. Základní vlastnosti materiálu jsou však vždy určeny typem polymeru, přísady tyto vlastnosti zlepšují, chrání materiál vůči degradačním procesům, zlepšují jeho zpracovatelnost, případně snižují jeho cenu. Základní rozdělení nejdůležitějších přísad do polymerů je zřejmé z obr. 1.15.



Obr. 1.15 Příspěvky do polymerů

Plastifikátory – přísady, které snižují střední molární hmotnost kaučuků a usnadňují jejich plastifikaci při hnětení (oleje, živice).

Maziva (lubrikanty) – zlepšují tekutost taveniny při zpracování (a)nebo usnadňují vyjímání dílu z formy (parafiny, mastné kyseliny, glycerol, apod.). Předpokládá se, že maziva plní více nebo méně obě úlohy, záleží na mezi rozpustnosti mezi polymerem a mazivem. Látky, které jsou v polymeru dobře rozpustné, snižují viskozitu taveniny a usnadňují jeho zpracovatelnost. Látky málo rozpustné v polymeru vystupují na jeho povrch, vytváří na něm vrstvu, která usnadní vyjmutí výrobku z formy. Maziva často zlepšují i jiné vlastnosti výrobku, např. vzhled povrchu, tepelnou a světelnou stabilitu nebo odolnost vůči povětrnosti.

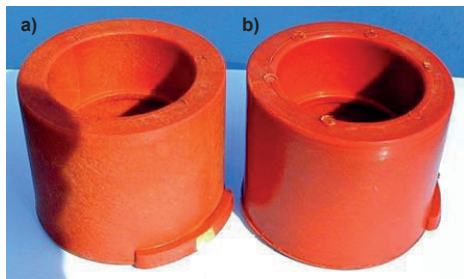
Změkčovadla – jedná se o organické kapaliny, které se rozkládají při vysoké teplotě, snižují viskozitu taveniny, zlepšují zpracovatelnost plastu, zvyšují jeho ohebnost, tvárnost i rázovou houževnatost (dochází k oddalování makromolekul, k poklesu mezimolekulárních sil a zvyšování vnitřní pohyblivosti makromolekul).

Tepelné stabilizátory – jejich úkolem je zpomalit degradační procesy (autooxidaci, síťování, štěpení makromolekul, dehydrochloraci) a zlepšit odolnost polymerů zvýšeným teplotám při jejich zpracování.

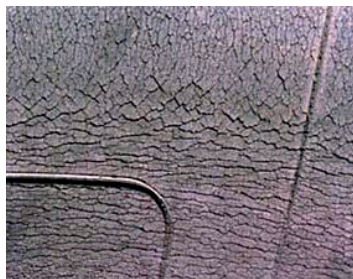
Světelné stabilizátory – zpomalují degradační procesy v důsledku slunečního záření (pro polymery je nejnebezpečnější UV záření, které vyvolává vznik volných radikálů, způsobující štěpení nebo síťování makromolekul), viz obr. 1.16. Nejúčinnějším UV stabilizátorem jsou saze, které UV záření nepropustí. Jiné typy stabilizátorů jej absorbují a zajišťují jeho přeměnu na tepelnou energii nebo na záření o větší vlnové délce, které je pro polymery neškodné.

Antioxidanty – látky, které zpomalují tepelně-oxidační stárnutí polymerů (štěpení makromolekul v důsledku působení vzdušného kyslíku a zvýšené teploty).

Antiozonanty – přísady, které brání praskání pryže ozonem (ozon degraduje povrch pryže a poměrně rychle ji mechanicky poškodí stále rostoucími prasklinami, viz obr. 1.17).



Obr. 1.16 Polyamidový díl se skelnými vlákny s obsahem (a), bez obsahu (b) světelných stabilizátorů



Obr. 1.17 Stárnutí pryže vlivem ozonu

Síťovací činidla (vulkanizační činidla, tvrdidla) – napomáhají ke vzniku příčných vazeb mezi lineárními makromolekulami a vytváření sesíťované struktury (síra, sloučeniny peroxidu, silanu apod.) Síťovací reakci aktivují tzv. *aktivátory síťování* a urychlují *urychlovače síťování* (reakce síťovacího činidla s polymerem probíhá někdy velmi pomalu, což je v technologické praxi ekonomicky neúnosné).

Antistatika – přísady, které snižují vysoký povrchový odpor polymerů, tj. zvyšují jejich elektrickou vodivost a zabraňují jejich elektrostatickému nabíjení. Jedná se o silně hydrofilní látky nebo látky s elektricky vodivou strukturou. Ve svých molekulách obsahují kromě uhlíku a kyslíku často dusík, fosfor a síru.



Elektrostatický náboj se stává zdrojem řady nežádoucích jevů, např. Inutí polymerů ke zpracovatelským strojům, přitahování prachu, elektrostatického výboje, který způsobí ztrátu dat v paměti, nesprávné výstupy apod.

Adhezni prostředky (*kompatibilizátory*) – zesilují adhezni síly (přilnavost) mezi plnivem a polymerem (např. silanové adhezni prostředky).

Retardéry hoření – přísady, které snižující hořlavost polymerů (proces hoření zpomalují nebo mu přímo zamezují), např. organické sloučeniny obsahující fosfor.

Kluzná činidla (*antifrikční přísady*) – přísady, které zlepšují kluzné vlastnosti a snižují součinitel tření (grafit, sulfid molybdeničitý, oxid hlinitý apod.).

Nadouvadla – přísady, které se při zpracovatelských teplotách polymeru rozkládají za vzniku plyných produktů (nejčastěji dusíku nebo oxidu uhličitého), který ve výrobku vytváří uzavřené nebo otevřené póry. Uplatňují se při zpracování polymerů na lehčené hmoty, výrobku dodávají tepelně-izolační vlastnosti.

Barviva a pigmenty – dodávají polymerům požadovaný odstín. Barvivo je buď přímo kapalně, nebo je v polymeru rozpustné, pigment (barevný prášek) je v polymeru nerozpustný. Organické barvivo, které je v polymeru rozpustné (na rozdíl od pigmentu) zachovává jeho průhlednost. **Fluorescenční pigmenty** jsou opticky zjasňující látky, které pohlcují část UV záření a pohlcenou energii vyzařují během osvětlování ve formě fluorescence, tj. záření o větších vlnových délkách. Lidskému oku tak vytváří dojem, že sledovaná barva je na denním světle jasnější. Uplatňují se při barvení do modrých, fialových a růžových odstínů.

Plniva – jedná se o látky *organického* nebo *anorganického* původu (minerální plniva), které se do plastů přidávají v podobě prášku nebo kuliček (*částicové plnivo*), anebo jako *vlákna různých délek*. Vzhledem k účinkům na mechanické vlastnosti mají *vyztužující* nebo *nevztužující* charakter. **Nevztužující plniva** mechanické vlastnosti polymerů nijak výrazně nezvyšují, ale mohou snižovat jeho cenu, smrštění dílu po výrobě, zlepšit tvarovou a rozměrovou stabilitu dílu za zvýšených teplot, odolnost proti poškrábání (např. uhlíčitán vápenatý, moučka břidlice, kaolin, slída ad.), dodávat dílu vizuální efekt dřevěného povrchu bez potřeby údržby a ochranných nátěrů (dřevní moučka), zlepšit odolnost proti oděru (wolastomit, slída), kyselinám a zásadám (síran barnatý) apod. Jiná plniva mohou mít specifické poslání, např. mikroskopické částice kovů zvyšují tepelnou vodivost materiálu apod.

Vyztužující plniva jsou používána především za účelem zvýšení pevnosti, tuhosti a tvarové stálosti polymerů. Mají zpravidla vláknitou strukturu a nejvíce se používají krátká (ca. 3 mm) nebo dlouhá (10 až 16 mm) *skleněná* (GF), *uhlíková* (CF), *aramidová* (RF), *kovová* (MF(x)), *minerální* (MF), *přírodní* (NF) nebo jiná vlákna. Technické aplikace s mimořádnými požadavky na mechanické vlastnosti při nízké hustotě dílu, např. chassi automobilů, hnací hřídele, sportovní potřeby (rámy jízdních kol, trupy lodí) nebo konstrukční části letadel, jsou založeny převážně na uhlíkových kompozitech s reaktoplastickou matricí. Vyvíjeny jsou však také vysoce namáhané díly, jako např. pružnice železničních vagónů a těžkých nákladních automobilů z kompozitu na bázi skleněných vláken. Mezi vyztužující plniva lze zařadit také částicové minerální plnivo na bázi křemičitanu, tzv. *talek* (*mastek*) i *skleněné mikrokuličky*, které mohou být navíc duté. Duté skleněné kuličky (v praxi o průměru 16 μm nebo 30 μm) nacházejí uplatnění jako lehké, ale velmi pevné plnivo. Zajišťují výrazné snížení hmotnosti a hustoty materiálu, přitom odolávají vysokým tlakům při jeho zpracování i aplikaci dílu. Přidáním talku i skleněných mikrokuliček dochází u polymerů ke zvýšení jejich tvrdosti, rázové houževnatosti, pevnosti, rozměrové stability, chemické a tepelné odolnosti. Skleněné kuličky navíc snižují anizotropii smrštění. Zvýšení uvedených vlastností však není tak velké, jako u polymerů plněných např. skleněnými vlákny.

1.6

Teplotní chování polymerů

Polymery se v závislosti na teplotě mohou nacházet ve třech fyzikálních stavech: *sklovitém*, *kaučukovitém* a *plastickém*, tj. v tuhém nebo kapalném stavu, to však neplatí pro sesítované polymery: reaktoplasty a pryže, které jsou netavitelné. Reaktoplasty mohou být pouze ve sklovitém stavu (pohyblivost řetězců nebo jejich vzájemný posun je omezen v důsledku příčných vazeb hustě sesítěné struktury). Pryže, řídce sesítěné polymery, mohou být ve stavu sklovitém a kaučukovitém. Značně vysoká molární hmotnost polymerů způsobuje, že jejich bod varu je neobyčejně vysoký a ve všech případech se nachází nad teplotou jejich rozkladu. Plyný stav polymerů tedy neexistuje.

Podobně jako u jiných materiálů, jsou vlastnosti polymerů závislé tedy na teplotě, přičemž v určité oblasti teplot se tyto změny významně zrychlují a mohou se měnit

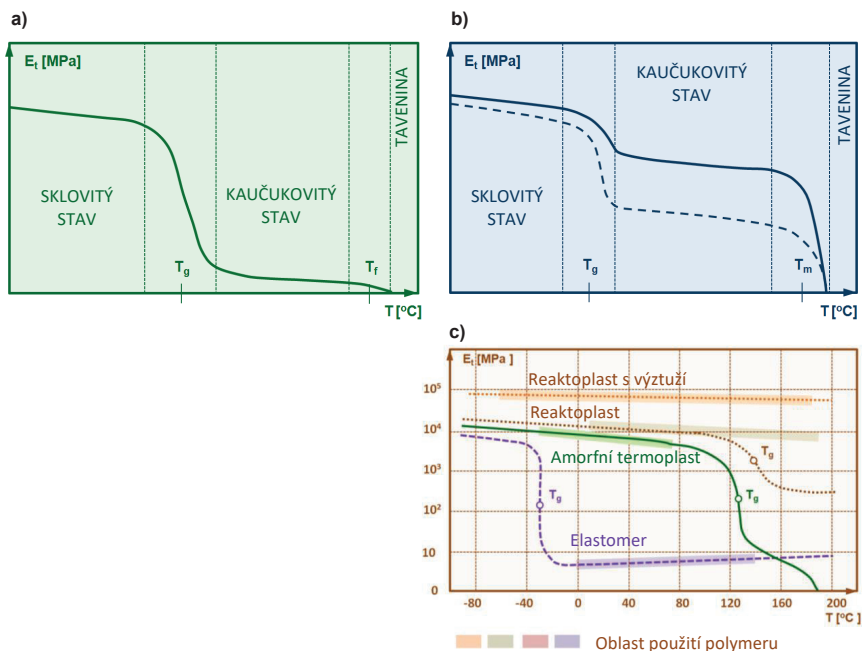
dokonce skokem. Tyto oblasti se nazývají *přechodovými oblastmi* s charakteristickými teplotami. Je to *teplota skelného přechodu* (T_g – g z angl. „glass“ - sklo), *teplota viskózního toku* (T_f – f z angl. „flow“ - tok) u amorfních plastů nebo *teplota tání krystalické fáze* (T_m – m z angl. „melt“ - tát) u semikrystalických plastů.

Sklovitý stav (při teplotách nižších než T_g) je charakteristický tím, že polymer je tvrdý a křehký s vysokým modulem pružnosti, mezi makromolekulami působí silné mezimolekulové síly. Je-li v tomto stavu polymer pod vlivem napětí, deformace jsou malé, dosahují maximálně několika málo procent, jsou okamžité a zcela vratné. Deformace v této oblasti se řídí Hookovým zákonem.

Kaučukovitý stav (mezi teplotami T_g a T_f , resp. T_g a T_m) se vyznačuje kaučukovitým chováním polymeru. Zahřátím nad T_g nastává zeslabování mezimolekulových sil a dochází k vnitřním konformačním změnám ve struktuře makromolekul. Při účinku vnějších sil probíhá vratná, avšak časově zpozděná viskoelastická deformace, která dosahuje až několika set procent.

Plastický stav (nad teplotou T_f , resp. T_m) se vyznačuje tokem materiálu (v plné míře se uplatňuje pohyb celých makromolekul). Materiál se nachází v oblasti taveniny. Deformace v této oblasti jsou velké, nevratné a závislé na čase. S rostoucí teplotou viskózní tok vzrůstá až po určitou hranici, kdy dochází k porušení vazeb, rozkladu a znehodnocení polymeru.

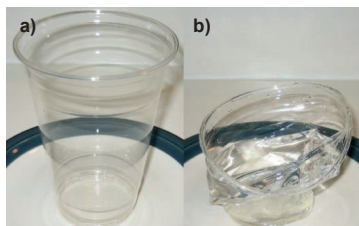
Závislost mechanických vlastností polymeru na teplotě ukazuje termomechanická křivka, viz obr. 1.18. Křivky mají v podstatě rovnoměrně stoupající nebo klesající průběh (v závislosti na měřené veličině) přerušovaný prudkým zlomem v přechodových oblastech. U amorfních polymerů dochází k významným změnám vlastností v oblasti *teploty skelného přechodu* (T_g) a u semikrystalických polymerů v oblasti *teploty tání krystalické fáze* (T_m). Změny vlastností semikrystalických polymerů v oblasti T_g jsou charakteristické pouze pro amorfní složku tohoto polymeru, tzn. čím vyšší je jeho stupeň krystalinity, tím méně výrazné jsou změny v oblasti T_g (viz obr. 1.18b). Vzhledem ke krystalickému podílu ve struktuře materiálu, resp. k velkým mezimolekulovým silám v krystalických oblastech, si semikrystalické polymery udržují dobré užité vlastnosti i v oblasti mezi přechodovými oblastmi T_g a T_m .



Obr. 1.18 Termomechanické křivky polymerů (závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě)

a) amorní termoplast; b) semikrystalický termoplast;
c) amorní polymery (termoplasty, reaktoplasty, elastomery)

Z termomechanických křivek na obr. 1.18a,b je zřejmé, že u amorních termoplastů je teplota skelného přechodu (T_g) považována za teoretickou hranici použitelnosti, pokud nejsou mechanicky zatěžovány. Při jejím překročení dochází k samovolné deformaci vyrobeného dílu a ztrátě jeho funkčnosti (viz obr. 1.19). Ovšem z praktických důvodů volíme horní použitelnou teplotu asi o $(10 \div 20)$ °C nižší. Obdobně je tomu také u semikrystalických termoplastů, kde je za teoretickou hranici použitelnosti považována teplota tání krystalických oblastí (T_m). S ohledem na spolehlivou funkci dílu volíme i v tomto případě horní použitelnou teplotu asi o $(20 \div 40)$ °C nižší. Maximální teplotu je však nutno volit vždy s přihlédnutím ke způsobu namáhání dílu a k době působení teplotního zatížení.



Obr. 1.19 Díl z bioplastu PLA
(amorfní forma)

stav pod (a) a nad (b) teplotou skelného přechodu (T_g)

Teploty skelného přechodu (T_g) a teploty tání krystalických oblastí (T_m) některých polymerů jsou uvedeny v tab. 1.3.

Tab. 1.3 Přechodové teploty některých polymerů

Polymer	Struktura	Název	Označení	T_g [°C]	T_m [°C]
Termoplast	Semikrystalická	Polyethylen	PE	-120	105 ÷ 135
		Polypropylen	PP	-15	160 ÷ 175
		Polyoxymethylen	POM	-50	165 ÷ 185
		Polyamid 6	PA 6	45 ÷ 80	225 ÷ 230
		Polyamid 6.6	PA 6.6	65 ÷ 90	225 ÷ 265
		Polybutylentereftalát	PBT	40 ÷ 60	220 ÷ 230
	Amorfní	Polystyren	PS	85	-
		Polyvinylchlorid	PVC-U	85	-
		Polymethylmethakrylát	PMMA	110	-
		Polykarbonát	PC	140	-
		Polyetherimid	PEI	215 ÷ 230	-
Kaučuk	Amorfní	Silikonový kaučuk	Q	-85	-
		Přírodní kaučuk	NR	-70	-
		Chloroprenový kaučuk	CR	-40	-
Reakto- plast	Amorfní	Polyesterová pryskyřice	UP	> 60	-
		Epoxidová pryskyřice	EP	> 75	-
		Fenol-formaldehydová p.	PF	> 150	-

Tab. 1.4 Semikrystalické termoplasty

Značení	Název
PA 6	Polyamid 6
PA 6.6	Polyamid 6.6
PBT	Polybutylentereftalát
PE	Polyethylen
PE-HD	Vysokohustotní polyethylen
PE-LD	Nízkohustotní polyethylen
PE-LLD	Lineární nízkohustotní polyethylen
PE-MD	Středněhustotní polyethylen
PE-UHMW	Polyethylen s maximální molekulovou hmotností (vysokomolekulární PE)
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PEK	Polyetherketon
PET	Polyethylentereftalát
PI	Polyimid
POM	Polyoxymethylen Polyacetal Polyformaldehyd
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen

Tab. 1.5 Amorfní termoplasty

Značení	Název
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
PC	Polykarbonát
PMMA	Polymethylmethakrylát
PS	Polystyren
PS-E	Expandovatelný polystyren
PS-GP	Standardní polystyren
PS-HI	Houževnatý polystyren
PVC-P	Měkčený polyvinylchlorid
PVC-U	Neměkčený polyvinylchlorid
SAN	Styren-akrylonitril

Tab. 1.6 Reaktoplasty

Značení	Název
EP	Epoxidová pryskyřice
MF	Melamin-formaldehydová pryskyřice
PF	Fenol-formaldehydová pryskyřice
PUR	Polyurethan
UF	Močovinoformaldehydová pryskyřice
UP	Nenasycený polyester

Tab. 1.7 Kaučuky

Značení	Název
ACM	Akrylátový kaučuk
CFM	Fluorokaučuk
CR	Chloroprenový kaučuk
EPDM	Ethylen-propylen-dién-terpolymer
EPM	Ethylen-propylenový kaučuk
IIR	Isobuten-isoprenový kaučuk (Butylkaučuk)
IR	Isoprenový kaučuk
NBR	Nitrilový kaučuk
NR	Přírodní kaučuk
SBR	Butadienstyrenový kaučuk
Q	Silikonový kaučuk

Tab. 1.8 Termoplastické elastomery

Značení	Název
TPE	Termoplastický elastomer (obecné značení)
TPE-A (TPA)	Termoplastické elastomery na bázi polyamidů
TPE-E	Termoplastické elastomery na bázi kopolyesterů
TPE-S (TPS)	Termoplastické elastomery na bázi blokových kopolymerů styrenu
TPE-O (TPO)	Termoplastické elastomery na bázi polyolefinů
TPE-U (TPU)	Termoplastické elastomery na bázi polyurethanů
TPE-V (TPV)	Vulkanizovaný termoplastický elastomer na bázi polyolefinů

2

PŘÍPRAVNÉ OPERACE

Před vlastním zpracováním polymerů je velmi často nutno provést přípravné operace. Tyto operace slouží k úpravě vlastností vstupní suroviny, zvýšení kvality i zefektivnění zpracovatelského procesu či zlevnění ceny dílu. Mezi nejčastější přípravné operace patří *míchání, granulace, recyklace, sušení, dávkování a doprava materiálu*.

2.1

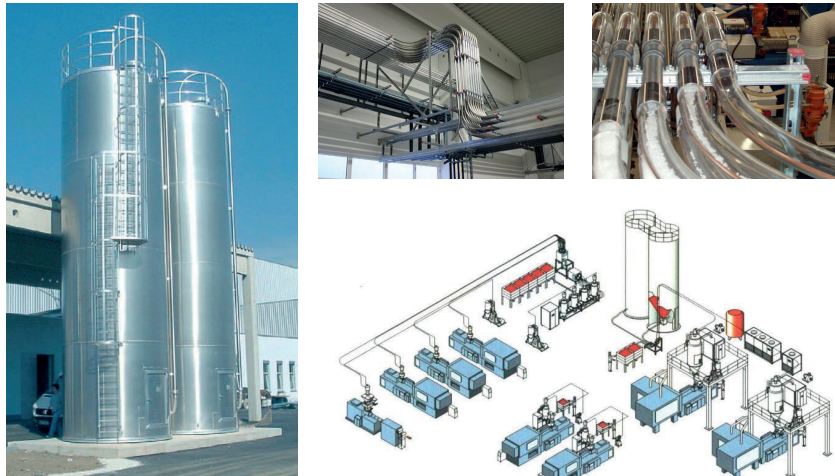
Doprava materiálu

Transport polymerního materiálu v podobě granulí a prášků je realizován v závislosti na zakoupeném množství a logistické ekonomii v podobě malých pytlů o hmotnosti (20 + 25) kg, velkých pytlů, oktabin o hmotnosti až 500 kg, případně pomocí železničních nebo automobilových cisteren, viz obr. 2.1. Zjednodušeně lze říci, že přeprava materiálu cisternami je vhodnější pro velké výrobní série, kde materiál není v průběhu výroby často měněn. Naopak zakoupení materiálu v podobě pytlů je vhodnější pro menší výrobní série s častou změnou výrobního sortimentu.



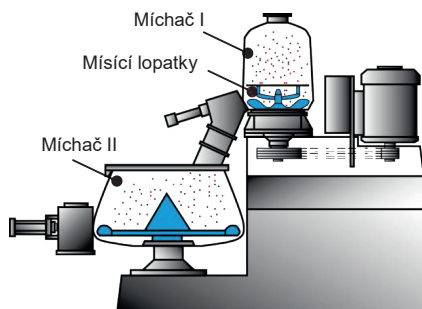
Obr. 2.1 Možnosti dopravy polymerních materiálů

Materiál je následně ve zpracovatelském závodě skladován a dopravován k výrobnímu zařízení. Pytle a oktaby jsou umísťovány do meziskladu či přímo na pracoviště. Polymerní materiál dopravovaný cisternami je skladován v silech (objem kolem 20 tun), která jsou vybavena zařízením pro kontrolu množství materiálu, automatickým čištěním, odlučovači a zásobníky prachových částic. K dopravě materiálu ze sila k výrobnímu zařízení je využíváno centrálního dopravního systému, viz obr. 2.2. Hlavní části dopravního systému jsou potrubí, generátory podtlaku či přetlaku, bezpečnostní filtry, odlučovače prachu a řídicí jednotky. Centrální dopravní systémy lze rozdělit dle způsobu vyvození hnací síly na **vakuové** a **tlakové systémy**. Vakuové systémy je vhodné používat pro dopravu materiálu na kratší vzdálenosti, do 100 metrů. Přetlakové systémy se používají na dopravu do delších vzdáleností, až 200 metrů. Vzhledem k vyšším tlakům je nutné počítat s vyšším opotřebením vodících elementů. Jako vodící elementy jsou nejčastěji používány potrubí ze slitin hliníku či korozivzdorné oceli. Má-li být docíleno vyšší životnosti potrubí, je vhodné použít tvrzené sklo, které může být aplikováno pouze do nejvíce namáhaných částí soustavy.



Obr. 2.2 Centrální doprava materiálu ze sila

Do základního materiálu jsou velmi často přidávána aditiva (v podobě granulátu, prášků nebo kapalin), jejichž cílem je např. zlepšení užitečných vlastností materiálu, jeho probarvení či pouze zlevnění ceny výrobku (viz kap. 1.5). Pro dosažení vysoké výrobní kvality dílu je velmi důležitá jejich disperze, která je do značné míry vymezena homogenitou vstupní suroviny. K tomuto účelu jsou v předvýrobní fázi používány *mísicí a hnětací zařízení*. **Mísicí stroje** je možné rozdělit dle osy rotace na horizontální a vertikální. Mezi nejpoužívanější zařízení patří diskontinuální bubnové, sudové, pásové, dvouramenné, planetové a fluidní „míchačky“, viz obr. 2.3 a obr. 2.4. Zejména fluidní mísicí stroje se jeví jako vysoce efektivní způsob promísení materiálu. V otázce homogenity materiálu je vhodné upozornit na skutečnost, že konečný stupeň jeho homogenity nemusí být dosažen již ve fázi míchání, ale může ho být dosaženo až v následném zpracovatelském procesu (vstřikování, vytlačování atd.).



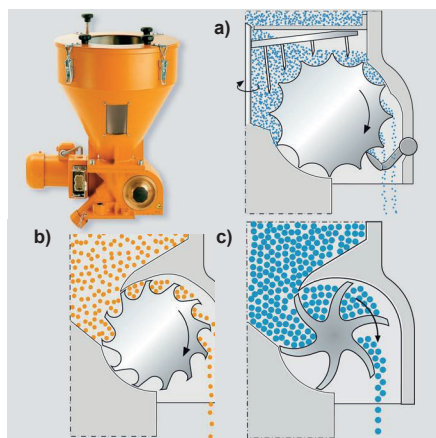
Obr. 2.3 Fluidní mísicí zařízení



Obr. 2.4 Planetové uspořádání šneku hnětiče

Další výrobním zařízením, pomocí něhož lze mísit plasty s přísadami jsou **hnětací stroje**. Při procesu hnětení, na rozdíl od běžného mísení, dochází k intenzivnímu smykovému namáhání materiálu a jeho převedení do plastického stavu. Hnětací stroje se dělí na kontinuální a diskontinuální. Příkladem diskontinuálního procesu jsou hnětací dvouválce. Jedná se o poměrně levné výrobní zařízení používané především pro hnětení kaučukových směsí. Vyznačuje se nízkým výkonem. Mnohem vyšších výkonů je dosaženo na šnekových vytlačovacích strojích. Šnekové

vytlačovací stroje, určené pro hnětení, obsahují oproti konvenčním strojům jisté modifikace, jako například hnětací vložky, speciální geometrii šneků, planetové upořádání šneků atd. Cílem těchto modifikací je docílení intenzivnějšího smykového namáhání a tedy vyššího hnětacího účinku, který je u běžných strojů nízký.



Obr. 2.5 Volumetrické dávkovací zařízení pro práškové materiály (a), masterbatch (b) a recyklát (c)



Obr. 2.6 Gravimetrické dávkovací zařízení

Vzrůstající spotřeba plastů a snaha o co nejvyšší zefektivnění procesu jejich zpracování jsou důvodem, proč se značná část výrobních společností nezabývá elementárním procesem míchání, nýbrž si dané materiály obohacené o požadované přísady nakupuje, a to v konečné podobě či v podobě tzv. „**masterbatchů**“. Pojem „masterbatch“ označuje polymerní materiál, který v sobě obsahuje přesně definovanou koncentraci aditiv (minerálního plniva, barviva ad.). Ten je následně přidáván v požadovaném množství do základního (čistého) materiálu. K tomuto účelu jsou využívány dávkovací zařízení umístěná přímo na vstřikovacím stroji, nad prostorem násypky. **Dávkovací zařízení** je možné rozdělit na volumetrické a gravimetrické, viz obr. 2.5 a obr. 2.6. Volumetrická dávkovací zařízení obsahují nejčastěji šnek či dávkovací kotouč, který dle rychlosti otáčení přivede do násypky zpracovatelského stroje patřičné množství materiálu. Výhodou tohoto zařízení je jeho jednoduchost a nízká cena. Naopak nevýhodou je vysoká citlivost na tvarové změny

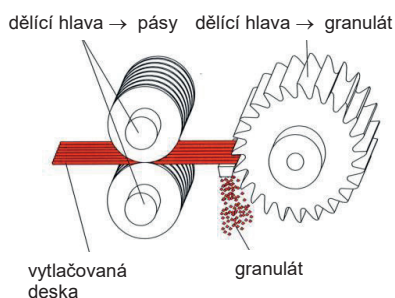
dávkovaného materiálu a nižší dosahovaná přesnost (přesnost $\pm 0,15$ %). Tyto nevýhody, za cenu vyšších investičních nákladů, jsou odstraněny gravimetrickým způsobem dávkování, kde je pomocí mikroprocesoru odvažováno přesné množství požadované dávky materiálu. Pro lepší promíchání materiálu obsahují gravimetrické jednotky v jejich výstupní části velmi často jednoduché mísící elementy (např. šnek). Pomocí dávkovacích zařízení mohou být přidávány i jiné složky materiálu, než „masterbatch“, jedná se například o recykláty, barviva a další látky v podobě prášků a kapalin.

2.3

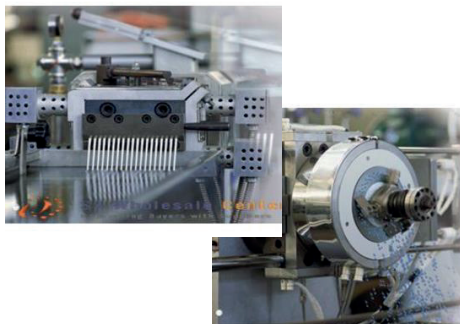
Granulace a recyklace

Granulace je technologická operace, která dodá zpracovávanému materiálu tvar v podobě krychliček, kuliček a válečků (nejrozšířenější podoba vstupní suroviny). Jejich velikost závisí na způsobu výroby a technologickém nastavení procesu. Pro mnoho materiálů se jedná o konečný stupeň přípravy, který plynule navazuje na předchozí operace míchání, hnětení a mletí použitého materiálu (recyklaci). Výhodou této formy suroviny, oproti recyklované drti či práškovým materiálům, je jejich snadná přeprava, dobrá sypaná hmotnost, dobrá mísitelnost a snadné dávkování do zpracovatelských zařízení. V průmyslové praxi je možné nalézt dva způsoby výroby granulátů, a to **granulaci z pásů** a **granulaci ze strun**, viz obr. 2.7 a obr. 2.8. Konkrétní volba metody závisí na vlastnostech zpracovávaného materiálu, dispozičních možnostech firmy, požadovaných výkonech a ekonomických aspektech. Granulace z pásů je způsob výroby granulátu, kde je nejprve vytlačovaný polotovar ve tvaru desky rozřezán na pásy, které jsou dále rozsekány na granule (tvar krychliček). Technologie není vhodná pro tvrdé materiály, jako například PVC-U, PS a vyznačuje se malou produktivitou. Mnohem produktivnějším způsobem výroby granulátu je granulace ze strun. Tento způsob lze dále rozdělit na granulaci za studena a granulaci za tepla. Rozdíly mezi oběma způsoby jsou v teplotním stavu strun v okamžiku jejich dělení. U granulace za studena jsou struny nejprve zchlazeny průchodem přes vodní lázeň a teprve poté sekány (tvar válečků). Nevýhodou této jinak produktivní metody (aplikovatelné pro většinu termoplastů) je nebezpečí slepování strun (platí zejména při velkém počtu strun), jejich lámání a skutečnost, že vodní lázeň může u některých materiálů způsobit sorpci vody. U granulace ze strun za tepla dochází k oddělování strun bezprostředně na vytlačovací hlavě (tvar

kuliček). Následuje proces chlazení proudem vzduchu, vodní mlhou či účinkem vody. Metoda je vhodná pro většinu polymerních materiálů, pouze materiály s velice nízkou viskozitou (vysokou tekutostí) nejsou pro tuto metodu vhodné.



Obr 2.7 Granulace z pásů



Obr 2.8 Granulace ze strun

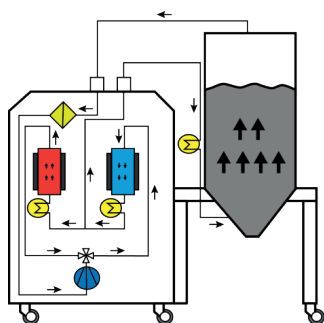
Velmi důležitou a často diskutovanou problematikou výrobních závodů je odpadová politika (problematika recyklace). Nejprve je nutné si uvědomit, že v každé výrobní společnosti vznikne určitý objem výrobků, které neodpovídají požadavkům kvality zákazníka. Tento podíl výrobků je nazýván technologický odpad. Možností jak nakládat s tímto odpadem je několik. První z nich je přímé zpracování odpadu. Materiál je pomocí nožových, talířových, nosových a jiných typů mlýnů rozemlet na tzv. drť. V této podobě je v určitém poměru přimícháván k originálnímu materiálu či ještě před tím modifikován stabilizujícími přísadami na granulačních linkách. Poměr směsi recyklátu a čistého materiálu závisí na mnoha faktorech, kterými jsou například předchozí smykové a tepelné namáhání materiálu, typ materiálu včetně přísad i způsobu jeho přípravy. Další možností je odprodání technologického odpadu do společností zabývajících se problematikou recyklace. Tyto společnosti zpracovávají a modifikují odpadní suroviny, kterými mohou být kromě technologického odpadu i nezpolymerizované bloky z petrochemických společností a další použité výrobky tak, aby výsledné vlastnosti recyklovaného materiálu odpovídaly požadavkům zákazníka na jeho kvalitu. Regranulovaný materiál se tak opět vrací do oběhu. Kromě této materiálové recyklace existují i další způsoby recyklace: energetická recyklace ve spalovnách, chemická recyklace (depolymerizace, vyčištění a následná polymerizace materiálu) a surovinová recyklace.

V řadě případů je mezi dopravou materiálu ze sila či skladu do zpracovatelských zařízení zařazen **proces sušení**, neboť většina polymerních materiálů absorbuje vlhkost z okolní atmosféry nebo navlhá povrchově. Vlhkost má za následek změnu tokových vlastností taveniny plastu (zvyšuje její tekutost), čímž negativně ovlivňuje reprodukovatelnost výrobní tolerance výrobků. Dále má za následek pokles pevnosti a tuhosti materiálu, povrchové (vlhkostní šmouhy) i skryté vady (bubliny) výrobku ad. Podle schopnosti materiálu absorbovat vlhkost lze polymery rozdělit na nenavlhavé, málo, středně a vysoce navlhavé. Příklad rozdělení vybraných polymerů dle míry navlhnutí při standardních podmínkách je uveden v tab. 2.1. Navlhavost polymerů závisí na jejich chemickém složení, přísadách, způsobu výroby, přepravy materiálu a na okolním prostředí. Z hlediska chemické struktury lze obecně říci, že vyšší absorpční schopnost mají materiály, které v makromolekule obsahují hydrofilní skupiny ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}$, $-\text{O}-$) podmiňující sorpci vody. Použití anorganických plniv (např. mletého křemenu nebo skleněných vláken) navlhavost materiálu mírně snižuje. Naopak přidáním organických plniv na bázi celulózy (např. bavlny, dřevěné moučky, kokosových, kenafových a jiných přírodních vláken) se navlhavost plastu zvyšuje. Tato skutečnost je důvodem, proč i nepolární (nenavlhavé) plasty ve skutečnosti navlhají.

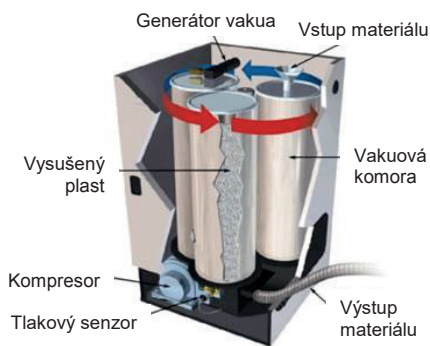
Vlhkost může být v polymeru vázána kapilárně (charakteristické pro navlhavé materiály nebo materiály s organickými přísadami) nebo se může vyskytovat pouze na jeho povrchu (charakteristické pro nenavlhavé materiály). Důvodem povrchové vlhkosti může být například přeprava materiálu (prudká změna teploty, která způsobí kondenzaci vody na povrchu materiálu), netěsnost obalů atd. Všechny tyto aspekty, společně s vysokými nároky na kvalitu dílů, které jsou vyžadovány zejména u pohledových výrobků, jsou důvodem, proč i nenavlhavé materiály je doporučeno sušit. Na proces sušení mají zásadní vliv především teplota sušení, doba sušení, relativní vlhkost vzduchu, velikost granulátu a způsob sušení. Rychlejší čas sušení bude dosažen při použití vysoké teploty sušení, vakua, nízké relativní vlhkosti vzduchu a malé velikosti granulátu. V souvislosti s aplikací vysoké teploty je však nutno upozornit na nebezpečí degradace materiálu, proto je nutné podmínky sušení volit velmi obezřetně.

Tab. 2.1 Příklady navlhavosti polymerů a doporučené podmínky sušení

Plast	Navlhavost	Podmínky sušení	Plast	Navlhavost	Podmínky sušení
PE-LD	0 %	Při nevhodném skladování: (50 ÷ 70) °C (0,5 ÷ 1) hodina	PA 6	(3,0 ÷ 3,5) %	(80 ÷ 90) °C (6 ÷ 12) hodin
PE-HD	0 %		PA 6.6	(2,5 ÷ 3,0) %	(70 ÷ 80) °C (4 ÷ 30) hodin
PP	0 %	Zcela výjimečně 80 °C (0,5 ÷ 1) hodina	POM	0,25 %	(80 ÷ 110) °C (1 ÷ 3) hodiny
PS	0 %	Zcela výjimečně (60 ÷ 80) °C (1 ÷ 3) hodiny	PET	0,3 %	(120 ÷ 140) °C (5 ÷ 27) hodin
PVC	< 0,3 %	(60 ÷ 70) °C 2 hodiny	PBT	0,25 %	(90 ÷ 120) °C (2 ÷ 5) hodin
PMMA	(0,8 ÷ 1,2) %	(70 ÷ 80) °C (12 ÷ 24) hodin	PC	0,2 %	(110 ÷ 120) °C (4 ÷ 12) hodin



Obr. 2.9 Princip sušení suchým vzduchem



Obr. 2.10 Princip vakuového sušení

Mezi nejpoužívanější způsoby sušení v průmyslové praxi patří sušení suchým, tlakovým nebo horkým vzduchem a jejich vzájemná kombinace. Kromě výše uvedených, běžných způsobů sušení, existují i relativně nové progresivní metody sušení, kterými jsou například sušení ve vakuu, sušení voštinovými kotouči, membránové a mikrovlnné sušení. Příklady sušících zařízení jsou uvedeny na obr. 2.9 a obr. 2.10.



Vakuové sušárny (oproti horkovzdušným sušárnám) snižují bod varu vody na 56 °C. Docílít tak lze zkrácení doby sušení až o 80 %. Díky nižším teplotám sušení se navíc snižuje nebezpečí degradace polymerů.

Technologie vstřikování je nejpoužívanější technologií pro zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, kompozitů, ale i reaktoplastů, kaučuků a pryží. Technologie vstřikování svou podstatou vychází z technologie tlakového lití, ale za výrazně jiných teplot a tokových vlastností tavenin plastů.

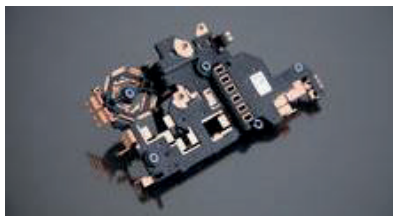
Vstřikováním se vyrábějí výrobky, které mají buď charakter konečného výrobku (krabičky, květináče, nárazníky, hračky apod.), anebo jsou to polotovary nebo díly pro další zkompletování samostatného výrobního celku (ozubená kola, světla, součásti přístrojů, klapky atd., viz obr. 3.1). Vstřikované díly jsou velmi rozmanité jak z hlediska tvaru, velikosti, tak i hmotnosti (mohou mít hmotnost menší jak 0,1 g, ale i několika kilogramů).



Obr. 3.1a Příklady vstřikovaných dílů pro automobilový průmysl

Výhodami technologie vstřikování jsou výrobky s vysokou rozměrovou i tvarovou přesností, sériová opakovatelnost procesu, na jeden cyklus lze získat konečný díl, výborná kvalita povrchu, velmi krátké výrobní cykly apod. **Nevýhodami** technologie

vstřikování jsou velké pořizovací náklady na nákup strojů a forem, velikost strojního vybavení ve vztahu k velikosti dílu atd. Technologie vstřikování je vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu.



Obr. 3.1b Příklady vstřikovaných dílů pro elektrotechnický průmysl



Obr. 3.1c Příklady vstřikovaných dílů pro lékařský průmysl



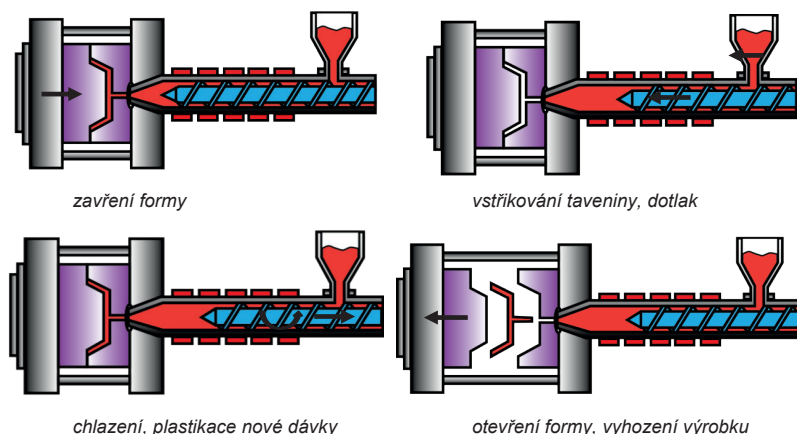
Obr. 3.1d: Příklady vstřikovaných dílů pro obalový průmysl



Obr. 3.1e Příklady vstřikovaných dílů pro spotřební průmysl

Technologie vstřikování je způsob zpracování plastů a kompozitů, při kterém je potřebná dávka zpracovávaného materiálu ve formě taveniny vstříknuta pomocí šneku nebo pístu velkou rychlostí z plastikační (tavící) komory vstřikovacího stroje do uzavřené dutiny vstřikovací formy, kde v důsledku rozdílných teplot, odvodu tepla (chlazení) ztuhne v konečný výrobek.

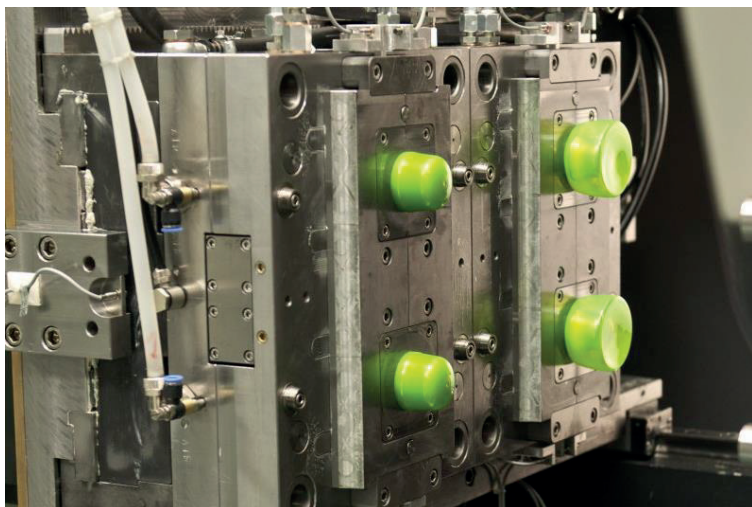
Princip technologie vstřikování je následující (viz obr. 3.2): čistý nebo recyklovaný plast (nejčastěji v podobě granulí) je nasypán do násypky, z níž je odebrán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která plast dopravuje do tavící komory, kde za současného účinku tření a topení vzniká tavenina. Tavenina plastu je následně vstřikována do dutiny formy (viz příklad na obr. 3.3), kterou téměř zcela zaplní a získá její tvar a objem. Následuje dotlak pro do vyplnění dutiny formy taveninou plastu, snížení smrštění a rozměrových změn výstřiku. Během vstřikování a dotlaku předává plast formě teplo a postupným ochlazováním ztuhne ve finální výrobek. Potom se forma otevře a výrobek je vyhozen a celý výrobní proces se cyklicky opakuje.



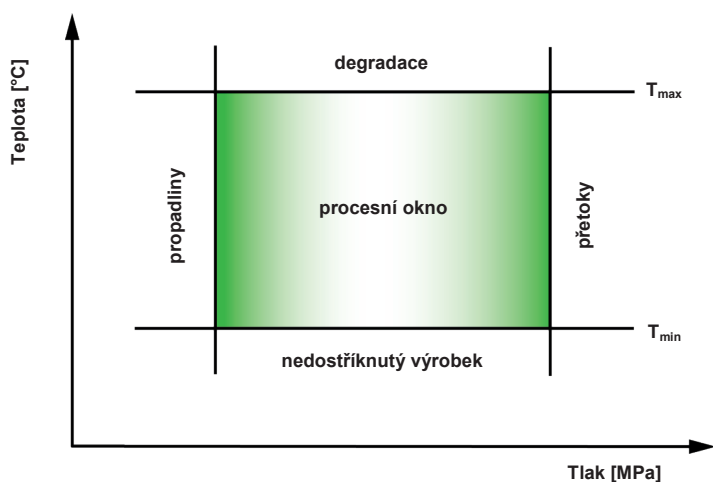
Obr. 3.2 Vstřikovací cyklus

Technologie vstřikování plastů je založena na cyklickém opakování jednotlivých částí výrobního cyklu. Během vstřikování plast prochází teplotním (neizotermický proces) a tlakovým cyklem. Parametry: teplota a tlak potom stanovují tzv. „procesní“

technologické okno (viz obr. 3.4). Pokud budou vstřikované díly vyrobeny při technologických parametrech, které jsou uvnitř tohoto okna, tak lze zjednodušeně říci, že dostaneme dobré výrobky. Při překročení těchto hraničních parametrů dojde ke vzniku vad a defektů.



Obr. 3.3 Příklad dutiny vstřikovací formy



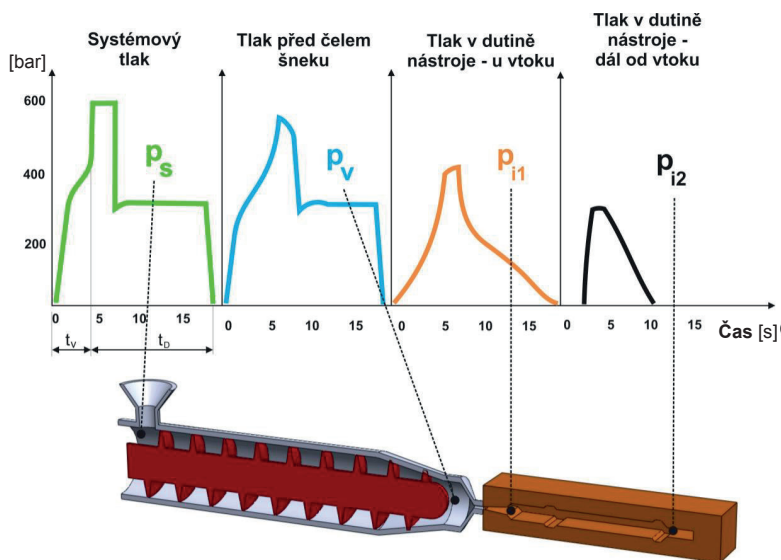
Obr. 3.4 Procesní okno u technologie vstřikování

Z hlediska technologie vstřikování lze popsat rozdílné teploty a tlaky. Na konečnou kvalitu dílu má výrazný vliv *teplota taveniny* plastu (T_{tav}) - teplota plastu před čelem šneku před vstřikováním, *teplota formy* (T_F), a *teplota temperačního (chladícího) média* (T_{tm}). Kromě těchto teplot rozeznáváme např. i teplotu dílu při vyhození (viz obr. 3.5), střední teplotu ve výstřiku, apod. Z hlediska tlaků má na kvalitu dílu vliv *systémový - hydraulický tlak* (p_s), který je možné naměřit v hydraulickém systému



Obr. 3.5 Termovizní snímek výrobků v dělicí rovině

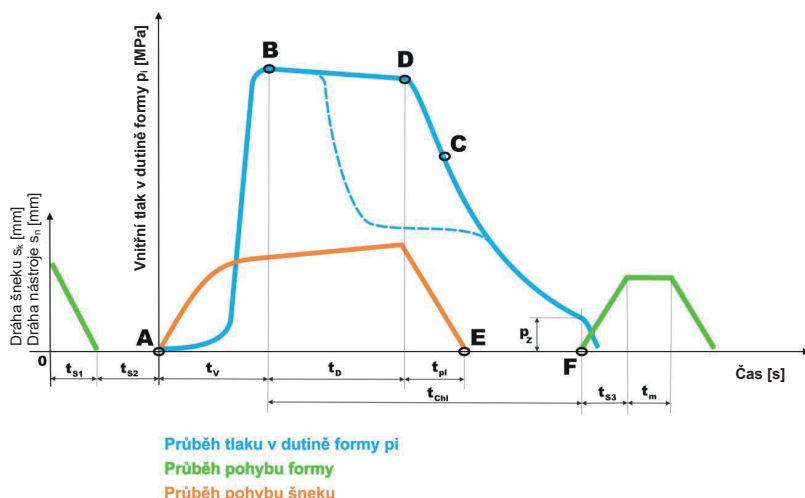
vstřikovacího stroje (viz obr. 3.6). Dále *vnitřní vstřikovací tlak*, což je tlak v dutině vstřikovací formy během procesu vstřikování (standardně se označuje jako p_i) a také *vnější vstřikovací tlak*, označovaný p_v , což je tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku před čelem šneku (viz obr. 3.6).



Obr. 3.6 Průběh tlaků u technologie vstřikování

t_v – doba vstřikování; t_D – doba dotlaku; p_s – systémový (hydraulický) tlak; p_v tlak před čelem šneku; p_i – vnitřní vstřikovací tlak v dutině formy

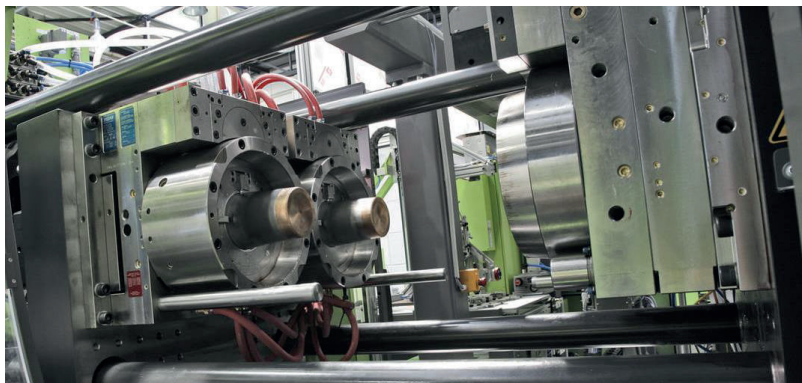
Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně specifikovaných fází, které se svou činností podílí na výrobě vstřikovaných dílů. Jednotlivé úseky vstřikovacího cyklu trvají různě dlouho a jsou ovlivněny materiálem (plastem), konstrukcí (geometrií) výstřiku, zvolenou technologií (technologickými podmínkami vstřikování), konstrukcí vstřikovací formy a typem stroje. Vstřikovací cyklus můžeme popsat s využitím časového průběhu tlaku v dutině formy, viz obr. 3.7.



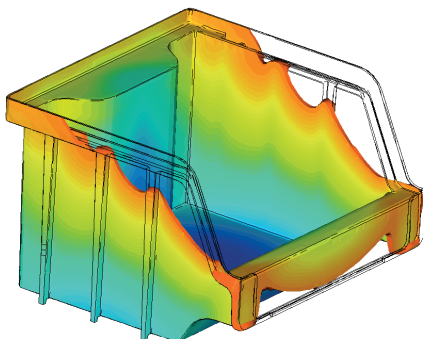
Obr. 3.7 Průběh vnitřního tlaku (p_i) v dutině formy během procesu vstřikování

Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená (viz obr. 3.8). V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu. V časovém úseku t_{s1} se pohyblivá část formy přisune k pevné a forma se zavře. Pokud se přisouvá vstřikovací jednotka vstřikovacího stroje k formě, tak tato činnost je znázorněna časovým úsekem t_{s2} . Časové úseky t_{s1} a t_{s2} jsou *strojní časy*. V bodě A se dává do pohybu šnek v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování roztavené hmoty (plnění) do dutiny vstřikovací formy (viz obr. 3.9). Tato doba, během níž probíhá plnění dutiny formy, se nazývá *doba plnění* nebo *doba vstřikování* a značí se t_v . Čas vstřikování, by měl být co nejkratší, protože nesmí dojít k zatuhnutí čela taveniny plastu. Během fáze plnění dosáhne tlak maximální hodnoty. Tento děj je ukončen v bodě B. Objem taveniny plastu je kolem $(95 \div 97)$ % objemu dutiny

vstřikovací formy. A samozřejmě platí, že jakmile tavenina vteče do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a začne chladnout, ztrácet tekutost. V této fázi šnek vykonává pouze axiální pohyb, neotáčí se a plní funkci pístu.



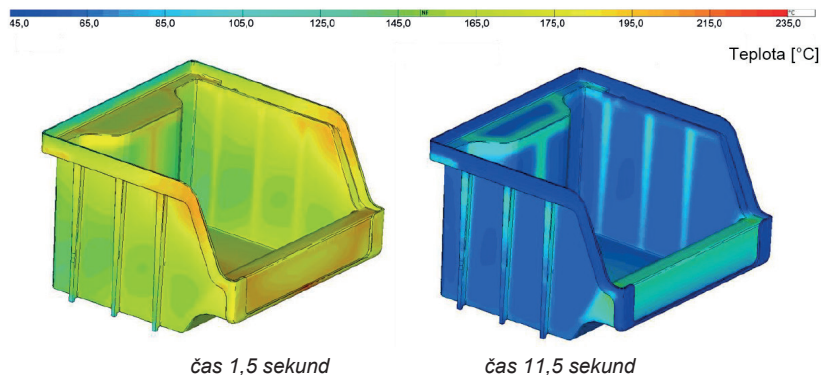
Obr. 3.8 Pohled do otevřené vstřikovací formy



Obr. 3.9 Proces plnění dutiny vstřikovací formy

Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí (vyhození) výstřiku ze vstřikovací formy. Tato nejdelší doba vstřikovacího cyklu se nazývá *doba chlazení* a je označena t_{chl} . Během fáze chlazení tlak ve vstřikovací formě klesá až na hodnotu *zbytkového tlaku* (p_z), což je tlak, pod nímž se výstřik nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Při vyhození výstřiku z dutiny vstřikovací formy musí být teplota plastového dílu tak vysoká, aby nedošlo k deformaci výrobku, a proces chlazení

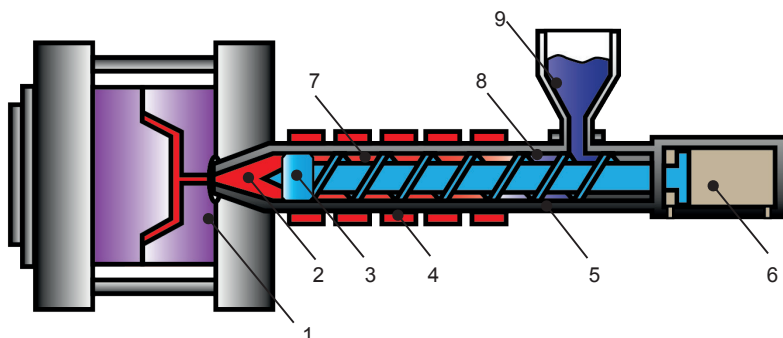
pokračuje již bez tlaku až do vyrovnání teploty výstřiku s teplotou okolí. Doba chlazení závisí hlavně na maximální tloušťce stěny výstřiku (geometrický faktor), na druhu plastu, teplotě taveniny (T_{lav}), teplotě formy (T_F) a na teplotě výstřiku v okamžiku vyjímání z formy a ovlivňuje krystalizaci, lesk, vnitřní zbytkové napětí, smrštění a deformace výstřiku.



Obr. 3.10 Teplota plastového dílu v rozdílném čase chlazení

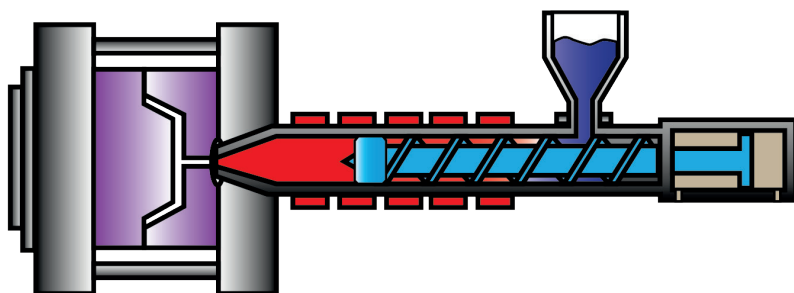
Během chladnutí (viz obr. 3.10) se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem. Aby se na výstřiku netvořily propadliny nebo staženiny, je nutné kompenzovat zmenšování objemu dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy. Tento úsek cyklu se nazývá *doba dotlaku* a značí se t_D . Dotlak může být po celou dobu stejně vysoký jako maximální tlak nebo se, v praxi mnohem častěji, může po několika sekundách snížit a další chladnutí probíhá při sníženém tlaku. Pokud by tlak zůstal na původní hodnotě vstřikovacího tlaku, došlo by ke vzniku tlakové špičky, která by mohla vést ke krátkému otevření vstřikovací formy v dělicí rovině, tzv. *dýchnutí*. Proto je nutné po doplnění objemu a stlačení taveniny plastu v dutině vstřikovací formy snížit vstřikovací tlak, tzn. přepnout na *dotlak* (přerušovaná modrá čára na obr. 3.7). K přepnutí na dotlak může dojít buď podle dráhy šneku, nebo podle času, tlaku ve formě, resp. podle tlaku v hydraulice. Doba dotlaku končí v bodě *D*. Bod *C* označuje okamžik zatuhnutí roztavené hmoty ve studeném vtokovém kanálu. Abychom mohli dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu. Zbýlý objem taveniny před čelem šneku po dotlaku je nazýván *materiálový polštář* (viz obr. 3.11). Tento

objem nesmí být příliš velký (obvykle kolem 5 až 15 % objemu výrobku), aby nedocházelo k tepelné degradaci taveniny.



Obr. 3.11 Schéma polštáře taveniny plastu před čelem šneku

1 – vstřikovací forma; 2 – materiálový polštář; 3 – zpětný uzávěr; 4 – topné zóny; 5 – tlaková komora; 6 – systémový tlak; 7 – roztavený materiál; 8 – neroztavený materiál; 9 – granulát

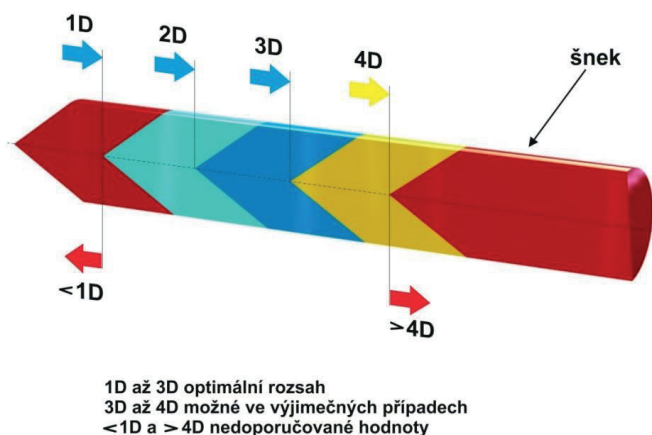


Obr. 3.12 Schéma nadávkované taveniny plastu před čelem šneku po skončené fázi plastikace

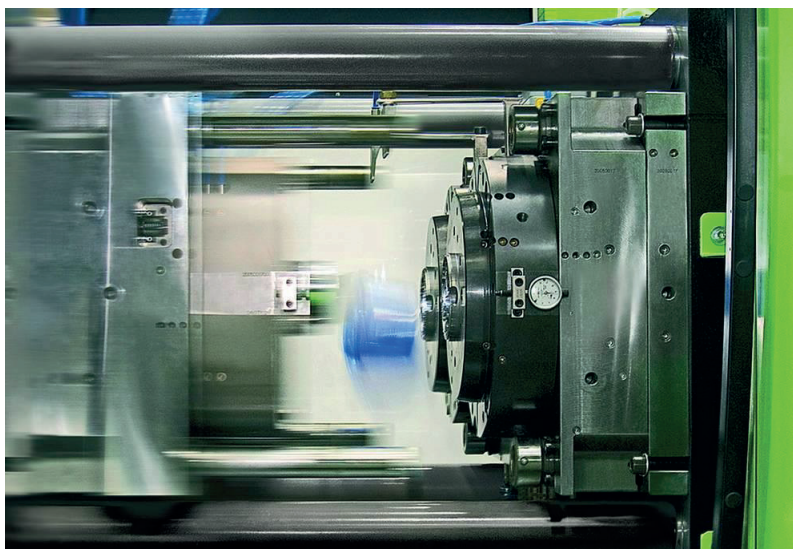
Po dotlaku začíná *plastikace* nové dávky plastu pro další výrobní cyklus (viz obr. 3.12), čas plastikace (t_{pl}) končící v bodě E. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulát, který plastikuje a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Šnek ustupuje současně dozadu, přičemž musí překonávat tzv. *protitlak* neboli *zpětný* tlak. Výška protitlaku ovlivňuje dobu plastikace a tím i kvalitu prohnětení taveniny plastu. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu. Ohřev plastu během plastikace se děje jednak vlivem působícího tepla od elektrických topných těles umístěných na obvodu plastikační komory, jednak frikčním teplem, které vzniká

třením plastu o stěny komory, o povrch šneku a mezi granulemi plastu a dále přeměnou hnětací práce v teplo. Objem zplastikované dávky taveniny plastu je dán velikostí dutin(y) vstřikovací formy, vtokovou soustavou a smrštěním materiálu. Tento objem (zdvih dávkování) by ve vztahu k použitému vstřikovacímu stroji neměl překročit 4násobek průměru šneku (viz obr. 3.13). Doba plastikace nemá zpravidla na celkovou délku výrobního cyklu žádný vliv, protože fáze plastikace probíhá během fáze chlazení.

V další fázi může nebo nemusí následovat odsunutí tavicí komory od vstřikovací formy (strojní čas). V bodě *F* se vstřikovací forma otevře a výstřik se vyhodí z formy (viz obr. 3.14). Na tuto operaci je potřeba *strojní doba* (t_{s3}). Je-li výstřik vyjímán z formy manipulátorem, je k tomu navíc vymezena *manipulační doba* (t_m). Ta je určena i k případné další činnosti, např. ke vkládání kovových zálsků do formy, k dávkování separačních prostředků, apod. Strojní časy závisí na rychlosti práce a pohybů vstřikovacího stroje ve vztahu k dráze, kterou musí vstřikovací forma nebo vstřikovací jednotka urazit. V dnešní době je snaha zkrátit strojní časy na minimum. U moderních strojů se toho výrobci snaží dosáhnout zvýšením rychlostí a pohybů vstřikovacího stroje, paralelními pohyby.



Obr. 3.13 Rozsah objemu dávky u vstřikovacích strojů



Obr. 3.14 Vyhození výrobku z formy

3.2

Technologické parametry procesu vstřikování

Technologických parametrů vstřikování je poměrně velké množství. Mezi nejvýznamnější technologické parametry, které výrazným způsobem ovlivňují vlastní proces vstřikování a finální vlastnosti výrobku, patří *vstřikovací rychlost* (v_v), *vstřikovací tlak* (p_v), *velikost dotlaku* (p_D), *doba dotlaku* (t_D), *teplota taveniny* (T_{tav}) a *teplota formy* (T_F). Teplota taveniny a teplota formy jsou pro vybrané termoplasty uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1a Doporučené teploty taveniny a teploty vstřikovací formy pro vybrané termoplasty

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
PE-HD	180 ÷ 280	30 ÷ 60
PE-LD	170 ÷ 270	20 ÷ 60
PP	180 ÷ 280	20 ÷ 90
PA 6	240 ÷ 280	40 ÷ 100
PA 6.6	260 ÷ 300	60 ÷ 100

Tab. 3.1b Doporučené teploty taveniny a teploty vstřikovací formy pro vybrané termoplasty

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
PBT	230 ÷ 270	30 ÷ 90
POM	180 ÷ 230	40 ÷ 120
PEEK	380 ÷ 430	160 ÷ 220
ABS	190 ÷ 270	50 ÷ 80
PS	170 ÷ 270	20 ÷ 80
PC	270 ÷ 320	85 ÷ 120
PMMA	200 ÷ 260	30 ÷ 80
SAN	200 ÷ 270	50 ÷ 80
PVC	190 ÷ 220	20 ÷ 70

3.3

Smrštění plastových dílů

Z hlediska aplikačních vlastností plastových dílů, z hlediska montážních celků, jsou velmi důležité rozměry plastových dílů, které jsou závislé na smrštění. **Smrštění** je objemová změna plastového dílu, která vzniká v důsledku chlazení výrobku bez současného působení tlaku. Výpočet výrobního smrštění popisuje rovnice (3.1).

Smrštění měřené v čase (16 až 24) hodin po výrobě při standardních podmínkách se nazývá **výrobní smrštění** (s_M). Rozměry vstříků po uplynutí 24 hodin však ještě nejsou zcela stabilizované a mohou dále měnit, např. v důsledku relaxace napětí nebo sekundární krystalizace u semikrystalických plastů. Tyto dodatečné změny rozměrů se nazývají **dodatečné (povýrobní) smrštění**. Vzhledem k orientaci makromolekul i plniva (např. skelných vláken) je smrštění různé v podélném a příčném směru (efekt anizotropie vlastností).

$$s_M = \frac{x_F - x_V}{x_F} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

kde x_F je rozměr v dutině formy při teplotě 23 °C [mm],

x_V je rozměr výrobku při teplotě 23 °C [mm].

Na velikost smrštění mají výrazný vliv nejenom technologické parametry, ale i vlastní polymer (viz tab. 3.2), umístění vtoku na plastovém dílu (efekt anizotropie,

viz tab. 3.3) a konstrukce dílu, např. tloušťka stěny. Obecně platí, že čím je teplota formy nebo taveniny vyšší, tím je větší výrobní smrštění a menší dodatečné smrštění. Naopak u vyššího tlaku je smrštění menší. S rostoucí tloušťkou stěny výstřiku smrštění vzrůstá. Amorfní plasty mají menší smrštění než semikrystalické plasty.

Tab. 3.2 Velikost výrobního smrštění pro vybrané druhy termoplastů

Termoplast	Smrštění [%]	Termoplast	Smrštění [%]
PE-LD	1,5 ÷ 3,0	PA 6	1,0 ÷ 2,5
PE-HD	2,0 ÷ 4,0	PA 6.6	1,0 ÷ 2,0
PP	1,5 ÷ 2,0	POM	1,0 ÷ 3,2
PS	0,2 ÷ 0,5	PC	0,6 ÷ 0,8
ABS	0,4 ÷ 0,7	PBT	1,7 ÷ 2,3
PVC	0,2 ÷ 0,6	PMMA	0,3 ÷ 0,8

Tab. 3.3 Velikost smrštění pro PA 6.6 s rozdílným procentem skleněných vláken

Termoplast	Podélné smrštění [%]	Příčné smrštění [%]
PA 6.6 + 15 GF	0,55	1,40
PA 6.6 + 25 GF	0,42	1,32
PA 6.6 + 30 GF	0,35	1,25
PA 6.6 + 35 GF	0,32	1,20

3.4

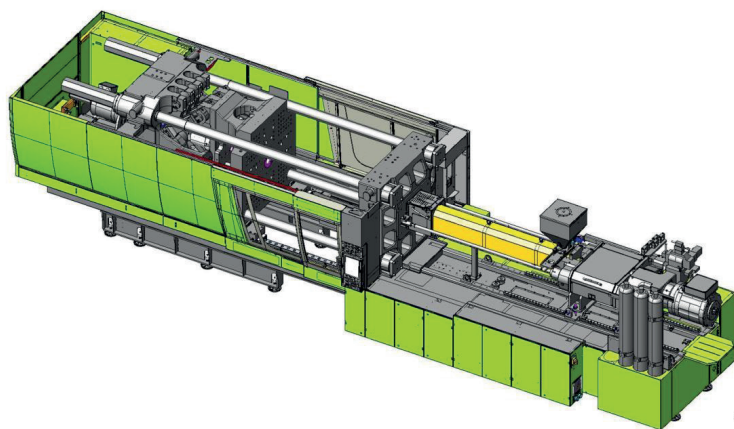
Vstřikovací stroje

Ke vstřikování plastů se používají **vstřikovací stroje**, které z hlediska typu pohonu mohou být hydraulické, elektrické nebo hybridní. Vstřikovací stroje mají dvě na sobě nezávislé jednotky, **vstřikovací** a **uzavírací jednotku**, které jsou řízeny řídicí **mikroprocesorovou jednotkou** (liší se dle typu výrobce). Příklady vstřikovacích strojů jsou ukázány na obr. 3.15 a obr. 3.16.

Úkolem **vstřikovací jednotky** (viz obr. 3.17) je doprava, plastikace, vstřikování a dotlak taveniny plastu. Mezi hlavní části vstřikovací jednotky patří tavicí komora, šnek (nebo píst), tryska, násypka a topení. Délka šneku se však nevyjadřuje v jednotkách délky, ale jako násobek jeho průměru. Délka šneku u vstřikovacích strojů na termoplasty bývá obvykle (15 ÷ 25 D).



Obr. 3.15 Příklad vstřikovacího stroje ENGEL



Obr. 3.16 Schéma elektrického vstřikovacího stroje ENGEL

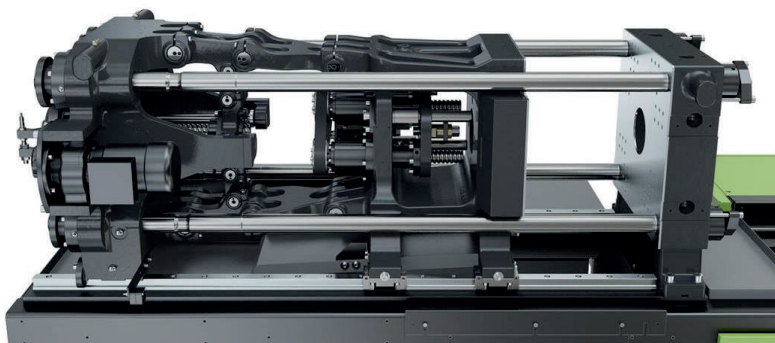
Mezi základní parametry vstřikovací jednotky patří: *vstřikovací kapacita* (Q_v), která udává maximální objem taveniny plastu [cm^3], který je stroj schopen vystříknout na jeden zdvih (posun šneku nebo pístu směrem ke vstřikovací formě) do volného prostoru (tzv. zdvihový výkon), *plastikační kapacita* (Q_p) – maximální hmotnost plastu, kterou je stroj schopen zplastikovat (roztavit a zhomogenizovat) za jednotku času [kg/hod] (tzv. tavící výkon) a *kompresní poměr*, který je definován jako poměr

objemu šnekového profilu pro jedno stoupání závitu pod násypkou k objemu profilu v části šneku před tryskou (bývá v rozmezí od 1,5 do 4,5).



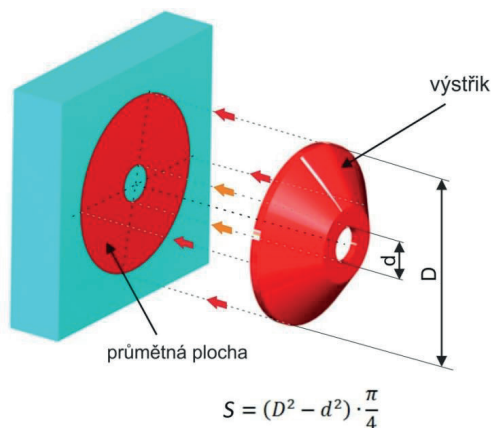
Obr. 3.17 Příklad vstřikovací jednotky

Uzavírací jednotka (viz obr. 3.18) zajišťuje otevírání a zavírání vstřikovací formy, „držení“ formy v zavřeném stavu během vstřikování a dotlaku a vyhození výrobku. Síla, která drží vstřikovací formu v zavřeném stavu během vstřikování a dotlaku se nazývá uzavírací síla (F_u) [kN]. Uzavírací síla se vypočte jako součin průmětu plochy výrobku S (viz obr. 3.19) do směru působící síly a tlaku v dutině formy (p_i).



Obr. 3.18 Příklad uzavírací jednotky

Vstřikovací a uzavírací jednotky mají vůči sobě určité umístění, polohu. Nejčastější uspořádání u vstřikovacích strojů je horizontální poloha vstřikovací i uzavírací jednotky, tedy vstřikování kolmo na dělicí rovinu formy. V některých případech, např. při zakládání zálisků do formy, dvoukomponentním vstřikování, však může dojít k jiné vzájemné poloze.



Obr. 3.19 Průmětná plocha výrobku

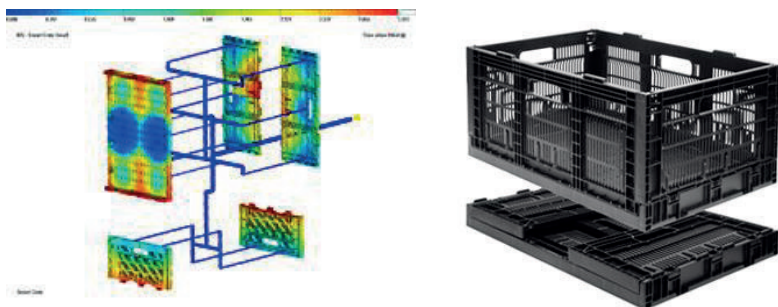
3.5

Vstřikovací formy

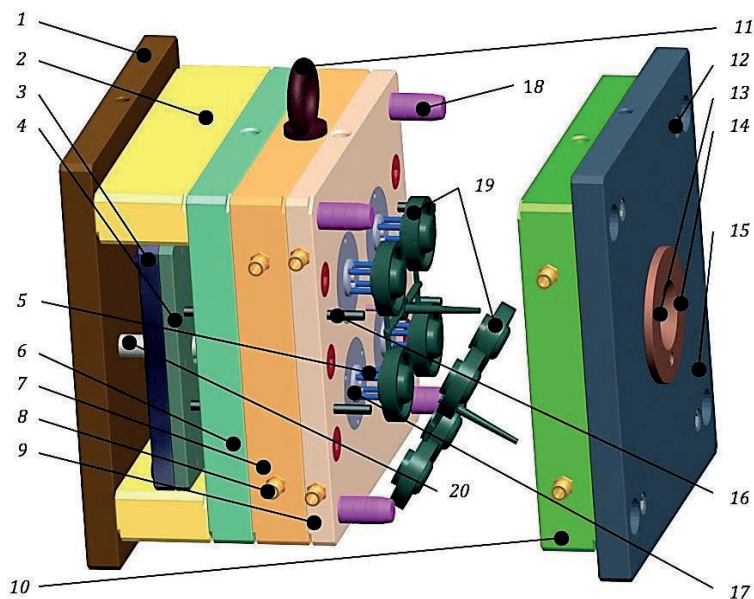
Formy pro zpracování plastů vstřikováním jsou komplikovaná zařízení, která musí odolávat vysokým tlakům a teplotám, musí poskytovat výrobky o přesných rozměrech, musí umožnit snadné vyjmutí výrobku a musí pracovat automaticky po celou dobu své životnosti.

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

- podle násobnosti na jednonásobné a vícenásobné nástroje (viz obr. 3.20),
- podle způsobu zaformování dílu a konstrukčního řešení na dvoudeskové (viz obr. 3.21), třídeskové, etážové, čelistové, vytáčecí, speciální apod.,
- podle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se vstřikem kolmo na dělicí rovinu a na formy se vstřikem do dělicí roviny.



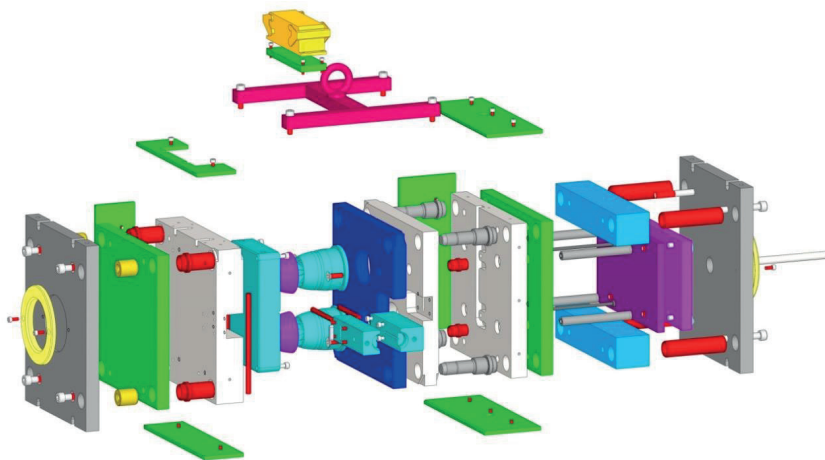
Obr. 3.20 Příklad vícenásobné, tzv. family formy (různá geometrie tvarových dutin) včetně výrobku



Obr. 3.21 Příklad jednotlivých dílů dvoudeskové vstříkovací formy

(1 – upínací deska; 2 – rozpěrka; 3 – vyhazovací deska opěrná; 4 – vyhazovací deska kotevní; 5 – vyhazovač; 6 – podpěrná deska; 7 – deska pro rozvod chlazení; 8 – přípojka chlazení; 9 – tvárník; 10 – tvárnice; 11 – manipulační oko; 12 – hlavní montážní šrouby; 13 – vtoková vložka; 14 – středící kroužek; 15 – upínací deska; 16 – vracecí kolíky vyhazovacího mechanismu; 17 – pevné jádro; 18 – vodící sloupky; 19 – vstříkovaný díl; 20 – podpěrné válce)

Vstříkovací forma (viz obr. 3.21 a obr. 3.22) se skládá z dílů, které vymezují tvarovou dutinu formy, z vtokového systému, temperačního (chladicího) systému, vyhazovacího systému, odvzdušnění a z upínacích a vodicích elementů. Jednotlivé části vstříkovacích forem lze rozdělit do dvou skupin na části konstrukční a na části funkční. Konstrukční části zabezpečují správnou činnost nástroje a patří sem např. desky, středící kroužky, rozpěrky, dorazy, vodící části apod. Funkční části jsou ve styku se zpracovávaným materiálem a udělují mu požadovaný tvar. Patří sem např. tvárník, tvárnice, vtoková vložka atd.



Obr. 3.22 Příklad rozpadu vstříkovací formy na díly

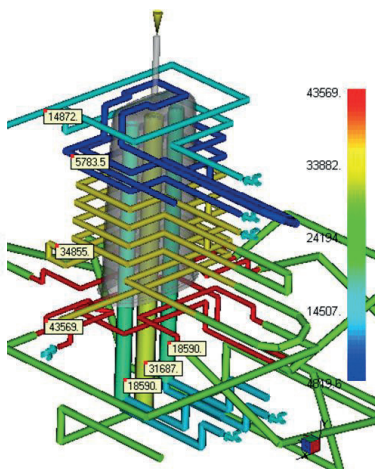
Vtokový systém vstříkovací formy je systém hlavních a rozváděcích kanálů a ústí vtoku, který musí zajišťovat správné naplnění dutiny formy taveninou plastu, snadné odtržení nebo oddělení od výstřiku a snadné vyhození vtokového zbytku. Vtoková soustava je navrhována podle počtu tvarových dutin, podle jejich rozmístění a podle toho, zda bude konstruována jako studený nebo horký (vyhříváný) rozvod (viz obr. 3.23).

Temperačním (chladícím) systémem se rozumí systém kanálů (viz obr. 3.24), umožňující přestup a prostup tepla z taveniny do formy a temperačního média (chladicí kapaliny). Teplota formy se udržuje na požadované výši pomocí temperačního média. Temperační systém bývá rozdělen do několika dílčích okruhů,

samostatně pro pevnou a pohyblivou část formy. Rozmístění temperačních kanálů a jejich rozměry je nutno navrhnout s přihlédnutím k celkovému řešení formy a tvaru výrobku.

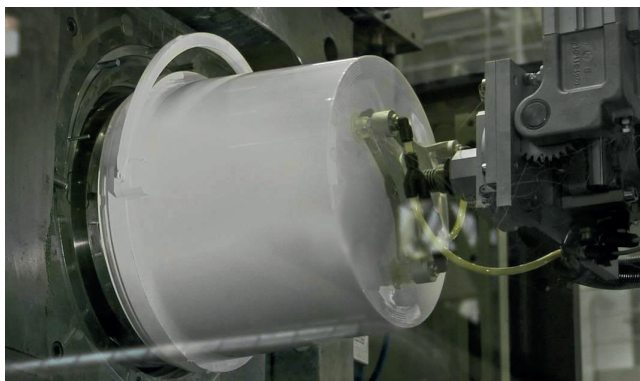


Obr. 3.23 Příklad vyhřívaného kaskádového vtokového systému



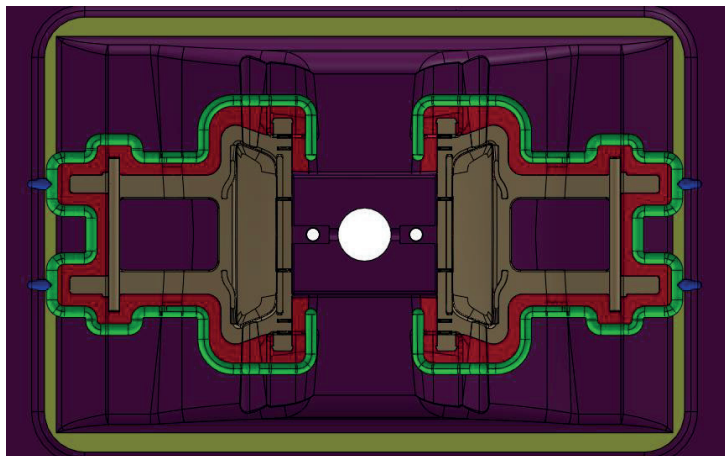
Obr. 3.24 Příklad temperačního systému formy

Vyhazovací systém (viz obr. 3.25) musí zajistit bezproblémové vyhození výrobku (příp. vtokového zbytku) z formy bez jeho deformací anebo porušení. Návrh vyhazovacího systému je závislý na tvaru dílu. Nejčastěji jsou používány vyhazovací kolíky, dále stírací desky, kroužky apod.



Obr. 3.25 Příklad vyhazovacího systému formy

Odvzdušnění (odvod vzduchu z tvarové dutiny formy během procesu plnění) je u vstřikovacích forem velmi důležité, protože by mohlo jinak dojít k nedokonalému vyplnění tvarové dutiny taveninou plastu, vadám výstřiku. Odvzdušnění se navrhuje v dělicí rovině (viz obr. 3.26), v zadních pozicích výrobku, u vodících částí apod. Na dostatečné odvzdušnění formy má vliv umístění vtoku, způsob zaformování výstřiku, umístění vyhazovačů, přítomnost tvarových vložek, apod.



Obr. 3.26 Příklad odvzdušnění v dělicí rovině vstřikovací formy (zobrazeno modře)

SPECIÁLNÍ TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

4

Speciální technologie vstřikování polymerů rozšiřují zpracovatelské a aplikační možnosti „konvenční“ technologie vstřikování plastů a kompozitů. Speciální technologie vstřikování využívají principu a podstaty této technologie, ale liší se v jednotlivých fázích procesu vstřikování, nebo jsou rozdílné z hlediska technologických parametrů, z hlediska konstrukce vstřikovací formy nebo uspořádání a stavby stroje. Speciálními technologiemi vstřikování plastů se vyrábí plastové díly, které jsou specifické např. kombinací plastů (viz obr. 4.1) nebo se jedná o lehčené díly, díly s uzavřenou vnitřní dutinou apod.



Obr. 4.1 Příklady plastových dílů pro speciální způsoby vstřikování

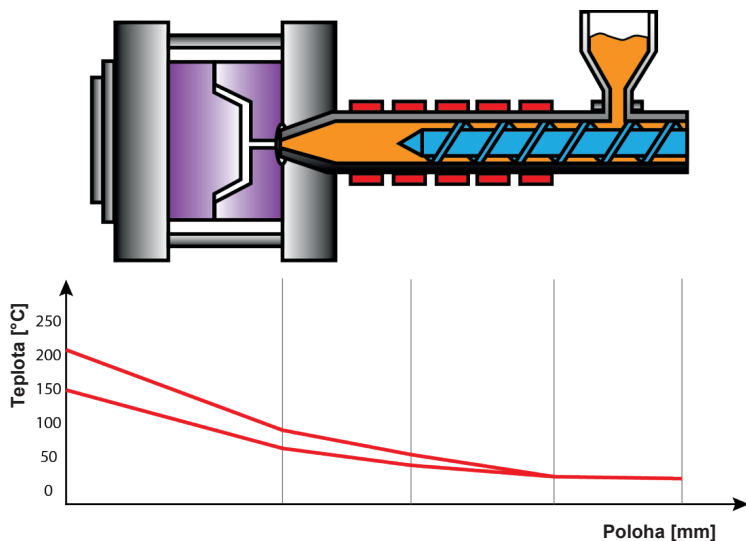
4.1

Vstřikování reaktoplastů

Vstřikování termoplastů je nejrozšířenější technologií, ale vstřikovat se mohou i **reaktoplasty**, které nabývají na stále větším významu. V současné době se vstřikováním zpracovává asi $(25 \div 35)$ % reaktoplastů. Vstřikování reaktoplastů má oproti dříve používaným technologiím lisování a přetlačování reaktoplastů následující výhody: předehev hmoty, dávkování, plastikace a vstřikování se uskutečňuje v jedné jednotce vstřikovacího stroje, proces lze automatizovat, doba vytvrzování je výrazně zkrácena, není zde technologický odpad ve formě přetoků, pokud neuvažujeme vtokový systém.

Hlavní rozdíl mezi vstřikováním termoplastů a vstřikováním reaktoplastů spočívá v tom, že doba chlazení je nahrazena dobou vytvrzování, při které dochází

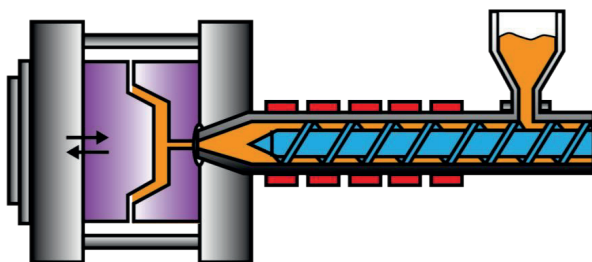
k vytvoření amorfní zesíťované struktury. Vstřikovací forma se nechladí, ale je vyhřívána na vytvrzovací teplotu (dle druhu reaktoplastu v rozsahu od 150 °C do 200 °C). Reaktoplasty jsou plastikovány při relativně nízkých teplotách (45 ± 115) °C dle druhu reaktoplastu (viz obr. 4.2).



Obr. 4.2 Teploty v tavící komoře a ve formě při vstřikování reaktoplastů

Reaktoplasty se mohou lišit ve velikosti smrštění, přísadách, viskozitě (reaktoplasty s lepší tekutostí potřebují delší vytvrzovací časy) a v závislosti viskozity na teplotě. Při vstřikování reaktoplastů je velmi důležité zajistit kvalitní odvzdušnění vstřikovací formy, neboť plyny, které vznikají při zpracování reaktoplastů, se musí odvést z tvarové dutiny vstřikovací formy, jinak by došlo k vadám na konečných plastových dílech. Kromě klasických odvzdušňovacích kanálů a způsobů odvzdušnění (v závislosti na konstrukci formy) se používá i technologický způsob, spočívající v pootevření formy po fázi vstřiku taveniny reaktoplastu (objem taveniny je 80 % až 95 % objemu dutiny formy) pomocí redukce uzavírací síly (otevření formy v dělicí rovině o 0,1 mm až 0,2 mm). Následuje uzavření formy zvýšením uzavírací síly a doplnění objemu dutiny formy taveninou reaktoplastu (viz obr. 4.3).

Kromě výše uvedených technologických a materiálových rozdílů se technologie vstřikování reaktoplastů liší také v konstrukci stroje a šneku, který má potlačenou kompresní část, aby nedošlo k přílišnému smykovému namáhání materiálu a tím k jeho předčasnému vytvrzení v tavicí komoře. Poměr L / D šneku je v rozmezí 12:1 až 15:1.



Obr. 4.3 Proces odvzdušnění pootevřením vstřikovací formy

4.2

Vstřikování pryží, kaučuků

Kaučuky a pryže (elastomery), stejně jako termoplasty a reaktoplasty, mohou být, kromě jiných technologických procesů, zpracovávány technologií vstřikování. Plastikace probíhá za nízkých teplot, které jsou obdobou zpracování reaktoplastů. A podobně jako u vstřikování reaktoplastů je hlavní rozdíl v tom, že doba chlazení je nahrazena dobou vulkanizace, při které dochází k vytvoření slabé zesíťované amorfní struktury materiálu. Vstřikovací forma je vyhřívána na vulkanizační teplotu dle druhu elastomeru. Podobně jako u vstřikování reaktoplastů, tak i u vstřikování elastomerů se liší pracovní část stroje (viz obr. 4.4), konstrukce šneku, který je buď obyčejný (kompresní



Obr. 4.4 Vstřikovací stroj pro technologii vstřikování elastomerů

poměr je nulový), anebo je kompresní poměr šneku kolem 1,5:1. Poměr L / D šneku je výrazně menší, než u technologie vstřikování termoplastů, obvykle kolem 14:1. Příklady výrobků jsou uvedeny na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Příklady dílů vyrobené technologií vstřikování elastomerů

4.3

Vstřikování silikonů

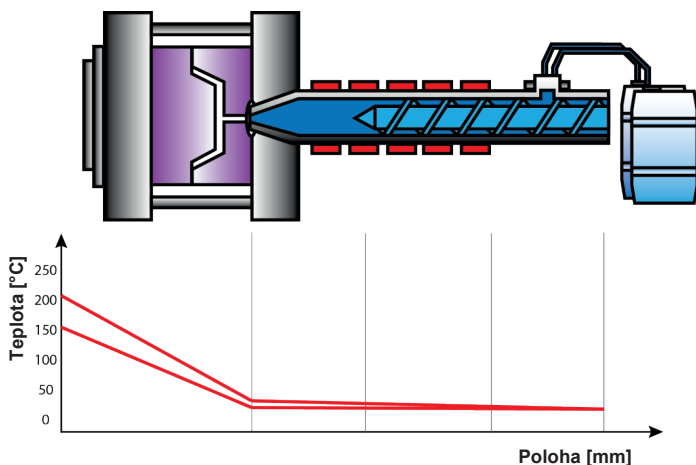
V posledních letech vzrůstá objem použití silikonů hlavně pro lékařský, automobilový a potravinářský průmysl (viz obr. 4.6) v důsledku jejich zdravotní nezávadnosti, životnosti, dobré teplotní odolnosti apod. Silikony se dají zpracovávat vstřikováním, stejně jako termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 4.6 Příklady silikonových vstřikovaných dílů

Při technologii **vstřikování silikonů** (LIM – Liquid Injection Moulding), oproti vstřikování termoplastů a reaktoplastů, je z materiálového hlediska největší rozdíl v tekutosti vstupního materiálu. Silikon je standardně dodáván v kapalně formě a v první fázi procesu je pístem dávkován ze sudů různých objemů (nejpoužívanějším objemem je 100 l barel, ale barely mohou být i objemově menší) do plastikační jednotky vstřikovacího stroje, kde dochází ke smíchání obou jeho složek (isokyanátu a polyolu) a následnému vstříknutí do dutiny vstřikovací formy.

Silikony jsou plastikovány při velmi nízkých teplotách (20 ± 30) °C, tedy při výrazně nižších teplotách než v případě reaktoplastů a termoplastů, kde je rozdíl ohromný (viz obr. 4.7). Z technologického hlediska je rozdíl oproti vstřikování termoplastů v tom, že místo doby chlazení je zde doba vulkanizace, při které dochází k vytvoření zesíťované struktury. Vulkanizační teplota je podle typu silikonu v rozsahu od 160 °C do 220 °C.



Obr. 4.7 Zpracovatelské teploty pro technologii vstřikování silikonů



Obr. 4.8 Vstřikovací stroj pro technologii vstřikování silikonů

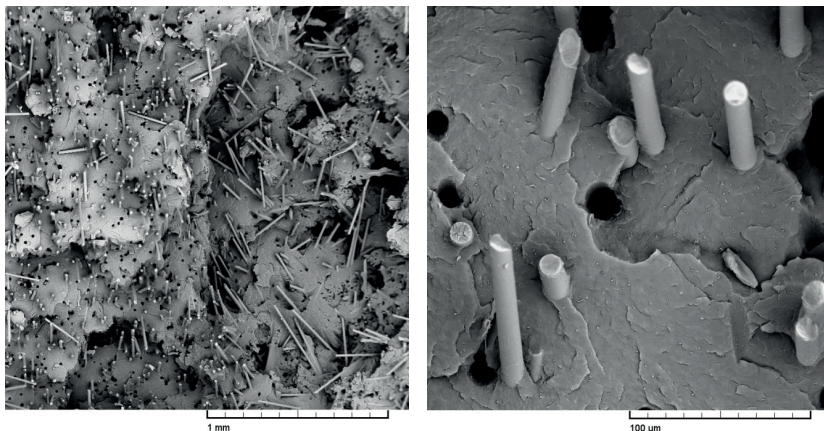
Z konstrukčního hlediska je nutné klást důraz na vysokou přesnost v dělicí rovině a na návrh odvodu vzdušného vstřikovací formy v důsledku vysoké tekutosti silikonů. Podobně jako u předchozích technologií vstřikování reaktoplastů a elastomerů se

oproti technologii vstřikování termoplastů liší konstrukce stroje (viz obr. 4.8) a konstrukce šneku, který má spíše funkci pístu. Stroj má, kromě vstřikovací a uzavírací jednotky, i dávkovací jednotku a odlišnou trysku.

4.4

Vstřikování vlákných plněných termoplastů

Pro zvýšení mechanických vlastností se do plastů přidávají *vláknenná plniva*, která mohou být jak organického, tak i anorganického původu. Jedná se např. o *skleněná vlákna*, která mají v současné době největší rozsah použití, ale také *uhlíková*, *kevlarová*, *polyesterová*, *rostlinná* a *živočišná vlákna*, *kovová vlákna* apod. (viz obr. 4.9). Plasty plněné vláknennými plnivy mají zvýšenou tuhost, rozměrovou stabilitu, nižší smrštění, horší kvalitu povrchu a vyšší anizotropii vlastností v podélném a příčném směru.



Obr. 4.9 Mikroskopický snímek lomové plochy kompozitu na bázi PP a skleněných vláken

V současné době se kromě standardně používaných krátkých vláken o délce ca $(0,2 \div 0,6)$ mm používají v granulátu i dlouhá vlákna o délce ca $(10 \div 12)$ mm, viz obr. 4.10. Při plastikaci polymeru dochází k rozlámání vláken téměř na třetinu, ale stále jsou tato vlákna ca desetkrát delší než standardně používaná krátká vlákna.

Vláknenný podíl (netavitelná část) zaujímá určitý objem plastového dílu na úkor plastu, proto klesá jeho smrštění. Z technologického hlediska je náročnější „narovnat“

vlákna do směru toku taveniny polymeru, je však možné zkrátit dobu chlazení v důsledku snížení objemu taveniny plastu. Na druhé straně je vzhledem k vysoké viskozitě taveniny vhodné používat vyšší teplotu taveniny (nejméně o 10 °C), vyšší vstřikovací tlak, rychlost vstřikování a vyšší teplotu formy. S tím však dochází i k vyššímu opotřebení vstřikovací formy, hlavně při použití kovových a skleněných vláken.



Obr. 4.10 Granulát polymeru s dlouhými skleněnými vlákny (LGF)

4.5

Vstřikování s podporou plynu

Technologie vstřikování plastů s podporou plynu (GIT – Gas Injection Technology) je technologie, která cíleně vytváří uvnitř plastového dílu uzavřenou dutinu. Za účelem vytvoření dutiny uvnitř dílu se do určitých míst plastového výstřiku přivádí inertní plyn. Jako plyn se nejčastěji používá vysoce čistý dusík (čistota min. 99,8 %) v rozsahu jeho stlačování (10 ÷ 40) MPa.

Výhodami technologie vstřikování s podporou plynu jsou možnosti vyrábět tlustostěnné plastové díly (viz obr. 4.11) s uzavřenými dutinami bez propadlin, snížení uzavíracích sil, snížení smrštění, zkrácení doby cyklu (zkrácení doby chlazení až o 50 % vlivem zmenšení tloušťky stěny), snížení hmotnosti výrobku (dochází k redukci hmotnosti až o 50 %), vysoký stupeň tuhosti dílů s žebry, zachování požadovaných mechanických vlastností výstřiku, minimalizace jeho deformací, snížení spotřeby plastů a zachování vysoké kvality povrchu plastových dílů. Technologie vstřikování s podporou plynu se dá použít pro většinu plastů, např. pro PE, PP, PS, ABS, PA, SAN, PC, PBT, PC/PBT, TPE, ale i pro vlákny plněné termoplasty. Nevýhodami technologie vstřikování s podporou plynu jsou vyšší cena nástroje (nárůst o 70 ÷ 100 %), vyšší cena stroje (zvýšení o 30 ÷ 50 %), problematické chlazení v místech vytvořených dutin, řízení procesu, potřeba plynu a nekvalitní povrch vnitřních uzavřených dutin.

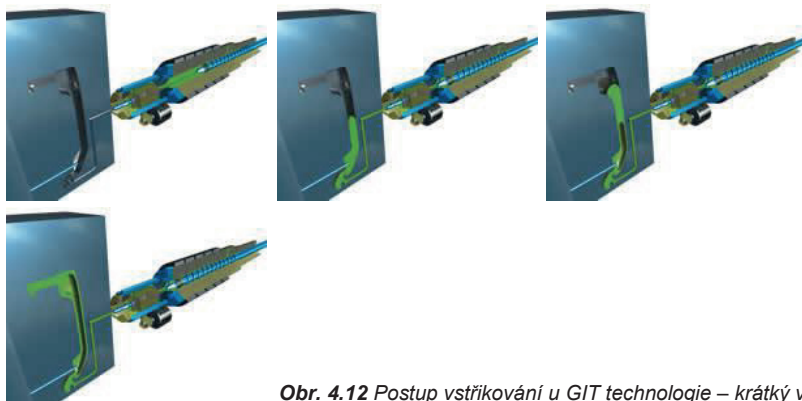
Postup vstřikování plastů s podporou plynu je následující: zavření formy, vstřík taveniny plastu, prodleva, přívod plynu, dotlak, chlazení, otevření formy a vyhození výrobku. Plyn vytváří uzavřenou dutinu ve výstřiku a přebírá funkci dotlaku.



Obr. 4.11 Příklady plastových dílů vyráběných technologií vstřikování s podporou plynu

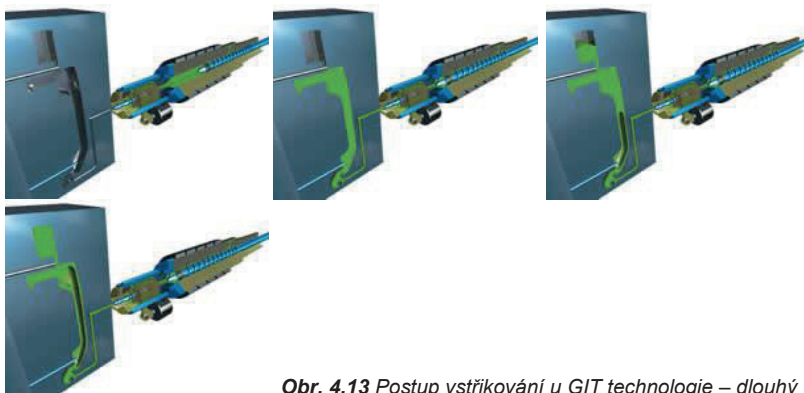
Oproti klasické technologii vstřikování je zde však velký rozdíl mezi viskozitou taveniny a plynu (vytváří se zcela jiný typ proudění). Tlak plynu je ve všech místech vytvořené dutiny stejný (jak u injektoru plynu, tak i v posledních místech vytvořené dutiny) a není potřeba tak vysokých vstřikovacích tlaků, jako u technologie konvenčního vstřikování (redukce je $40 \div 80 \%$). Zjednodušeně platí, že pro tekutější plasty je potřeba nižší tlak a naopak. Důležitým technologickým parametrem u technologie vstřikování s podporou plynu je doba prodlevy mezi vstřikováním taveniny a přívodem plynu. Prodleva je důležitá z hlediska zachování celistvosti povrchu plastového dílu, jinak by se plyn dostal na povrch výstřiku. Obecně platí, že s rostoucí dobou prodlevy roste tloušťka stěny výrobku.

Z hlediska procesu existují dvě technologické možnosti vytvoření uzavřené dutiny v plastových dílech. První je **krátký vstřík, dofukovací způsob**. Jedná se o technologický proces, při kterém je dutina vstřikovací formy naplněna jen částečně (objem vstříknuté taveniny plastu je $50 \div 90 \%$) a následně je tlakem plynu tavenina doplňována do zadních míst plastového dílu (viz obr. 4.12). Největším problémem je volba objemu vstříknuté dávky taveniny plastu, protože při malém objemu vstříknuté taveniny plastu do dutiny formy dochází k proražení stěny výrobku plynem a při velké dávce taveniny plastu není vytvořena vnitřní uzavřená dutina po celé délce výrobku. Tloušťka stěny klesá se vzdáleností od místa vstřiku plynu.



Obr. 4.12 Postup vstřikování u GIT technologie – krátký vstřík

Druhou možností je **dlouhý vstřík, vyfukovací způsob**. Jedná se o technologický proces, při kterém se plyn vstříkuje pod tlakem do dutiny formy až potom, co tavenina plastu úplně vyplní tvarovou dutinu vstřikovací formy (viz obr. 4.13). Tavenina plastu je během tvorby dutiny vytlačována buď do pomocné dutiny vstřikovací formy (viz obr. 4.13), anebo zpět před čelo šneku (v tomto případě musí být vstřikovací tryska vyhřívána). U dlouhého vstříku je rovnoměrnější tloušťka stěny po délce dutiny formy.

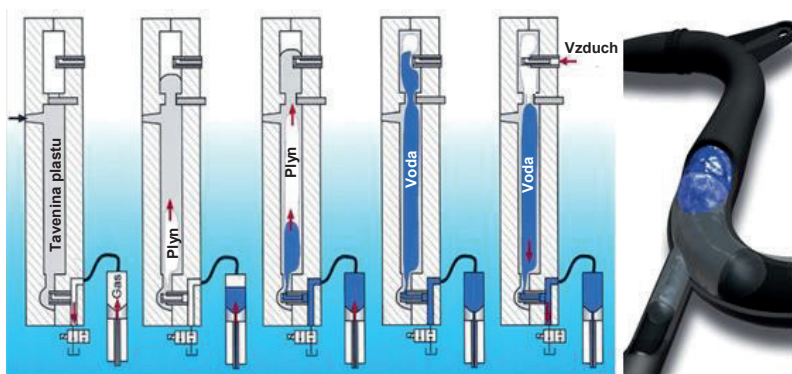


Obr. 4.13 Postup vstřikování u GIT technologie – dlouhý vstřík

Možnosti přívodu plynu za účelem vytvoření uzavřené dutiny jsou v podstatě dvě, *tryskou stroje* nebo *injektorem* (průměr jehly 3 mm ÷ 5 mm). U injektoru je nebezpečí

ucpání jehly zbytky taveniny při zpětném odsávání plynu. Kontrolu tlaku plynu provádí tlaková jednotka, která je obvykle součástí vstřikovacího stroje.

U technologie vstřikování s podporou plynu existuje několik technologických alternativ, které odstraňují „nedostatky“ této technologie. Tak např. vysoké teploty v místech vytvořených dutin (plyn se zahřeje a je součástí dutiny), které se velmi špatně a problematicky chladí, jsou technologicky řešeny tak, že po vytvoření uzavřené dutiny v plastovém díle se tyto „proplachují“ buď studeným vzduchem, anebo vodou (viz obr. 4.14).



Obr. 4.14 Princip technologie s dodatečným „proplachem“

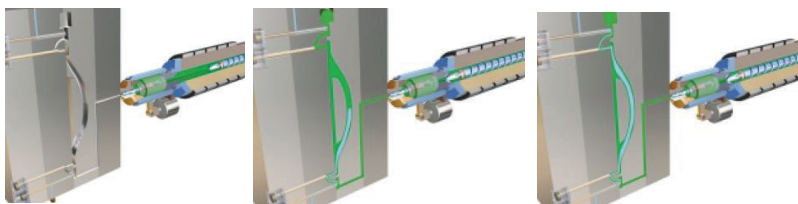
4.6

Vstřikování s podporou vody

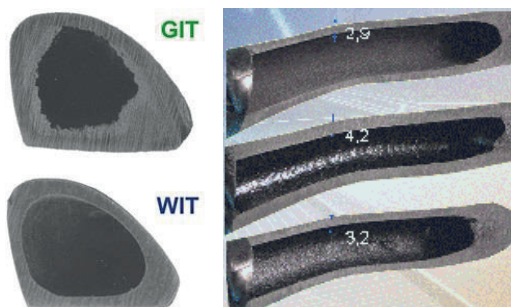
Kromě technologie vstřikování plastů s podporou plynu se v dnešní době používá **technologie vstřikování s podporou vody** (WIT – Water Injection Technology), kdy k výrobě uzavřených dutin se nepoužívá plyn, ale voda. Voda je stejně jako plyn vstřikována do tekuté taveniny za účelem vytvoření dutiny. Voda by se neměla během procesu odpařovat, což závisí nejenom na teplotě plastu, ale i na tlaku, kterým bude voda vstřikována do taveniny plastu. Vstříknutí vody se musí provést dostatečně rychle, aby se zabránilo hydrolytickému rozkladu plastu. Čelo vody pak působí na plastické jádro jako vtlačovaný píst.

Výrobní proces a technologické principy vstřikování plastů s podporou vody (viz obr. 4.15) jsou obdobné jako u technologie vstřikování s podporou plynu. Voda,

stejně jako plyn, přebírá funkci dotlaku a tlak vody je ve všech místech vytvořené 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. Stejně jako u plynu je i u vody velmi důležitá prodleva mezi vstřikováním taveniny a přívodem vody z hlediska tloušťky stěny výstřiku (viz obr. 4.16). Nakonec může být voda z dílu vytlačena tlakovým vzduchem, nebo odsáta zpět, anebo se vylévá do zásobníku mimo formu.



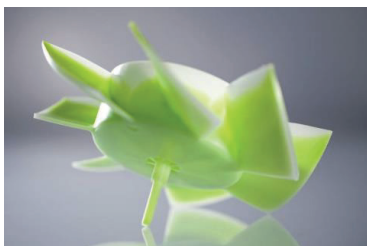
Obr. 4.15 Princip WIT technologie – dlouhý vstřík



Obr. 4.16 Porovnání technologie GIT a WIT z hlediska kvality povrchu dutiny (vlevo) a z hlediska tloušťky stěny (vpravo – WIT nahoře, GIT uprostřed a GIT/WIT dole)

Výhodami technologie vstřikování s podporou vody je možnost vyrábět tlustostěnné plastové díly (viz obr. 4.16), snížení uzavíracích sil, snížení smrštění, zkrácení doby cyklu (zkrácení doby chlazení o $70 \div 90$ % vlivem většího chladicího účinku vody oproti plynu), snížení hmotnosti výrobku, nízká deformace plastových výrobků, snížení spotřeby plastů a zachování vysoké kvality povrchu a kvality vnitřní stěny plastových dílů (viz obr. 4.16). **Nevýhodou** technologie vstřikování s podporou vody je vyšší cena nástroje (nárůst o $80 \div 100$ %), vyšší cena stroje (zvýšení o 30 % $\div$ 50 %), řízení procesu, potřeba dodatečných zařízení, omezená aplikace atd.

Technologie sendvičového vstřikování je založena na tom, že jeden výrobek tvoří dva shodné anebo rozdílné plasty. Plast na vnějším povrchu plastového dílu tvoří jeho „slupku“, „povrch“ nebo „kůži“ a druhý plast uvnitř plastového dílu tvoří jeho „jádro“ (viz obr. 4.17). Výhodou technologie je možnost použití např. recyklátu do jádra plastových dílů, nebo použití speciálních typů plastů (vodivé plasty, high-tech plasty, nanokompozity atd.) pouze na jejich vnějším povrchu. Plast na povrchu výstřiku může, ale nemusí, být rozdílný od plastu v jeho jádru. Oba materiály by však měly mít podobné materiálové vlastnosti a parametry zpracování, např. teplotu taveniny. Výsledné rozložení component plastového výrobku (ve vztahu k objemu plastu na povrchu a v jádru) závisí hlavně na tokových vlastnostech materiálů, na geometrii výrobku a na umístění vtokového systému.

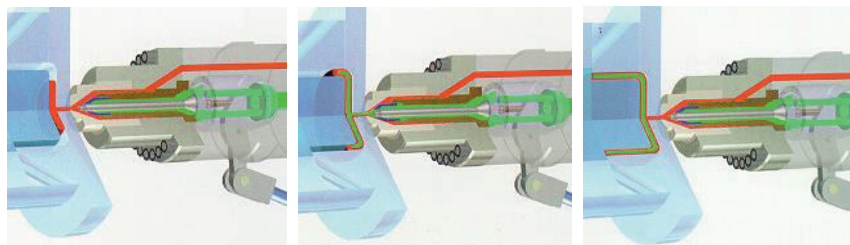


Obr. 4.17 Příklady plastových dílů vyrobených sendvičovým vstřikováním

Technologický postup výroby je následující: zavření formy, vstřikování přesně definovaného objemu taveniny plastu, který tvoří povrchovou vrstvu výstřiku, vzápětí je do plastického jádra vstříknuta tavenina plastu tvořící jádro výrobku, následuje dotlak, chlazení a je-li třeba zajistit, aby povrch dílu byl kompaktní je nakonec vstříknuta ještě tavenina plastu, který tvoří povrch plastového dílu (třístupňový proces, viz obr. 4.18). Následuje otevření formy a vyhození výrobku.

Pro jednotlivé fáze vstřiku je nutné nalézt správný okamžik přepnutí plnění dutiny formy taveninami plastů tvořící povrch výstřiku a jeho jádro. Během plnění se povrchová vrstva plastu (zamrzlá vrstva) po ochlazení dotykem se stěnou vstřikovací formy již dále neposunuje. Posun taveniny plastu nastává pouze tam, kde tavenina ještě neztuhla a tím dojde k doplnění tvarové dutiny formy po celé ploše povrchu

výrobku. Po fázi vstřiku jsou taveniny obou plastů ještě dostatečně plastické pro fázi dotlaku.



Obr. 4.18 Princip sendvičového vstřikování

Při sendvičovém vstřikování se používají stroje se dvěma vstřikovacími jednotkami (viz obr. 4.19) a vstřikovací proces je řízen speciální tryskou stroje, která jednak spojuje obě vstřikovací jednotky a jednak dávkuje taveninu do dutiny vstřikovací formy pomocí nucených (hydraulicky) nebo tlakově řízených mechanismů, které ovládají jehlu trysky v závislosti na tlakových poměrech.



Obr. 4.19 Příklad stroje pro sendvičové vstřikování

Technologie vícekomponentního nebo **vícebarevného vstřikování** umožňuje na jednom plastovém výrobku kombinovat (spojovat) dva nebo více polymerních materiálů nebo dvě nebo více barev od jednoho druhu plastu (viz obr. 4.20). Technologický proces je založen na vytvoření spoje mezi použitými polymery v rámci jednoho výrobku buď pomocí adhezčních sil (viz tab. 4.1) anebo u polymerů bez vzájemných adhezčních vazeb (nemísitelných polymerů) zastříknutím tvarové geometrie (viz obr. 4.21). V současné době je tato technologie stále více používána na plastové výrobky obsahující kombinace termoplastu a termoplastického elastomeru, který eliminuje např. vibrace dílu, plní těsnící funkci apod.



Obr. 4.20 Příklady plastových dílů vyrobených technologií vícekomponentního nebo vícebarevného vstřikování



Obr. 4.21 Příklady plastových dílů vyrobených technologií vícekomponentního vstřikování s adhezním spojem (vlevo) a zastříknutím (vpravo)

Tab. 4.1 Vzájemná soudržnost (adheze) vybraných typů polymerů

	ABS	ASA	PA 6	PA 6.6	PC	PE-HD	PE-LD	PMMA	POM	PP	PBT	PC/ABS
ABS												
ASA												
PA 6												
PA 6.6												
PC												
PE-HD												
PE-LD												
PMMA												
POM												
PP												
PBT												
PC/ABS												

	Dobrá adheze
	Geometrický spoj (bez adheze)
	Slabá adheze

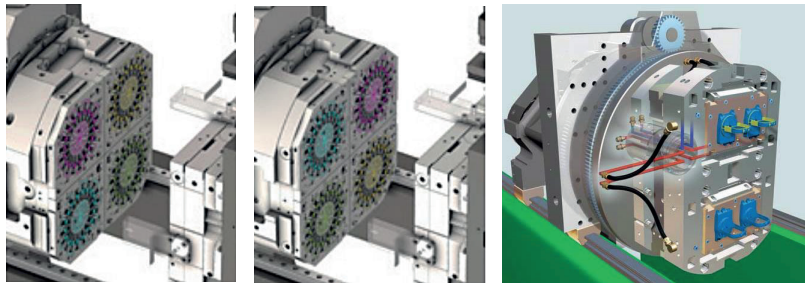
Princip technologie vícekomponentního vstřikování se od technologie konvenčního vstřikování liší tím, že proces tvorby výrobku je vícefázový, vícepolohový: v první fázi je vstříknut první materiál (nebo barva) a v další fázi, po přemístění výrobku (předlisku) do jiné pozice, se vstříkuje další (druhý, třetí ad.) materiál a dochází ke zkompletování dílu. Při použití dvou materiálů se jedná o dvoukomponentní vstřikování (2K), při třech materiálech o tříkomponentní (3K) a u čtyř o čtyřkomponentní (4K) vstřikování.

Nejrozšířenější a zároveň nejjednodušší variantou je *dvoukomponentní vstřikování*. Princip procesu je následující: zavření formy, vstřikování prvního polymeru do jedné tvarové dutiny vstřikovací formy a zároveň vstříknutí druhého polymeru do druhé dutiny vstřikovací formy, kde dochází ke spojení a k vytvoření konečného plastového dílu. Po fázi dotlaku a chlazení je po otevření formy z druhé dutiny plastový díl vyhozen a současně dojde k přesunutí předlisku z první dutiny formy do druhé. Počet otevření vstřikovací formy je závislý na počtu dutin vstřikovací formy.

Technologické možnosti **překládání předlisků** z jedné tvarové dutiny do další tvarové dutiny během vstřikovacího cyklu jsou následující:

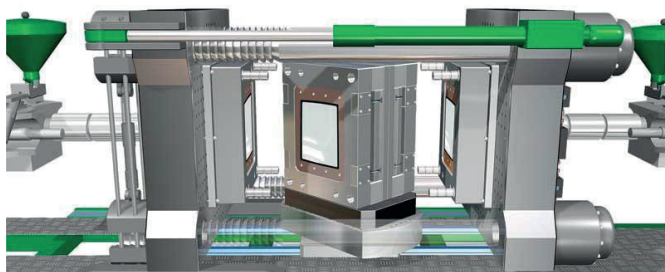
- rotace poloviny vstřikovací formy kolem vodorovné osy,
- rotace poloviny vstřikovací formy kolem svislé osy,
- rotace části vstřikovací formy kolem vodorovné osy (systém indexové desky),
- použití pohyblivé části formy,
- použití robotu.

V případě **rotace vstřikovací formy kolem vodorovné osy** je jedna polovina formy rotačně pohyblivou částí vstřikovací formy, která se natáčí k jednotlivým vstřikovacím jednotkám (viz obr. 4.22) podle nastavených technologických časů. Po prvním vstřiku, dotlaku a chlazení se forma otevře, je vyhozen vtok a následuje pootočení formy spolu s předliskem k další vstřikovací jednotce. Forma se znovu uzavře a předlisek je dostříknut do konečného tvaru dalším plastem. Rotační pohyby mohou být buď alternující (dvoupolohová vstřikovací forma), nebo spojitě (třípolohová vstřikovací forma).



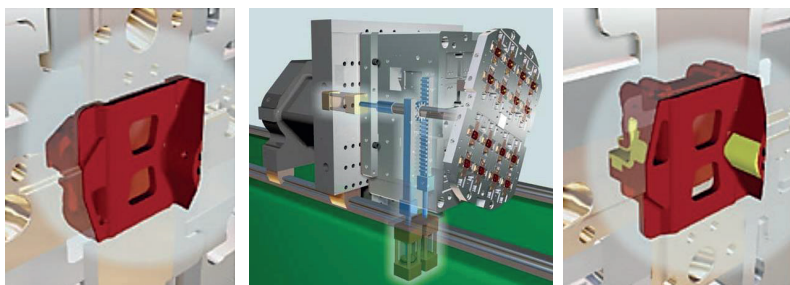
Obr. 4.22 Princip překládání výrobků pomocí rotace vstřikovací formy kolem vodorovné osy

V případě **rotace vstřikovací formy kolem svislé osy** dochází k otočení střední desky formy k druhé polovině vstřikovací formy (viz obr. 4.23). K bezproblémovému otočení je potřeba dimenzovat velikost otevření formy. Vstřikovací jednotky vstřikují proti sobě a odděluje je jen tloušťka otočné desky, čímž dochází ke snížení potřebných uzavíracích sil, protože taveniny působí proti sobě.



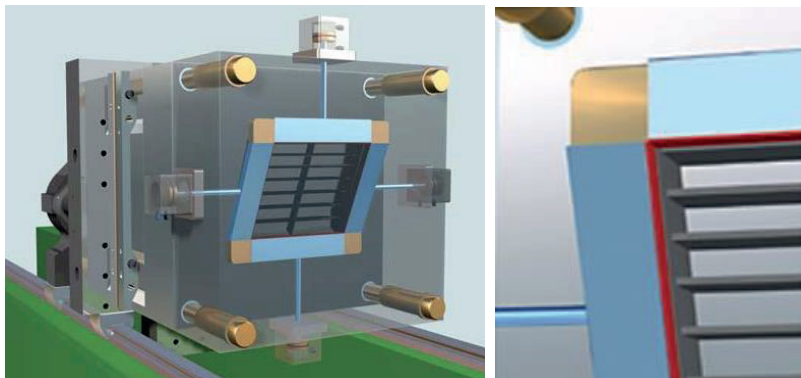
Obr. 4.23 Princip překládání výrobků pomocí rotace vstříkovací formy kolem svislé osy

V případě **rotace pouze části vstříkovací formy kolem vodorovné osy** je otočná pouze část pohyblivé poloviny vstříkovací formy, tzv. indexová deska (viz obr. 4.24). Princip a ovládání jsou shodné s rotačně otočnou částí vstříkovací formy kolem vodorovné osy.



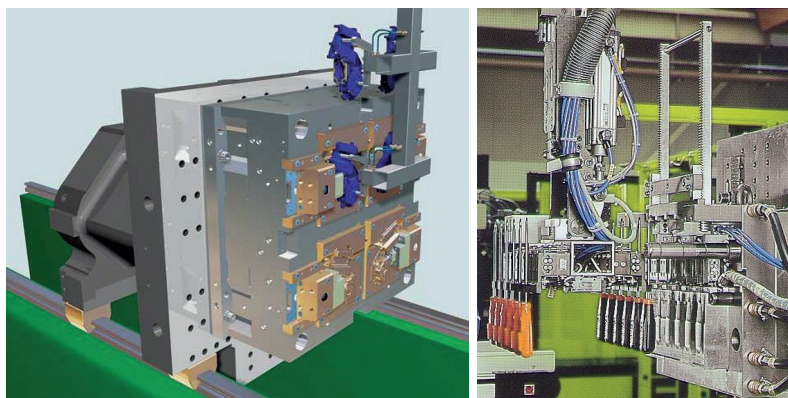
Obr. 4.24 Princip rotace části vstříkovací formy – systém indexové desky

V případě použití **posuvné části formy** (viz obr. 4.25), se použití pohyblivých tvárnků využívá hlavně u plastových dílů buď při místním nástřiku druhého plastu, anebo při nástřiku měkkého plastu (např. termoplastického elastomeru, silikonu) na tvrdý plast (termoplast). Posuvná tvarová část vstříkovací formy uzavírá nebo otevírá tu část dutiny formy, která se má zaplnit taveninou plastu. Nevýhodou je někdy delší vstříkovací cyklus, protože se jednotlivé komponenty vstříkují postupně a ne najednou.



Obr. 4.25 Princip použití posuvné části vstřikovací formy

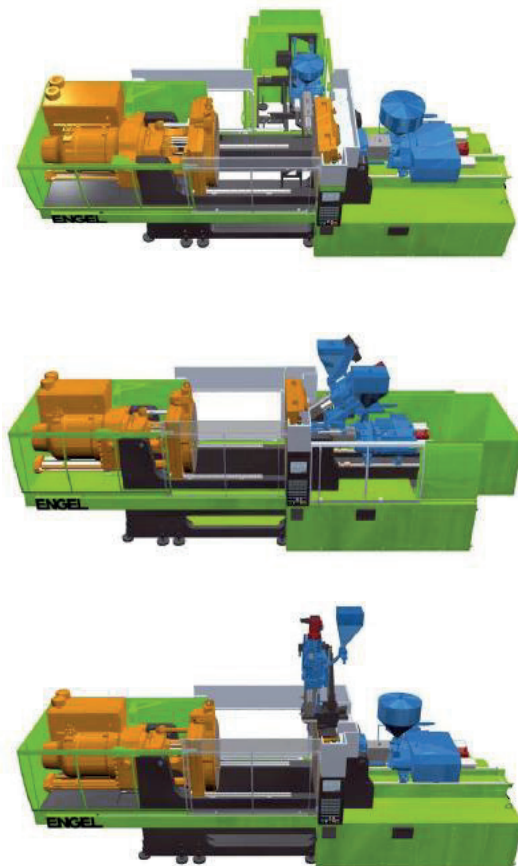
Použití **robotů** (viz obr. 4.26) se aplikuje hlavně u větších plastových dílů nebo u plastových dílů vstřikovaných na dvou strojích. Nasazení robotů obvykle vede k prodloužení celkové doby vstřikovacího cyklu v důsledku delšího času potřebného k přemístění předlisků. Na druhé straně je použití robotů jedním z nejčastěji používaných způsobů překládání výrobků z jedné pozice do další pozice.



Obr. 4.26 Princip použití robotů k překládání plastových dílů mezi dutinami formy

Z hlediska strojů a forem se technologie vícekomponentního vstřikování liší od konvenčního vstřikování tím, že vstřikovací forma musí umožnit vstřik rozdílných

plastů nebo barev v jednotlivých dutinách vstřikovací formy během jednoho vstřikovacího cyklu. Dále je ke vstřikovací formě připojeno více vstřikovacích jednotek (viz obr. 4.27). Vstřikovací jednotky mají samostatně nastavované nejenom vytápění, ale i dávkování a technologické parametry. Umístění vstřikovacích jednotek je konstrukčně odlišné podle druhu a počtu komponentů. Příklady jsou uvedeny na obr. 4.27.



Obr. 4.27 Vybrané příklady uspořádání vstřikovacích jednotek u technologie vícekomponentního nebo vícebarevného vstřikování

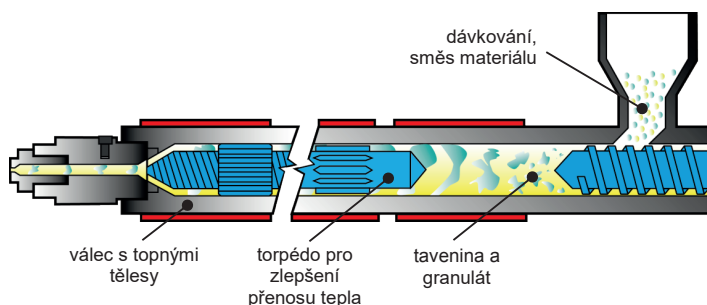
Zvláštním případem technologie vícebarevného vstřikování je **technologie intervalového vstřikování**. Princip technologie je založen na tom, že před vlastní fází plnění taveniny plastu do dutiny vstřikovací formy dochází k promíchání více barevných odstínů od jednoho polymeru ve speciální míchací trysce. Vstřikovací jednotky neústí přímo do vstřikovací formy, ale do speciální intervalové jednotky, uvnitř které je umístěna speciální míchací tryska a odkud je tavenina vstřikována do dutiny formy. Na rozdíl od technologie vícebarevného vstřikování nejsou na plastových dílech jasné a ostré hranice mezi barevnými odstíny. Konečný barevný efekt v plastovém dílu (viz obr. 4.28) je závislý na nastaveném časovém procesu míchání jednotlivých barev, na konstrukci vstřikovaného dílu, umístění vtokového systému a na tokových vlastnostech taveniny plastu.



Obr. 4.28 Příklad plastových dílů vyrobených intervalovým vstřikováním

Technologie mramorového vstřikování je obdobou technologie intervalového vstřikování, protože dochází k nerovnoměrnému a nehomogennímu míchání rozdílných barev použitého plastu. Kvůli nehomogenitě taveniny se na výrobku objevují různě intenzivní barevné oblasti, které nemají ostré ohraničení a stejnou intenzitu. Hlavní rozdíl od technologie konvenčního vstřikování spočívá v konstrukci pracovního členu, který zajišťuje plastikaci polymeru v tavící komoře vstřikovacího stroje. Namísto šneku je u mramorového vstřikování použit speciální hnětací člen (viz obr. 4.29), který má částečně tvar pístu, částečně tvar šneku. V důsledku toho

nedochází k tak intenzivnímu hnětení a smykovému namáhání a barevné odstíny jsou orientovány ve směru posuvu taveniny polymeru.



Obr. 4.29 Konstrukce vstřikovací jednotky u mramorového vstřikování

4.11

Vstřikování plastů s prášky

Technologie vstřikování plastů s prášky (PIM - Powder Injection Moulding) je technologie, kde se polymer používá jako pojivo, nosič pro prášky z rozdílných materiálů, např. na bázi kovů (tvrdé kovy, oceli, karbidy), neželezných kovů (měď), skla nebo keramiky apod. Objem plastu v granulátu je v rozsahu $(35 \div 50) \%$. Z hlediska použitých typů prášků má tato technologie dvě alternativy, které mají samostatné označení: MIM (Metal Injection Moulding) a CIM (Ceramic Injection Moulding). Typ, tvar a velikost použitého prášku má výrazný vliv na proces a konečnou kvalitu dílů, zejména jejich smrštění (prášky nepravidelných tvarů mají za následek vyšší míru anizotropie smrštění dílu).

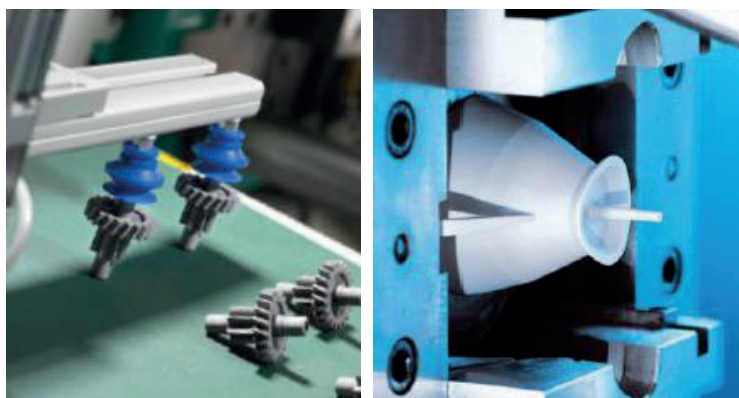
Technologií PIM se vyrábějí díly pro automobilový a textilní průmysl, elektrotechniku, zdravotnictví, zbrojní průmysl apod. (viz obr. 4.30). Konečné výrobky mají výbornou kvalitu povrchu a vysokou přesnost rozměrů. Nevýhodou je nárůst vstupních investic oproti klasické technologii vstřikování, cena nástroje je vyšší o $(50 \div 80) \%$, cena stroje a zařízení je řádově dvojnásobná.

Princip technologie vstřikování plastů s prášky je následující: zavření formy, vstřikování taveniny plastu s prášky do dutiny vstřikovací formy (výsledkem je tzv. zelený výrobek, viz obr. 4.31), dotlak, který je nižší než u konvenčního vstřikování, plastikace nové dávky, chlazení, vyjmutí výrobku z formy, odstranění plastu

(výsledkem je tzv. hnědý produkt) a konečnou fází je spékání (sintrace). V důsledku vysokého podílu prášku ve směsi výrazně klesá tekutost taveniny, a proto je žádoucí používat vysoké vstřikovací tlaky a teploty.



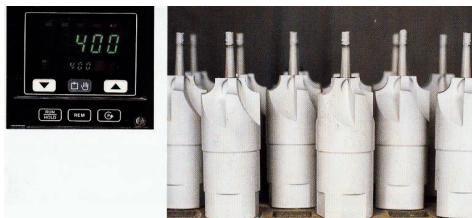
Obr. 4.30 Příklady dílů vyráběných technologií vstřikování plastů s prášky



Obr. 4.31 Příklady „zelených“ dílů po vstřikování

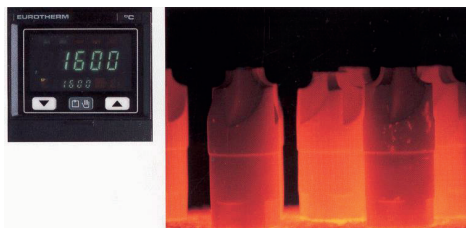
Odstranění polymeru se může provádět několika technologickými způsoby, např. vypálením v pecích při teplotě ca $(400 \div 450)^\circ\text{C}$, viz obr. 4.32 nebo katalytickým, teplotně-chemickým procesem.

Obr. 4.32 „Hnědý produkt“ po teplotním odstranění plastu



Spékání (sintrace, viz obr. 4.33) kovového nebo keramického prášku probíhá v pecích v inertních atmosférách při teplotách do 2 000 °C, odpovídajících použitému druhu prášku. Výsledné díly jsou homogenní a vykazují smrštění, které je výrazně vyšší, než u klasické technologie vstřikování (pohybuje se v desítkách procent) a velikost smrštění je závislá na použitém polymeru, prášku a objemu polymeru.

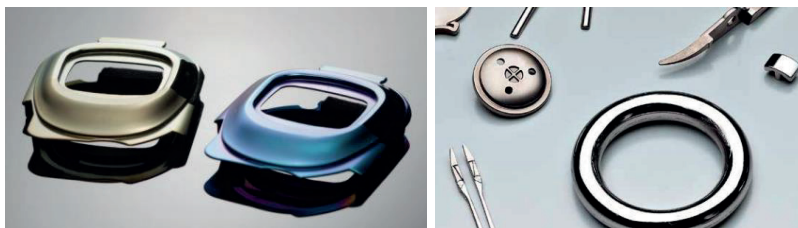
Obr. 4.33 Proces sintrace



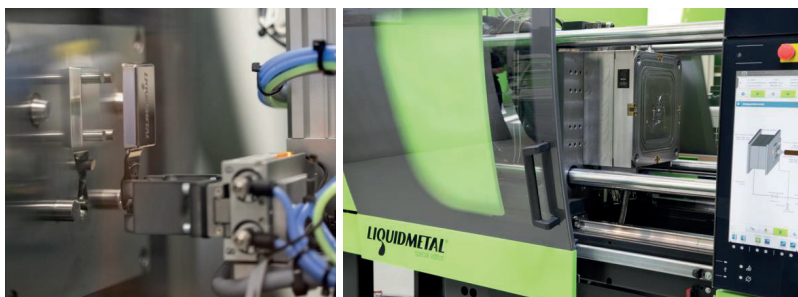
4.12

Vstřikování slitin kovů

Technologie vstřikování slitin kovů, amorfních slitin zirkonia (technologie Liquidmetal) je alternativou pro technologii PIM, resp. obráběcí procesy. Vstřikováním se vyrábí kvalitní kovové díly (viz obr. 4.34) do hmotnosti ca 100 g (včetně vtoku) s vysoce kvalitním povrchem (drsnost povrchu je 0,05 μm až 0,025 μm). Princip technologie je následující: roztavení vstupního materiálu ve vakuu (indukční ohřev), zavření formy, plnění dutiny formy ve vakuu pomocí pístu, chlazení, otevření formy (viz obr. 4.35) a vyhození výrobku. Doba cyklu je delší, ca (3 ÷ 5) minut, než u technologie vstřikování, ale výrazně kratší, než u technologie obrábění.



Obr. 4.34 Příklady výrobků pro technologii vstřikování slitin kovů



Obr. 4.35 Detail formy a stroje pro technologii vstřikování slitin kovů

4.13

Reakční vstřikování

Technologie reakčního vstřikování (RIM – Reaction Injection Moulding) se oproti konvenčnímu vstřikování liší v tom, že do dutiny vstřikovací formy se nevstřikuje tavenina plastů, ale kapaliny (monomery), které mají mnohem vyšší tekutost (viz tab. 4.2). Tuhého dílu se dosáhne tím, že v dutině vstřikovací formy proběhne exotermická reakce, polyreakce.

Výhodami reakčního vstřikování jsou vysoká tekutost nízkomolekulárních složek – monomerů (isokyanátu a polyolu), malá deformace molekul a tedy možnost výroby velkých a velkoplošných dílů (viz obr. 4.36), výroba velkých dílů za nízkých tlaků při malých tloušťkách výrobku, nízké výrobní náklady (nízká cena forem), výroba dílů bez vnitřního napětí, dodatečných deformací a propadlin i při rozdílných tloušťkách stěn, možnost ovlivnit vlastnosti dílu kombinací monomerních složek a technologickými parametry, vstřik polymeru do formy o vyšší teplotě, než je teplota vstřikované kapaliny a nízká hodnota smrštění dílu. **Nevýhodami** technologie

reakčního vstřikování jsou zejména relativně dlouhé doby výrobních cyklů a vysoké nároky na odvodu tepla.

Tab. 4.2 Hlavní rozdíly mezi technologií konvenčního a reakčního vstřikování

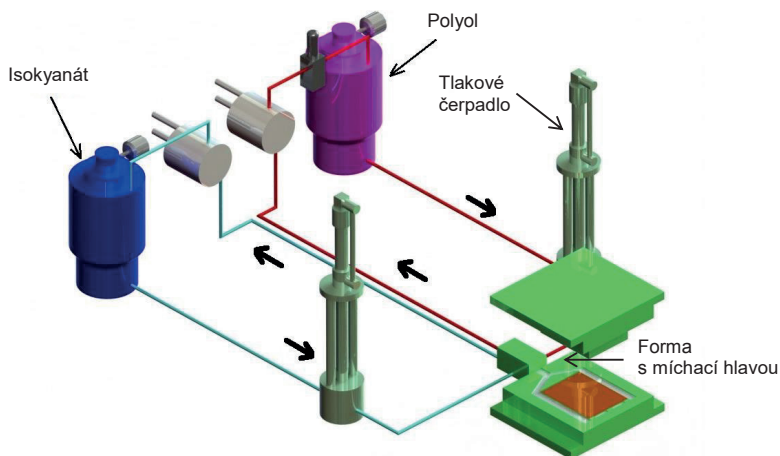
Procesní parametry	Reakční vstřikování	Konvenční vstřikování
Procesní teplota [°C]	30 ÷ 130	150 ÷ 380
Teplota formy [°C]	75 ÷ 150	20 ÷ 230
Vstřikovací tlak [MPa]	1,5 ÷ 20	20 ÷ 120
Uzavírací síla [kN]	400 ÷ 600	> 30 000
Viskozita plastu [Pa·s]	0,1 ÷ 1	10 ² ÷ 10 ⁵

Hlavním materiálem, který se používá pro reakční vstřikování, jsou složky, které vedou chemickou reakci ke vzniku polyurethanu (PUR), polyamidu (PA) nebo epoxidu (EP).



Obr. 4.36 Příklady dílů vyráběných technologií reakčního vstřikování

Princip technologie reakčního vstřikování (viz obr. 4.47) je následující: zavření formy, doprava kapalin tlakovými čerpadly ke vstřikovací formě, míšení jednotlivých kapalin těsně před vstřikováním do dutiny formy (součástí nástroje je míšací jednotka), vstřikování, chemická reakce, vytvrzování. Polymer (v konečné fázi může být tvrdý nebo pěnový) je buď vytvrzen ve formě, anebo je částečně vytvrzován ve formě a následně se vytvrzování dokončí na odděleném přípravku, zatímco probíhá další cyklus.



Obr. 4.37 Princip technologie reakčního vstřikování

Technologickými alternativami reakčního vstřikování jsou *technologie reakčního vstřikování s vyztužením* (RRIM) a *technologie strukturního reakčního vstřikování* (SRIM). Technologie RRIM je založena na tom, že jsou před vstřikováním do kapaliny přidávány tuhé vyztužující částice (např. skleněná vlákna, minerální plniva apod.). U technologie SRIM je jako výztuha použita tkanina, pletenina nebo preforma vložená do formy před vstřikováním.

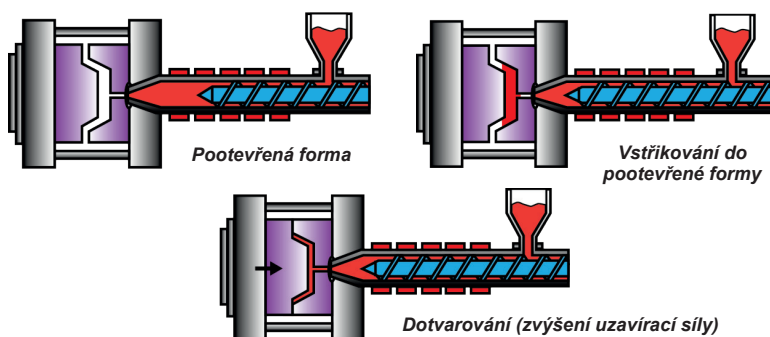
Zařízení pro technologii RIM, stroje a formy, jsou levnější než v případě konvenčního vstřikování, protože se pracuje s nižšími tlaky (viz tab. 4.2 a obr. 4.38). Nástroje mají míchací jednotku pro obě dvě komponenty, plnicí část a velmi dobré odvzdušnění kvůli nízkým tlakům plnění.



Obr. 4.38 Stroj pro technologii RIM

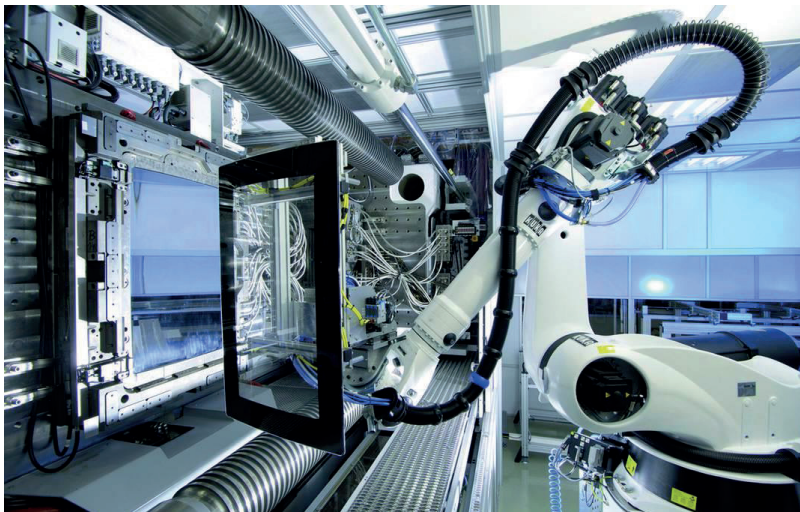
Technologie kompresního vstřikování nebo také vstřikování s dolisováním (CIM – Compress Injection Moulding) je technologie, u které je oproti konvenčnímu vstřikování tavenina plastů dotlačena pomocí uzavírací síly stroje. Uzavírací síla (uzavírací jednotka vstřikovacího stroje) přejímá funkci dotlaku.

Technologie kompresního vstřikování má několik procesních alternativ. Jednou z nich je proces, při kterém je před vlastním vstřikováním pootevřena vstřikovací forma a do takto pootevřené vstřikovací formy je vstříknuta tavenina plastu o přesně stanoveném objemu (viz obr. 4.39). Následuje zvýšení uzavírací síly a tedy dotlak taveniny plastu. Další možnou alternativou jsou vstřikovací stroje s možností programově řízené uzavírací síly. Ve fázi vstřikování taveniny polymeru je uzavírací síla programově snížena a v důsledku nárůstu tlaku v dutině vstřikovací formy dojde k pootevření vstřikovací formy v dělicí rovině. Následuje programové zvýšení uzavírací síly a tedy vyvození dotlaku. Ostatní fáze procesu jsou shodné jako u technologie konvenčního vstřikování.



Obr. 4.39 Princip kompresního vstřikování do pootevřené vstřikovací formy

Technologie kompresního vstřikování umožňuje dosáhnout vysoké rozměrové přesnosti v celé ploše výrobku, nízkých hodnot smrštění, deformací a vnitřních napětí, protože tlak vyvozený uzavírací silou působí přímo na taveninu plastu v celém objemu najednou. Technologie kompresního vstřikování se používá např. k výrobě optických dílů, čoček, plastových skel a střeš (viz obr. 4.40), CD nebo DVD nosičů apod.



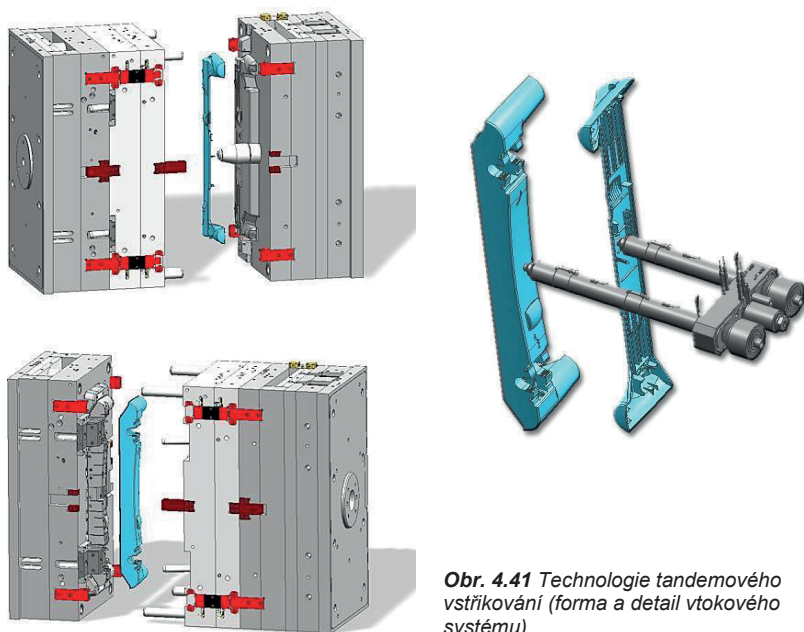
Obr. 4.40 Příklad plastového dílu vyráběného kompresním vstřikováním

4.15

Tandemové vstřikování

Technologie tandemového vstřikování (TIM - Tandem Injection Moulding) spočívá v tom, že v jedné vstřikovací formě jsou dvě dutiny, které jsou umístěny „za sebou“ (viz obr. 4.41) a tyto dutiny jsou v přesně stanovených časových cyklech plněny taveninou plastu, dotlačovány a chlazeny (stejně jako u technologie konvenčního vstřikování).

Podstata technologie je založena na tom, že zatímco v jedné tvarové dutině vstřikovací formy probíhá proces otevření formy, vyhození výrobku a zavření formy, proces plnění dutiny formy taveninou plastu a fáze dotlaku, tak ve druhé tvarové dutině probíhá proces chlazení (viz obr. 4.42). Vstřikovací formy mají „mezidesku se zámky“ pro otevírání formy v jednotlivých dělicích rovinách. Vstřikovat můžeme výrobky stejného i rozdílného objemu. Výhodou technologie je nejenom zvýšení produktivity výroby, ale i snížení uzavírací síly vstřikovacího stroje. Nevýhodou je vyšší cena formy.



Obr. 4.41 Technologie tandemového vstřikování (forma a detail vtokového systému)

Technologie vstřikování



Technologie tandemového vstřikování



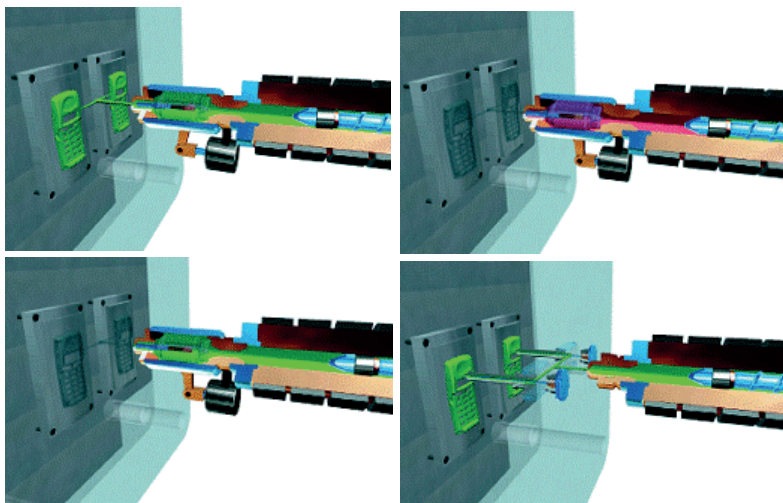
Obr. 4.42 Příklad časového cyklu u technologie tandemového vstřikování

4.16

Vstřikování taveninou o vysokém tlaku

Technologie vstřikování taveninou o vysokém tlaku (X-melt, fa. Engel) je proces založený na vstřikování taveniny pod vysokým tlakem do uzavřené dutiny vstřikovací formy. Podstata technologie je založena na tom, že tavíci komora obsahuje programově ovládanou trysku s pneumatickou jehlou.

Princip technologie je následující: zavření formy, uzavření trysky stroje jehlou, plastikace a stlačení taveniny plastu mezi uzavřenou tryskou a čelem šneku pohybem šneku vpřed (kompresní tlak v tavenině plastu je v rozsahu 100 MPa + 250 MPa, čímž nastane zmenšení objemu), časová prodleva (dochází k teplotní homogenitě taveniny plastu), otevření trysky a plnění dutiny formy (tavenina zvětšuje svůj objem, expanduje a relaxuje), následuje dotlak, chlazení, otevření formy a vyhození výrobku (viz obr. 4.43). Technologie se používá k výrobě tvarově složitých a členitých dílů do hmotnosti ca 20 g, viz obr. 4.44.



Obr. 4.43 Princip technologie vstřikování stlačenou taveninou (plastikace, stlačení, expanze přes studený a horký vtokový systém)



Obr. 4.44 Příklady plastových dílů vyráběných technologií x-melt

Technologie vstřikování strukturních pěn slouží k výrobě plastových dílů s velmi nízkou hustotou, hmotností. Nejčastěji používanými plasty pro strukturní pěny jsou ABS, PA, PE, PC, PP, PS, PBT, PC/ABS, termoplastické elastomery apod. Výrobky ze strukturních pěn mají kompaktní povrchovou vrstvu a napěněné jádro. Nazývají se strukturní pěny. Své uplatnění nacházejí nejenom jako izolační materiály ve stavebnictví a spotřebním průmyslu, ale také v automobilovém průmyslu (viz obr. 4.45), při výrobě tlustostěnných dílů (10 mm a více) a při výrobě hraček. V současné době je např. možné vstřikovat v rámci jednoho výrobku pěny rozdílné tvrdosti.



Obr. 4.45 Příklady plastových dílů vyráběných technologií vstřikování strukturních pěn

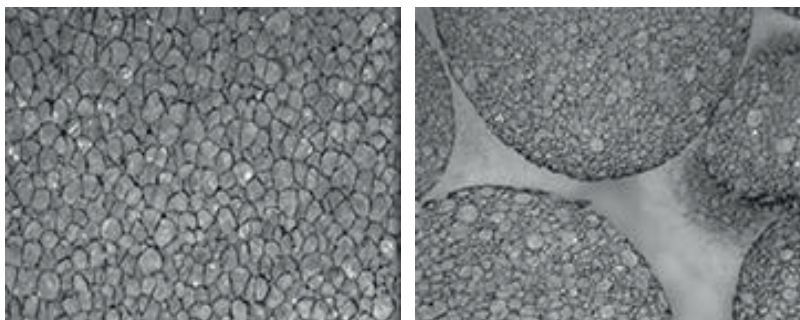
Z technologického hlediska existuje několik způsobů, které využívají k vytvoření napěněné struktury buď *fyzikální*, anebo *chemické procesy*. Prvním možným technologickým způsobem výroby strukturních pěn je vstřikování granulátu plastu s přídavkem **chemického nadouvadla**. Plasty jsou nadouvány přídavkem $(0,5 \div 3) \%$ chemického nadouvadla. V důsledku ohřevu taveniny plastu během plastikace dochází k aktivaci nadouvadla (rozkládají se a uvolňují plyny). Následuje proces plnění dutiny vstřikovací formy taveninou plastu a to tak, že se zaplní $(60 \div 80) \%$ objemu formy. Stupeň zaplnění se volí podle požadované průměrné hustoty výstřiku. V důsledku expanze nadouvadla uvnitř plastového výrobku dojde k vytvoření pěnové struktury a vyplnění celé dutiny formy. Nadouvadlo přejímá funkci dotlaku. Proces pokračuje chlazením plastu, které je v důsledku tepelně-izolačních vlastností strukturních pěn mnohem obtížnější (prodloužení cyklu) a nakonec vyhozením výrobku.

Strukturní pěny lze zpracovávat na běžných vstřikovacích strojích s dostatečnou vstřikovací rychlostí buď nízkotlakým, anebo vysokotlakým způsobem. Tlak plynu u nízkotlakého způsobu je do ca 3 MPa, tlak plynu u vysokotlakého způsobu je vyšší jak 3 MPa. Nevýhodou vysokotlakého způsobu jsou vzhledové vady na povrchu výrobku a poměrně dlouhý čas pro vytěkání zbytku nadouvadla, ovlivňující dodatečné operace. Uzavírací síla stroje je v důsledku nízkých vstřikovacích tlaků v rozsahu (25 ÷ 50) % uzavírací síly konvenčního vstřikování.

Dalším technologickým způsobem je použití fyzikálního nadouvadla, pentanu v polystyrenu (PS). Hustota konečného výrobku je kolem (10 ÷ 15) kg/m³. Princip technologie je následující: předpění kuliček PS horkou párou při teplotě 100 °C (viz obr. 4.46), plnění dutiny uzavřené formy, dopění kuliček teplotou kolem 120 °C, chlazení, otevření formy a vyhození výrobku. Alternativou je technologický způsob, který je založen na plném vypění v dutině nástroje. V těchto případech mluvíme o expandovatelném polystyrenu (PS-E). Existují i materiály XPS, které jsou napěněné v celém objemu a jsou vyráběny extruzí (viz obr. 4.47).



Obr. 4.46 Kuličky polystyrenu (vlevo) a předpěněné kuličky polystyrenu (vpravo)

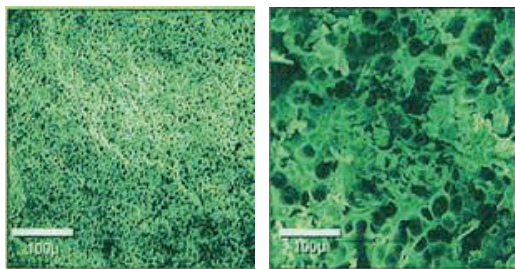


Obr. 4.47 Extrudovaný polystyren (vlevo) a expandovaný polystyren (vpravo)

Velmi moderním způsobem výroby strukturních pěn je v současnosti způsob, který využívá **fyzikálního nadouvadla**, např. dusíku (N_2) nebo oxidu uhličitého (CO_2). Tato technologie je známá pod označením „MuCell“ - *mikrobuněčné vstřikování* (fa. Trexel). Princip technologie je založen na tom, že plyn je dávkován do taveniny plastu nikoliv pomocí nadouvadla, ale speciálním injektorem, který je součástí vstřikovací jednotky stroje (viz obr. 4.48), tedy během plastikace. Plyn je ve stavu superkritického fluidního média, které umožňuje homogenní tvorbu mikrobublin se stejnou velikostí v rozsahu ($10 \div 100$) μm , viz obr. 4.59. Množství a velikost mikrobublin jsou ovlivněny viskozitou taveniny, dobou chlazení, vstřikovacím tlakem, množstvím plynu a tloušťkou dílu. Po fázi plnění a dotlaku následuje fáze chlazení, která je oproti konvenčnímu vstřikování kratší. Nakonec se forma otevře a kompaktní plastový díl je vyhozen.

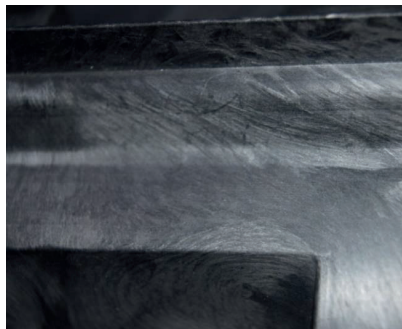


Obr. 4.48 Vstřikovací jednotka MuCell s injektorem a regulátorem tlaku



Obr. 4.49 Porovnání struktury výstřiku při použití fyzikálního (vlevo) a chemického nadouvadla (vpravo)

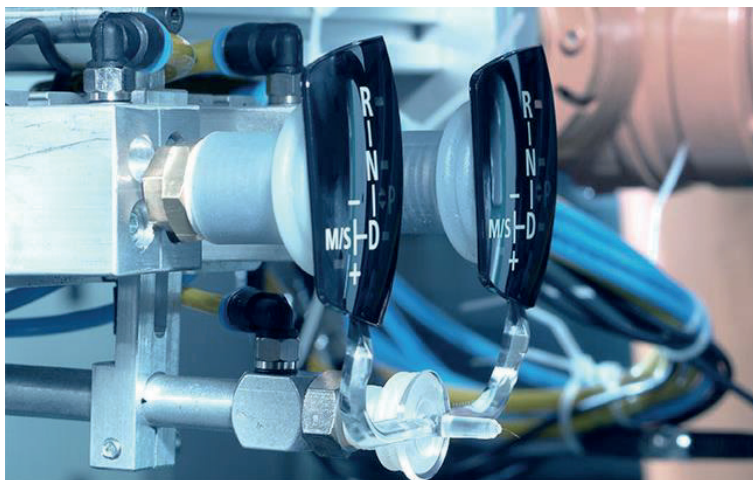
Výhody této technologie jsou snížení hmotnosti vstřikovaných plastových dílů až o 30 % se zachovanými mechanickými vlastnostmi, rovnoměrné rozložení mikrobublin ve výrobku, eliminace jeho deformací a propadlin, zmenšení smrštění, zkrácení výrobního cyklu, snížení uzavírací síly ca o (30 ÷ 60) % oproti technologii konvenčního vstřikování. **Nevýhody** technologie Mucell jsou nevyhovující vzhled povrchu, viz obr. 4.50 (vzduchové šmouhy) a vyšší náklady na strojní vybavení.



Obr. 4.50 Povrch plastového dílu vyrobeného technologií Mucell

Technologie zastříkování (hybridní technologie, InMould technologie, IML – InMould Labeling, IMD – InMould Decoration) spočívají v tom, že vložený materiál (kov, plast, textilie, pěny aj.) je v dutině vstřikovací formy zastříknut taveninou plastu (viz obr. 4.51), dojde ke spojení těchto dvou materiálů za účelem zlepšení např. vzhledových vlastností výrobku, kvality jeho povrchu, zvýšení jeho mechanických vlastností, odolnosti proti otěru, UV záření apod. (viz obr. 4.52). Plast zajišťuje rozměrovou a tvarovou stabilitu plastového dílu.

Princip technologie zastříkování je následující: otevření formy, založení fólie, textilie apod. do dělicí roviny vstřikovací formy, zavření formy, plnění dutiny formy (zastříknutí vloženého materiálu), dotlak, chlazení, otevření formy a vyhození plastového dílu. Technologických alternativ je poměrně velké množství ať už z hlediska tlaku (snížený vstřikovací tlak, kompresní proces), tak i z hlediska tvaru vloženého materiálu („nekonečný“ materiál z role, přístřih nebo předtvarovaný polotovár – viz obr. 4.53).

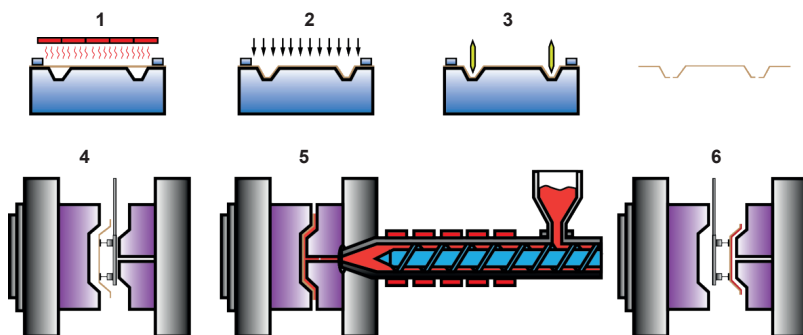


Obr. 4.51 Technologie zastříkování fólií



Obr. 4.52 Příklady pastových dílů vyráběných technologií zastříkování

Způsob výroby vkládaných materiálů a jejich orientace při založení do formy ovlivňuje jejich deformaci během zastříkování, čímž lze zamezit např. jejich protržení. Při vstřikování se používají nižší vstřikovací tlaky. Proces chlazení je ovlivněn tepelnými vlastnostmi vloženého materiálu (kov, polymer, přírodní materiály atd.). Před otevřením vstřikovací formy dochází většinou k odstřížení přebytečné fólie (textilie) ve formě nebo ji lze odstříhovat až po vyjmutí výrobku z formy.



Obr. 4.53 Princip zastříkování předvarovaného polotovaru

1 – ohřev polotovaru; 2 – předvarování; 3 – ostřížení; 4 – vložení polotovaru do formy; 5 – zastříkování taveninou plastu; 6 – vyjmutí výstřiku z formy

4.19

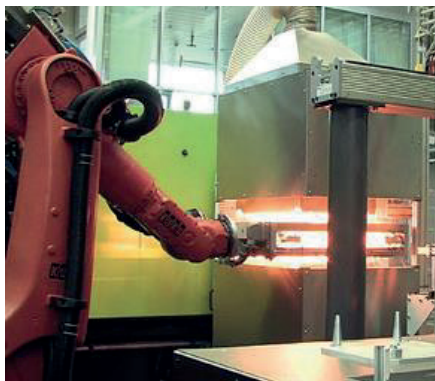
Technologie výroby organoplechů

Technologie zastříkování textilií (Organomelt) je založena na tom, že do vstřikovací formy se vloží předvarovaný textilní polotovar z rozdílných typů vláken (skleněná, uhlíková, atd.), který se následně zastříkne taveninou plastu. Oproti předchozí technologii zastříkování zde dochází k prosycení textilie plastem. Vyrábí se tím vysoce pevné, ale zároveň lehké plastové díly (viz obr. 4.54), které nahrazují ocelové a hliníkové plechy.

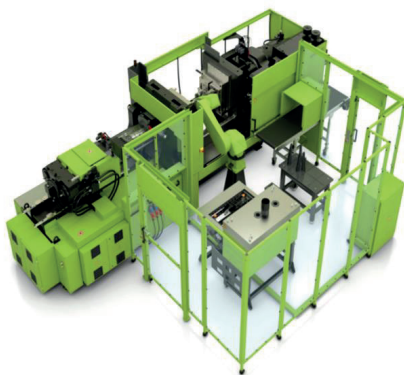


Obr. 4.54 Příklady pastových dílů vyráběných technologií organoplechů

Princip technologie je následující: infračervený ohřev textilie (viz obr. 4.55), předtvarování textilie, založení předtvarovaného polotovaru do vstřikovací formy, zavření formy, plnění dutiny formy taveninou plastu, dotlak, chlazení, otevření formy a vyhození plastového dílu, oříznutí přebytečného materiálu textilie. K výrobnímu procesu se používá zařízení ve výrobních linkách, sdružujících předtvarovací stroj s infraohřevem a vstřikovací stroj (viz obr. 4.56).



Obr. 4.55 Infračervený ohřev



Obr. 4.56 Linka pro výrobu organoplechů

4.20

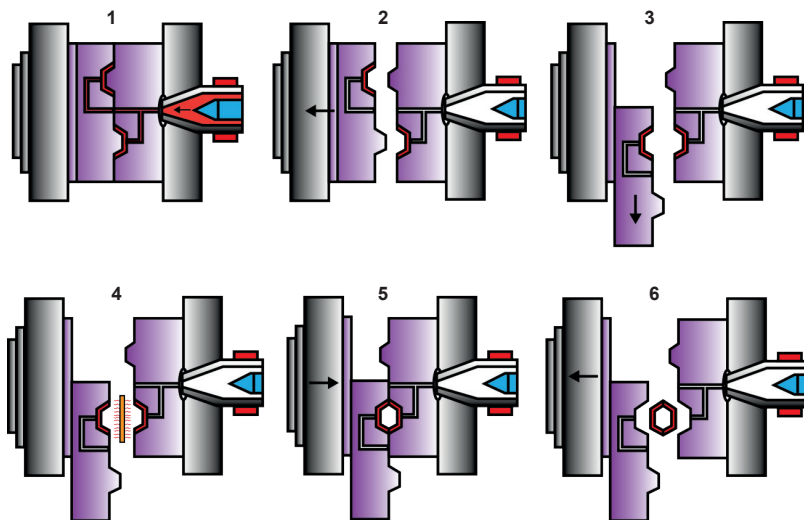
Mikrovstřikování

Technologií mikrovstřikování se vyrábí plastové díly o velmi malých rozměrech (viz obr. 4.57), resp. s velmi malou hmotností (od $0,004 \pm 15$ g). Proces je obdobný konvenčnímu vstřikování. K mikrovstřikování se používají speciální vstřikovací stroje s kombinovanou vstřikovací jednotkou (např. plastikace šnekem, vstřikování pístem). Výroba forem je vzhledem k rozměrům plastových dílů velmi náročná a vyhazování dílů je vzhledem k velikosti plastových výrobků velmi specifické. Kontrola rozměrů vyrobených plastových dílů se obvykle provádí pod mikroskopem.



Obr. 4.57 Příklady plastových dílů vyrobených mikrovstřikováním

Vstřikování se svařováním (Joinmelt) je technologie, kdy se ve formě kombinuje proces vstřikování a proces svařování. Princip vstřikování je následující: zavření formy, plnění dutiny formy taveninou plastu, dotlak, chlazení, otevření formy, posunutí části formy s jednou polovinou budoucího dílu proti druhé polovině, přísun topného tělesa, natavení styčných ploch, odsunutí topného elementu, zavření vstřikovací formy (dojde ke spojení dílů), otevření formy a vyhození výrobku (viz obr. 4.58). Výhodou je přesná pozice jednotlivých částí dílu proti sobě. Nevýhodou jsou delší výrobní cykly (dva výrobní kroky).



Obr. 4.58 Princip vstřikování se svařováním, detail formy a příklad výrobku

1 – vstřikování polotovaru; 2 – otevření formy; 3 – posunutí formy do svařovací pozice;
4 – ohřev; 5 – svařování; 6 – vyjmutí výrobku

Kromě dříve popsaných speciálních technologií vstřikování plastů a kompozitů existují i další speciální technologie, jako je např. *sekvenční vstřikování*, *vstřikování*

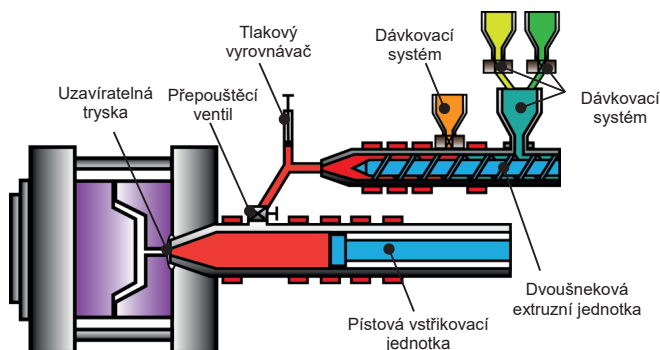
do vakua, extruzní vstřikování, inteligentní vstřikování, kombinace vstřikování a kompaundace, atd.

Sekvenční vstřikování (MLFM - Multi Live Feed Injection Moulding) se používá hlavně u plastů plněných vyztužujícím (ale i nevyztužujícím) plnivem. Princip je založen na kontrolovaném tečení taveniny plastu ve více proudech během fáze plnění a dotlaku, při kterém dochází k promíchávání taveniny v dutině vstřikovací formy během jednoho cyklu. Tyto proudy jsou sekvenčně cyklicky stlačovány pro „promíchání“ taveniny v dutině vstřikovací formy. Ve fázi dotlaku jsou oba proudy stlačeny současně. Tím se snižuje počet vad na výrobku, zvyšuje pevnost u vyztužených plastů, snižuje vnitřní napětí výstřiku a eliminuje se vznik studených spojů (povrchová vada plastových dílů).

Technologie vstřikování do vakua je technologie, kdy se tavenina plastu vstřikuje do dutiny formy, odkud byl v předchozím kroku odsát vzduch.

Inteligentní vstřikování (Intellimould) je proces, při kterém se vstřikuje tavenina plastu do dutiny vstřikovací formy, kde je protitlak vzduchu.

Extruzní vstřikování je proces, při kterém se vstřikuje do dutiny vstřikovací formy nikoliv axiálním pohybem šneku vpřed, ale otáčivým pohybem šneku jako při extruzi. Vstřikovací tlaky jsou výrazně nižší, než v případě klasického vstřikování. Ve fázi dotlaku koná šnek funkci pístu (tlačí taveninu do dutiny formy). Technologie se používá v případě, kdy není dostatečná vstřikovací kapacita stroje.



Obr. 4.59 Princip vstřikování s kompaundací

Kombinace vstřikování a kompaundace (IMC - Injection Moulding Compounder, fa. Kraus Maffei) je technologie, která kombinuje výhody extruzní kompaundace a procesu vstřikování (viz obr. 4.59). Eliminován je proces granulace a opětovného roztavení granulátu plastu. Princip technologie je založen na úpravě strojního vybavení, kdy stroj obsahuje jak extruzní jednotku pro kompaundaci polymeru s plnivý (nejenom vláknennými), tak i vstřikovací jednotku pro jeho plnění do dutiny formy a následný dotlak (viz obr. 4.60).



Obr. 4.60 Příklad stroje pro vstřikování s kompaundací

Technologie vytlačování (extruze) je po technologii vstřikování druhou nejrozšířenější technologií zpracování polymerů. Každý rok je touto technologií zpracováváno více než 90 milionů tun termoplastů. Principem technologie je převedení polymeru do plastického stavu, jeho zhomogenizování a vytlačování přes vytlačovací hlavu s hubicí do volného prostoru. Charakteristickými výrobky jsou polotovary tvaru desek, fólií, trubek a profilů, které mohou být určeny k dalšímu zpracování technologiemi tvarování, vyfukování, svařování nebo lepení (viz obr. 5.1).



Obr. 5.1 Příklad výrobků technologie vytlačování

Mezi **hlavní výhody** a důvody širokého uplatnění technologie vytlačování patří především:

- produktivní kontinuální výroba dílů,
- technologická variabilita (desky, profily, opláštění),
- produkce tenkých i silnostěnných výrobků malých i velkých rozměrů,
- relativně jednoduché výrobní zařízení,
- možnost zpracování vícevrstevných materiálů.

Naopak mezi **hlavní nevýhody** technologie vytlačování patří:

- značné konstrukční omezení výrobků dané jejich kontinuální výrobou,

- problematika narůstání objemu vytlačovaného polymeru,
- nižší výrobní přesnost dílů oproti technologii vstřikování.

V současné době existuje široká škála rozličných typů vytlačovacích strojů. Základním rozdílem mezi jednotlivými konstrukcemi je kontinuální či diskontinuální proces výroby. Kontinuální proces je zajišťován pomocí rotujících členů (kotoučů, šneků) a diskontinuální pomocí posuvných členů (pístu).

Pístové vytlačovací stroje

Mezi zástupce diskontinuálního, cyklického procesu patří jedno či vícenásobné pístové vytlačovací stroje. Výhodami těchto strojů jsou vysoké tlaky (až 300 MPa) a jednoduchost zařízení. Naopak nevýhodou je nízká plastikační kapacita a špatná teplotní homogenita taveniny. Příkladem aplikačního využití jedno pístových vytlačovacích strojů je vytlačování polotovarů z obtížně zpracovávaných materiálů, kterými jsou například vysokomolekulární polyethylen (PE-UHMW) a polytetrafluorethylen (PTFE). Důvodem aplikace vícenásobných pístových vytlačovacích strojů je snaha eliminovat problematiku diskontinuálního procesu.

Diskové vytlačovací stroje

Diskové vytlačovací stroje patří ke kontinuálním výrobním zařízením, které využívají tzv. Weissenbergův jev, projev elasticity taveniny vznikem napětí kolmého k povrchu rotačního tělesa, kdy dochází k vytlačování taveniny. Materiál je mezi statickou a pohyblivou deskou zahříván (teplem i třením), smykově namáhán, což vyvolává v tavenině normálové síly, které zapříčiňují jeho vytlačování středovým otvorem pevné deky. Výhodami diskových vytlačovacích strojů jsou poměrně rychlá plastikace, vysoká homogenita taveniny a možnost zpracovávat i práškové materiály. Naopak nevýhodou jsou nízké vytlačovací tlaky.

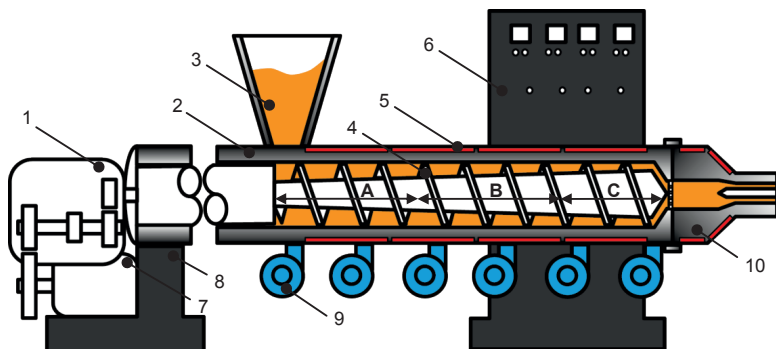
Šnekové vytlačovací stroje

Šnekové vytlačovací stroje jsou vzhledem k jejich univerzálnosti, vysokému poměru ceny a výkonu a spolehlivosti, nejpoužívanějšími vytlačovacími stroji. Skládají se z mnoha funkčních částí (viz obr. 5.2 a obr. 5.3), přičemž základními jsou: násypka, rám, topné, regulační a kontrolní komponenty, řídicí jednotka, elektromotor, vnější i vnitřní plášť plastikační jednotky a šnek. Právě šnek je nejdůležitější součástí, zajišťuje plastikaci, homogenizaci a následné vytlačování materiálu. Za tímto účelem

je v geometrii šneku možno po jeho délce rozlišit tři základní oblasti. První oblastí je *dopravní zóna* (oblast pod násypkou). Úkolem této části šneku je dopravit materiál do dalších zón, částečně jej stlačit (vytěsnit vzduch mezi granulami) a na konci této zóny docílit také jeho ohřev a tavení (vzájemným třením materiálu a předáním tepla od topných elementů). Na dopravní zónu navazuje *kompresní zóna*, v níž dochází k značnému stlačování materiálu a k jeho nejintenzivnějšímu tání. Poslední částí je *homogenizační zóna*, zde je polymer již zcela zplastifikován a dokončuje se jeho homogenizace. Jelikož má každý polymer své specifické vlastnosti (např. tokové, tepelné apod.), není možné navrhnout šnek, kterým by bylo možné vytlačovat všechny typy polymerů. Proto byla vyvinuta velká řada různých typů šneků. Šneky se vzájemně liší délkou jednotlivých zón, průměry, stoupáním, roztečí závitů atd. Příkladem rozdílných typů šneků jsou například šneky se zmenšujícím se úhlem stoupání závitů (vhodné pro PVC), šneky s dlouhou kompresní zónou (vhodné pro ABS, PA), šneky s krátkou kompresní zónou (vhodné pro PP, PA), šneky s hladkým válcovým zakončením (vhodné pro PS), šneky s odplyňovací zónou (určené pro PC, ABS), šneky pro kaučuky, vícechodé, bariérové šneky, které dosahují vysokého výkonu plastikace i mísení při nižších otáčkách (kratší doba plastikace).



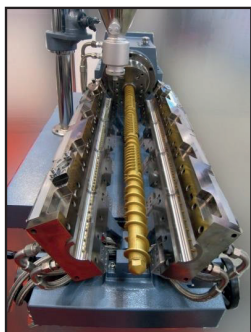
Obr. 5.2 Šnekový vytlačovací stroj



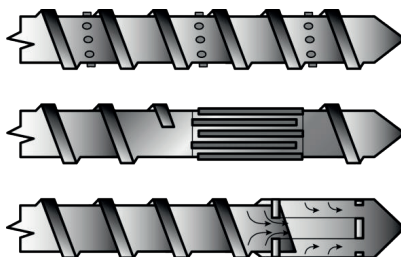
Obr. 5.3 Funkční části vytlačovacího stroje

1 – převodovka; 2 – válec, tělo extruderu; 3 – násypka; 4 – šnek;
 5 – elektrické odporové topení; 6 – řídicí jednotka, ovládání stroje; 7 – elektromotor;
 8 – rám; 9 – ventilátor; 10 – vytlačovací hlava;
 A – dopravní zóna šneku; B – kompresní zóna šneku; C – homogenizační zóna šneku

Šnekové vytlačovací stroje se dle počtu šneků dělí na jedno-, dvou- a vícešnekové. *Jednošnekové vytlačovací stroje* (viz obr. 5.4) zaujímají dominantní postavení při vytlačování desek, folií, trubek a profilů. Další využití mohou nalézt při jednoduché kompaundaci, mísení polymerů s barvivy a některými dalšími aditivy. Pro zvýšení homogenity materiálu mají šneky často mísící elementy, jako například trny, bariéry a torpéda (viz obr. 5.5), jejichž úkolem je rozdělení taveniny na několik proudů, které jsou následně opět před ústím vytlačovací hlavy spojovány.



Obr. 5.4 Jednošnekový vytlačovací stroj



Obr 5.5 Šneky s mísícími elementy

Dvoušnekové vytlačovací stroje jsou aplikovány zejména pro kompaundaci a zpracování materiálů s vlákny nebo procesně citlivé materiály. Rozdíly mezi jednotlivými typy strojů jsou mnohem větší, než je tomu u strojů jednošnekových. Šneky jsou velmi často modulární, složené z více jak osmi vyměnitelných částí sestavovaných dle zpracovávaného materiálu a technologických požadavků výroby. Příklad základního dělení dvoušnekových vytlačovacích strojů včetně jejich možného aplikačního využití je uveden v tab. 5.1 a na obr. 5.6 až obr. 5.8.

Tab. 5.1 Rozdělení dvoušnekových vytlačovacích strojů

Směšovací	Stejný smysl otáčení	• Pomaloběžné extrudery pro profily • Vysokootáčkové extrudery pro kompaundaci
	Opačný smysl otáčení	• Kónické extrudery pro profily • Paralelní extrudery pro profily • Vysokootáčkové extrudery pro kompaundaci
Nesměšovací	Stejný smysl otáčení	• V praxi se nepoužívá
	Opačný smysl otáčení	• Se stejnou délkou šneků • S rozdílnou délkou šneků
	Koaxiální extrudéry	



Obr. 5.6 Šneky paralelních dvoušnekových strojů otáčejících se v opačném smyslu rotace

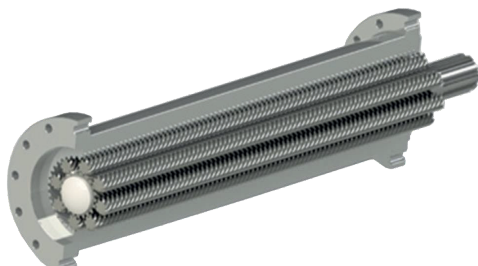


Obr. 5.7 Šneky paralelních dvoušnekových strojů otáčejících se ve stejném smyslu rotace



Obr. 5.8 Kónické šneky dvoušnekových strojů s opačnou osou otáčení

Vícešnekové vytlačovací stroje jsou stroje, které obsahují více jak dva rotující šneky. Mezi dnes již dobře známé a rozšířené stroje patří planetové extrudery, viz obr. 5.9. Vstupní část těchto extruderů (dopravní zóna) vypadá obdobně jako u jednošnekových strojů. Zásadním rozdílem je konstrukce kompresní a homogenizační zóny. Tyto zóny jsou tvořeny z několika (standardně šesti a více) menších planetově rotujících šneků obíhajících kolem velkého centrálního šneku. Výsledkem je dosažení intenzivního tavení a promísení materiálu, při jeho nízkém teplotně smykovém namáhání. Planetové vytlačovací stroje jsou obdobně jako dvoušnekové konické stroje vhodné pro zpracování vysoce citlivých materiálů, kde hrozí nebezpečí jejich degradace (např. PVC).



Obr. 5.9 Planetové uspořádání šneků



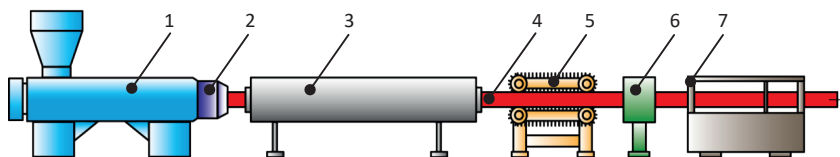
Prvními vytlačovacími stroji byly stroje pístové určené pro výrobu profilů z elastomerů. Zpracování termoplastů na elektricky vyhřívaných jednošnekových strojích je datováno k roku 1935 (Německo). Následně byl v krátké době patentován i dvoušnekový způsob vytlačování (Itálie).

5.1

Výroba trubek a profilů

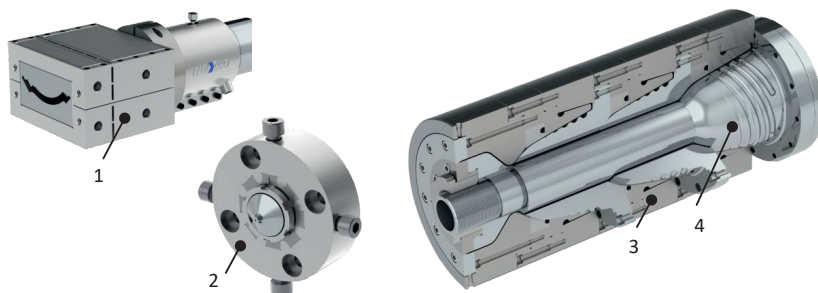
Jedním z nejtýpčtějších produktů technologie vytlačování jsou trubky z PVC, PE-HD, PE-LD, PP, PA, POM a PBT, které mohou dosahovat až průměru 1 600 mm a tloušťky stěny 60 mm a dále jednoduché nebo několikakomorové profily z PVC, PS, PMMA, PC a POM. Příklad běžného uspořádání výrobní linky trubek a profilů je uveden na obr. 5.10. Hlavními částmi jsou šnekový extruder, vytlačovací hlava

s hubicí (v případě trubek vytlačovací hlava s trnem), kalibrační a chladicí jednotka, odtahovací a dělicí zařízení.



Obr. 5.10 Základní složení linky pro výrobu trubek a profilů

1 – extruder; 2 – vytlačovací hlava; 3 – kalibrační jednotka, chlazení; 4 – vytlačovaná trubka či profil; 5 – odtahovací zařízení; 6 – potiskovací, měřicí či další doplňková stanoviště; 7 – dělicí zařízení



Obr. 5.11 Podélná vytlačovací hlava pro vytlačování trubek a profilů

1 – koncová část vytlačovací hlavy profilů; 2 – koncová část vytlačovací hlavy trubek; 3 – plášť základní části vytlačovací hlavy; 4 – trn s rozvaděčem proudu

Vytlačovací hlava

Z hlediska finální kvality dílu je kromě homogenity taveniny plastu důležité také jeho tvarování průchodem přes vytlačovací hlavu, kde je materiál značně teplotně a tlakově namáhán. Pro správnou funkci vytlačovací hlavy musí být dodrženo mnoho zásad. Pravděpodobně tou nejdůležitější je plynulý průchod taveniny. Špatná konstrukce vytlačovací hlavy může zapříčinit tvorbu vrásnité struktury a nerovnoměrnou obvodovou rychlost vytlačování, jež ovlivňují finální vlastnosti polotovaru. Pro výrobu trubek a profilů jsou používány zejména *podélné*, ale i *příčné* vytlačovací hlavy, které jsou vhodné pro vytlačování trubek a profilů menších

rozměrů. Příklad typického konstrukčního řešení podélné vytlačovací hlavy je znázorněn na obr. 5.11.

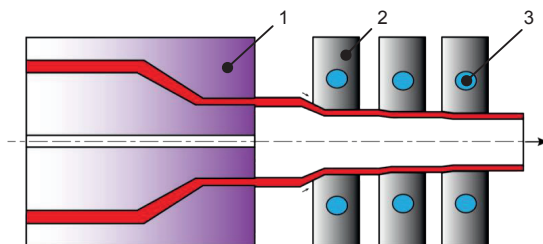
Kalibrace trubek a profilů

Při průchodu taveniny vytlačovací hlavou dochází k jejímu stlačování, které při přechodu do volného prostoru způsobuje narůstání rozměrů profilu, viz tab. 5.2. Příčinou tohoto nežádoucího efektu (tzv. Barus efekt) je viskoelastické chování polymerních materiálů. Kromě materiálu má na úroveň narůstání profilu vytlačovaného polotovaru vliv také rychlost vytlačování a geometrie vytlačovací hlavy. Pro dosažení přesných rozměrů dílu (eliminaci pulzace materiálu a rozdílů ve vstupní kvalitě materiálů) jsou proto přímo za vytlačovací hlavy umisťována kalibrační zařízení, jejichž hlavním úkolem je kalibrace rozměrů profilu a jejich fixace ochlazením. Dle kalibrovaných rozměrů mohou být kalibrační jednotky rozděleny na kalibrace vnějších a vnitřních rozměrů a dle vyvozené síly na kalibrace frikční (třecí), přetlakové a podtlakové.

Tab. 5.2 Narůstání profilu v oblasti ústí vytlačovací hlavy

Materiál	PE – HD	PE – LD	PVC	PS	PA 6.6	PC
Narůstání profilu	15÷60 %	30÷60 %	30÷35 %	10÷20 %	5÷15 %	5÷10 %

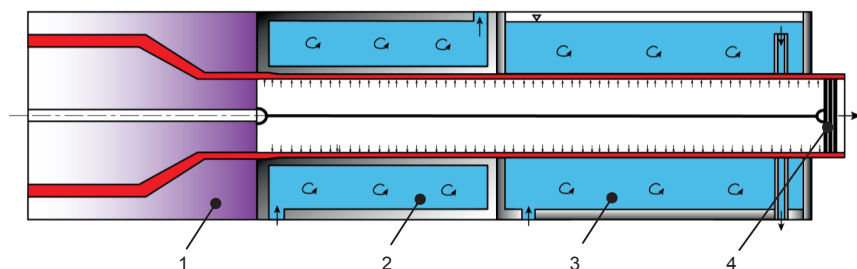
Vnější frikční (třecí) kalibrace je používána pro jednoduché otevřené profily, viz obr. 5.12. Vytlačovaný profil je protahován rychlostí $(1 \div 4,5)$ m/min přes chlazené elementy (desky, pouzdro), kde postupně dochází k jeho redukci rozměrů (kalibraci). Kalibrační elementy jsou často pro zvýšení jejich životnosti oplášťovány materiály s nízkým koeficientem tření (PTFE).



Obr. 5.12 Příklad vnější frikční (průvlakové) kalibrace

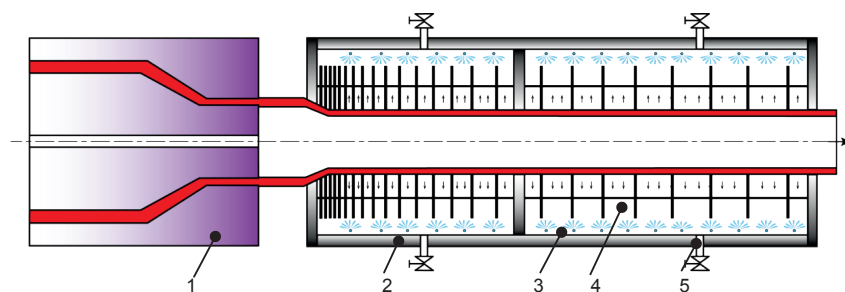
1 – vytlačovací hlava; 2 – kalibrační elementy; 3 – chladicí kanály

Kalibrace vnějších rozměrů pomocí tlakového vzduchu je používána pro kalibraci profilů (trubek) větších rozměrů (pro trubky z PVC o průměru > 350 mm, z PP o průměru > 100 mm). Příklad kalibračního zařízení je znázorněn na obr. 5.13. Vytlačovaný profil je z vnější strany kalibrován průchodem přes vodou chlazené kalibrační pouzdro, na které je přitlačován pomocí přetlaku vzduchu přivedeného vytlačovací hlavou s dutým trnem. K vyvození potřebného tlakového vzduchu je nutno zajistit vnitřní utěsnění profilu, viz obr. 5.13.



Obr. 5.13 Přetlaková kalibrace trubky

1 – vytlačovací hlava; 2, 3 – vodou chlazené kalibrační pouzdro;
4 – zátka umožňující tvorbu přetlaku



Obr. 5.14 Vakuová kalibrace trubky

1 – vytlačovací hlava; 2, 4 – kalibrační pouzdro; 3 – chlazení injektáží kapek vody;
5 – vakuový ventil

Kalibrace vnějších rozměrů pomocí podtlaku (vakua) je nepoužívanější způsob kalibrace, který je vhodný pro jednoduché i komplexní profily (nutno kalibrovat ve více krocích). Důvodem je vysoká rychlost kalibrace a nízké provozní náklady. Příklad podtlakové kalibrace je uveden na obr. 5.14. Hlavní rozdíl oproti přetlakové

kalibraci je ve způsobu vyvození přitlačné síly, která v tomto případě působí z vnější strany profilu. Profil je přitahován ke kalibračnímu pouzdru vytvořeným podtlakem.

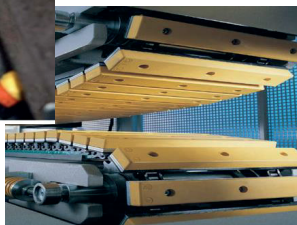
Vnitřní kalibrace (oproti vnější kalibraci se jedná o méně častý způsob kalibrace) je nejčastěji používána pro kalibraci trubek. Principem této kalibrace je přetahování vytlačovaného profilu přes vodou chlazené trny. Potřebná kalibrační síla je vyvozená procesem tuhnutí, kde dochází ke smršťování profilu na trn.

Chlazení výroby

Během procesu kalibrace dochází k fixaci a chlazení vytlačovaného profilu. K tomuto účelu je v závislosti na aplikované technologii kalibrace a vytlačovaném materiálu možné použít chlazení přímým kontaktem (průchodem přes vodní lázeň, injektáží kapek vody, viz obr. 5.15, vodní mlhou) či nepřímým kontaktem s vodou (přestupem tepla přes kalibrační pouzdra). Potřebný čas chlazení a tedy i délka výrobní linky se liší v závislosti na rozměrech vytlačovaných profilů, ale také v závislosti na použitém materiálu (linka pro PE potrubí a profily je delší než linka pro polotovary z PVC).



Obr. 5.15 Příklad chlazení
injektáží kapek vody



Obr. 5.16 Odtah typu
„Caterpillar“



Obr. 5.17 Automatické dělení profilu

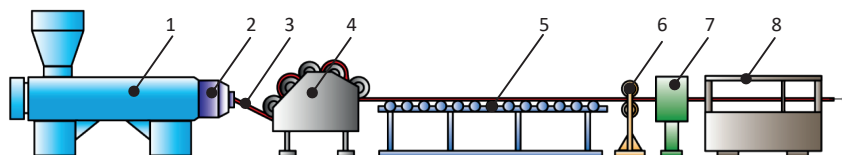
Odtah a dělení výrobku

Po kalibraci a chlazení polotovaru následuje jeho odtah. Úkolem odtahu je zajištění rovnoměrného kontinuálního posunu vytlačovaného profilu, čímž je v přímém důsledku ovlivněna i jeho rozměrová přesnost. Rychlost odtahu je proto velmi přesně kontrolována a řízena. Mezi nejčastější typy odtahů patří „caterpillar„ (viz obr. 5.16) a „gripping wheel“. Finální operací výrobní linky trubek a profilů je jejich automatická kontrola, potiskování a dělení. K dělení jsou využívány kotoučové nebo nožové pily, speciálně navržené pro řezání polymerních materiálů. Velmi často je využíváno také automatické oddělovací zařízení, viz obr. 5.17. Dělicí jednotka se posouvá podél vytlačovaného profilu, v definované vzdálenosti provede oddělení profilu a posouvá se zpět do výchozí polohy.

5.2

Výroba desek a fólií

Dalšími díly vyráběnými technologií vytlačování jsou desky a fólie. Základní rozdíl mezi deskou a fólií je v tloušťce stěny. Fólie jsou charakteristické velice malou tloušťkou stěny, která se standardně pohybuje v rozmezí $(0,2 \div 0,5)$ mm. Pro vytlačované desky je typické rozpětí tlouštěk stěny $(0,5 \div 25)$ mm. Proces výroby obou typů polotovaru je velmi podobný, viz obr. 5.18. Materiál je přes vytlačovací hlavu s hubicí vytlačován do volného prostoru, poté následuje jeho kalibrace průchodem přes přesazené válce (jiný počet válců je pro fólie a desky), chlazení a ořez (dělení).

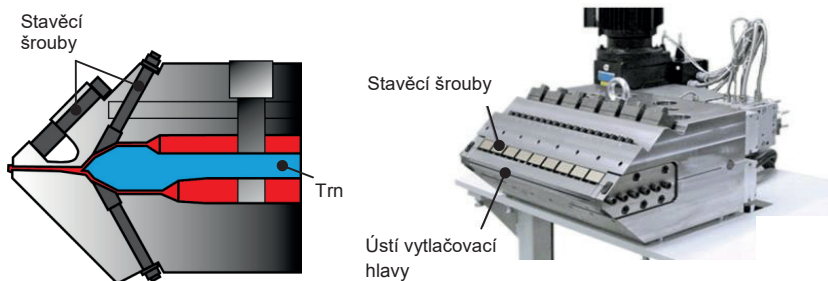


Obr. 5.18 Výrobní linka na výrobu desek

1 – extruder; 2 – vytlačovací hlava; 3 – vytlačovaná deska, fólie; 4 – kalibrační válce;
5 – válečková trať (chlazení); 6 – odtahovací zařízení; 7 – potiskovací, měřicí či další
doplňková stanoviště; 8 – dělicí zařízení

Vytlačovací hlava

Pro výrobu desek a fólií jsou používány speciální příčné vytlačovací hlavy (širokoštěrbínové vytlačovací hlavy), viz obr. 5.19. Z charakteru výrobků (rovinný díl) a procesu je zřejmé, že je zde ještě mnohem více důležitá otázka rovnoměrnosti toku taveniny a narůstání rozměrů profilu v oblasti ústí hlavy. Ve vytlačovacích hlavách jsou proto konstruovány distribuční a relaxační kanály. Moderní výrobní zařízení navíc obsahují rovněž servopohonem ovládané posuvné elementy (stavěcí šrouby), které po celé šířce hlavy umožňují změnu nastavení tloušťky vytlačovaného profilu.



Obr. 5.19 Podélný řez širokoštěrbínovou vytlačovací hlavou

Kalibrace desek a fólií

Kalibrační zařízení pro výrobu fólií a desek se skládá z temperovaných (chlazených) a povrchově leštěných (případně chromovaných) kalandrovacích válců. Pro výrobu desek jsou používány tři vzájemně přesazené kalandrovací válce, viz obr. 5.20, pro výrobu fólií jsou to pouze válce dva. Hlavní problematikou procesu kalibrace je tuhost válců (průhyb) a nerovnoměrná rychlost vytlačování (pulzace šneku). Tyto aspekty přímo ovlivňují rovnoměrnost tloušťky desek, která klesá směrem k jejich okrajům (průměrný rozdíl je 3 %). Rozdíly v distribuci tlouštěk stěn se zvyšují s tloušťkou a rozměry vytlačovaných polotovarů. Jednou z možností jak eliminovat tento nežádoucí efekt je použití detekčního zařízení (umístěného za



Obr. 5.20 Kalibrace tloušťky stěny

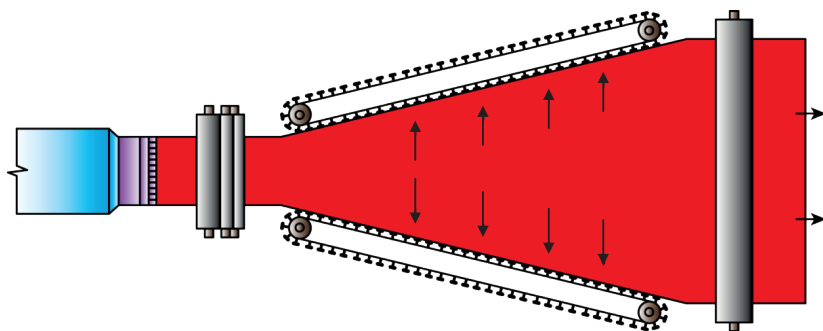
kalibračními válci), které umožní společně se stavěcími šrouby vytlačovací hlavy korekci extrudované tloušťky stěny profilu v potřebných oblastech. Problematika pulsace šneku může být eliminována přidáním zubového čerpadla před vytlačovací hlavu.

Ořez polotovaru

Nerovnoměrnost vytlačování, narůstání rozměru profilu v ústí vytlačovací hlavy, pulzace šneku, průhyb kalibračních válců jsou příčiny rozdílných šířek vytlačovaných rovinných polotovarů. Pro docílení jednotné šířky je nutné zařadit do výrobní linky operaci kontinuálního ořezu. Ořez je nejčastěji realizován pomocí kotoučových nožů.

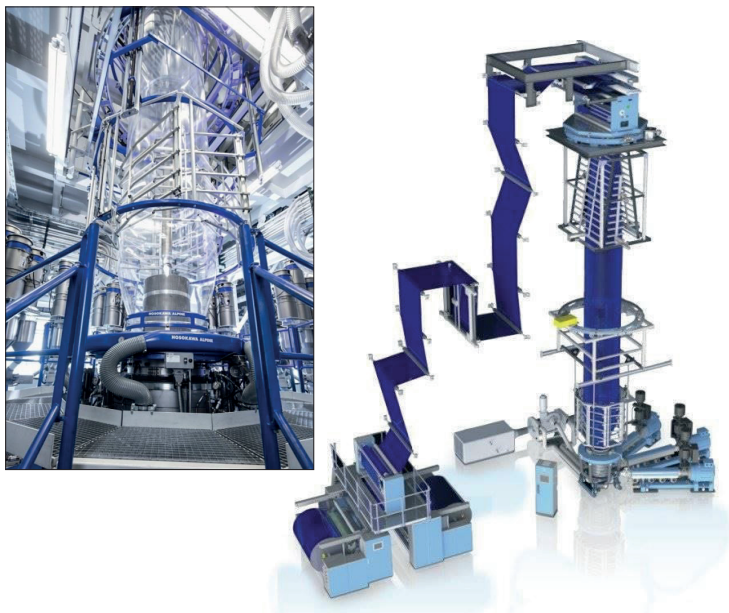
Dloužení (orientace) polotovaru

U výroby fólií je velmi často zařazovanou výrobní operací její dloužení. Účelem této operace je cílená orientace makromolekul (při definované teplotě fólie), která zapříčiňuje narůstání pevnosti materiálu ve směru dloužení, zvyšuje bariérovou ochranu fólie (snižuje propustnost pro plyny a páry) a snižuje tloušťku její stěny (finanční úspora). Polymerní fólie jsou orientovány buď v jednom směru (monoaxiálně), což je nejčastěji realizováno rozdílnou obvodovou rychlostí odtahovacích válců nebo ve dvou směrech (biaxiálně), viz obr. 5.21. V případě opětovného ohřátí dloužených fólií dochází k reorientaci makromolekul do původního tvaru, folie se smršťuje.



Obr. 5.21 Princip biaxiálního dloužení fólií

Jinou, a to vysoce produktivní možností výroby fólií (několik miliónů tun ročně), je *technologie vyfukování vytlačovaného profilu ve tvaru trubky*. Princip technologie spočívá ve vytlačování trubky, která je ještě v plastickém stavu nafouknuta stlačeným vzduchem, protažena odtahovacím zařízením (nejčastěji je používán horní odtah), chlazena a navíjena na válec (viz obr. 5.22). Výhodou technologie je vysoká produktivita výroby, velké zeslabení vyfukované trubky a tedy možnost dosažení velmi malých tlouštěk stěn (biaxiální orientace fólie). Pouhou změnou procesních parametrů lze změnit rozměry fólie (není potřeba změny přístrojového vybavení). Naopak za nevýhody lze považovat velké prostorové nároky pro zařízení (výška zařízení je až 15 metrů) a vysokou náročnost na kvalifikaci jeho obsluhy. Na výsledné vlastnosti fólie, její rozměry, orientaci makromolekul a krystalizaci mají značný vliv procesní parametry, zejména rychlost vytlačování, chlazení, objem plynu nebo rychlost odtahu.

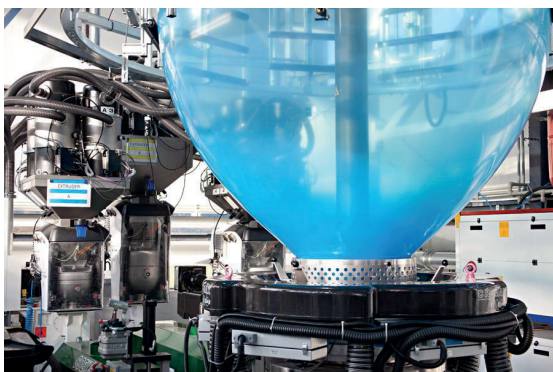


Obr. 5.22 Princip technologie vyfukování fólií



Technologií vyfukování fólií se vyrábí většina plastových sáčků. Díky biaxiální orientaci fólií je možno dosáhnout tloušťky stěn sáčku až několik stovek mikrometrů.

Pro tvorbu vyfukovaného profilu jsou nejvíce používány speciální příčné vytlačovací hlavy (viz obr. 5.23) se spirálově vedeným tokem taveniny v drážce vytlačovacího trnu. Efekt spirálového rozvodu taveniny umožňuje eliminaci tvorby studených spojů, optických a mechanických změn vlastností, které jsou charakteristické pro standardní příčné vytlačovací hlavy.



Obr. 5.23 Vytlačovací hlava pro vyfukování fólií

Vyfukování fólií

Vyfukování fólií je realizováno pomocí vzduchu o tlaku $(0,15 \div 1)$ kPa, který je přiváděn přes vytlačovací hlavu. Jak již bylo uvedeno výše, objem použitého tlakového média má zásadní vliv na rozměry fólie, optické vlastnosti i orientaci makromolekul. Při navýšení objemu plynu dochází ke ztenčení stěny fólie, ale i ke zvětšení vyfukovaného průměru a zvýšení míry orientace makromolekul. Po vytlačení trubky je tato ochlazována vzduchem, který je přiváděn chladícím prstencem a rovnoměrně ofukuje fólii po celém obvodu.

Chlazení fólií

Chlazení je u technologie vyfukování fólií zajištěno pomocí vzduchu z vnější i vnitřní strany fólie. Kromě standardního vzduchu může být použit i chlazený vzduch či „vodní mlha“. Volba metody a použitého média závisí vždy na ekonomických podmínkách výroby.

Vedení a odtah fólií

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje rozměry i užité vlastnosti fólie je vedení a odtah fólie. Pro zajištění rovnoměrné tloušťky fólie jsou v případech dlouhých drah vyfukovaných profilů umísťovány po jejich délce podpory (nejčastěji válečkové), viz obr. 5.22. Tyto podpory zamezují vychýlení profilu. Vyfouknutý profil se zplošťuje mezi skládacími deskami a uzavírá odtahovacími válci, které jsou obvykle opatřeny vrstvou vodivé pryže, aby bylo možno odvádět elektrostatický náboj. Vlastní odtah ochlazené fólie je realizován pomocí válečkových tratí.

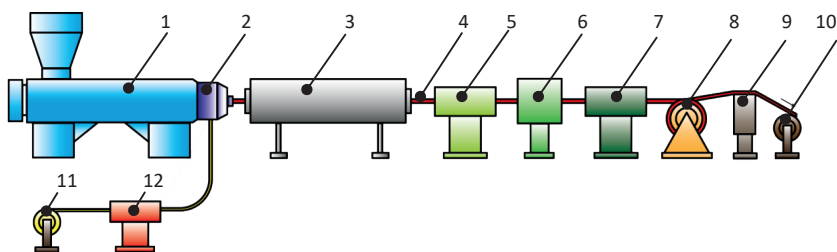
Nejpoužívanějšími materiály pro technologii vyfukování fólií jsou PE a PP. Tyto materiály jsou charakteristické svými nepolárními vlastnostmi, dají se obtížně potiskovat a snadno se elektrostaticky nabíjí. Proto je nutné do výrobního procesu aplikovat dodatečnou operaci, která tyto nežádoucí jevy eliminuje. Změna polarity fólií je nejčastěji realizována cílenou oxidací jejich povrchu nebo koronovým výbojem (ionizací vzduchu vysokým napětím). Následný potisk musí být proveden do několika dnů po této operaci.

5.4

Opláštěvání

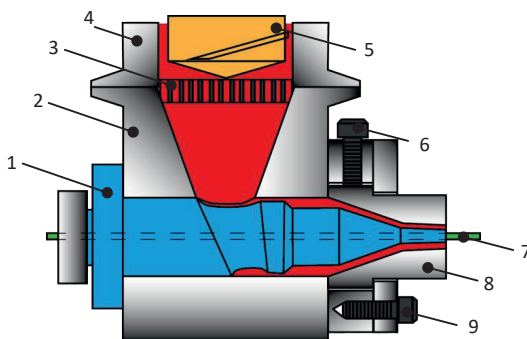
Technologie vytlačování je rovněž využívána pro *opláštění trubek, vodičů a drátů* o průměru (0,1 ÷ 10) mm. Příklad výrobní linky je uveden na obr. 5.24. Dráty, vodiče, či trubky jsou před vstupem do vytlačovací hlavy předeřhřívány, čímž se zajistí lepší adheze polymeru a zamezí se vnášení vlhkosti do výrobního procesu. Vlastní proces opláštění je realizován v příčných vytlačovacích hlavách s trnem, které se standardně skládají ze dvou hlavních zón (dopravní a axisymetrické), viz obr. 5.25. Úkolem první zóny je dosažení rovnoměrné distribuce taveniny (změna proudu taveniny o 90°). Druhá axisymetrická část vytlačovací hlavy nejprve umožňuje stlačování polymeru

mezi trnem a pláštěm hlavy (tlak kolem 50 MPa) a následně i vlastní proces opláštění, kontakt taveniny s vodičem, drátem či trubkou. Opláštěné předměty jsou dále chlazeny průchodem přes vodní nádrž, odtahovány, navíjeny či děleny. U oplášťování vodičů jsou do procesu zařazována také kontrolní stanoviště, která umožňují detekci vad, kontrolu symetrie a tloušťky oplášťovaného profilu. Všechny tyto faktory mají zásadní vliv na kvalitu nanášené izolační vrstvy. Velmi důležitým parametrem je tloušťka nanášené vrstvy, která nezávisí pouze na nastavených procesních parametrech (otáčkách šneku, teplotě taveniny) a konstrukci vytlačovací hlavy, ale také na rychlosti odtahování, rozměru drátu a použitém materiálu.



Obr. 5.24 Výrobní linka pro oplášťování vodičů

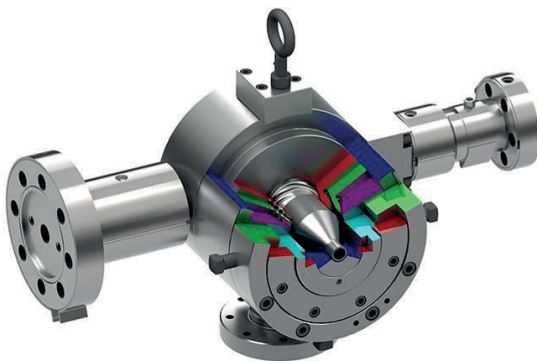
1 – vytlačovací stroj; 2 – vytlačovací hlava; 3 – chlazení; 4 – opláštěný vodič; 5 – kontrola izolačních vlastností; 6 – kontrola rozměrů vodiče; 7 – kontrola excentricity; 8 – odtah; 9 – finální kontrola; 10 – navíjení opláštěného vodiče; 11 – cívka vodiče; 12 – předehřev



Obr. 5.25 Konstrukce vytlačovací hlavy pro opláštění vodičů

1 – dutý trn; 2 – základní (vstupní) část vytlačovací hlavy; 3 – lamač; 4 – válec, tělo extruderu; 5 – šnek; 6 – korekce souososti vytlačování; 7 – opláštěvaný drát; 8 – tvarovací část vytlačovací hlavy (hubice); 9 – fixace tvarové části hlavy

Koextruze je způsob výroby vícevrstvých polotovarů a produktů, kde dochází ke kontinuálnímu vytlačování a tvarování několika materiálů současně, viz obr. 5.26. Technologii koextruze lze aplikovat pro všechny uvedené technologie vytlačování (výrobu trubek a profilů i výrobu desek a fólií). Oproti standardnímu procesu vytlačování s jednou vytlačovací jednotkou a hlavou je při vícevrstvě vytlačování (koextruzi) použito několik vytlačovacích jednotek, z nichž jsou materiály současně vytlačovány do jedné vytlačovací hlavy. Důvodem použití koextruze je ekonomické i kvalitativní hledisko, neboť při výrobě vícevrstvých dílů lze pro jejich povrchovou vrstvu použít kvalitního materiálu s odpovídajícími mechanickými a bariérovými vlastnostmi nebo vhodnou chemickou odolností, zatímco středové vrstvy mohou obsahovat levnější variantu plastů včetně recyklátu. K výrobě vícevrstvých dílů lze použít materiály s dobrou vzájemnou adhezí i materiály se špatnou adhezí kompatibilitou, avšak za předpokladu použití vhodného adherendu.



Obr. 5.26 Koextruzní vytlačovací hlava pro výrobu trubek

Vyfukování je po technologii vstřikování a vytlačování třetí nejrozšířenější zpracovatelskou technologií polymerních materiálů. Jedná se o nízkotlakou technologii, která má majoritní postavení při výrobě více či méně uzavřených výrobků o objemu několika mililitrů až po velkorozměrné díly o objemu desítek litrů. Vyfukované díly se uplatňují především v automobilovém, dopravním a obalovém průmyslu v podobě nádrží na kapaliny, kanystrů, dílů pro rozvod vzduchu, sudů a lahví. Dále se používá při výrobě hraček, elektroniky, farmaceutických, zahrádkářských, sportovních či volnočasových potřeb (viz obr. 6.1). Principem technologie je plastikace materiálu (granulátu), výroba polotovaru (vytlačováním nebo vstřikováním), tvarování polotovaru v plastickém stavu ve vyfukovací formě pomocí přetlaku vzduchu, chlazení a odformování výrobku.



Obr. 6.1 Příklady produktů vyráběných technologií vyfukování

Mezi **hlavní výhody** a důvody širokého uplatnění technologie vyfukování patří především:

- relativně levné a jednoduché výrobní zařízení vhodné pro středně a velkosériovou výrobu,
- menší smykové namáhání materiálu oproti technologii vstřikování,

- možnost použití materiálů nižších pevnostních charakteristik pro vyfukovací formy (aplikace vysoce vodivých materiálů),
- možnost výroby vícevrstvých výrobků.

Naopak mezi **hlavní nevýhody** technologie vyfukování patří:

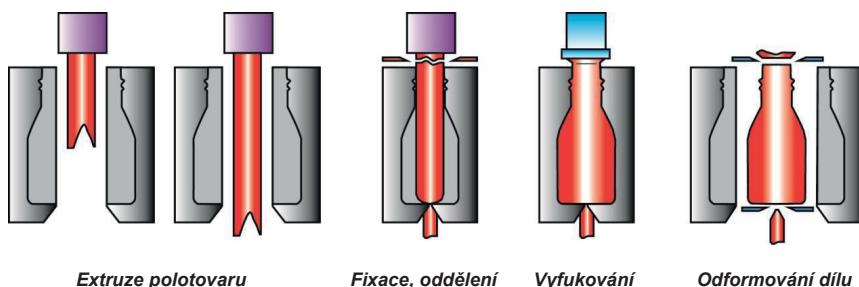
- geometrické omezení tvaru výrobku,
- nižší výrobní přesnost dílů oproti technologii vstřikování.

Technologii vyfukování lze rozdělit na dvě základní metody: *vytlačovací (extruzní) vyfukování* a *vstřikovací vyfukování*. Obě metody se vzájemně liší zejména způsobem výroby polotovaru. Existují však také speciální techniky pro tvarově složitější díly, které nejsou předmětem této kapitoly, zabývat se jimi budeme v navazujícím magisterském studiu.

6.1

Vytlačovací vyfukování

Technologie vytlačovacího vyfukování (viz obr. 6.2) využívá komplexního výrobního zařízení, které umožňuje tvorbu polotovaru extruzí a zároveň jeho vyfukování, chlazení a následné odformování dílu. Pro technologii vytlačovacího vyfukování jsou aplikovány obdobné materiály jako pro technologii vytlačování (např. PVC-P, PE-HD, PE-LD, PP, PA, POM, PBT, PS a PC). Jednoznačně nejpoužívanějším materiálem (vzhledem k jeho nízké ceně, dobrým zpracovatelským a užitným vlastnostem) je PE. Technologie vytlačovacího vyfukování je velmi variabilní proces, pomocí něhož lze vyrábět jedno či vícevrstvé díly malých rozměrů (koextruze), například lahvičky od kosmetických a mycích prostředků, hračky apod., tak i středně a velkoobjemové díly, jako jsou konve, nádrže, sudy ad.



Obr. 6.2 Princip vytlačovacího vyfukování

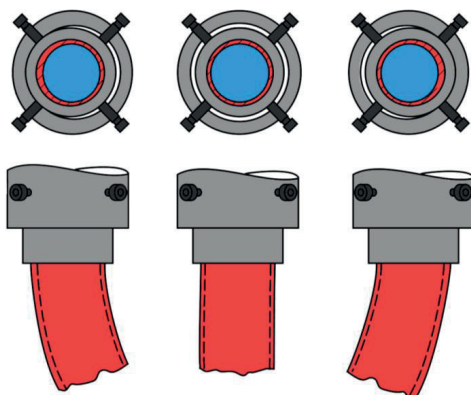
Výroba polotovaru

Výroba polotovaru (trubky, tzv. *parizonu*) je u vytlačovacího vyfukování realizována extruzní jednotkou, která konstrukčně odpovídá klasické extruzní jednotce pro výrobu trubek. Materiál (granulát) je z násypky stroje dopravován do tavicí komory pomocí šneků, postupně je stlačován, taven a homogenizován. Příklad doporučených výstupních teplot tavenin z extruderu je pro vybrané polymery uveden v tab. 6.1. Na výstupní části extruzní jednotky je připojena jedno či vícenásobná příčná vytlačovací hlava s axiálně pohyblivým trnem. Pozice trnu vymezuje mezeru mezi trnem a tělem hlavy a tím předurčuje tloušťku vytlačovaného polotovaru (parizonu). Jakmile polotovar, schopný plastického přetvoření, dosáhne požadované délky, tak se odřízne (např. žhavicím drátkem) a je uzavřen ve formě. Zavřením formy dojde k vyhlazení hrdla a ke svaření dna. Následně se přivede stlačený vzduch a dojde k vyfouknutí.

Hlavní problematikou vytlačování polotovaru je souosost vytlačování (viz obr. 6.3), narůstání jeho profilu v ústí vytlačovací hlavy (vliv efektu stlačitelnosti) a jeho protahování (vlivem gravitačních sil). Všechny tyto aspekty významně ovlivňují rovnoměrnost distribuce tloušťky polotovaru a tím i finálního výrobku.

Tab. 6.1 Doporučené teploty taveniny

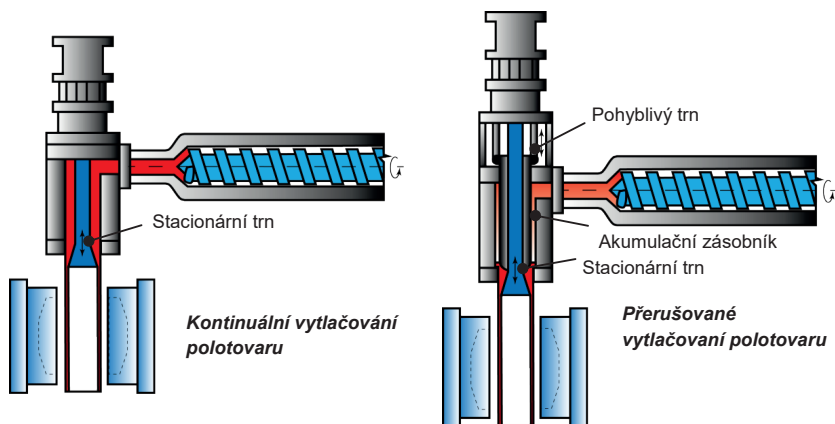
Materiál	Doporučená teplota na konci extruze
PE-HD	(200 ÷ 215) °C
PE-LD	(170 ÷ 200) °C
PVC	(160 ÷ 190) °C
PS	(180 ÷ 235) °C
PC	(240 ÷ 270) °C
PA 6.6	(270 ÷ 285) °C



Obr. 6.3 Korekce souososti vytlačování polotovaru

Negativní efekt protahování polotovaru se projevuje zejména u tlustostěnných dílů větších objemů. U těchto výrobků není proto aplikováno klasické kontinuální

vytlačování, ale *přerušované vytlačování*, kde je zhomogenizovaný materiál postupně akumulován před čelem šneku či ve speciální akumulční hlavě (viz obr. 6.4). Po plastikaci dostatečné dávky materiálu následuje jeho velmi rychlé vytlačení z vytlačovací hlavy pomocí axiálního pohybu šneku či pístu v akumulčním zásobníku. Výsledkem je rovnoměrnější distribuce tloušťky stěny polotovaru po jeho délce.



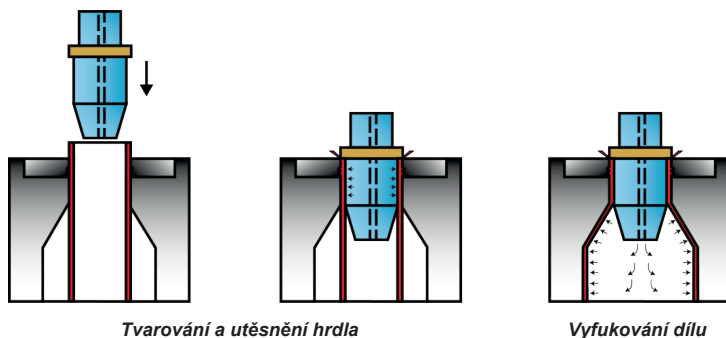
Obr. 6.4 Princip kontinuálního a přerušovaného způsobu tvorby polotovaru

Vyfukování polotovaru

Hlavním úkolem této fáze procesu je zajištění rychlého a bezpečného vytvarování polotovaru ve formě do žádaného tvaru výrobku. K tomuto účelu je používán stlačený vzduch o velikosti $(0,2 \div 0,6)$ MPa. Tlakový vzduch je standardně přiváděn do vnitřních prostor polotovaru pomocí *vyfukovacích trnů*, jejichž úkolem je i tvorba a kalibrace hrdla (závitu) výrobku (např. lahvíček, kanystrů, sudů apod.), viz obr. 6.5. Další možností přívodu tlakového vzduchu je aplikace jedné či více *vyfukovacích jehel*. Vyfukovací jehly jsou používány pro zcela uzavřené produkty či produkty s velmi malým otvorem, jako například dětské hračky, míče atd.

Pro rychlé a bezproblémové vytvarování polotovaru, kde dochází až k 80 % narůstání jeho objemu a pro dosažení požadované kvality výrobků, je nutné zajistit odpovídající odvzdušnění (odvětrání) formy. U menších a tvarově jednoduchých výrobků postačují k odvzdušnění nerovnosti v dělicí rovině. U tvarově složitějších

a objemnějších dílů jsou velmi často do forem přidávány odvětrávací drážky či kanálky, viz obr. 6.6.



Obr. 6.5 Vyfukování polotovaru pomocí trnů

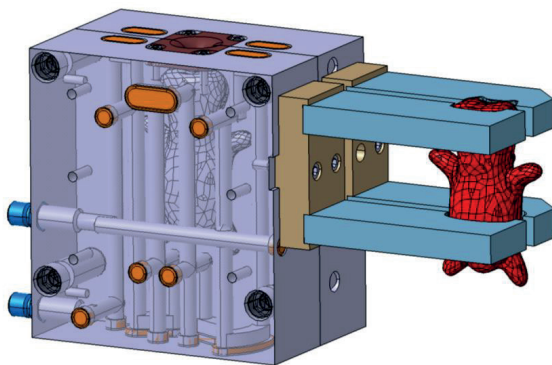


Obr. 6.6 Vložky s odvětrávacími kanály či drážkami

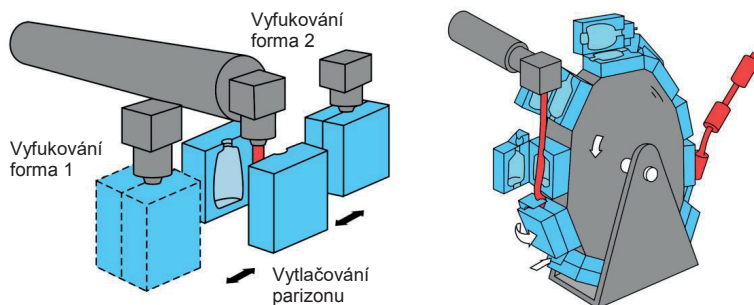
Chlazení výrobku

Polymery jsou obecně špatnými vodiči tepla, proto je proces chlazení (z hlediska produktivity výroby) tím nejvíce omezujícím faktorem. V závislosti na tvaru, velikosti, tloušťce a použitém materiálu výrobku odpovídá doba chlazení řádově desítkám sekund až minut, což v procentuálním vyjádření odpovídá $(50 \div 90)$ % celkové doby výroby. Ve fázi vyfukování je teplo odvedeno pomocí dvou vzájemně závislých chladicích systémů - vnějšího a vnitřního. Za vnější chladicí systém je označován způsob, kdy teplo je z výrobku odvedeno přestupem mezi stěnou výrobku, stěnou formy a chladicími kanály, v nichž cirkuluje teplotonosné médium (viz obr. 6.7). Vnitřní chladicí systém je systém zajišťující tepelnou výměnu vnitřních částí dutých výrobků prouděním plynného média. Jsou-li porovnány oba systémy, je zřejmé, že vnější chladicí systém dosahuje výrazně vyšších účinností. Důvodem je obecně špatná

tepelná vodivost vyfukovacího (chladicího) plynného média, kterým je standardně vzduch o teplotě okolí. Proto je kladen velký důraz na správný návrh chladicího systému vyfukovací formy.



Obr. 6.7 Příklad vnějšího systému chlazení vyfukovací formy



Obr. 6.8 Vytlačovací vyfukování s pohybujícími se formami

Protože fáze chlazení představuje nejdelší časový úsek výrobního procesu a ovlivňuje tak produktivitu výroby, jsou v technické praxi provedena řešení, která tuto produktivitu zvyšují. Nejjednodušší z nich je použití dvou, střídavě se pohybujících forem, případně horizontálního či vertikálně rotujícího kola. Tento způsob výroby, kde je použit velký počet forem, umožňuje dosažení výrobního cyklu pouhých několik sekund, viz obr. 6.8.

Odformování výrobku a ořez

Velmi důležitým krokem, předcházející odformování výrobku, je dodržení dostatečného času pro odvod tlakového vzduchu, kterým byl výrobek tvarován. V opačném případě by mohlo dojít ke shození výrobku z vodících elementů, k jeho zaklínění v dutině formy, ale i k jeho poškození. Vlastní proces odformování je u technologie vyfukování velice jednoduchý, je zajištěn smrštěním materiálu, kdy výrobek odlehne od stěn formy. K odformování výrobku tak není zapotřebí žádných speciálních mechanismů (vyhazovacích kolíků, desek, kroužků apod.), jako u technologie vstřikování.

Vyfukovací stroje

Stroje pro vytlačovací vyfukování je možné rozdělit do několika kategorií, dle požadavků na jejich produktivitu a charakteru finálního produktu, viz tab. 6.2.

Tab. 6.2 Základní rozdělení vyfukovacích strojů pro technologii vytlačovacího vyfukování

Typ	Aplikace, poznámky
Kontinuální vytlačování	- výrobky menších objemů a tloušťek stěn - problematika protahování parizonu
S posuvným pohybem formy	- standardní zařízení - vhodné pro střední a větší výrobní série
Rotující kolo	- vysoká produktivita výroby - vhodné pro velké výrobní série
Přerušované vytlačování	- výrobky velkých objemů a tloušťek stěn - eliminace problematiky protahování parizonu
S posuvným pohybem šneku	- méně časté - vhodné pro střední, větší i velké výrobní série
Akumulátor	- velmi časté - vhodné pro střední, větší i velké výrobní série

6.2

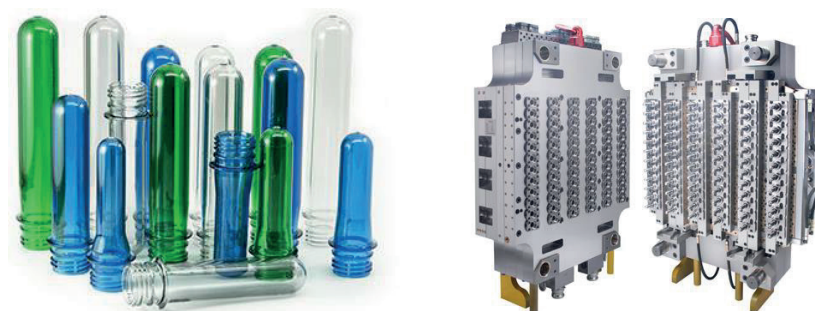
Vstřikovací vyfukování

Vstřikovací vyfukování je další možnou alternativou výroby dutých těles, kdy je polotovar - předlisek (tzv. preforma) vyráběn vstřikováním. Výhodou technologie vstřikovacího vyfukování je, že pokud je při vstřikování preforem použito horkých trysek (vyhřívaných vtoků), tak neexistuje technologický odpad. Výrobek neobsahuje svar, dno a hrdlo se závitem je vysoké kvality, odpadá problematika protahování

polotovaru (parizonu), souosost vytlačování atd. Naopak k nevýhodám patří nutnost použití dvou forem (vstřikovací a vyfukovací), plast musí být vhodný jak pro vyfukování, tak i pro vstřikování, velikost výrobků je omezena velikostí předlisku, složité a drahé výrobní zařízení. Nejčastěji zpracovávanými materiály jsou PET, PVC, PE, PC a PA. Tokové vlastnosti těchto materiálů se od běžně používaných materiálů pro technologii vstřikování liší. Z ekonomického hlediska je technologie vstřikovacího vyfukování využívána především pro velkosériovou výrobu dílů obalového průmyslu, zejména PET lahví o objemu $(0,125 \div 2)$ litrů, případně více.

Výroba polotovaru

Jak již bylo uvedeno výše, u technologie vstřikovacího vyfukování není pro výrobu polotovaru využíván proces vytlačování, nýbrž operace technologie vstřikování. Materiál je ve vstřikovací jednotce stroje taven, homogenizován a pod vysokým tlakem vstřikován do dutin formy, které jsou tvořeny tvárníky (trny) a tvárnícemi. Vyrobenými polotovary jsou polouzavřené nádoby (preformy) se zhotoveným hrdlem se závitem o vysoké kvalitě (rozměrové přesnosti), viz obr. 6.9. Dle navržené konstrukce formy může být tloušťka stěny preforem stejnoměrná i proměnná (zesílená v oblasti dna budoucího výrobku). Proměnná tloušťka stěny preformy umožňuje u odstupňovaných výrobků dosáhnout rovnoměrnou tloušťku stěny, lepší vzhled a tuhost. Velkou výhodou tohoto způsobu výroby polotovaru je vysoká produktivita výroby (používají se 70 ti i více násobné vstřikovací formy).



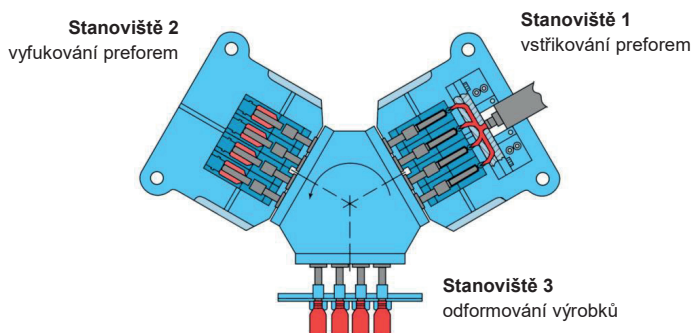
Obr. 6.9 Příklad polotovaru a formy pro technologii vstřikovacího vyfukování

Vyfukování polotovaru

Problematika tvarování je u technologie vstřikovacího vyfukování obdobná jako u vytlačovacího vyfukování. Výrobek musí být rychle a bezpečně vytvarován. K přívodu tlakového vzduchu do dutiny formy jsou používány vyfukovací trny (bez funkce kalibrace hrdla). Stlačený vzduch je přiváděn o tlaku ($1 \div 1,2$) MPa. Jedná se tedy o nepatrně vyšší hodnoty tlaku, než u technologie vytlačovacího vyfukování, které umožňují lepší kopírování povrchového reliéfu formy a tedy dosažení lepší kvality povrchu výrobků.

Odformování a chlazení výrobku

Problematika chlazení, odformování polotovarů a výrobků je obdobná jako u technologie vstřikování a extruzního vyfukování. Předlisky jsou z tvárníku vyhazovány (odformovány) pomocí stírací desky.



Obr. 6.10 Gussoniho metoda překládání polotovarů (preforem)

Vyfukovací stroje

Technologie vstřikovacího vyfukování využívá dvou procesních jednotek (vstřikovací a vyfukovací), které mohou být součástí jednoho výrobního stanoviště (jednokrokový proces) nebo mohou být zcela odděleny (dvoukrokový proces). Proces výroby na jednom výrobním stanovišti vypadá následovně: nejprve dochází k vstřikování polotovaru a to včetně dna a hrdla se závitem (tavenina plastu se nastříkne na tvárník – trn vstřikovací formy), následně, dokud je materiál ještě v plastickém stavu, se trn s polotvarem přesune do vyfukovací formy, kde dochází k jeho vytvarování stlačeným vzduchem (vyfouknutí), ztuhnutí a po otevření formy

k vyhození výrobku z trnu pomocí stlačeného vzduchu. Existuje několik metod překládání polotovaru mezi vstřikovací a vyfukovací jednotkou (Piotrowsky, Farcus, Moslo, Gussoni metody). Jednoznačně nepoužívanější metodou je Gussoni metoda uspořádání a překládání polotovaru, kde jsou pracoviště (vstřikování, vyfukování a odformování) uspořádány o 120° , viz obr. 6.10.

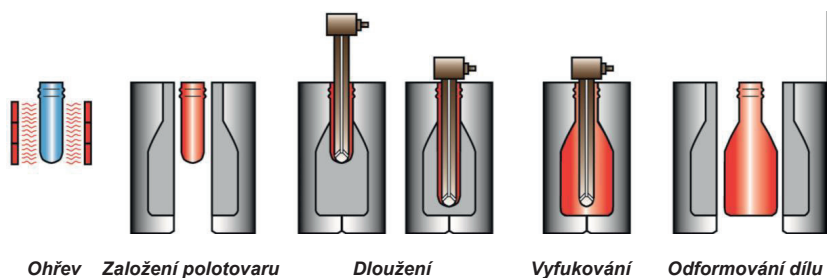
U dvou krokového procesu jsou polotovary vyrobeny na běžném vstřikovacím stroji. Po ochlazení následuje jejich přesun, např. do jiného výrobního závodu, opětovný ohřev (oblast hrdla se závitem budoucího výrobku se znovu nezahřívá) a tvarování na vyfukovacím stroji, viz obr. 6.11. Součástí vyfukovacích strojů tedy není pouze vyfukovací jednotka, ale i zařízení pro ohřev preforem. Dle úrovně automatizace lze vyfukovací stroje rozdělit na poloautomatické (ruční zakládání polotovaru, ca 800 lahví za hodinu) a plně automatické stroje (ca 1 500 lahví za hodinu). Plně automatické stroje je možné dále dělit na stroje s přerušovaným a kontinuálním vyfukováním, přerušovaným pohybem forem (8 a více dutin) a kontinuálním pohybem forem (40 a více dutin). Nejvyšší produktivity výroby (ca 80 000 lahví za hodinu) je dosaženo právě na kontinuálních, horizontálně či vertikálně rotujících kolech. Tyto stroje dnes pokrývají 80 % trhu výroby PET lahví.



Obr. 6.11 Poloautomatické a automatické vyfukovací stroje

Jednokrokový proces nabízí tedy vysokou komplexnost výroby (energetickou úsporu), dvukrokový proces naopak vyšší produktivitu výroby, lepší kontrolu teplot polotovaru a tím i vyšší rovnoměrnost distribuce tloušťky stěny výrobků.

Z hlediska ekonomie výroby (ceny materiálu a produktivity výroby) jsou velmi důležitými faktory minimální dosažitelná tloušťka stěny výrobku a její rovnoměrná distribuce, které vedly k aplikaci **technologie vyfukování s dloužením**. Principem technologie je dloužení polotovaru před vlastním vyfukováním. Protažení polotovaru nemá za následek pouze rovnoměrnost tloušťky stěny, ale ovlivňuje také orientaci makromolekul polymeru, která má pozitivní vliv na zvýšení pevnosti a tuhosti dílu ve směru orientace a snižuje propustnost pro plyny a páry (zvyšuje bariérovou ochranu výrobku). Technologii vyfukování s dloužením lze aplikovat pro oba způsoby vyfukování (vstřikovací i vytlačovací vyfukování), nicméně nejvíce se uplatňuje u technologie vstřikovacího vyfukování, např. při výrobě nápojových PET lahví, viz obr. 6.12.



Obr. 6.12 Příklad procesu dloužení u dvou krokového vstřikovacího vyfukování

Další technologií výroby dutých těles z polymerů je **technologie rotačního tváření**. Princip technologie spočívá ve vložení potřebného množství práškového polymeru do dvoudílné kovové formy. Uzavřená forma se následně uvede do rotačního pohybu kolem dvou na sebe kolmých os, přičemž je z vnějšku současně zahřívána. Díky rotaci je materiál rovnoměrně rozdělen a natavován po vnitřním povrchu formy. Výsledkem je tvorba monolitické vrstvy plastu o tloušťce ($1,5 \pm 30$) mm. Rotace formy pokračuje i ve fázi chlazení výrobku, která je realizována opět z vnější strany formy. Po dostatečném ochlazení je výrobek z formy vyjmut. Stejně jako u technologie vytlačovacího vyfukování je i u rotačního tváření nejpoužívanějším materiálem PE (85 % $\pm$ 90 % celkové světové produkce). Mezi další používané materiály patří PVC-P (12 % celkové produkce), PC, PA, PP a ABS. Kromě těchto standardních materiálů jsou známy i aplikační příklady kompozitních materiálů a tzv. „high-tech“ (vysoce výkonných) polymerů, např. PEEK. Jedná se o výrobu vysoce pevnostních dílů používaných v leteckém průmyslu a sportovních automobilech. Hlavní skupinu výrobků technologie rotačního tváření však tvoří tyto speciální aplikace, nýbrž běžné (komoditní) výrobky, jako jsou nádrže, sudy, plastové jímky nebo septiky a další díly stavebního, automobilového a medicínského průmyslu. Velkou skupinu výrobků tvoří také hračky: míče, zahradní domečky, kuželky ad., výrobky pro volnočasové aktivity a designové díly. Technologie rotačního tváření tak nachází široké uplatnění napříč průmyslovým spektrem. Vzhledem ke svým výrobním omezením, však nemůže velikostí produkce konkurovat technologiím vstřikování, vytlačování, vyfukování ani tepelnému tvarování polymerů.

Mezi **hlavní výhody** technologie rotačního tváření patří především:

- výroba dutých dílů, které jsou vyráběny jako jeden kus, tzn. bez svarového či jiného spoje,
- atmosférický tlak při tváření (výroba dílů bez vnitřního napětí),
- možnost využití materiálů pro výrobu forem s nižšími pevnostními charakteristikami,
- nízké výrobní náklady a nízká cena forem (vhodné pro malosériovou i prototypovou výrobu),

- rychlá cesta od návrhu dílu k jeho realizaci (jednoduché formy),
- bezodpadovost technologie (při správné dávce materiálu),
- snadná výroba dílů o objemech $> 2 \text{ m}^3$,
- možnost vkládání tvarových vložek do formy.

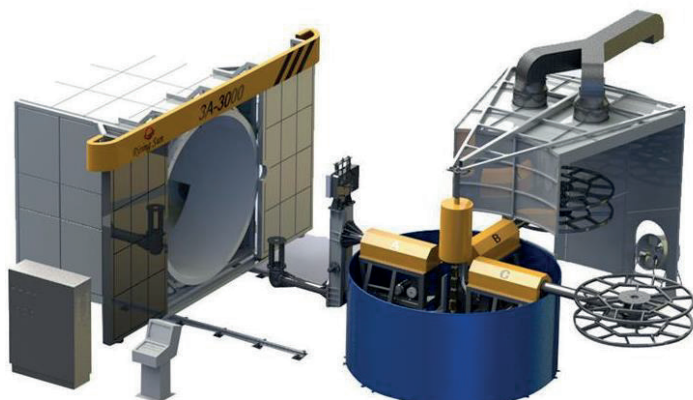
Naopak mezi **hlavní nevýhody** technologie rotačního tváření patří:

- dlouhý výrobní čas (nízká produktivita výroby),
- tvarové omezení dílu,
- omezené možnosti volby materiálu,
- nižší rozměrová přesnost výrobků (v porovnání s technologií vstřikování i vyfukování).



Obr. 7.1 Příklady výrobků vyráběných technologií rotačního tváření

Vlastní zpracovatelský proces lze rozdělit do pěti základních fází, kterými jsou: **dávkování, ohřev a tváření materiálu, chlazení a odformování dílu**. Příklad pracoviště technologie rotačního tváření je uveden na obr. 7.2.



Obr. 7.2 Příklad uspořádání pracoviště technologie rotačního tváření

7.1

Dávkování materiálu

Velikosti dávky materiálu je pro technologii rotačního tváření zásadní otázkou. Množstvím materiálu je totiž omezena dosažitelná tloušťka stěny dílu, potřebný čas ohřevu a chlazení materiálu, ale i vlastnosti výrobku. V technické praxi je nejčastěji aplikováno dávkování odpovídající poměru 350 gramů na 1 metr krychlový objemu dílu.

7.2

Ohřev materiálu a formy

Ohřev materiálu, resp. rotující uzavřené formy je realizován v elektricky vyhřívaných pecích. Ohřev materiálu probíhá přestupem tepla stěnou formy (ve vnitřních částech formy působí atmosférické prostředí). Výsledkem je postupné natavování materiálu. Nejprve dochází k natavení vrstvy poblíž vnějších stěn formy. Tato vrstva se díky kontinuálnímu přívodu tepelné energie zvětšuje, až do okamžiku, kdy dojde k natavení celé vložené dávky materiálu. Kromě vhodné teploty ohřevu formy, která je vyšší, než je teplota tání příslušného polymeru, je velmi důležitá i doba ohřevu. Doporučené teploty i doby ohřevu hliníkových forem (nejpoužívanější materiál forem) jsou pro vybrané polymery uvedeny v tab. 7.1. Tyto hodnoty jsou

velmi často pouze empirickými hodnotami, které jsou použitelné pouze pro úzkou výrobní oblast (specifický materiál a konstrukci forem, typ pece atd.).

Tab. 7.1 Doporučené teploty ohřevu forem při rotačním tváření plastů

Materiál	Tloušťka dílu [mm]	Teplota pece [°C]	Čas ohřevu [min]
PE-HD	2	300	13
	4		23
	6		32
	8		43
	10		56
PP	3	325	18
PC	3	375	22
PVC	5	200	23
ABS	3	350	17
PA 6.6	3	325	16
PFA	3	330	33

7.3

Tváření dílu – rotace formy

Tváření dílu je realizováno současným procesem ohřevu (natavování) materiálu a víceosé rotace (viz obr. 7.3).

Velmi důležitým faktorem procesu tváření je dosažení rovnoměrné tloušťky stěny výrobku. Na její tvorbu má zásadní vliv především volba obvodové rychlosti otáčení formy. V technické praxi je obvodová rychlost volena nejčastěji v rozmezí $(4 \div 20)$ ot/min, tedy relativně pomalá rychlost otáčení. Konkrétní hodnota závisí vždy na použitém materiálu (jeho sytné hmotnosti), na tvaru formy, respektive dílu, ale i na drsnosti povrchu formy.



Obr. 7.3 Příklad víceosého rotačního zařízení

Odvod tepla z materiálu ve fázi chlazení je u technologie rotačního tváření zajišťován přestupem přes stěny formy do okolí. Forma je z vnější strany chlazena proudem vzduchu, injektáží vodních kapek či vodní mlhou. Zejména injektáž vodních kapek je vysoce efektivní způsob, který však není vhodný pro všechny případy. Jednostranný vysoce intenzivní odvod tepla totiž negativně ovlivňuje rovnoměrnost vytváření krystalické struktury (platí u semikrystalických polymerů) a může mít za následek deformaci dílu. V technické praxi je z tohoto důvodu velmi často používáno sekvenční chlazení (chlazení tlakovým vzduchem a vodní mlhou). V některých případech je nutné aplikovat chlazení stacionárním vzduchem. V těchto případech je doba chlazení až několik desítek minut.

Proces odformování dílu není nijak komplikovaný, obdobně jako u technologie vyfukování. Výrobek, díky smrštění materiálu, odlehne od stěn formy a po otevření formy ho lze poměrně snadno vyjmout. Nepatrně komplikovanější je proces odformování dílů u vícenásobných forem. V takovýchto případech je vhodné použít podpěr, které zabrání nechtěnému poškození výrobků v důsledku jejich pádu.

Tepelné tvarování je proces zpracování termoplastických polotovarů, kde působením tepla a tlaku dochází ke změně jejich tvaru. Jako polotovary jsou nejčastěji používány desky nebo fólie o tloušťkách v rozmezí $(0,2 \div 16)$ mm. Mezi charakteristické výrobky této technologie patří díly obalového průmyslu, ale i dalších průmyslových odvětví, viz obr. 8.1. Zpracovávat lze téměř všechny termoplasty a to i plněné vyztužujícími vlákny, nejčastěji to jsou PS, ABS, PE, PP, PET, PVC, PC, PMMA, PA a POM. Tvarovat lze jednovrstvé i vícevrstvé desky vyráběné technologií koextruze.



Obr. 8.1 Příklady výrobků zhotovených technologií tepelného tvarování

Mezi **hlavní výhody** a důvody širokého uplatnění technologie tvarování patří především:

- možnost dosažení vysoké produktivity výroby - krátký výrobní čas,
- vhodnost technologie pro malé i velké výrobní série,
- možnost výroby velkorozměrových dílů o ploše $> 4 \text{ m}^2$ a hmotnosti $> 125 \text{ kg}$,
- možnost výroby tenkostěnných dílů (již od tloušťky $0,05 \text{ mm}$),
- nižší tvarovací tlaky,
- relativně nízká cena výrobního zařízení (oproti technologii vstřikování),
- možnost zpracování vícevrstvných polotovarů.

Naopak mezi **hlavní nevýhody** technologie tvarování patří:

- konstrukční omezení dílů – podkoso,
- nerovnoměrná tloušťka stěny dílů,
- obtížně kontrolovatelná teplota polotovaru,
- vyšší cena polotovarů,
- velký výrobní odpad (až 80 %) – operace ořezu.

Vlastní zpracovatelský proces lze rozdělit do čtyř základních fází, kterými jsou: **ohřev a tvarování polotovaru, chlazení a ořez dílu.**

8.1

Ohřev polotovaru

Ohřevu polotovaru (dle použitého materiálu a technologie tvarování) předchází fáze sušení, tvorba přířezu, založení a utěsnění polotovaru v tvarovacím rámu stroje. Všechny tyto operace mohou ovlivnit kvalitu finálního výrobku. Nicméně tou zásadní fází, která vymezuje tvarovatelnost použitého polotovaru a výslednou kvalitu dílu je právě fáze jeho ohřevu. Ohřev ovlivňuje například rovnoměrnost tloušťky stěny výrobku, smrštění materiálu, jeho deformační schopnost, kopírování reliéfu povrchu formy apod. Základním úkolem ohřevu je dosažení rychlého a rovnoměrného prohřátí desky, případně fólie, na teplotu, při níž se materiál nachází v termodynamickém stavu, který umožňuje jeho dobrou tvarovatelnost. U amorfních plastů se tvarovací teploty nacházejí mezi teplotou skelného přechodu (T_g) a teplotou viskózního toku (T_f), u semikrystalických plastů je to v oblasti těsně pod teplotou tání (T_m). Příklady doporučených tvarovacích teplot pro vybranou skupinu polymerů jsou uvedeny v tab. 8.1. Konkrétní hodnoty teplot závisí nejen na použitém materiálu, ale i na tloušťce stěny polotovaru, technologii tvarování a konstrukci dílu. Při použití vyšších tvarovacích teplot dochází k lepšímu tvarování a kopírování reliéfu formy. Vyšší teplota polotovaru umožňuje použít nižších tvarovacích tlaků. Na druhou stranu s vyšší teplotou polotovaru se zvyšuje nebezpečí jeho protahování působením gravitační síly. Tento efekt je důležitý zejména u silnostěnných polotovarů. Ještě mnohem komplikovanější je problematika ohřevu u vícevrstvých a kompozitních polotovarů, kde je nutné zohlednit rozdílnou teplotní roztažnost a vodivost materiálů vrstev a zabránit jejich delaminaci nebo u polotovarů s mikroporézní strukturou (vytvořenou fyzikálními nebo chemickými nadouvadly), kde při jejich tvarování

dochází k nebezpečí následného spojování vnitřních dutinek a negativnímu ovlivnění kvality výrobku.

Tab. 8.1 Doporučené teploty tvarování pro vybrané termoplasty

Materiál	Doporučená tvarovací teplota [°C]	Možný teplotní rozsah tvarování [°C]
PP	155	130 ÷ 165
PP + 40 GF	200	130 ÷ 230
PE-HD	145	130 ÷ 180
PS	150	130 ÷ 180
ABS	165	130 ÷ 180
PVC	140	104 ÷ 155
PMMA	180	150 ÷ 195
PET	150	120 ÷ 165



Obr. 8.2 Příklad ohřevu polotovaru

Kromě odpovídající teploty polotovaru je důležité zajistit jeho rovnoměrný ohřev v ploše i tloušťce. Rovnoměrnost ohřevu je ovlivněna především použitým topným systémem a tloušťkou stěny polotovaru. Nicméně je nutné počítat i s vlivy ochlazování polotovaru v rozích, v důsledku tepelné výměny mezi polotovarem a fixačním rámem stroje. Pro dosažení rovnoměrného ohřevu polotovaru jsou moderní topné systémy

rozděleny do několika zón se samostatným nastavením teplot, viz obr. 8.2. Pro dosažení rovnoměrného ohřevu v tloušťce stěny je u tlustostěnných polotovarů výhodnější použít jejich oboustranný ohřev. U tenkostěnných polotovarů (zpravidla do tloušťky 3 mm) postačí jednostranný ohřev.

Mezi nejčastěji používaná zařízení k ohřevu polotovarů patří:

- *Keramické a „quartz“ panely*, které umožňují rovnoměrný ohřev polotovaru a jsou vhodné pro zónový ohřev,
- *Indukční panely*, které dosahují požadované teploty v krátkém čase a nabízejí ekonomický provoz,
- *Chrom niklové odporové vinutí*, které je vzhledem k nízké pořizovací ceně velmi často používané, ale vyznačuje se nestabilním ohřevem a vyššími provozními náklady,
- *„Quartz“ trubice*, které jsou vhodné pro „horní“ ohřev, avšak jsou velmi křehké.

V otázce ohřevu je možné konstatovat, že semikrystalické termoplasty potřebují k jejich ohřevu dodat více tepelné energie než termoplasty amorfnní. Proto i doba ohřevu bývá u semikrystalických termoplastů zpravidla delší. Ohřev silnostěnných desek je většinou realizován na jednom, maximálně na dvou stanovištích a může trvat až několik minut. Ohřev tenkých fólií je standardně kontinuální a pro jeho realizaci postačí několik málo sekund.

8.2

Tvarování

Technologie tvarování je výrobní proces charakteristický malým přemísťováním částic hmoty, proto i tvarovací tlaky jsou mnohem menší než u ostatních zpracovatelských technologií (např. vstřikování, vytlačování apod.). Dle charakteru výrobku a použité technologie jsou tvarovací síly vyvozovány mechanicky nebo pneumaticky pomocí podtlaku (vakua), přetlaku či jejich vzájemnou kombinací a na díly působí po celou dobu tvarování a to i během fáze chlazení, aby nedocházelo k jejich deformacím.

Mechanické tvarování

Jedná se o technologicky jednoduchý a levný způsob tvarování ve dvoudílných formách složených z tvárníku a tvárnice, který umožňuje dosažení velmi vysokých

tvárovacích tlaků (nejvyšších ze všech způsobů tvarování). Díky vysoké schopnosti materiálu kopírovat reliéf formy (dezén, písmo atd.) je zajištěno vynikajících pohledových vlastností dílu. Nevýhodou mechanického tvarování je značné ztenčování stěny polotovaru a pomalá tvarovací rychlost. Technologie mechanického tvarování je vhodná především pro silnostěnné výrobky malých hloubek. Příklady typických produktů jsou například spoilery, střechy nákladních vozidel, zemědělské techniky apod.

Pneumatické podtlakové (vakuové) tvarování

Podtlakové tvarování patří díky rychle vyvozené tvarovací síle, ekonomičnosti a produktivitě výroby k nejpoužívanějším způsobům tvarování. Kromě ohřevu zde důležitou roli má utěsnění polotovaru. Dosažitelná tvarovací síla je velmi omezená. Technologie je vhodná pro tvarování tenkostěnných dílů. Charakteristickými výrobky jsou díly obalové techniky, například kelímky a misky v potravinářském průmyslu. Podtlakové tvarování lze dále dělit na tvarování *negativní* nebo *pozitivní* a na tvarování *bez předtvarování* nebo *s předtvarováním* (mechanickým, pneumatickým či kombinovaným), viz tab. 8.2.

Pneumatické přetlakové tvarování

Změna tvaru polotovaru je vyvozena působením přetlaku (stlačeného vzduchu o tlacích $1 \div 2$ MPa). Vzhledem k vyšším vyvozeným tlakům je tento způsob tvarování vhodný pro silnostěnné polotovary (o tloušťce ≥ 10 mm) nebo plasty se špatnou tvarovatelností (PVC, PC). Výrobky vykazují velmi dobré vzhledové vlastnosti, polotovary bezproblémově obtiskují reliéfy, loga, dezény, kombinovat lze hladké povrchy s dezénovanými. Velmi důležité je zajistit dostatečné odvedení vzduchu mezi tvarovaným polotvarem a dutinou formy. Typickými výrobky jsou kufry, boxy na nářadí apod.

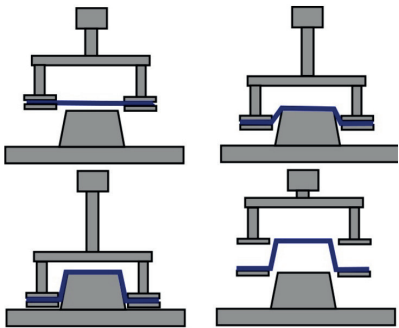
Kombinované pneumatické tvarování

Způsoby tvarování pomocí podtlaku a přetlaku jsou velmi často kombinovány. Důvodem je snaha zrovnoměnit tloušťky stěn výrobků a zvýšit jejich dosažitelnou hloubku. Tyto parametry bývají velmi často limitujícími faktory výrobního procesu.

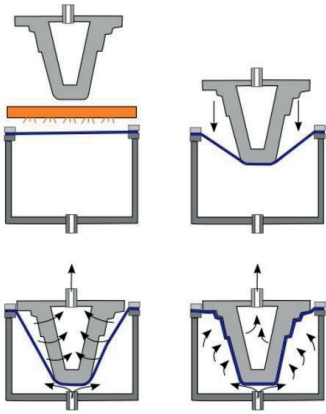
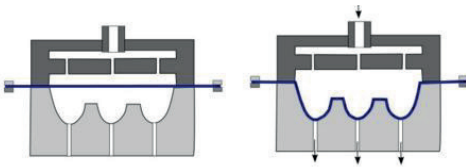
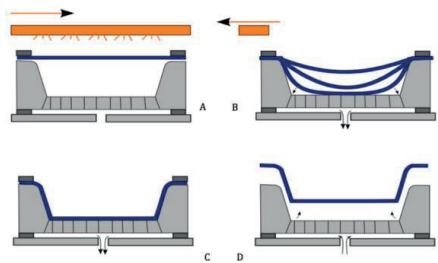
Kromě tvarovacího tlaku jsou pro výrobní proces důležité i další faktory, zejména tvar a rozměry formy, úkosy, podkoso, rádiusy, způsob odvzdušnění formy atd. Forma musí být opatřena odsávacími otvory, které spojují prostor dutiny formy pod tvarovaným polotovarem se zásobníkem vakua a odsávacím zařízením. Forma může vůči výrobku zaujímat pozitivní tvar (pozitivní tvarování na tvárník) nebo negativní tvar (negativní tvarování do tvárnice formy). Díly vyráběné negativním tvarováním jsou charakteristické ztenčováním tlouštěk stěn v oblasti jejich dna. Tento způsob tvarování je vhodný proto především pro díly s menší hloubkou. Pozitivní tvarování umožňuje dosažení větší hloubky výrobku a v oblasti dna se naopak nachází nejsilnější stěna. Pro mechanismus ztenčování tloušťky stěny polotovaru platí pravidlo, že tvarování se zúčastňuje jen volná část polotovaru, tj. ta, která se nedotýká povrchu formy, neboť jakmile se polotovar dotkne formy, ihned se ochladí a na dalším tvarování se již nepodílí.

V tab. 8.2 jsou uvedeny nejpoužívanější způsoby tvarování, včetně jejich výhod a procesních omezení. Snaha dosáhnout co nejrovnoměrnější stěny výrobku a největší jeho hloubky vede k vývoji celé řady kombinovaných způsobů tvarování včetně způsobů předtvarování.

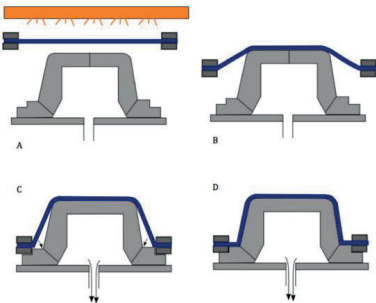
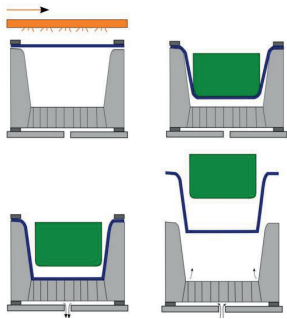
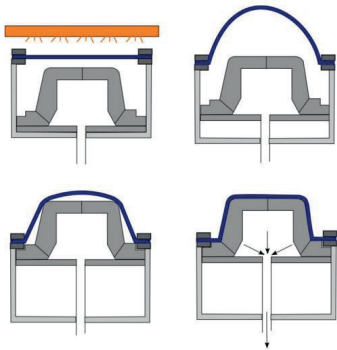
Tab. 8.2a Přehled základních způsobů tepelného tvarování

Pozitivní mechanické tvarování	
	• Vysoké tvarovací tlaky • Vhodné pro velké tloušťky desek • Dobrá kvalita povrchu dílu • Pomalá tvarovací rychlost

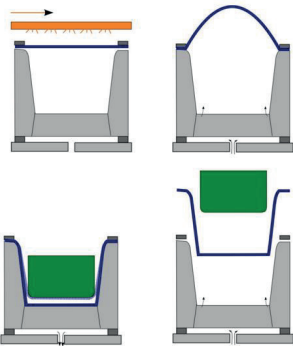
Tab. 8.2b Přehled základních způsobů tepelného tvarování

Pozitivní přetlakové tvarování 	• Relativně vysoké tvarovací tlaky • Vhodné pro tlustostěnné desky • Dobrá kvalita povrchu dílu • Pro mělké díly s poměrem hloubka/ průměr $< 0,4$
Negativní přetlakové tvarování 	• Relativně vysoké tvarovací tlaky • Dobrá kvalita povrchu dílu • Možnost dosažení vyšší hloubky dílu • Vhodné pro díly s poměrem hloubka/ průměr < 1
Negativní podtlakové tvarování 	• Vysoká rychlost tvarování • Pro tvarování mělkých dílů • Vhodné pro díly s poměrem hloubka/ průměr $< 0,4$ • Tloušťka bočních stěn dílu odpovídá téměř původní tloušťce polotovaru • Ztenčení stěny v oblasti dna výrobku • Vnější povrch dílu dobré kvality

Tab. 8.2c Přehled základních způsobů tepelného tvarování

Pozitivní podtlakové tvarování 	• Vysoká rychlost tvarování • Rovnoměrnější tloušťka stěny dílu než u negativního podtlakového tvarování • Vhodné pro díly s poměrem hloubka/ průměr = 1 • Forma musí mít úkosy pro snadné odformování • Vhodné pro střední velké a tvarově členité díly • Vnitřní povrch dílu dobré kvality
Negativní podtlakové tvarování s mechanickým předtvarováním 	• Pomocný tvárník je z málo tepelně vodivých materiálů • Předtvarování se volí ca. 70 % konečné hloubky dílu • Tloušťka boční stěny výrobku je rovnoměrnější • Vhodné pro díly s poměrem hloubka/ průměr < 1,5
Podtlakové pozitivní tvarování s pneumatickým předtvarováním 	• V první fázi dochází k předtvarování stlačeným vzduchem, teprve potom je zdvižena forma a vytvořeno vakuum, které výrobek dotvaruje. • Vyšší pořizovací cena zařízení • Výrazné zrovnoměření tloušťky stěn výrobku • Vhodné pro díly s poměrem hloubka/průměr > 1,5

Tab. 8.2d Přehled základních způsobů tepelného tvarování

Podtakové negativní tvarování s pneumatickým a mechanickým předtvarováním 	• V první fázi dochází k předtvarování stlačeným vzduchem ($0,5 \div 1$ s), následuje mechanické předtvarování (ca. 1 s) a vytvoření vakua, které dotvaruje díl (ca. 1 s) • Vyšší pořizovací cena zařízení • Používá se zvláště u hlubokých dílů nebo u dílů se zdvojenými stěnami • Vhodné pro díly s poměrem hloubka/ průměr > 2
---	--

8.3

Chlazení dílu

Další velmi důležitou fází technologie tvarování je chlazení dílu a jeho ořez. Stejně jako u většiny technologií zpracování polymerů je odvod tepla z výrobků zajištěn pomocí cirkulujícího teponosného média (nejčastěji vodou) ve vzájemně propojených vrtaných kanálech (viz obr. 8.3). Vrtané kanály nebývají umísťovány přímo do tvarovacích forem, nacházejí se v upínacích deskách, na které jsou jednotlivé formy upevněny. Odvod tepla z materiálu je zajištěn jeho přestupem do formy, upínacích desek a teponosného média. Tento způsob realizace odvodu tepla umožňuje rychlou výměnu forem a díky vysoké tepelné vodivosti materiálu forem (formy jsou nejčastěji ze slitin hliníku) také vysokou produktivitu výroby. Kromě materiálu forem a konstrukce chladicích kanálů je významným parametrem fáze chlazení teplota cirkulujícího média. Při snaze o dosažení maximální efektivity chlazení a produktivity výroby, je teplota teponosného média volena co nejnižší. Nedoporučuje se však používat teploty nižší než $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy hrozí nebezpečí rosení forem, které zapříčiňuje povrchové vady dílů (vlhkostní šmouhy) a dále také nárůst vnitřního napětí dílu, které by při jeho opětovném zahřátí vyvolalo jeho deformaci. Význam problematiky chlazení roste s tloušťkou stěny polotovaru a sériovostí výroby. Například pro prototypovou výrobu, kde jsou s výhodou využívány dřevěné nebo

plastové formy, či formy ze syntetických pěn, není používáno žádné chlazení, případně je aplikováno pouze vnější chlazení tlakovým vzduchem.



Obr. 8.3 Příklad hliníkových forem s propojenými chladicími (temperačními) kanály

8.4

Ořez dílu a tvarovací stroje

Ořezem dílu se rozumí mechanické oddělení přebytečného materiálu z vytvarovaného polotovaru (desky nebo fólie). Ořez je volen dle tloušťky stěny dílu, druhu materiálu, tvarové koncepce a počtu dílů, požadované drsnosti povrchu řezu, tolerance rozměrů výrobku a požadované rychlosti řezu. Nejčastěji je ořez realizován pomocí ostrých hran přípravku či formy (tlakový ořez), ostrých hran nožových nástrojů (smykový ořez), pomocí rotujících ozubených elementů (tahový křehký ořez), pomocí žhavených drátů či laseru (tepelný ořez) nebo pomocí broušení, omílání (abrazivní ořez), viz obr. 8.4. Při ořezu vzniká velké množství prachu, který je v důsledku vznikajícího elektrostatického náboje u plastů (zejména u PS a PMMA) přitahován na dělené plochy. Tento negativní efekt lze eliminovat kontinuálním odsáváním prachových částic.



Obr. 8.4 Příklady ořezu vytvarovaného dílu

Stroje pro tvarování termoplastických desek a fólií lze kromě způsobu vyvození tvarovacího tlaku (mechanicky nebo pneumaticky) rozdělit také dle úrovně automatizace na *poloautomatické* a plně *automatické stroje*, viz obr. 8.5 a obr. 8.6. U poloautomatických strojů je polotovar ve tvaru desky zakládán do stroje ručně a upínán mechanicky nebo pneumaticky. Tyto stroje jsou vhodné pro prototypovou a malosériovou výrobu a vyžadují dodatečný ořez přebytečného materiálu dílu. Plně automatické stroje (kontinuální výrobní linky) jsou aplikovány zejména pro velkosériovou výrobu dílů obalového průmyslu, pracují zcela automaticky včetně odvíjení polotovarů (fólií) z rolí a ořezu přebytečného materiálu dílu.



Obr. 8.5 Poloautomatický tvarovací stroj s ručním zakládáním desek



Obr. 8.6 Plně automatický tvarovací stroj (kontinuální výrobní linka)



Na plně automatických strojích jsou nejčastěji zpracovávány fólie z PP, PS, PET a PLA v rozmezí tloušťek stěn $(0,3 \div 2)$ mm. Výrobní cyklus těchto zařízení se pohybuje mezi $(5 \div 15)$ s.

Spojování plastových dílů ze stejných nebo jiných druhů plastů, s kovy a dalšími materiály, se používá často v případech, kdy je výsledná sestava dílů příliš velká nebo komplexní a nelze jí vyrobit v jednom kuse nebo pokud je vyžadována její demontáž. Termoplasty jsou často spojovány **svařováním**, kde jsou dílčí povrchy dílů roztaveny, což umožňuje vzájemnou difuzi polymerních řetězců. *Reaktoplasty a elastomery svařovat nelze*, k jejich spojení se používá **lepení nebo mechanické způsoby spojování**. Lepit lze úspěšně pouze některé druhy termoplastů. Při lepení dochází ke spojení dvou součástí nanesením vrstvy lepidla na spojovací linii. Svařování a lepení patří mezi tzv. nerozebíratelné spoje. Mechanické spoje, jako jsou šroubová nebo západková spojení, patří mezi tzv. rozebíratelné spoje a patří spíše do oblasti konstrukce plastových dílů.

9.1

Svařování plastů

Termoplasty působením tepla měknou, přechází z pevného do tzv. viskoelastického stavu a následně v taveninu. Při svařování dochází k vzájemnému přitlačení nahřátých ploch vůči sobě tak, aby došlo k promísení makromolekul ve spoji. Nerozebíratelný spoj následně vzniká obnovením výchozího stavu pozvolným chlazením materiálu bez jeho urychlování. U termoplastů, na rozdíl od svařování kovů, nedochází ve svařované oblasti k přeměně struktury materiálu, jedná se pouze o fyzikální proces. Při svařování tak dochází pouze k vzájemnému promísení makromolekulárních řetězců a obnovení vzájemně přitažlivých sil.

Chemická podstata a fyzikální chování svařovaných plastů, ale také druh použité technologie svařování a podmínky svařovacího prostředí, ovlivňují základní parametry svařovacího procesu: teplotu, tlak a čas. Například při polyfúzním svařování PP se volí teplota horkého tělesa (250 ± 270) °C, při svařování na tupo (200 ± 220) °C a při svařování horkým plynem s přídavným materiálem se teplota horkého plynu volí v rozmezí (300 ± 340) °C. Svařovací tlak musí vždy působit na spojovaných plochách svařovaných dílů a je vyvozován různě dle použité technologie. U ručních postupů je tlak vyvozován svářečem ručně, u strojních

postupů je vyvozován mechanicky, pneumaticky nebo hydraulicky. Svařovací čas je dán především zvolenou svařovací technologií. Při svařování polyfúzí a svařování na tupo je čas vymezen dle jednotlivých fází technologického postupu. Při ručním svařování je čas dán rychlostí svářeče.

Kvalita svařovaného spoje je kromě svařovacích parametrů ovlivněna také vlastnostmi materiálu, technologií svařování a podmínkami prostředí. Mezi vlivy dané vlastnostmi materiálu patří zejména velká teplotní roztažnost plastů. Při ochlazování svaru dochází ke smršťování materiálu a vzniku zbytkových vnitřních napětí. Dalším faktorem je malá tepelná vodivost plastů, která zapříčiňuje nedostatečnou plastikaci svařovaných ploch. To často vede k volbě vyšší svařovací teploty, která zapříčiňuje tepelné poškození svařovaných ploch, aniž by došlo k plastikaci materiálu do hloubky.

Tab. 9.1 Vlivy okolního prostředí na proces svařování

Podmínky prostředí	Vliv na svařování	Protipatření
Srážky	Vadné svary, není možné svařovat.	Postavit stan, zabránit průniku vody.
Vysoká vlhkost vzduchu	Tvorba kondenzátu (především při nízkých teplotách).	Osušit a předeřhřát svařovací plochy před svařováním.
Nízké teploty (< 5 °C)	Tvorba kondenzátu, změněné svařovací podmínky.	Předeřhřát svařovací plochy na teploty (10 ÷ 15) °C, vytápění ochranného stanu.
Vysoké teploty	Nepřípustné změny rozměrů vlivem teplotní roztažnosti materiálu (přesazení, problémy s lícováním atd.).	Přizpůsobení podmínek.
Přímé sluneční záření	Nestejněměrná teplotní roztažnost materiálu, změny rozměrů a tvarů dílu.	Ochrana dílu zakrytím před slunečními paprsky.
Vítr, průvan	Nepravidelné tepelné roztahování, nestejněměrná svařovací teplota, nedostatečná a nepravidelná plastikace svařovací zóny, možnost zanesení svařované plochy nečistotami (prach).	Použití ochranných stěn nebo stanu.

Vliv okolního prostředí se uplatňuje zejména při svařování ve venkovních prostorech. Svářeč musí zohlednit nejen teplotu, vlhkost a pohyb vzduchu, ale

i srážky, vliv slunečního záření apod. Při nepříznivých podmínkách se přistupuje k dodatečným opatřením (viz tab. 9.1), případně k odložení svařovací operace.

Podstatnou součástí svařovacího procesu je vzájemné sladění svařovacích parametrů tak, aby vznikaly svary s dostatečnou pevností a pokud možno bez vnitřního napětí. Požadavek svarů na minimální vnitřní napětí lze zajistit rovnoměrným a dostatečným ohřevem spojovaných ploch s následným pomalým a rovnoměrným ochlazováním.

9.1.1 Svařitelnost materiálů

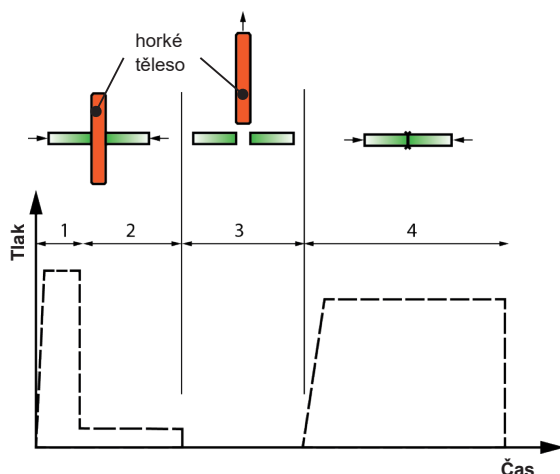
Vzájemně svařitelné jsou zpravidla pouze termoplasty stejného druhu a typu, tedy na stejném chemicko-fyzikálním základu. Nicméně v praxi existují výjimky, s nimiž se setkáváme ale jen zřídka (např. při svařování PVC-U s PMMA). Plasty, jako jsou např. polyethyleny, které mají díky rozdílnému uspořádání makromolekulárních řetězců mnoho strukturních podob, avšak stejné chemické složení, jsou svařitelné jen omezeně. Rozhodujícím faktorem pro svařitelnost plastů jsou jejich tokové vlastnosti po roztavení (index toku taveniny - MFI). Snahou je dosahovat co nejnižší viskozity materiálu, kterou dosáhneme při vyšších teplotách, přičemž musíme zamezit tepelnému poškození materiálu (jeho degradaci). Obecnou podmínkou je, že polymery s vysokou molární hmotností ($>10^6$ g/mol), jako jsou např. PTFE nebo PE-UHMW, svařovat nelze. Neplatí to však absolutně, např. polybuteny (PB) s molární hmotností řádově v miliónech se běžně svařují.

*Svařitelnost materiálů můžeme rozdělit: na **zaručenou**, kdy spojujeme stejné druhy a typy materiálů se shodnými nebo blízkými hodnotami indexu toku taveniny MFI (např. PE-HD s PE-HD) a **podmíněnou**, kdy spojujeme stejné druhy materiálů, ale odlišné typy (např. PP-H s PP-R, PE-HD s PE-LD apod.). Obecně platí, že při svařování není vhodné kombinovat různé druhy plastových materiálů mezi sebou (např. PE s PP, PC s PMMA apod.).*

V technické praxi existuje značné množství metod svařování termoplastů. V následujících kapitolách jsou uvedeny nejdůležitější z nich.

9.1.2 Svařování horkým tělesem

Tato metoda pro ohřev a natavení povrchu spojovaných dílů využívá vyhřívanou kovovou desku (tzv. zrcadlo). Jakmile jsou povrchy dostatečně nataveny, odstraní se horká deska a součásti jsou přivedeny v kontakt pod tlakem tak, aby se po ochlazení vytvořil svar. Na součásti se aplikuje axiální zatížení jak během ohřevu, tak i při spojování a chlazení.



Obr. 9.1 Svařování horkým tělesem

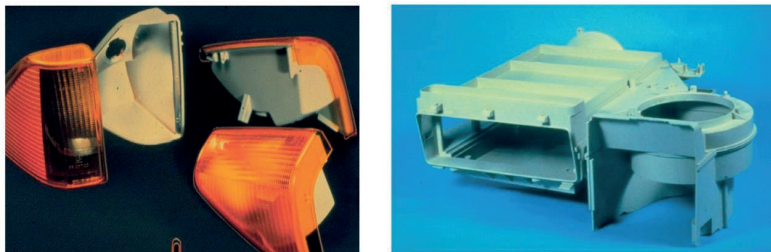
Postup **svařování horkým tělesem** (viz obr. 9.1) je následující: spojované součásti jsou uvedeny v kontakt s horkým nástrojem při současném působení tlaku (fáze 1). Teplo se přenáší z horkého nástroje na díly vedením (kondukcí), což vede v průběhu času k lokálnímu zvýšení teploty materiálu. Jakmile je dosaženo teploty tání, materiál začíná téci. Tání materiálu odstraňuje povrchové nedokonalosti dílu a vytváří hladký okraj na rozhraní spoje. V důsledku působení tlaku je část roztaveného materiálu vytlačena na povrch spoje (vzniká tzv. výronek). Ve fázi 2 se snižuje tlak, teplo proniká hlouběji do materiálu a rozšiřuje se natavená vrstva. Rychlost, při které se natavená tloušťka materiálu rozšiřuje, je určena tepelnou vodivostí roztavené vrstvy. Po dosažení odpovídající natavené tloušťky materiálu se díl a horké těleso oddělí (fáze 3), tlak a povrchová teplota se snižují. Tato fáze by

měla být co nejkratší (< 3 s), aby se zabránilo předčasnému ochlazení roztaveného materiálu. Při delší době se může na rozhraní spoje vytvořit tenká, zatuhlá povrchová vrstva, která ovlivňuje kvalitu svaru. Následně jsou díly spojeny pod tlakem (fáze 4), což způsobuje, že roztavený materiál v průběhu ochlazování a tuhnutí teče laterálně směrem od spoje. Pevnost výsledného spoje je dána intermolekulární difúzí, která vytváří propletení makromolekulárních řetězců. Protože se během chlazení vytváří konečná nadmolekulární struktura materiálu a chlazení ovlivňuje míru zbytkového napětí ve svařované oblasti, je důležité udržovat během chlazení konstantní tlak, aby se zabránilo deformacím spoje.

Svařování horkým tělesem je jednoduchá a ekonomická metoda, při níž lze dosáhnout vysokopevnostních a hermeticky uzavřených svarů, jak u velkých, tak u malých součástí. Svařovat lze spoje s rovnou, zakřivenou nebo komplexní geometrií se současným vyhlazováním povrchových nepravidlostí během fáze ohřevu. Rozdílné materiály, které jsou kompatibilní, ale mají různé teploty tání, lze svařovat pomocí horkých těles o různých teplotách. Proces svařování lze snadno automatizovat a vzhledem k tomu, že není používán žádný přídatný materiál, lze nevhodně svařené díly snadno recyklovat. Hlavní nevýhodou procesu je dlouhá doba cyklu ve srovnání s jinými běžnými metodami, jako je např. vibrační nebo ultrazvukové svařování. Doba svařování se pohybuje od $(10 + 20)$ s pro malé součásti až po 30 minut pro velké trubky. Druhou nevýhodou jsou vysoké teploty potřebné pro natavení spojovaných materiálů. Teplo není lokalizováno jako při vibračním svařování a v některých případech může způsobit degradaci plastu nebo jeho přilepení k horké desce.

Metoda je široce používána v automobilovém průmyslu, kde jednou z nejběžnějších aplikací je svařování zadních a směrových světel vozidla (viz obr. 9.2). Vnitřní kryt je vyráběn zpravidla z ABS a je přivařen k vnějšímu dílu, který je vyroben z PMMA nebo PC. Jedná se o jednu z mála kombinací materiálů, které jsou kompatibilní pro svařování horkým tělesem. Díky identickým teplotám tání (viskózního toku) polymerů lze světla z ABS a PMMA svařovat pomocí jedné horké desky. Dvojitě horké desky jsou nutné pro ABS a PC. Zakázkové konstrukce svařovacích strojů se používají při výrobě vyfukovaných palivových nádrží z PE-HD. Ty se skládají až z 34 součástí, které mají být navařeny do nádrže: jedná se o klipsy, hrdla na filtr, odvzdušňovací vedení, konzoly ad. Ostatní automobilové díly svařované horkým tělesem zahrnují pouzdra baterií, karburátorové plováky, nádržky pro

chlazení i ostřikovače a větrací kanály. Z oblasti domácích spotřebičů se jedná například o ramena ostřikovačů v myčkách na nádobí nebo zásobníky na prací prášky u praček (viz obr. 9.2).



Obr. 9.2 Díly svařované horkým tělesem

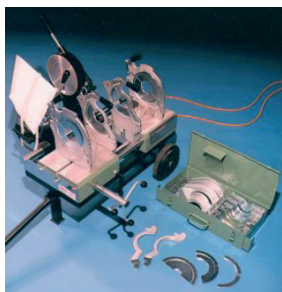
Tab. 9.2 Přehled metod svařování horkým tělesem

Metody svařování horkým tělesem		Svařované polotovary	Postup	
			Ruční	Strojní
Přímé	Na tupo	trubky, desky, profily	výjimečně	ano
	Profilové	desky, profily	výjimečně	ano
	Ohraňování	desky	výjimečně	ano
	Polyfúzní svařování	trubky	do $\varnothing$ 40 mm	do $\varnothing$ 125 mm
	Elektrotvarovkou	trubky	ne	ano
	Horkým klínem	fólie, profily	výjimečně	ano
	S oddělením svaru	fólie, tenké desky	výjimečně	ano
	Bezvýronkové	trubky	ne	ano
Nepřímé	Impulsní	fólie	ano	ano
	Tepelně kontaktní	fólie	ne	ano
	Kotoučové svařování	fólie	ne	ano

Přehled jednotlivých metod svařování plastů horkým tělesem je zobrazen v tab. 9.2. Jednou z nejběžnějších aplikací svařování horkým tělesem je spojování plastových trubek. Pro příklad si uvedeme pouze dva nejběžnější způsoby spojování a to svařování *na tupo* a *polyfúzní svařování*.

9.1.2.1 Svařování na tupo

Svařování na tupo je metoda, při které se očištěná a odmaštěná čela trubek, ale i desek a profilů ohřívají pomocí horkého tělesa (zrcadla), které je zpravidla elektricky vyhříváné a následně jsou pod tlakem spojena. Mezi nejčastěji svařované materiály patří PP, PE a PVDF. Nástroj ve formě horkého tělesa je opatřen antiadhezní vrstvou, nejčastěji z PTFE, která je vytvrzována ve vypalovací peci. Antiadhezní vrstva zabraňuje ulpívání spojovaného materiálu na povrchu horkého tělesa. Styčné plochy nástroje musí být planoparalelní, aby došlo k přesnému dosednutí obou spojovaných ploch při svařování. Příklady typických strojů pro svařování na tupo jsou zobrazeny na obr. 9.3 až obr. 9.5. Charakteristickým rysem svařování na tupo je výronek, který se vytváří na spojovací linii obou čel vlivem působení spojovacího tlaku (viz obr. 9.6).



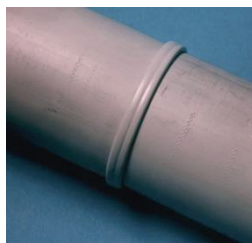
Obr. 9.3 Zařízení pro ruční svařování na tupo



Obr. 9.4 Poloautomatické zařízení pro svařování na tupo



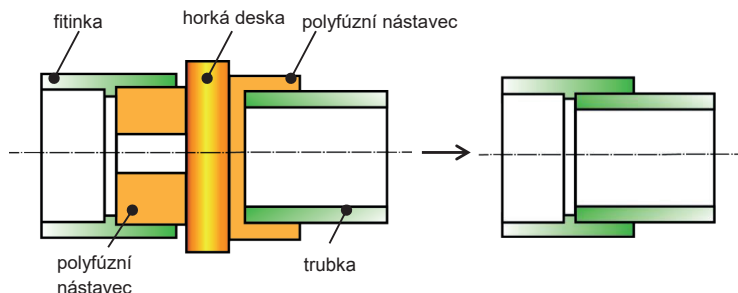
Obr. 9.5 Zařízení pro svařování trubek velkých průměrů na tupo



Obr. 9.6 Výronek ve svarovém spoji

9.1.2.2 Polyfúzní svařování

Polyfúzní svařování se používá výhradně pro trubky z PP, PE a PVDF o maximálním vnějším průměru do 125 mm. Princip metody spočívá v souběžném ohřevu vnějšího povrchu trubky a vnitřního povrchu hrdla tvarovky (fitinky) pomocí polyfúzního nástavce (tvarového horkého tělesa). Po uplynutí nahřívacího času jsou jak trubka, tak tvarovka odděleny od nástavce a konec trubky je zasunut do kónického hrdla tvarovky. Schéma procesu polyfúzního svařování je zobrazeno na obr. 9.7. Princip ručního způsobu polyfúzního svařování je zobrazen na obr. 9.8 a hotový svarový spoj tvarovky a trubky je zobrazen na obr. 9.9.



Obr. 9.7 Polyfúzní svařování



Obr. 9.8 Ruční způsob polyfúzního svařování

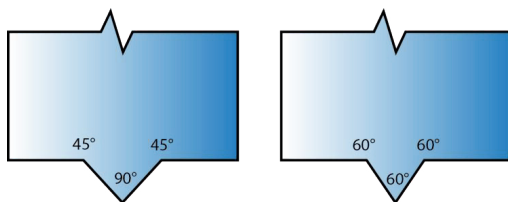


Obr. 9.9 Svarový spoj (polyfúzní svařování)

9.1.3 Svařování ultrazvukem

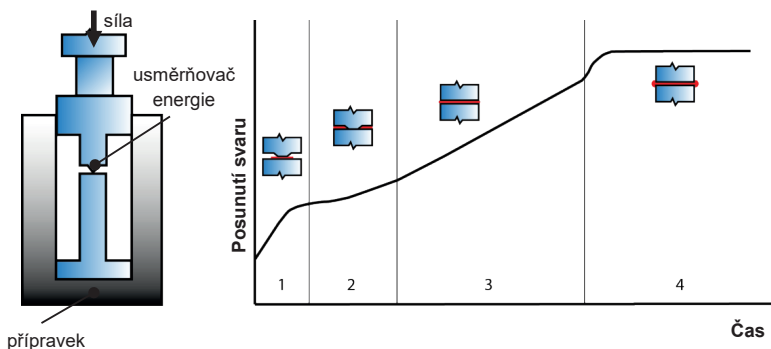
Metoda využívá ultrazvukovou energii o vysoké frekvenci ($20 \div 40$) kHz pro vytváření mechanických vibrací s nízkou amplitudou ($1 \div 25$) μm . Vibrace se šíří k

místu styku obou svařovaných ploch, kde se mění v teplo a dochází k lokálnímu natavení polymerů a vytvoření svarového spoje po ochlazení. Svařované díly jsou umístěny mezi svařovací nástroj (*sonotrodu*) a opěrnou desku. **Ultrazvukové svařování** je nejrychlejší svařovací technikou, svařování trvá standardně $(0,1 \div 1,0)$ s. Když je termoplastický materiál podroben ultrazvukovým vibracím, vytvářejí se v materiálu vlny ve tvaru sinusoidy. Část této energie se rozptýlí intermolekulárním třením, což vede k nahromadění tepla v materiálu a část je přenášena na rozhraní spoje, kde díky tření na rozhraní spojovaných ploch dochází k místnímu ohřevu. Optimální přenos ultrazvukové energie do spoje a následné tání materiálu je závislé na geometrii dílu a na schopnosti materiálu absorbovat ultrazvukové kmity. Teplo je obvykle nejvyšší na povrchu spoje a to v důsledku povrchových nerovností, které jsou vystaveny většímu namáhání a třecí síle než celkový objem materiálu. U mnoha aplikací při svařování ultrazvukem je v horní části spojovaného dílu vylišován trojúhelníkový výstupek, známý jako usměrňovač energie (viz obr. 9.10). Ten se používá k soustředění ultrazvukové energie na rozhraní spoje (viz obr. 9.11).



Obr. 9.10 Usměrňovač energie při ultrazvukovém svařování amorfních (vlevo) a semikrystalických materiálů (vpravo)

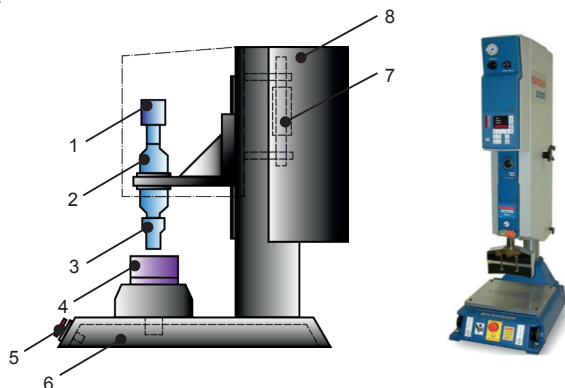
V okamžiku, kdy je usměrňovač energie přiveden do kontaktu se svařovanou součástí, dochází k největšímu vývinu tepla a usměrňovač se roztaví a začíná vyplňovat budoucí spoj (viz *fáze 1* na obr. 9.11). Plochy dílů se setkávají a rychlost tavení se zvyšuje (*fáze 2*), následně probíhá tavení v ustáleném stavu (*fáze 3*), kdy je dosaženo konstantní tloušťky vrstvy taveniny ve svaru a konstantního rozložení teploty. Po uplynutí určité doby nebo po dosažení určité energie, výkonu nebo tloušťky svaru se vypne napájení a ultrazvukové vibrace přestanou působit (začátek *fáze 4*). Tlak se dále udržuje téměř konstantní, což způsobuje dodatečné vytlačení taveniny ze spoje. Vytváří se molekulární vazba a svar následně chladne.



Obr. 9.11 Svařování ultrazvukem

- 1 – začátek tavení; 2 – nejvyšší vývin tepla (oblast usměrňovače);
3 – roztavení v celém průřezu; 4 – chlazení za působení tlaku

Ultrazvukové svařování je jednou z nejoblíbenějších metod svařování používaných v plastikářském průmyslu. Metoda je rychlá, hospodárná, snadno automatizovatelná a vhodná pro hromadnou výrobu s rychlostí výroby až 60 dílů za minutu. Vytváří konzistentní a vysoce odolné spoje. Omezení použití ultrazvukového svařování spočívá v tom, že při současné technologii nemohou být svařeny v jediné operaci velké spoje (svařovat lze desky maximálně o rozměrech 250 x 300 mm). Navíc pro každou svařovanou součást jsou vyžadovány různé geometrické úpravy stykových ploch.



Obr. 9.12 Ultrazvuková svářečka

- 1 – převodník energie; 2 – zesilovač; 3 – svařovací trn; 4 – svařované díly;
5 – bezpečnostní tlačítko; 6 – rám stroje; 7 – pneumatický pohybový systém;
8 – mikroprocesor řídicího systému

Mezi aplikace ultrazvukového svařování patří v *automobilovém průmyslu* např.: části světlometů, přístrojové desky, tlačítka a spínače, palivové filtry, nádoby na tekutiny, zámky bezpečnostních pásů, elektronické klíčenky, lampové sestavy, v *elektronice a u domácích spotřebičů*: spínače, snímače, USB flash disky, v *lékařství*: filtry, katétry, zdravotnické oděvy, masky a v *obalovém průmyslu* např.: blistrové obaly, sáčky, tuby, skladovací kontejnery apod.

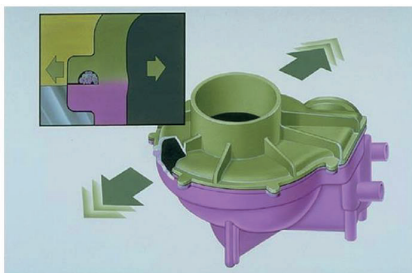
9.1.4 Vibrační (třecí) svařování

Vibrační svařování využívá teplo generované třením materiálů, které způsobuje tání na rozhraní spojovaných materiálů. Natavené materiály tečou společně pod tlakem a vytvářejí svar po ochlazení. Vibračním svařováním je vytvořen svar v čase $(1 \div 10)$ s a je použitelné pro různé termoplastické součásti s rovinnými nebo mírně zakřivenými povrchy. **Vibrační svařování** může být **lineární**, zde je tření generováno lineárním, vratným pohybem (viz obr. 9.13) nebo **úhlové**, při kterém horní spojovaná část vibruje kruhovým pohybem. Lineární vibrační svařování je nejčastěji používanou metodou, na druhé straně úhlové vibrační svařování umožňuje svařovat nepravidelně tvarované díly. Parametry procesu, které ovlivňují pevnost výsledného svaru, jsou amplituda a frekvence vibrací, svařovací tlak a doba svařování.

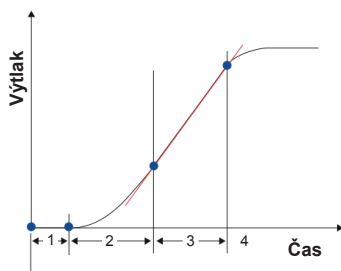
Proces svařování se skládá ze čtyř fází (viz obr. 9.14). Teplo generované třením zvyšuje teplotu ve spojované oblasti až na teplotu skelného přechodu (u amorfních termoplastů) nebo teplotu tání (u semikrystalických termoplastů). Ve **fázi 1** je materiál stále v pevném stavu, v této fázi nedochází k žádnému vzájemnému spojení. Ve **fázi 2** začíná tání materiálů na rozhraní spoje a dochází k laterálnímu toku v bočním směru, což způsobuje nárůst posunutí svaru. Ve **fázi 3** se rychlost tvorby taveniny rovná rychlosti vytěšňování taveniny, která se proto s časem zvyšuje lineárně. Na konci této fáze se vibrační pohyb zastaví a zvyšuje se prolínání obou částí ve svaru v průběhu tuhnutí pod tlakem (**fáze 4**).

Výhodami vibračního svařování jsou poměrně krátké výrobní časy, energetická účinnost, schopnost svařování velkých součástí a minimální požadavky na přípravu povrchu. Ohřev je do značné míry lokální, na rozdíl od svařování horkým tělesem a je zde mnohem menší pravděpodobnost, že dojde k degradaci materiálu v důsledku

jeho přehřátí na rozhraní spoje. Nicméně vibrační svařování by mělo být použito pouze u sestav, které nemají vysoké nároky na toleranci rozměrů.



Obr. 9.13 Lineární vibrační svařování



Obr. 9.14 Vibrační svařování

Vibrační svařování se běžně používá pro spojování velkých součástí. Menší součásti lze ekonomicky svařovat v nástrojích s více dutinami. Typické rozměry dílů se pohybují od (76 x 76) mm až po (610 x 1520) mm. Metoda se používá pro silnostěnné, tlakově nepropustné spoje. V oblasti domácích spotřebičů je používána například k spojování dílů čerpadel praček a myček na nádobí, dávkovačů pracích prášků a ramen myček na nádobí. V automobilovém průmyslu se používá pro sestavy světlometů, koncových světel a přístrojové desky (viz obr. 9.15), dveřní výplně svařované ve dvou rovinách, palubní a ozdobné prvky, klimatizační a vyhřívací potrubí, vakuové nádrže, dvířka palivového filtru a snímače průtoku vzduchu.

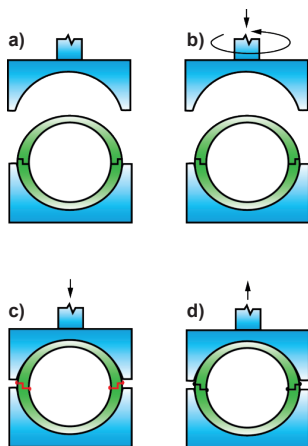


Obr. 9.15 Aplikace svařovaných dílů vibračním svařováním

9.1.5 Rotační (třecí) svařování

Rotační svařování je další metodou svařování třením, jedná se o proces, kdy jsou termoplastické součásti s rotačně symetrickými spojovacími plochami třeny o sebe pod tlakem při současném jednosměrném kruhovém pohybu. Obvykle je jedna svařovaná část zachycena stacionárně, zatímco druhá je otáčena. Teplo, které se v průběhu tohoto procesu generuje, roztaví plast na rozhraní součástí a vytvoří svar po ochlazení.

Proces rotačního svařování lze rozdělit do čtyř fází. V první fázi jsou ručně do stroje vloženy svařované součásti. Obě součásti se nacházejí v přípravku namontovaném na základně svářečky (viz obr. 9.16a). V další fázi se začne otáčet hnací hlava, která klesá na horní svařovanou součást (viz obr. 9.16b). Rychlost otáčení se pohybuje zpravidla v rozmezí $(200 \div 14\,000)$ ot/min, v závislosti na velikosti svařovaných dílů. Následuje svařování dílů, hnací hlava dosedne na horní součást, otáčí se a relativní pohyb mezi součástmi vytváří ohřev a tavení materiálu na jejich rozhraní. Samotný svařovací proces odpovídá popisu u vibračního svařování (viz obr. 9.16c). Po dostatečném ztuhnutí svaru se hnací hlava zvedne a díly se ručně vyjmou (viz obr. 9.16d). Příklady svařovaných dílů a svařovacího zařízení jsou uvedeny na obr. 9.17 a obr. 9.18.



Obr. 9.16 Rotační svařování



Obr. 9.17 Příklad rotačně svařovaných dílů

Rotační svařování je jednoduchý a energeticky vysoce účinný proces, při kterém se generuje malý přebytek tepla, což znamená, že doba chlazení je velmi krátká. Metoda je tak vhodná pro automatizované montážní linky. Rotačním svařováním se vytváří silné a hermeticky uzavřené spoje.

První aplikací rotačního svařování byla výroba kompasů naplněných tekutinou. Tato operace se provádí svařováním pod povrchem kapaliny. Proces může být proto použit pro utěsnění kapaliny v nádobě. Jiné aplikace zahrnují palivové filtry, zpětné ventily, světla kamionů, aerosolové lahve a plováky. Používá se také pro montáž konstrukčních prvků, připojení ventilačních trubek k vyfukovaným palivovým nádržím nebo při svařování vrcholů a den kontejnerů.



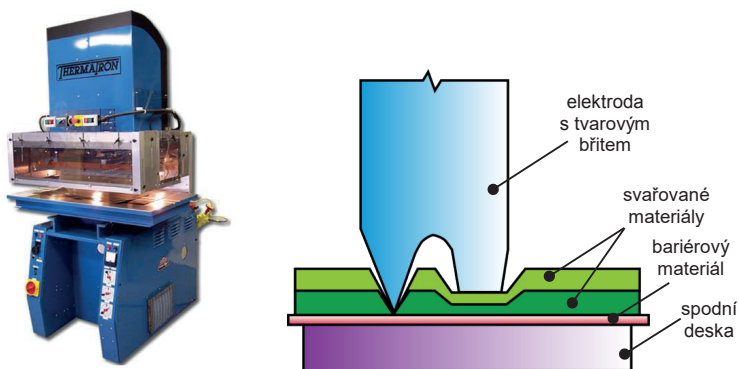
Obr. 9.18 Svářečka pro rotační svařování

9.1.6 Vysokofrekvenční svařování

Vysokofrekvenční svařování, nazývané také jako *radiofrekvenční* nebo *dielektrické svařování*, využívá pro vytváření tepla v materiálech elektromagnetickou energii s vysokou frekvencí (obvykle 27,12 MHz), díky elektrickým vlastnostem plastů. Svařovaný materiál musí být schopen přeměnit střídavé elektrické pole na teplo. Svařované díly se vkládají mezi dvě elektrody, které vytváří střídavé elektrické pole, vyvolávající v materiálu shodnou orientaci makromolekul (tzv. elektronovou polarizaci). Polární molekuly mají v elektrickém poli snahu orientovat se ve směru

jeho působení. Tento proces se nazývá polarizace dipólu. Výsledkem natáčení makromolekul je jejich vzájemné tření, čímž se vytvoří potřebné teplo. Svařovací tlak mezi elektrodami potom zajistí vznik svarového spoje.

Vysokofrekvenční svařování používá jednoduché kompaktní zařízení (viz obr. 9.19) a vyžaduje pouze elektřinu a stlačený vzduch. Doba cyklu je také poměrně krátká (až 20 dílů za minutu). Vysokofrekvenční svářečky mohou být použity nejen k výrobě svarů, ale elektrody mohou být vyrobeny také tak, že jsou doplněny o tvarový břit, který současně se svařováním odděluje přebytečný materiál. Hlavní nevýhodou vysokofrekvenčního svařování je jeho omezení pro termoplasty s polárními atomy ve struktuře makromolekul (např. PVC, PA, PMMA, ABS). Při svařování nepolárních termoplastů je vyžadován další materiál ve formě vodivého kompozitního implantátu na rozhraní spoje.



Obr. 9.19 Zařízení pro vysokofrekvenční svařování

Vysokofrekvenční svařování se běžně používá při utěšňování tenkých fólií z PVC-P nebo pro papírenské výrobky, jako jsou pořadače a různé obaly. Dalšími aplikacemi jsou nafukovací výrobky: plážové míče, záchranné vesty, nafukovací čluny a hračky, z oblasti zdravotnictví pak např. krevní sáčky (viz obr. 9.20), jednorázové oblečení, nafukovací lůžka a polštáře (viz obr. 9.20).



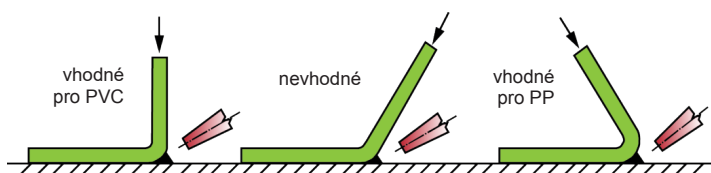
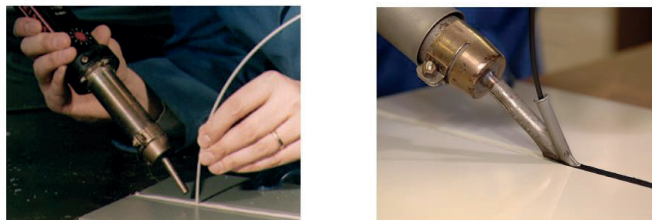
Obr. 9.20 Aplikace vysokofrekvenčního svařování: krevní sáčky (vlevo), nafukovací polštář (vpravo)

9.1.7 Svařování horkým plynem a přídavným materiálem

Svařování horkým plynem a přídavným materiálem je ruční proces, u kterého kvalita svaru závisí na dovednostech a zkušenostech svářeče. Během procesu svařování je zahřátý plyn, obvykle vzduch, používán k místnímu natavení přídavného materiálu ve formě tyčinky/drátu (nejčastěji kruhového, trojúhelníkového nebo trojitého průřezu), ale také součástí, které mají být svařeny. Tlak je aplikován na svařovací drát a svářeč musí dbát na stejnoměrné zahřívání základního a přídavného materiálu. Kombinace tepla a tlaku způsobí, že svařovací drát a základní materiál dílů se vzájemně spojí. Při této metodě je možné dosáhnout pevnosti svaru až 90 % výchozí pevnosti materiálu svařovaných dílů. Svářeč by měl udržovat konstantní rychlost pojezdu, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení teplot v celém svaru. Přídavný materiál a spojované součásti by měly být vyrobeny ze stejného termoplastu a v ideálním případě stejného typu. Před svařováním by měl být povrch spojovaných součástí očištěn, aby se zajistilo odstranění jakékoliv kontaminace ve formě nečistot, prachu nebo mastnoty. Očištěné součásti a svařovací drát by měly být oškrabány, aby se odstranila jakákoliv zoxidovaná vrstva na jejich povrchu, a aby se zajistila odpovídající kvalita svaru.

Svařovat lze dvěma způsoby: **ručním svařováním horkým plynem, kruhovou tryskou**, která usměrňuje proud plynu směrem ke svarové ploše **a přídavným materiálem** nebo **horkým plynem a přídavným materiálem s použitím rychlotrisky** (viz obr. 9.21). Rychlotriska je nástavec speciálního tvaru, který

usměrňuje proud plynu do svarové plochy. Přídavný materiál je veden předkomorou umístěnou v ústí výstupu horkého plynu. Rychlotryska napomáhá udržet správnou polohu svářečky i přídavného materiálu.



Obr. 9.21 Svařování horkým plynem, kruhovou tryskou a přídavným materiálem (vlevo) a svařování horkým plynem a přídavným materiálem s použitím rychlotrysky (vpravo)

Svařování horkým plynem může být použito pro svařování prakticky jakéhokoliv tvaru nebo velikosti součástí a zařízení má pravděpodobně nejnižší náklady ze všech způsobů svařování plastů. Svařovat lze všechny druhy termoplastů, které lze uvést teplem do termoplastického stavu. Nejběžnějšími termoplasty jsou PE, PP, PVC a fluoroplasty (PVDF, FEP, PFA a ECTFE). Horkovzdušné svářečky v provedení s externím zdrojem plynu nebo integrovaným dmýchadlem jsou velmi lehké a snadno se používají v nevhodných polohách a jsou ideální pro opravy v terénu, když je součást příliš velká, aby byla přemístěna do dílenského prostředí. Rychlosti svařování jsou však relativně pomalé (ve srovnání s jinými technikami svařování plastů) a kvalita svařování závisí na dovednostech obsluhy. Proto je důležité, aby svářeči byli řádně vyškoleni a certifikováni.

Vzhledem k tomu, že svařování horkým plynem a přídavným materiálem je ruční proces, není tento způsob vhodný pro sériovou výrobu. Je však ideální pro výrobu různých zakázkových výrobků, protože může být přizpůsoben pro svařování dílů s libovolnou geometrií spojů. Mezi příklady patří chemické skladovací nádrže, potrubí, odsávací systémy a mokré stolice pro polovodičový průmysl. Dále se

používá pro svařování termoplastických membrán pro střechy, bazény a jezírka, obložení pro chemické nádoby a může být také použito pro opravy automobilových dílů, jako jsou nárazníky a nádoby kapalin.

9.1.8 Extruzní svařování

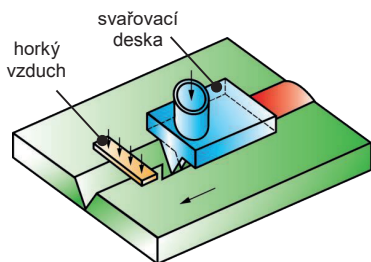
Extruzní svařování se komerčně používá pro svařování PP a PE-HD. Obvykle se provádí ručně, i když může být částečně automatizováno. Tato technika zahrnuje kontinuální vytlačování roztaveného termoplastu ze stejného materiálu (a ideálně stejného typu) jako jsou svařované součásti do připraveného spoje mezi součástmi za použití vytlačovací svařovací pistole (viz obr. 9.22).



Obr. 9.22 Extruzní svařovací pistole

Spojované součásti jsou předehřáty na teplotu měknutí proudem horkého vzduchu a následně je vytlačovaný materiál přiveden do spoje. Pro správné vytvoření svaru je nutné, aby byl vytlačovaný materiál přitlačován do svarové zóny. Tím je zajištěno, že vytlačovaný materiál a spojované součásti se spojí a vytvoří svar (viz obr. 9.23). Stejně jako u svařování horkým plynem jsou díly, které mají být spojeny, předem očištěny, oškrábány a obrobena tak, aby vznikla spára tvaru V. Na začátku svařovacího cyklu operátor předehřeje spojované díly jemným pohybem svařovací pistole podél spoje. Pokud se tato operace vynechá, bude vytlačovaný materiál nanesen na studený materiál dílů, což bude mít za následek nekvalitní svar.

Největší výhodou procesu extruzního svařování (oproti svařováním horkým plynem) je, že při jediném průchodu je vytvořena kontinuální svarová vrstva ve srovnání s vícenásobnými průchody pro svařování horkými plyny. Doba výroby je také podstatně kratší než při svařování horkým plynem. Navíc maximální síla svaru je vyšší než při svařování horkým plynem, díky snadnější kontrole svařovacích parametrů. Značnou nevýhodou procesu extruzního svařování (ve srovnání se svařováním horkým plynem) je hmotnost a velikost svařovacího zařízení. Některé vytlačovací svařovací pistole mohou vážit více než 12 kg.



Obr. 9.23 Extruzní svařování

Extruzní svařování se používá při výrobě velkých plastových dílů, jako jsou nádrže a potrubí, kde je nutné vyrábět velké množství homogenních svarů při jednom průchodu (viz obr. 9.24). Extruzní svařování se používá také v environmentálních aplikacích, jako je spojování podšívkového materiálu pro stavbu pozemků, lagun a střešních krytin a stále častěji se využívá v zemědělství a ve vodohospodářských aplikacích, jako jsou např. odvodňovací systémy půdy a nádrže (viz obr. 9.24).



Obr. 9.24 Aplikace extruzního svařování

9.1.9 Svařování laserem

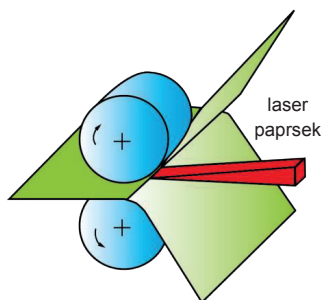
Svařování laserovým paprskem patří k dynamicky se rozvíjejícím metodám, které se uplatňují především v průmyslové výrobě, kde se opakovaně svařuje velké množství stejných polotovarů. Jedná se o metodu vhodnou pro spojování fólií, desek a vstřikovaných dílů. Princip spočívá v použití laserového paprsku k natavení plastů v oblasti svarového spoje a následném přitlaku součástí. Lasery jsou vhodné pro přívod řízeného množství energie na přesné místo díky možnosti kontroly rozměru paprsku (šířka $10\text{ }\mu\text{m} \div 100\text{ mm}$) a velkému rozsahu dostupných metod pro přesné polohování a pohyb paprsku. Existují obecně dva způsoby laserového svařování: **přímé laserové svařování a prozařovací (transmisní) laserové svařování.**

Při dopadu laserového záření na povrch materiálu, bude část energie laserového záření odražena, část absorbována (přeměněna na teplo) a část projde materiálem do určité hloubky (transmise). Při laserovém svařování materiálů musí být energie absorbována efektivně na správném místě. Typ interakce paprsku s povrchem závisí na následujících faktorech: *typu materiálu a obsahu aditiv, včetně vlivu povrchových povlaků, vlnové délce laseru, intenzitě laseru* (výkonu, velikosti nebo tvaru místa, kvalité paprsku) *a rychlosti pohybu paprsku nad povrchem.*

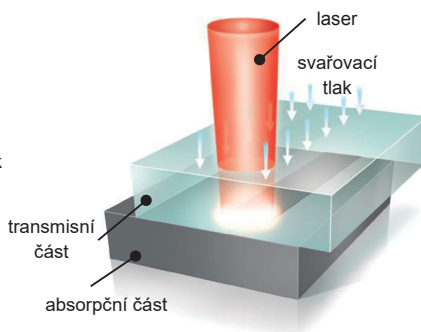
Absorbované laserové záření na povrchu plastu může způsobit jednu ze dvou interakcí v závislosti na vlnové délce. Při *krátko vlnném záření* ($< 350\text{ nm}$, nebo ultrafialovém záření) dochází k *fotolytickým procesům*, při nichž je fotonová energie dostatečně vysoká, aby přímo narušila chemické vazby makromolekul. To je někdy popisováno jako zpracování za studena a může být použito pro obrábění, chemické vytvrzování nebo jiné chemické změny plastu (např. značení změnou barvy). Při *dlouhovlnném záření* ($> 350\text{ nm}$, rozprostírající se do infračerveného spektra) dochází k *pyrolytickým procesům*, které zahrnují ohřev. To může být použito pro tavení materiálů, a tedy i pro jejich svařování nebo při vyšších intenzitách prořezání dílů laserem. Při svařování plastů laserovým paprskem je využíváno tedy infračerveného záření.

V praxi se používají především Nd:YAG, diodové a CO_2 lasery. První dvě konstrukce se používají pro prozařovací (transmisní) svařování a třetí pro svařování přímé (na tupo). Při *přímém svařování plynovým CO_2 laserem* (viz obr. 9.25) je emitováno záření o vlnové délce $10,6\text{ }\mu\text{m}$, které je absorbováno do povrchu

plastového dílu. Konstrukce laseru se dobře hodí pro svařování tenkostěnných fólií a řezání různých druhů plastů.



Obr. 9.25 Přímé svařování
plynovým CO_2 laserem



Obr. 9.26 Prozařovací (transmisní)
laserové svařování

Prozařovací (transmisní) svařování laserem je široce využíváno pro průmyslové spojování termoplastů pomocí laserových zdrojů s vlnovou délkou $(0,8 \div 1,1) \mu\text{m}$. Používány jsou diodové lasery, pevné Nd:YAG a vláknové lasery. Radiace je při těchto vlnových délkách hůře absorbována. Plasty jsou proto modifikovány přísadami, které absorbují laserové záření, případně jsou aplikovány ve spoji tenké povrchové povlaky. Součásti jsou při svařování umístěny dle potřeby a laserový paprsek prochází horní částí, aby nahřál spoje na absorbujícím povrchu dolní části (viz obr. 9.26).

Laserové svařování se používá v široké škále aplikací: elektronické obaly, textilie, biomedicínská zařízení, potravinové a zdravotnické obaly, displeje, automobilové komponenty ad.

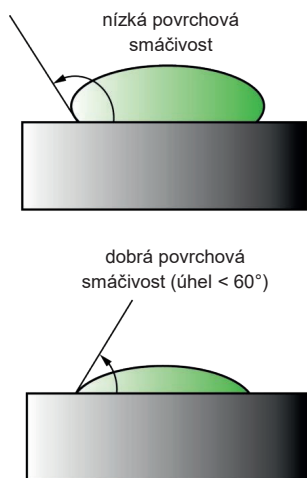
9.2

Lepení plastů

Lepení je nejvšestrannější ze všech spojovacích technik a může být použito pro spojování plastových dílů navzájem nebo s jinými materiály, jako jsou např. kovy, keramika nebo dřevo. Lepení je proces spojování ploch (adherendů) pomocí lepidla (adheziva). Pevnost a mechanické vlastnosti lepeného spoje závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech lepidla i spojovaného materiálu. Rozhodující vliv má

adheze, což je přilnavost lepidla k lepenému dílu a koheze, tedy soudružnost lepidla (částice jsou drženy pohromadě valenčními a mezimolekulárními silami). V praxi rozeznáváme mechanické adhezční síly, které mají původ v mechanickém uchycení (zakotvení) lepidla v nerovnostech a pórech spojovaných materiálů, a specifické adhezční síly, skládající se z chemických sil (např. primární chemické vazby) a fyzikálních sil (Van der Waalsovy mezimolekulární síly, difuzní síly, elektrostatické síly apod.).

Velmi silné adhezční síly nejsou vždy výhodou. V mnoha případech jsou tyto síly silnější než kohezční síly lepidla (adheziva) nebo lepeného plastu (adherendu) a porušení spoje se vyskytuje spíše v adhezivu nebo adherendu než na rozhraní spoje. Navíc adhezční síla na mezifázovém rozhraní je zvýšena úpravou povrchu lepených dílů (leptáním, zdrsňením, abrazí apod.), což má za následek vytvoření mechanické adheze.



Obr. 9.27 Smáčivost povrchu

Tab. 9.3 Povrchová energie materiálů

Materiál	Povrchová energie	
	dyne/cm	mJ/m ²
PTFE	18	0,018
Q	24	0,024
EPM	28	0,028
PE	31	0,031
PS	33	0,033
SBR	33	0,033
ABS	35	0,035
PMMA	39	0,039
PVC	39	0,039
PI	40	0,040
PET	43	0,043
PA	46	0,046
PC	46	0,046
EP	47	0,047
H ₂ O	73	0,073
Al	~ 500	~ 0,500
Cu	~ 1000	~ 1,000

K dosažení dobré adheze je nutné, aby došlo ke smáčení povrchu mezi lepidlem a adherendem. Smáčení se vztahuje k rozprostírání kapaliny na pevném povrchu a je dosaženo, když je povrchové napětí kapalného adheziva nižší než povrchové napětí (nebo energie) adherendu. Povrchové napětí adherendu je tak dostatečné k přivedení větší plochy kapaliny do styku s jeho povrchem. Příklady hodnot povrchové energie pro běžná adheziva, adherendy a kapaliny jsou uvedeny v tab. 9.3. Dobrá smáčivost povrchu je dosažena, pokud je kontaktní úhel mezi adherendem a kapkou adheziva menší než 60° . Špatná smáčivost povrchu nastává při kontaktních úhlech vyšších než 90° (viz obr. 9. 27). Povrchová energie každého adherendu je vnitřně spojena s jeho chemickým složením. Úpravou povrchu adherendu lze smáčivost adheziva zlepšit.

Přestože lepení je především procesem chemické povahy, který se uplatňuje na povrchu materiálu, je kvalita lepeného spoje závislá na přípravě povrchu adherendu a na způsobech používaných pro manipulaci, nanášení, tuhnutí a vytvrzování lepidla. Povrchy adherendů je často nutné zdrsňit, aby se zvýšila plocha povrchu a vytvářely se póry pro ulpění lepidla.

9.2.1 Vliv plastů na pevnost lepeného spoje

Pevnost lepeného spoje, kromě dobré smáčivosti lepidla s lepeným povrchem (adheze), koheze lepidla a povrchové úpravy adherendu, je ovlivněna chemickou a molekulovou strukturou plastu. **Nepolární plasty** (např. PE, PP, PTFE) **se lepí jen velmi obtížně** (téměř vůbec). Jejich povrch se proto upravuje oxidací (např. ožehem nebo elektrickými výboji za přítomnosti vzdušného kyslíku), která lokálně a časově omezeně zvyšuje polaritu na povrchu plastu. Lepitelnost lze zlepšit také ponořením dílů do mořící lázně (složené např. z kyseliny sírové, dvojchromanu draselného a destilované vody v příslušných poměrech a koncentracích) za zvýšené teploty (nejméně 70°C) nebo přidavkem polárních plniv, změkčovadel apod. Na druhou stranu změkčovadla mohou migrovat do vrstvy lepidla a spoj zcela znehodnotit. **Velmi dobře se lepí slabě až středně polární plasty** (např. PVC, ABS, PS, PMMA, EP) za použití polárních lepidel stejného původu, jako je plast. **Silně polární plasty** (zejména PA) **se lepí hůře než plasty slabě polární**. Lepitelnost plastů se zhoršuje také se zvyšující se krystalinitou. Pro pevnost lepeného spoje a jeho životnost mají

důležitý vliv také vnitřní napětí, která mohou vznikat z různých důvodů, např. lepením materiálů s různým koeficientem teplotní délkové roztažnosti.

9.2.2 Typy lepidel

Základem úspěšnosti lepeného spoje je výběr takového lepidla, které by se svými vlastnostmi co nejvíce přibližovalo lepeným materiálům (adherendům). Předpis DVS 2204 rozděluje lepidla pro lepení termoplastů následovně:

- **Rozpouštědlová lepidla**

Jedná se o roztoky polymerů v organických rozpouštědlech, popřípadě samotná rozpouštědla, která naleptávají spojované povrchy a po slisování a vytěkání rozpouštědla dojde k vytvoření lepeného spoje. Takto se lepí mnoho typů polymerů, např. PA 6.6 s koncentrovanou kyselinou mravenčí, PMMA chloroformem apod.

- **Adhezní lepidla**

Adhezní lepidla se zpracovávají ve formě roztoků, disperzí a tavenin. Velmi často se nanáší na podkladový materiál (papír, fólii, textil) a po navinutí vzniknou samolepící pásy nebo v rovinném tvaru etikety či štítky. Lepidlové filmy jsou měkké, trvale lepkavé a při relativně dobré adhezi mají nepatrnou kohezi. Tato lepidla se používají při spojování předem neupravených povrchů.

- **Kontaktní lepidla**

Ve většině případů se jedná o rozpouštědlová lepidla (roztoky polymerů v organických rozpouštědlech, které jsou před použitím často míseny s tvrdidly). Nanáší se na obě, předem upravené plochy, po odpaření rozpouštědla se filmy pevné látky uvedou krátkodobým tlakem do těsného spoje. Hlavními zástupci kontaktních lepidel jsou polyurethanová lepidla, polychloroprenová lepidla a nitrilkaučukovitá lepidla.

- **Tavná lepidla**

Základem tavných lepidel je termoplast, který se před použitím roztaví v tavné pistolí, nanese se na jednu ze spojovaných ploch a po jejich spojení, ochlazení a ztuhnutí lepidla je vytvořen lepený spoj. Tavná lepidla se vyrábí např. z polyethylenu, polyuretanů, polyamidů apod.

- **Reaktivní (pryskyřičná) lepidla**

Reaktivní lepidla polymerují působením vnějších vlivů (iniciátorem je zpravidla vzdušná vlhkost nebo teplota, UV záření a světlo) - tzv. *jednosložková reaktivní lepidla* nebo smícháním základních komponent v přesném poměru - tzv. *vícesložková reaktivní lepidla*. Pro spojení obou lepených ploch není žádoucí nadměrný tlak, součásti se fixují konstantním tlakem po celou dobu vytvrzování (ca 1 N/cm²).

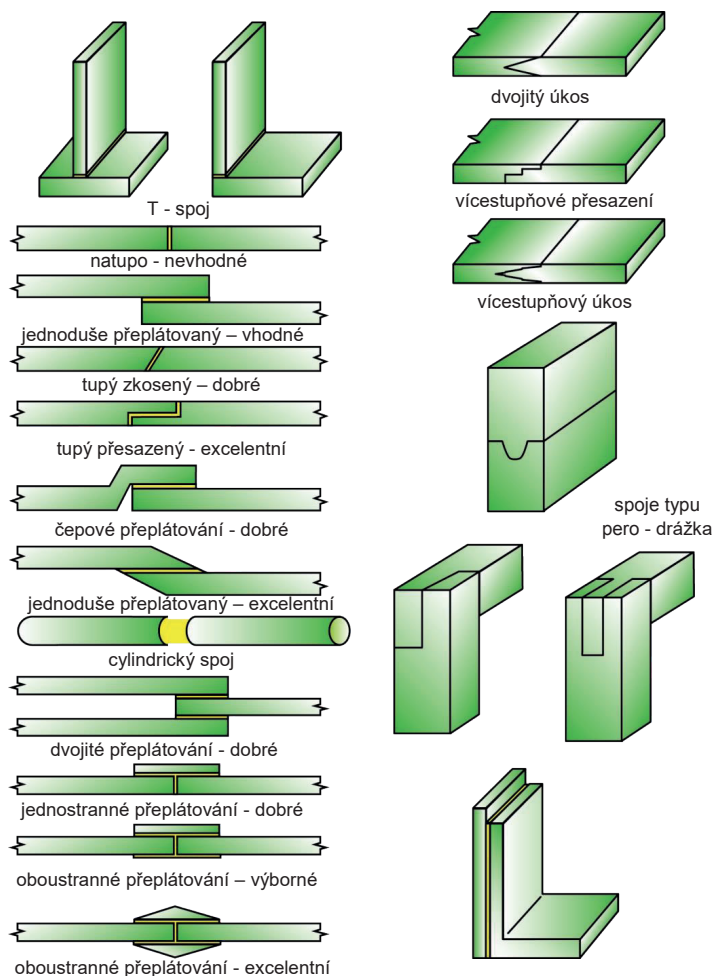
Jednosložková reaktivní lepidla (polyurethanová, kyanoakrylátová vteřinová lepidla) se dodávají spotřebiteli v obalech vzduchotěsně uzavřených. Chemická reakce (vytvrzování) nastává při kontaktu se vzdušnou vlhkostí (bez přísady tvrdidel) a probíhá velice rychle. Podle složení reaktantů vznikají tvrdé až měkké elastické filmy.

Vícesložková reaktivní lepidla se dodávají nejčastěji odděleny ve dvou složkách: pryskyřice a tvrdidlo. Vzhledem ke skutečnosti, že tuhnutí lepidla po smíchání složek vede ke zvyšující se jeho viskozitě, jsou použitelné jen po omezenou dobu. Maximální pevnost dosahuje lepidlo až po úplném vytvrzení, které lze urychlit účinkem teploty. Patří sem především *epoxidová lepidla*, která se dodávají jako viskózní kapaliny a vytvrzovací přísady nebo prášky či lepicí fólie, které již obsahují tvrdidlo, aktivující se při zvýšené teplotě. Důležitou oblastí pro jejich použití jsou skelné lamináty, dále se používají k lepení reaktoplastů, kovů, skla a dřeva. Dalšími vícesložkovými reaktivními lepidly jsou *polyurethanová lepidla* (složená z polyolu a isokyanátu) a *lepidla na bázi nenasyčených polyesterů* (základní složkou jsou polyesterové pryskyřice připravené z nenasyčeného polyesteru v reaktivním rozpouštědle vytvrzované v organických peroxidech).

9.2.3 Konstrukce lepených ploch

Pro celkovou pevnost lepeného spoje má zásadní vliv také správná volba jeho tvaru. Tvary jednotlivých spojů jsou určovány podle druhu polotovaru, rozměru lepené plochy, druhu lepidla a mechanického a chemického namáhání lepené plochy. Není vhodné lepit díly, které jsou při montáži vystaveny odlupujícím se silám. Mechanické namáhání lepeného dílu musí být rozděleno rovnoměrně a nesmí se

soustředit pouze v místě spoje. Spoje musí být namáhány v tahu a smyku, minimálně v odlupování. Nejčastější tvary lepených ploch jsou znázorněny na obr. 9.28.



Obr. 9.28 Příklady konstrukčního provedení lepených spojů

9.2.4 Aplikace lepených spojů

Lepení může být použito pro spojování fólií, desek, tkanin, dílů s neobvyklými tvary nebo konfiguracemi, jako jsou sendvičové panely a lamináty pro letecké aplikace, dřevěné lamináty, brusné kotouče, brusný papír a vrstvené fólie. Aplikace, kde jsou polymery spojovány lepidly, jsou neuvěřitelně pestré a zahrnují: kosmetické kontejnery, osvětlení, optické komponenty, sportovní vybavení, hračky atd. Konstrukční lepidla se používají v leteckém, automobilovém, sportovním a spotřebním průmyslu pro spojování konstrukčních prvků. Lepidla se používají také při sestavování lékařských komponent, jako jsou ortopedické příchytky, sluchadla, měniče, infuzní zařízení a pumpy, lékařská elektronická zařízení, katétrů a k připojení plastových jehel z korozivzdorné oceli do plastových pouzder. Automobilové aplikace zahrnují například spojování dvoudílných termoplastických nárazníků a zpětných zrcátek spojených se skleněnými čelními skly.

Mezi výhody použití lepidel patří rychlejší montáž dílů, kompenzace jejich tolerancí a skutečnost, že při výrobě dílů není nutné zhotovovat otvory pro jejich mechanické spojení apod. Nevýhodami lepení je naopak omezená životnost lepených spojů, důkladná příprava povrchu a někdy i zdlouhavé časy vytvrzování. Použití lepidel může být špinavý proces vyžadující rozsáhlé čištění a během vytvrzování lepidel mohou vznikat nebezpečné výpary. Pro dosažení optimální pevnosti lepeného spoje je nezbytné zajistit dostatečně velkou lepenou plochu (celistvost lepeného spoje nelze snadno kontrolovat). Mezi polymerem a určitými adhezivy mohou vznikat napětové trhliny (obvykle před, ale také během vytvrzování), které negativně ovlivňují vlastnosti lepeného spoje.

POUŽITÁ LITERATURA



- [1] ADAMS, Robert D. *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Elsevier, 2005. ISBN 9781855737419.
- [2] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [3] AVERY, Jack. *Gas-assist injection molding: a principles and applications*. Munich: Hanser, 2001. ISBN 9781569902981.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [5] BELCHER, Samuel L. *Practical extrusion blow molding*. New York: Marcel Dekker Inc., 1999. ISBN 0-8247-1997-2.
- [6] BELCHER, Samuel L. *Practical guide to injection blow molding*. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 0-8247-5791-2.
- [7] *Blow moulding processing manual*. Dostupné z: [<http://www.leaktesters.co.uk>]
- [8] BOBEK, Jiří. *Vstříkovací formy pro zpracování termoplastů*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [9] BRANDAU, Ottmar. *Stretch blow molding*. Boston: Elsevier/William Andrew, 2017. ISBN 978-0323-46177-1.
- [10] BRDLÍK, Pavel. *Aplikace CO₂ interního chlazení ve vyfukovacím procesu*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [11] BROCKMANN, Walter, GEIß, Paul Ludwig, KLINGEN Jürgen a K. Bernhard SCHRÖDER. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Wiley, 2008. ISBN 978-3-527-62393-8.
- [12] CANTOR, Kirk. *Blow film extrusion*. Munich: Hanser, 2011. ISBN 978-3-446-41705-2.
- [13] CRAWFORD, Roy J. a James L. THRONE. *Rotational molding technology*. Norwich: Plastic Design Library/William Andrew Pub., 2002. ISBN 1884207855.
- [14] DOMININGHAUS, Hans. *Plastics for engineers: materials, properties, applications*. Munich: Hanser, 1993. ISBN 3-446-15723-9.
- [15] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [16] ENGELMANN, Sven. *Advanced thermoforming: methods, machines and materials, applications and automation*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2012. ISBN 978-0-470-49920-7.
- [17] *Extrusion procesing*. Dostupné z: [<https://www.slideshare.net>].
- [18] GREWELL, David a Avraham BENATAR. Welding of plastics: fundamentals and new developments. *International Polymer Processing*. 22(1), 43-60, 2007.
- [19] HABENICHT, Gerd. *Applied adhesive bonding: a practical guide for flawless results*. Wiley, 2008. ISBN: 9783527320141.

- [20] HAQUE, Md Shakibul a Mohd Anees SIDDIQUI. Plastic welding: important facts and developments. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(2), 15-19, 2016.
- [21] CHUNG, Chan I. *Extrusion of polymers: theory and practice*. Munich: Hanser, 2011. ISBN 978-1-56990-459-6.
- [22] JAROSCHEK, Christoph. Fast-cycle injection moulding machines with tandem moulds. *Kunststoffe Plast Europe* 93(3), 22-23, 2003.
- [23] KLEIN, Peter. *Fundamentals of plastic thermoforming*. California: Morgan and Claypool, 2009. ISBN 978-1-598-29884-0.
- [24] KLEIN, Rolf. *Laser welding of plastics*. John Wiley and Sons, Inc., 2012. ISBN: 978-3-527-40972-3.
- [25] KOLOUCH, Jan. *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním*. Praha: SNTL, 1986.
- [26] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. Praha: SNTL, 1981.
- [27] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: TU v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
- [28] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: VŠCHT v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [29] LAFLEUR, Pierre G. a Bruno VERGNES. *Polymer extrusion*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 1998. ISBN 978-1-84821-650-1.
- [30] LEE, Norman C. *Understanding blow molding*. Munich: Hanser, 2007. ISBN 3-446-41265-4.
- [31] LENFELD, Petr. *Technologie II.: Část 2. (Zpracování plastů)*. Liberec: TU v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [32] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [33] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXÝ a kol. *Polymérne konstrukčné materiály*. Žilina: ŽU v Žilině, 2012. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [34] LOYDA, Miloslav a kol. *Svařování termoplastů*. Praha: UNO Praha, 2011. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [35] MALLON, J. M. *Advances in automation for plastic Injection Molding*. New York: Rapra Technology, 2011. ISBN 1-85957-283-9.
- [36] MENNIG Günter a Klaus STOECKHERT. *Mold-making handbook*. Munich: Hanser, 2013. ISBN 978-1-56990-446-6.
- [37] MURALISRINIVASAN, Natamai Subramanian. *Update on troubleshooting in Thermoforming*. Shawbury: iSmithers Rapra, 2010. ISBN 978-1-84735-137-1.
- [38] OSSWALD, Tim A., TURNG Lih-Sheng a Paul J. GRAMANN. *Injection molding handbook*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 9781569904206.
- [39] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: (netradiční úvod do současné materiálové vědy)*. Praha: Encyklopedický dům, 1999. ISBN 80-860-4413-0.
- [40] RAUWENDAAL, Chris. *Polymer extrusion*. Munich: Hanser, 2014. ISBN 978-1-56990-516-6.

- [41] ROSATO, Dominick V., ROSATO, Andrew V. a David P. DI MATTIA. *Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics: the complete blow molding operation*. Munich: Hanser, 2004. ISBN 1-56990-343-3.
- [42] ROSATO, Dominick V. *Extruding practices, A practical processing hanbook*. Berlin: Springer, 1998. ISBN 978-0-412-82810-2.
- [43] ROSATO, Dominick V. a Andrew V. ROSATO. *Injection molding handbook*. New York: Springer 2000. ISBN 978-1-4615-4597-2.
- [44] ROSEN, Stanley R. *Thermoforming: Improving process performance*. Dearborn, Michigan: Plastics Molders and Manufacturers Association of SME, 2002. ISBN 0-87263-582-1.
- [45] *Screw extrusion technology – past, present, future*.
Dostupné z: [en.www.ichp.pl]
- [46] *Selecting polystyrene foam where moisture exposure occurs*.
Dostupné z: [https://www.constructionspecifier.com/selecting-polystyrene-foam-where-moisture-exposure-occurs/]
- [47] SIKORA J. W. *Design of extrusion heads*, Lublin: Politechnika Lubelska, 2018.
- [48] STEIDL, Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, č. 1. ISSN 1212-2572.
- [49] STEVENSON, James F. *Innovation in polymer processing: molding*. Munich: Hanser, 1996. ISBN-13 978-3446174337.
- [50] *Thermosetting polymers – rheological testing*. TA Instruments, 2015.
Dostupné z: [https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12103]
- [51] THORNE, James L. *Technology of thermoforming*. Munich: Hanser, 1996. ISBN 3-446-17812-0.
- [52] THRONE, James L. *Understanding thermoforming*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 978-3-446-10796-1.
- [53] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, 2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [54] WILSON, Helen J. *Problem plastics – and how mathematics can help*.
Dostupné z: [http://www.ucl.ac.uk/~ucahhwi/uclscience.html]
- [55] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.

Technické materiály firem:

ARBURG GmbH & Co. KG | ASH Industries | BOCO PARDUBICE Machines s.r.o. | Conair | CZ Plast s.r.o. | ENGEL AUSTRIA GmbH | GDK s.r.o. | Graham Engineering Corporation | Chevron Phillips Chemical Company | Insulation Corporation of America | KraussMaffei Technologies GmbH | KUBOŮŠEK Systems s.r.o. | Kunststoffs Helmbrechts AG | Mold Hotrunner Solutions Inc. | T/Mould Solution GmbH & CoKG | TiK-Technologie in Kunststoff GmbH | Trexel Inc. | Yantai Huantong Rotational Molding Equipment Co., Ltd.

Název	Úvod do technologií zpracování plastů
Autoři	Ing. Luboš Běhálek, Ph.D. Ing. Pavel Brdlík, Ph.D. Ing. Martin Borůvka Ing. Irena Lenfeldová, Ph.D.
Určeno pro	studenty Fakulty strojní TU v Liberci a HS Zittau/Görlitz
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2, Liberec
Schváleno	Rektorátem TUL dne 15. 2. 2019, čj. RE 7/19
Vyšlo	v březnu 2019
Počet stran	173
Vydání	první
Číslo publikace	55-007-19
Tiskárna	Vysokoškolský podnik Liberec, s.r.o. Studentská 2, CZ-Liberec

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7494-460-4

