

Obsah

1 Úvod	13
2 Úvod do makromolekulární chemie	17
2.1 Polymery, 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
Uhlíčitan vápenatý	62
Mastek (talek)	62
Duté kuličky – balotina	63
Vyztužující plniva	63
Skleněná vlákna	63
Uhlíková vlákna	64
Nanoplňiva	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 polotovarů 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 matricí	130
Výroba prepregů s termoplastickou matricí	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 strukturně lehčených termoplastů – vstřikování termoplastů s napěňováním	203
Vstřikování strukturně lehčených dílů – chemické lehčení.	204
Fyzikální způsoby lehčení	206
Strukturní 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

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
Applikace 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 výstřiku	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, otřepty na výstřicích	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 Vizuální 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