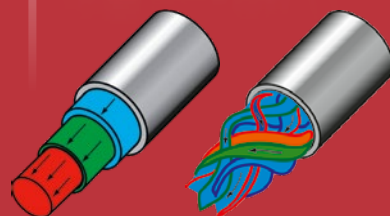


Lubomír Zeman

VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ 2



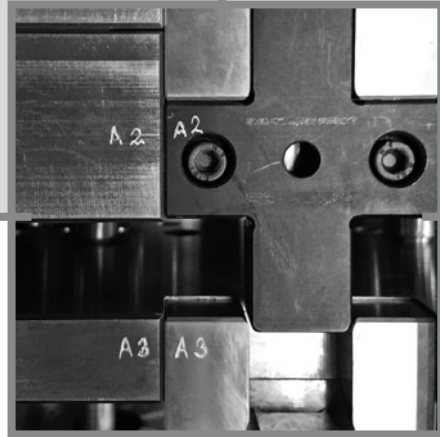
Simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk

Teorie a praxe



Grada
Publishing

Lubomír Zeman



VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ 2

Simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk

Teorie a praxe

Lubomír Zeman

Vstřikování plastů 2

Simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk
Teorie a praxe

Vydala Grada Publishing, a. s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, www.grada.cz
tel.: +420 234 264 401
jako svou 8042. publikaci

Odpovědný redaktor Petr Somogyi
Sazba Jakub Náprstek
Počet stran 448
První vydání, Praha 2021
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

© Grada Publishing, a. s., 2021
Cover Design © Grada Publishing, a. s., 2021

*Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy
Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována
a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele.
Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.*

*Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami
nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.*

ISBN 978–80–271–4247–7 (pdf)
ISBN 978–80–271–1294–4 (print)

Obsah

1 Úvod	13
2 Úvod do makromolekulární chemie	17
2.1 Polymer, polymerizace, konstituce makromolekul, molární hmotnost polymerů	17
2.2 Nadmolekulární struktura polymerů	20
2.3 Vlastnosti polymerních materiálů	23
2.3.1 Viskoelastické chování polymerů	23
2.3.2 Chování polymerních materiálů při zatěžování	28
2.3.3 Termické chování polymerů	28
Termické chování amorfních polymerů, teplota skelného přechodu	28
Termické chování částečně krystalických polymerů	30
3 Úpravy polymerů	31
3.1 Polymerní materiály – jejich stručná historie	32
3.1.1 Vybrané mezníky v historii polymerů	32
3.2 Stárnutí, znehodnocování, porušování, koroze a degradace polymerů	34
3.2.1 Fyzikální stárnutí polymerů	35
3.2.2 Odolnost polymerů vůči přírodnímu prostředí, degradace vnějšími vlivy	36
Chemické přeměny při degradaci	36
Vliv morfologie	36
Hydrolytická degradace	38
Dehydrochlorace	38
Depolymerace	38
Odolnost proti působení povětrnostních vlivů	38
Odolnost proti působení kyslíku	39
Odolnost proti působení ozonu	39
Odolnost proti působení slunečního záření	39
Odolnost proti působení záření o vysoké energii	40
Odolnost proti působení biologických činitelů	41
Odolnost vůči ohni	42
Odolnost vůči chemickým činidlům	44
Odolnost vůči mechanickému namáhání	45
Stárnutí polymerů a metody jeho testování	45

3.3 Modifikace polymerů	49
3.3.1 Fyzikální modifikace polymerů	49
3.3.2 Mechanochemické modifikace polymerů	50
3.3.3 Chemické modifikace polymerů	50
Polymeranalogické přeměny	50
Síťování polymerů	51
3.4 Přísady do polymerů, aditivace polymerů	51
3.4.1 Přísady formulující zpracovatelnost polymerních tavenin	53
3.4.2 Ochrana před vnějšími vlivy – antidegradanty, stabilizátory	53
3.4.3 Plastifikátory, změkčovadla	54
3.4.4 Lubrikanty, nukleační činidla, antistatika	54
3.4.5 Prostředky snižující hořlavost polymerů, retardéry hoření, zpomalovače hoření, samozhášecí přísady	55
3.4.6 Barviva, pigmenty, barevné koncentráty, optická zjasňovadla	57
Pigmenty	57
Barviva	60
3.4.7 Nadouvadla	60
3.4.8 Síťovací činidla	61
3.4.9 Plniva – kompozitní materiály	61
Plniva částicová	62
Uhlíčitán vápenatý	62
Mastek (talek)	62
Duté kuličky – balotina	63
Vyztužující plniva	63
Skleněná vlákna	63
Uhlíková vlákna	64
Nanoplniva	64
3.4.10 Kompatibilizátory v kompozitních materiálech a v polymerních směsích	64
3.4.11 Kompozitní polymerní slitiny, směsi, blendy	65
Druhy polymerních slitin	66
Výroba polymerních směsí	66
4 Termická analýza polymerních materiálů, infračervená spektrometrie	68
4.1 Termické analýzy – termodynamika, metody termické analýzy	68
4.1.1 Základní pojmy	71
4.1.2 Zařízení	72
4.1.3 Tepelné jevy při zahřívání	72
4.2 Termogravimetrie (TG)	73
4.3 Diferenční termická analýza (DTA) a diferenční kompenzační (snímací, skenovací) kalorimetrie (DSC)	75
4.3.1 Diferenční kompenzační kalorimetrie, DSC	76
4.4 Interpretace a využití DTA a DSC křivek	78
4.5 Příklady DSC křivek a jejich vyhodnocení	80
4.6 Spektroskopie	83
4.6.1 Infračervená spektroskopie	84
Princip infračervené spektroskopie	85
Infračervené spektrometry, technika měření, příprava vzorků	86
Možnosti využití infračervené spektrometrie	88

5 Výrobky z plastů – zpracovatelské technologie	93
5.1 Historie metod zpracování plastů	93
5.2 Zpracovatelské technologie	95
5.2.1 Pomocné operace	96
5.2.2 Přípravné zpracování plastů	96
Míchání a hnětení	96
Granulace	97
Tabletování	97
Recyklace	97
Sušení	98
Barvení, aditivace	101
Linky přípravného zpracování	101
5.2.3 Hlavní zpracovatelské technologie	102
Přímé lisování	102
Přetlačování	103
Válcování (kalandrování)	104
Vytlačování (extruze)	104
Vyfukování dutých těles	105
Vstřikování	109
Tvarování polotovaru za tepla (thermoforming)	112
5.2.4 Další technologie pro zpracování plastů	116
Zpracování kapalných systémů	116
Odlévání, lití, zalévání	116
Máčení	117
Natírání, impregnace	117
Reakční vstřikování (RIM, Reaction Injection Molding – RRIM, SRIM)	118
Zvlákňování	118
Technologie nerozebíratelného spojování	118
Svařování plastů	119
Lepení	126
Výroba laminátů a součástí z vyztužených plastů	129
Výroba prepregů s reaktoplastickou maticí	130
Výroba prepregů s termoplastickou maticí	132
Lisování za tepla a Injektform	133
Navíjení	134
Příklady metod navíjení	134
Tažení (pultruze)	135
Laserové zpracování plastů	136
Řezání laserem	136
Strukturované vrtání laserem	136
Laserové spojování – svařování a navařování	137
Spoje plast – kov	137
Laserové leštění plastů	138
Korekce tvaru, odstraňování přetoků, odjehlování	138
Laserové značení	138
Lehčení	140
Spékání	141

Rotační natavování polymerů	141
Povrchové úpravy	142
Kaširování	142
Lakování	145
Potiskování plastů	145
Dezénování plastů	147
Leštění plastů	148
Pokovování plastů	148
Povrchová ochrana povlakováním plasty nebo práškovými plasty	148
Sametování (flockování)	149
Obrábění plastů	149
Nerozebíratelná spojení	150
Rozebíratelná spojení	150
Radiační síťování	151
Nekonvenční způsoby zpracování plastů	151

6 Technologie vstřikování termoplastů a její modifikace 153

6.1 Fyzikální procesy v průběhu vstřikování termoplastů 153

6.2 Fáze vstřikovacího cyklu 154

6.2.1 Plastikační fáze – příprava polymerní taveniny 154

6.2.2 Vstřikovací fáze 155

6.2.3 Dotlaková fáze 156

6.2.4 Fáze ochlazovací 156

6.3 Technologie vstřikování s využitím horkých systémů vstřikovacích forem 157

6.3.1 Porovnání horkých a studených vtokových rozvodů 157

6.3.2 Řešení horkých systémů vstřikovacích forem 160

6.3.3 Horké systémy s jehlovými uzávěry 167

Kaskádové a sekvenční vstřikování, systém Dynamic Feed, SoftGate, SynFlow, FLEXflow 167

6.4 Technologie vícekomponentního vstřikování termoplastů 170

6.4.1 Výběr materiálů pro vícekomponentní vstřikování, mísitelnost a kompatibilizace polymerních materiálů, adheze polymerních materiálů 174

6.4.2 Vícemateriálové vstřikování termoplastů 177

 Sendvičové vstřikování termoplastů 177

 Intervalové vstřikování termoplastů 178

 Mramorové vstřikování termoplastů 178

6.4.3 Technologie obstřikování, zastřikování, nastřikování 179

 Technologie vstřikování Insert Molding – zastřikování do formy vkládaných dílů 179

 Technologie vstřikování Outsert Molding – lokální nástřik termoplastu na kovový díl vložený do formy 184

 Vstřikování hybridních konstrukčních dílů 190

 Technologie vstřikování Moulded Interconnect Device (MID), Three Dimensional Molded Interconnect Device (3D MID), vytváření elektricky vodivých cest a spojů 192

 Vícekomponentní vstřikování – technologie 2K, 3K 195

6.4.4 Technologie vstřikování strukturálně lehčených termoplastů 198

 Struktura polymerních pěn 198

Příprava polymerních pěn – nadouvadla (blowing agent)	199
Příprava polymerních pěn – princip vzniku a růstu buněk	202
Technologie vstřikování strukturálně lehčených termoplastů – vstřikování termoplastů s napěňováním	203
Vstřikování strukturálně lehčených dílů – chemické lehčení.	204
Fyzikální způsoby lehčení	206
Strukturální lehčení termoplastů v porovnání se standardní technologií vstřikování termoplastů	212
6.4.5 Vstřikování s podporou plynu a vody	214
Vstřikování s podporou plynu, Gas Injection Technology (GIT).	215
Vstřikování s podporou vody, Water Injection Technology (WIT)	218
6.4.6 Vstřikování kovových a keramických prášků, Powder Injection Moulding (PIM)	224
Technologie vstřikování kovových prášků, Metal Injection Moulding (MIM) – postup výroby	228
Technologie vstřikování kovových prášků – Metal Injection Molding	232
MIM – vstřikovací stroje	232
MIM – konstrukce výstřiků a vstřikovacích forem	233
MIM – technologické parametry vstřikování	234
Užití technologie vstřikování MIM	235
6.4.7 Další modifikace technologie vstřikování termoplastů.	237
6.4.8 Reakční vstřikování, Reaction Injection Molding (RIM) a jeho varianty	244
6.4.9 Technologie vstřikování silikonových kaučuků (Liquid Silicon Rubber, LSR), vstřikování tekutých silikonových kaučuků (Liquid Injection Moulding, LIM), vstřikování pevných silikonových kaučuků (HTV Process – Solid Silicone Injection Molding)	246
Vstřikování tekutých silikonových kaučuků – technologie LSR, LIM	247
Vstřikování pevných blokových silikonů a past – HTV Solid Silicone.	248
6.4.10 Technologie vstřikování reaktoplastů	250
6.4.11 Vstřikování hořčíku (Mg – Thixomolding) a zirkonia (Zr – Liquidmetal).	257

7 Využití simulačních programů CAE (Computer Aided Engineering) při vstřikování termoplastů	260
7.1 CAE (Computer Aided Engineering): usnadnění analýz a optimalizací	263
7.2 Průmysl 4.0 a využití softwarů CAE při optimalizaci procesu vstřikování termoplastů	265
7.3 Vstřikování termoplastů: modelování a simulace	267
7.4 Virtuální a reálná optimalizace procesu vstřikování.	268
7.4.1 3D model výstřiku	269
7.4.2 Standardní moduly CAD/CAM programů	270
7.4.3 Simulační a optimalizační programy – programy CAE.	271
Variantní výpočty a optimalizace procesu vstřikování.	274
Virtuální a reálná optimalizace vstřikovacího procesu – VARIMOS	275
7.5 Interpretace výsledků simulačních výpočtů	277
7.5.1 Příklady simulačních výsledků s komentářem	280
7.6 Nové přístupy k toku polymerních tavenin.	291
7.6.1 Metoda vstřikování na technickou viskózní křivku	292
7.6.2 Změna viskozity polymerní taveniny a technologie vstřikování termoplastů	297
Aplikace simulačních programů a programů pro optimalizaci plnicí fáze vstřikovacího procesu	300
7.7 Komentář – vzdělávání	303
7.8 Simulační výpočty a realita.	304

8 Průvodce při řešení problémů a odstraňování vad při vstřikování termoplastů	306
8.1 Termoplasty pro technologii vstřikování	307
8.2 Vliv aditiv v polymerních materiálech na kvalitu výstřiků z termoplastů	307
8.3 Fyzikální procesy probíhající v polymerních materiálech při jejich zpracování vstřikováním	311
8.3.1 Vnitřní pnutí ve výstřicích z termoplastů	314
Tepelné pnutí	314
Pnutí z nerovnoměrné orientace makromolekul a vyztužujícího plniva	315
Pnutí z nerovnoměrné krystalizace – částečně krystalické materiály	315
Pnutí vlivem dotlakové fáze	315
Pnutí deformační	315
8.3.2 Shrnutí – vlivy na fyzikální procesy	316
8.4 Fáze vstřikovacího procesu	316
8.4.1 Plasticační fáze	317
8.4.2 Vstřikovací fáze	317
8.4.3 Dotlaková fáze	318
8.4.4 Fáze ochlazovací	318
8.4.5 Shrnutí – stav výstřiku a jeho kvalita	319
8.5 Předpoklady pro řešení problémů a odstraňování vad při vstřikování termoplastů	319
8.5.1 Metody pro odstraňování problémů (Troubleshooting Methodology)	321
8.5.2 Nástroje pro odstraňování problémů při vstřikování termoplastů	322
8.5.3 Nejčastější obecné problémy při vstřikování termoplastů	323
Ústí vtoku na výstřiku	323
Formy s hydraulicky ovládanými tvary	323
Odvzdušnění tvarových dutin vstřikovacích forem	324
Vstřikovací stroj	325
Sušárny a sušení vstřikovacích granulátů	327
Změna vstřikovaného materiálu nebo jeho barevného odstínu při výrobě výstřiků, černé tečky na výstřicích	329
Speciální čistící granuláty	331
Horké systémy vstřikovacích forem	332
Zásady provozu vstřikovacích forem s horkými systémy – horké trysky bez uzavíracích jehel	334
Zásady provozu vstřikovacích forem s horkými systémy – horké trysky s jehlovým uzávěrem	335
Balancované plnění tvarových dutin vstřikovacích forem	335
Vybalancované plnění tvarových dutin vstřikovacích forem	340
Balancování, temperace a chlazení vstřikovacích forem	341
Balancování – odvzdušnění tvarových dutin vstřikovacích forem	341
Balancování – rozmístění tvarových dutin v hlavní dělicí rovině formy, objem tvarových dutin	342
8.6 Příklady přístupu k řešení a odstraňování vad při vstřikování dílů z termoplastů	344
8.6.1 Změny, rozdíly v lesku na povrchu výstřiků	344
8.6.2 Stopy po vyhazovačích viditelné jako deformace stěn výstřiků	344
8.6.3 Bubliny ve stěně výstřiku	348
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	348
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	349
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	350
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	350
8.6.4 Nestejnoměrné probarvení výstřiků	350
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	350

Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	351
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	351
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	352
8.6.5 Přetoky, otřeby na výstřících	353
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	353
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	354
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	355
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	356
8.6.6 Vizualní vada – stín na vzhledovém povrchu	357
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	357
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	357
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	358
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	358
8.6.7 Neúplné výstřiky	358
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	358
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	360
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	361
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	363
8.6.8 Výstřiky s propadlými místy	363
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	364
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	365
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	367
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	368
8.6.9 Vzhledové vady na povrchu výstřiků (stříbření, světlé stopy, mapy, pruhy apod.)	368
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	369
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	371
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	372
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	372
8.6.10 Studené spoje	373
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	373
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	374
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	375
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	375
8.6.11 Deformace výstřiků	375
Technologické procesní parametry a jejich vliv na odstranění vady	377
Konstrukce vstřikovací formy a její vliv na odstranění vady	379
Vstřikovací stroj a jeho vliv na odstranění vady	380
Vstřikovaný materiál a jeho vliv na odstranění vady	380
8.6.12 Sériová výroba výstřiků z termoplastů a systémy jakosti	381
Statistické řízení procesů	383
Způsobilost výrobního procesu, stroje a měřidla	386
Paretův princip, Paretův diagram	394

9 Využití 3D tisku při výrobě prototypových výstříků z termoplastů	397
9.1 Výroba prototypových výstříků s využitím tvarových vložek z PA 12	398
9.1.1 Multi Jet Fusion Process	398
9.1.2 Výstříky a koncepce vstřikovacích forem	400
9.1.3 Příprava tvarových vložek z PA 12 pro vstřikování	404
9.1.4 Materiály a podmínky výroby prototypových výstříků – tvarové vložky z PA 12	405
9.1.5 Závěry z výroby prototypových výstříků – tvarové vložky z PA 12	406
9.2 Výroba prototypových výstříků s využitím tvarových vložek z ABS	409
9.2.1 Technologie 3D tisku Poly Jet	409
9.2.2 Příprava tvarových vložek z ABS pro vstřikování	410
9.2.3 Závěry z výroby prototypových výstříků – tvarové vložky z ABS	413
10 Zkratky a názvy polymerních materiálů a plniv	422
Testovací otázky	426
Literatura	443
Rejstřík	444

Historie a vývoj lidské, tedy naší civilizace jsou neodmyslitelně spojeny s materiály a materiálovými technologiemi. Archeologové dokonce materiály využívají pro periodizaci vývoje lidstva. Jako příklad takovéto periodizace můžeme uvést starší a mladší dobu kamennou, které byly následovány dobou měděnou, bronzovou, železnou...

Minulé století je možné označit za dobu ocelovou, přičemž se v tomto století materiálové spektrum významně rozšířilo, a to zejména díky objevům polymerních materiálů. Z názvoslovného hlediska je „polymer“ ekvivalentní termínu „makromolekulární látka“. Předpona „poly-“ znamená „více“ nebo „mnoho“, slovo polymer tedy vyjadřuje, že se jedná o substanci složenou z velkého množství „merů“. Materiály založené na makromolekulách (polymerní materiály) se dělí na dvě základní skupiny: na plasty, které jsou za běžných podmínek tuhé, a na kaučuky, které jsou měkké a ohebné. Polymery tvoří také souvislou fázi – matici – v různých typech kompozitních materiálů.

Plasty jsou jedním z největších fenoménů posledních dekád. Můžeme jim fandit, můžeme být ve vztahu k nim neutrální nebo k nim mít negativní přístup, ale všichni máme jednu věc společnou – bez použití výrobků z plastů si náš život těžko umíme představit.

Nabízí se tedy otázka: proč je plast mezi konstrukčními materiály takovým fenoménem?

Odpověď je relativně jednoduchá. Plasty (termoplasty, reaktoplasty, termoplastické elastomery, kompozitní materiály s termoplastickou nebo reaktoplastickou maticí) mají jako materiály – samozřejmě, že se dále uvedené výčty obecně netýkají všech typů – široké rozpětí objemové hmotnosti (od cca $0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ do cca $2,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, platí pro materiály bez plniva), což výrazně napomáhá snižovat hmotnost konstrukčních skupin a další řady výrobků. Například skleněná půllitrová lahev na pivo má hmotnost cca 330 g, jedenapůllitrová lahev z polyethylentereftalátu (PET) váží jen cca 38 g.

Mají vysokou variabilitu vlastností, velmi dobrý poměr hmotnosti k mechanickým vlastnostem (pružnost, pevnost), jsou houževnaté za nízkých teplot, mají výborné izolační vlastnosti (jsou tepelnými, zvukovými i elektrickými izolanty), ale mohou také dobře vést teplo, jsou i elektricky vodivé, mohou být magnetické, jsou odolné vůči korozi, chemickým vlivům, odolávají biologickým činidlům (bakterie, plísně, houby, hmyz), jsou hygienicky nezávadné, ve tvaru potrubí mají malou hydraulickou drsnost, jsou odolné proti zarůstání (inkrustaci), umožňují použití velmi široké palety zpracovatelských technologií, jsou snadno barvitelné, lze je velmi dobře dekorovat (od zrcadlového lesku po různé typy desénů a textur), jsou recyklovatelné, jsou relativně levné atd.

Pokud jsem uvedl výčet kladných vlastností, musím zmínit, že plasty mají i vlastnosti omezující jejich použití. Dá se říci, že nejvíce diskutovaným je jejich vliv na životní prostředí, respektive environmentální vlastnosti plastů. Plasty jsou za normálních podmínek velmi stabilní, podléhají velmi pomalému samovolnému rozkladu, jejich likvidace je problematická. Plasty mají obvykle nízkou tepelnou odolnost, jejich vlastnosti jsou výrazně závislé na teplotě jejich použití a na době působení zatížení. Zejména kompozity s vytuzujícími plnivými jsou anizotropní (anizotropie je vlastnost, kterou se určuje závislost dané veličiny na volbě směru), jejich teplotní roztažnost je o jeden řád (cca $10\times$) větší

než u kovových materiálů, některé plasty jsou navlhavé, jsou částečně hořlavé, z některých se mohou uvolňovat zdravotně závadné monomery a rozkládající se aditiva, vykazují povětrnostní a fyzikální stárnutí, podléhají korozi za napětí, jsou vrubově citlivé, propustné pro nízkomolekulární látky, bobtnají nebo se rozpouštějí v selektivních rozpouštědlech (selektivní rozpouštědlo je médium, které je rozpouštědlem alespoň pro jednu složku ze směsi polymerů), na závadu může být vznik statické elektřiny atd. Výstřiky z termoplastů obsahují nezanedbatelné vnitřní prnutí, které může v mnoha aplikacích vést až k jejich destrukci.

Mnohé uvedené nevýhody „čistých“ polymerních materiálů se dají snížit nebo i eliminovat při jejich výrobě vhodnou aditivací, plnivý, přípravou směsí materiálů, chemickými modifikacemi atd.

Plasty jako polymerní materiály se – zjednodušeně popsáno – vyrábějí ve třech krocích:

- Výroba monomeru buď přímo z ropy, respektive jejích frakcí (frakce je část produktu získaná při dělení látek destilací, tříděním apod.), nebo chemickými reakcemi.
- Druhým krokem je polymerace (viz kapitolu 2.1), což je chemický proces, kdy za přítomnosti dalších chemických látek (iniciátory, inhibitory, retardéry polymerační reakce) vzniká z monomeru vysokomolekulární látka – polymer.
- Posledním, třetím krokem je aditivace vysokomolekulárního produktu, kdy tento získává konečné (jak zpracovatelské, tak i užité) vlastnosti. Při aditivaci se do polymerního materiálu přidávají například antioxidanty, UV stabilizátory, tepelné stabilizátory, retardéry hoření, antistatika, modifikátory rázové houževnatosti, plniva – částicová, vláknitá (vyztužující), nanoplňniva, barevné pigmenty, jiné polymery (výroba polymerních směsí), chemická modifikace atd.

Pozitiva jejich použití obvykle převyšují negativa v dostatečné míře. Z pohledu technického rozvoje je využití plastů jako konstrukčních i spotřebních materiálů nezbytné. Podle statistik uvedených na www.bpf.co.uk je jedním z největších spotřebitelů plastů obalový průmysl. V případě náhrady plastových obalů obaly z jiných materiálů by se hmotnost těchto obalů z alternativních materiálů zvýšila 3,6×, emise skleníkových plynů by se zvýšily 2,7×, spotřeba energií na jejich výrobu by vzrostla 2,2× a velikost odpadů by narostla 1,6×.

Plasty a polymerní kompozity přinášejí při správném použití novou kvalitu výrobků se zvýšenou užitnou hodnotou a obvykle i s příznivější ekonomikou výroby.

Plasty umožňují při konstruování výrobků využívat nové konstrukční a koncepční přístupy založené například na integraci jednoduchých tvarů a dílů do složitějších vícefunkčních součástí, nebo na kombinaci plast – kov apod.

Obecně je možné konstatovat, že použití materiálů na bázi polymerů je vhodné a nutné, zejména tam, kde se hledají úspory hmotnosti, například ve vztahu ke spotřebě pohonných hmot a energií. Takovými obory jsou primárně letecký a automobilový průmysl, kde například u osobních automobilů s plně elektrickým pohonem jejich hmotnost stoupla v důsledku použití baterií pro zásobu elektrické energie o cca 250 kg až 350 kg.

Při konstrukci plastových dílů a součástí by měl převažovat způsob, který vzájemně propojuje výběr vhodného materiálu, jenž bude – stejně jako další řešení – odpovídat požadavkům jakosti kladeným v zadání konkrétního výrobku, konstrukčnímu řešení dílu, výrobní technologii, včetně výrobního zařízení a způsobu kontroly jakosti vyrobené součásti. Protože se jedná o materiály s relativně dlouhou životností, součástí konstrukčního řešení by mělo být posouzení dopadu výrobku na životní prostředí ve všech stádiích jeho životního cyklu (Life Cycle Assessment, LCA), stejně jako ekonomická analýza.

Problémem dnešní doby je, že většina materiálových toků plastů má lineární povahu: primární surovina (většinou ropa) se vytěží, přemění se na konkrétní produkty a na konci životního cyklu produktů skončí na skládce nebo ve spalovně. Určité množství se recykluje a znovu se zpracuje. Zde si dovoluji jednu poznámku: podle údajů z MIT (Massachusetts Institute of Technology) existuje celosvětově poptávka po cca 16 % z recyklovaných plastů připravených k dalšímu zpracování.

Svět vidí řešení problémů lineárních materiálových toků v cirkulární ekonomice (nebo podle pojmosloví Evropské unie v oběhovém hospodářství). Cirkulární ekonomika je koncept, který je integrální součástí programů udržitelného rozvoje. Na rozdíl od lineárních materiálových toků je v cirkulární ekonomice klíčové, aby byly používané materiály navzájem odděleny do dvou nezávisle cirkulujících okruhů, jež se oba řídí svou vlastní logikou. První okruh zahrnuje látky organického původu, které jsou snadno odbouratelné, jejich návrat do biosféry tedy není problematický. Druhý obsahuje syntetické látky, kam řadíme většinu plastů, protože vznikly syntézou látek (nejsou tedy umělé). Tyto materiály by měly být vkládány do produktů tak, aby je bylo možné z nich extrahovat (získat zpět) a použít znovu, tedy nevracet je do biosféry, což v reálném světě samozřejmě není 100% možné. Proto je i cirkulární ekonomika částečně ekonomikou lineární.

Výběr vhodného materiálu není úplně jednoduchý, protože se sice již neobjevují nové druhy plastů, ale jejich výrobci je nabízejí v množství variant. Výběr materiálů usnadňují různé materiálové databáze s uvedenými vlastnostmi plastů, přičemž základem obvykle je databáze CAMPUS (Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards). Důležitou vlastností této databáze je skutečnost, že nabízí data jednotlivých materiálů, která byla sestavena podle jednotné metodiky normované v normách ISO, umožňuje tedy vzájemné porovnání naměřených hodnot a materiálů mezi sebou.

Konstrukce dílů z plastů vyžaduje odlišné přístupy než ty, které jsou platné pro konstruování součástí z kovových materiálů (a které se obvykle vyučují na příslušných technických školách).

Zásady technologičnosti konstrukce dílů z plastů obsahují řadu konstrukčních pravidel, jako například jak řešit tloušťku stěn, vyztužující žebra a jejich napojování na sebe i základní stěnu, úkosy, zaoblení, vruby, umístění ústí vtoků, problematiku studených spojů, způsoby spojování dílů atd.


Na potenciál použití materiálů na polymerní bázi a na jejich vývoj je tedy nutné pohlížet nejen z technického, ale i ekonomického a environmentálního hlediska.

Zpracování a aplikace plastů má v České republice a i na Slovensku tradici a v souvislosti zejména s rozvojem výrobních kapacit výstřiků z plastů pro automobilový průmysl je předmětem celé řady podnikatelských aktivit. Přes různé výkyvy se tato oblast podnikání jeví jako perspektivní i do budoucna. Důvodem je skutečnost, že současný vývoj se prakticky ve všech průmyslových odvětvích bez dílů z plastů neobejde a další pokrok bez nich není možný.

Tato kniha představuje další část volného cyklu publikací¹ věnovaných základům problematiky vstříkování termoplastů. Mým cílem bylo zmapovat, a to zejména z praktického úhlu pohledu, technologii vstříkování termoplastů v celé její šíři a snad tím položit základy pro další vzdělávání v této oblasti.

Technologie vstříkování termoplastů, včetně všech jejich variant, jsou díky možnosti zapojit do procesu výroby výstřiků celou řadu automatizačních zařízení (včetně virtuálního zapojení počítačových programů do předvýrobních etap k usnadnění inženýrských analýz a optimalizací a možnosti 3D měření výstřiků) vhodné pro zapojení do sice zprofanovaného pojmu a systému Průmysl 4.0, neobejde se to však bez pracovníků se znalostmi jejich fungování a ani bez pracovníků se znalostmi procesu vstříkování termoplastů. Celkem snadno se to manažersky vysloví, ale naplnění těchto slov je velmi nesnadný úkol, se kterým se všichni – v některých firmách úspěšněji, v některých méně úspěšně – potýkáme při vstříkování výstřiků z termoplastů s definovanou kvalitou, a to dnes a denně.

¹ ZEMAN, L.: *Vstříkování plastů*, Praha: BEN – technická literatura, 2009 (ISBN 978-80-7300-250-3) a ZEMAN, L.: *Vstříkování plastů, teorie a praxe*, Praha: Grada Publishing, 2018 (ISBN 978-80-271-0614-1).



Jedná se o běh na dlouhou trať, který bez profesních znalostí zainteresovaných pracovníků a s ohledem na stále se zvyšující požadavky na kvalitu výstřiků a zvyšující se současné finanční nároky na výrobu (zvyšování mezd bez zvyšování produktivity vstřikování, které z pohledu požadavků na jakost daného výstřiku již bylo v nejširším slova smyslu optimalizováno, zvyšování cen vstřikovacích materiálů, nutnost platit odběrateli výstřiků paušální částku za nominaci k výrobě daného výstřiku, změny v automobilovém průmyslu vyvolané z velké části ne úplně kompetentními politickými rozhodnutími atd.) nelze realizovat.

Profesní vzdělávání, respektive průběžné profesní vzdělávání zainteresovaných pracovníků představuje v oboru vstřikování termoplastů při současném zoufalém nedostatku odborně vzdělaných pracovníků jeden z největších problémů. A dovolím si podotknout, že žádné přístupy v rámci akcí Průmysl 4.0 nemají bez vzdělání šanci na úspěch. Proto je tato kniha doplněna přílohou obsahující sadu otázek, na které by naši odborní pracovníci měli (nebo mohli) být schopni uvést správné odpovědi. Otázky vycházejí z obsahu této knihy (a dvou jejích předchůdců), pokud tedy na některé neznáte odpověď, hledejte ji právě v nich.

Mnoho úspěchů při dalším vzdělávání přeje

Autor

Mechanické, elektrické, optické a další vlastnosti polymerů jsou určeny jejich chemickou a fyzikální strukturou. Pod pojmem chemická struktura se rozumí **konstituce**¹ (tedy typ a uspořádání strukturálních jednotek v makromolekulách), **molární hmotnost polymeru**, dále **konfigurace**² a **konformace**³ makromolekul. Vesměs jde o informace vztahující se k izolovaným makromolekulám. Chemická struktura polymerů předurčuje možnosti jejich vzájemného uspořádání – fyzikální strukturu polymerů. Z pohledu názvosloví, jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole, je pojem „polymer“ ekvivalentem pojmu „makromolekulární látka“. Předpona „poly-“ ve slově polymer pochází ze starořečtiny a znamená „mnohý, četný, hojný“, respektive „více“ nebo „mnoho“. Vyjádření slovem polymer tedy uvádí, že se jedná o sloučeniny několikrát substituované (nahrazené) nebo se jedná o makromolekulární látky, tedy o látky složené z velkého množství jednotek, „merů“, elementárních částí. Pod pojem polymer zahrnujeme všechny makromolekulární látky, tedy látky přírodní (například škrob, celulózu, bílkoviny, kaučuky, ...) i látky syntetické. Velká řada proteinů získává svou funkci až při vytvoření oligomerní struktury (struktury složené z více podjednotek).

Podle obecné charakteristiky syntetické⁴ makromolekulární látky zahrnují širokou oblast materiálů: plasty, elastomery, syntetická vlákna a syntetické kaučuky. Bohužel místo správného názvosloví se mnohdy setkáváme s pojmy jako například igelit (nejčastěji u termoplastů), umělá hmota (plasty), bakelit (u reaktoplastů), guma (u elastomerů) apod.

2.1 Polymery, polymerizace, konstituce makromolekul, molární hmotnost polymerů

Z chemického hlediska jsou polymery látkami vzniklými **polymerací** nebo též polymerizací. Polymerace je chemický proces, při kterém se většinou malá jednoduchá molekula (nazývaná **monomer**) řetězí sama se sebou v mnoha opakováních, až dojde ke vzniku velké molekuly, tzv. **makromolekuly**,⁵ z nichž se utvářejí polymery. Je to tedy reakce velkého množství monomerů, při které vznikají dlouhé makromolekulární řetězce a při níž nevznikají vedlejší produkty. Chemické složení polymerů je shodné s chemickým složením monomerů.

Aby byla polymerace zahájena, musí být do systému přivedeno určité množství energie, která reakci aktivuje. **Aktivační energie** uvede část molekul do reaktivní formy, v níž jsou schopny provádět příslušnou reakci. Aktivační energii může být ohřev systému, UV záření nebo nějaká aktivující látka, iniciátor, katalyzátor.

¹ Z latinského *constituere*, ustavit, založit, zakotvit složení, uspořádání atomů a vazeb v molekule.

² Seskupení, uspořádání, nastavení, prostorové uspořádání atomů v molekule.

³ Prostorově různé uspořádání atomů v molekule jedné sloučeniny.

⁴ Slovo „syntéza“ pochází z řeckého *synthesis*, skládání, jde o označení pro proces spojování dvou nebo více částí do jednoho celku, v makromolekulární chemii se jedná zejména o uhlík, vodík, dusík, síru, chlor a fluor.

⁵ Z řeckého *macros*, velký, dlouhý.

2

Polymerizace se – podle svého mechanismu – dělí na polymeraci radikálovou, iontovou a na tři polyreakce:

- **Polymerace (polyinzerce)** je v podstatě „vsunutí“ molekuly monomeru s násobnou (obvykle dvojnou) vazbou mezi dvěma atomy uhlíku do vazby jednoduché, nejčastěji C-H. Je to řetězový mechanismus bez vzniku nějaké vedlejší nízkomolekulární látky. Typická je polyreakce pro polymeraci olefinů (ethylen, propylen, butadien, styren, ...), slouží k výrobě například PE, PP, PVC, PTFE, PVDF, PS, HI-PS, PMMA, SB, ABS, SAN, POM, EVA, TPE, PAN, butadienstyrenových kaučuků, kaučuků butadienakrylonitrilových, chloroprenových kaučuků a dalších. Vzniklé polymery jsou složeny z jednotek o stejné hmotnosti, jakou měl výchozí monomer. Nárůst makromolekuly je velmi rychlý (zlomky sekundy), vytvořené makromolekuly nejsou stejně dlouhé.
- **Polykondenzace** je stupňovitá reakce, kdy se velikost rostoucí makromolekuly zvětšuje přibližně geometrickou řadou. Reakce se zpravidla účastní monomery různého druhu, jde o spojování dvou kondenzujících látek za současného odštěpení vedlejšího produktu – nízkomolekulární sloučeniny (nejčastěji H₂O – voda, NH₃ – amoniak, HCl – chlorovodík), polymer má jiné chemické složení než jednotlivé monomery. Slouží k výrobě PA, PPA, polyesterů nasycených i nenasycených, PET, PBT, PC, PEI, PPS, PEK, PEEK, PAEK, PSU, LCP, fenoplastů, aminoplastů, silikonů, epoxidových pryskyřic, alkydových pryskyřic, ...).
- **Polyadice** je reakce dvou různých monomerů, ale na rozdíl od polykondenzace nevzniká žádný vedlejší produkt. Slouží k výrobě PU, epoxidů atd.

Radikálová polymerace je iniciována radikálem,⁶ což je vysoce reaktivní částice, která má jeden nebo více nepárových elektronů. Jako radikály se nejčastěji používají peroxidy nebo UV záření. Peroxidy jsou sloučeniny se specifickou funkční skupinou nebo molekulou obsahující jednoduchou vazbu kyslík – kyslík a slouží jako katalyzátory⁷ některých typů polymerací.

Podle způsobu provedení se polymerace dělí například na blokovou, roztokovou, suspenzní, emulzní. Stereospecifickou se nazývá polymerizace, při níž vznikají prostorově pravidelně uspořádané makromolekuly. Radiační polymerizace je iniciována ozářením monomerů. Počet opakování stavebních jednotek (merů) v makromolekule udává polymerační stupeň *n*. Pokud je počet opakování nízký (*n* < 10), označujeme tuto molekulu jako **oligomer**.⁸ Pokud je počet opakování monomeru v molekule přesně daný, pak hovoříme o tzv. dimeru (zdvojení monomeru), trimeru (ztrojení), tetrameru atd.

Polymerizace je základní reakce pro výrobu plastů, elastomerů, syntetických kaučuků a syntetických vláken. Uplatňuje se při výrobě a využití laků, polyesterů, laminátů a v lékařství. Polymerizace se vyskytuje i v procesech v živé přírodě, například při biosyntéze polysacharidů a proteinů. Polymerizace lze dělit podle způsobu narůstání makromolekulárních řetězců během syntézy na **řetězové** (výroba PS, PE, PP, PVC, PMMA...) a **neřetězové**.

Polymery, jejichž makromolekuly obsahují jen jeden druh monomerních jednotek (tedy vznikají polymerací jednoho monomeru – homopolymerací), se nazývají **homopolymery**. Současnou polymerací dvou nebo více monomerů vznikají **kopolymery**.

Výsledkem kopolymerizace dvou nebo více monomerů může být podle podmínek statistický kopolymer (jednotlivé typy monomerů se v řetězci střídají náhodně, mohou tvořit i skupiny), alternující kopolymer (jednotlivé typy monomerů se v řetězci střídají pravidelně), případně blokový kopolymer (jednotlivé typy monomerů tvoří delší souvislé úseky řetězce, střídají se v blocích), nebo roubovaný kopolymer (na hlavní řetězec tvořený monomerními jednotkami jednoho druhu jsou naroubovány postranní řetězce vystavěné z druhého monomeru).

⁶ Z latinského *radicalis*, pocházející z kořene.

⁷ Katalyzátor, z řeckého *katalytés*, je látka vstupující do chemické reakce, kterou urychluje nebo zpomaluje do rovnovážného stavu a přitom z ní sama vystupuje nezměněná.

⁸ Z řeckého *oligos*, několik.