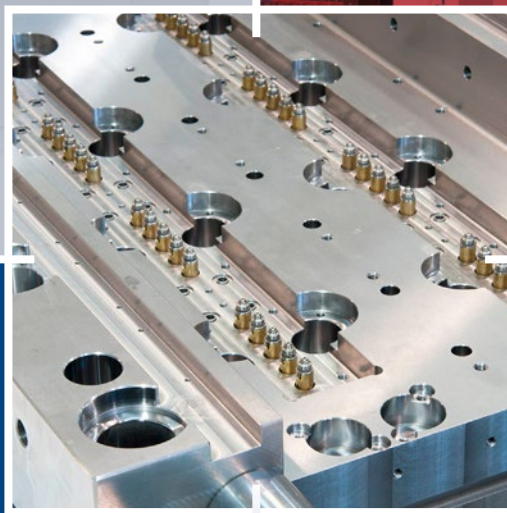
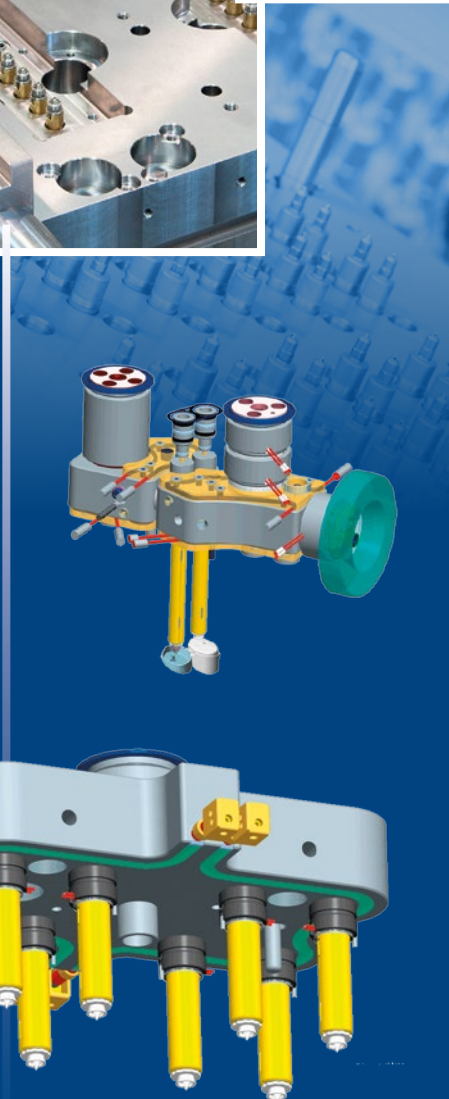


Lubomír Zeman



VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

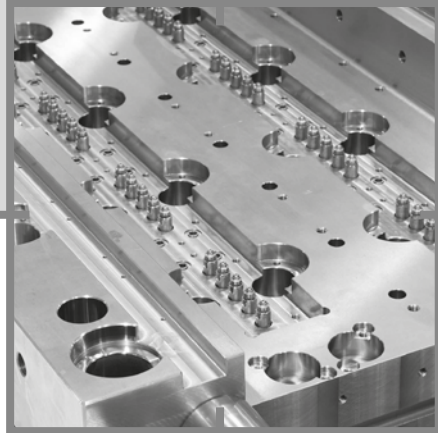
Teorie a praxe





Grada
Publishing

Lubomír Zeman



VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Teorie a praxe

Děkujeme společnosti JAN SVOBODA s. r. o. za podporu při vydání této publikace



Lubomír Zeman

Vstřikování plastů

teorie a praxe

Vydala Grada Publishing, a. s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, www.grada.cz
tel.: +420 234 264 401, fax: +420 234 264 400
jako svou 6890. publikaci

Odpovědný redaktor Petr Somogyi
Sazba Jakub Náprstek
Počet stran 464
První vydání, Praha 2018
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

© Grada Publishing, a. s., 2018
Cover Design © Grada Publishing, a. s., 2018

*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 978-80-247-2818-6 (ePub)
ISBN 978-80-247-2819-3 (pdf)
ISBN 978-80-271-0614-1 (print)

Obsah

Úvod	15
1 Návrh materiálu výstřiku	19
1.1 Faktory ovlivňující výběr materiálu výstřiku – požadavky na materiál	19
1.2 Stárnutí a koroze dílů z plastů	20
1.3 Faktory ovlivňující dobu životnosti plastových dílů	21
1.4 Závislost vlastností výstřiků z termoplastů na teplotě	22
1.4.1 Vznik makromolekul	22
1.4.2 Nadmolekulární struktura polymerů	23
1.4.3 Polymery a jejich charakteristické teploty	23
1.4.4 Reologie polymerních tavenin, disipační ohřev tavenin, fontánový tok tavenin	25
1.4.5 Charakteristické teploty, vlastnosti amorfních a částečně krystalických plastů	25
1.5 Odolnost termoplastů proti působení chemikálií	28
1.6 Navlhavost a nasákavost	30
1.7 Koroze za napětí	30
1.8 Aditiva do polymerů	31
1.9 Termoplasty určené pro výrobu výstřiků	34
1.9.1 Polymerní materiály – členění	34
1.9.2 Termoplasty pro technologii vstřikování	38
1.9.3 Databáze termoplastů, data v nich obsažená, zkoušení plastů a související normy	38
1.9.3.1 Materiálové databáze, závaznost norem	38
1.9.3.2 Příprava zkušebních těles vstřikováním	39
1.9.3.3 Standardní prostředí	45
1.9.3.4 Jednobodová data	45
I Reologické vlastnosti	45
I Mechanické vlastnosti	49
I Tepelné vlastnosti	51
I Elektrické vlastnosti	52
I Další vlastnosti	52
I TPE vlastnosti	53
1.9.3.5 Vícebodová data	54
I ČSN EN ISO 11403 – 1:2015 Plasty – Stanovení a prezentace srovnatelných vícebodových hodnot – Část 1 Mechanické vlastnosti	55
I ČSN EN ISO 11403 – 2:2013 – Část 2: Tepelné a zpracovatelské vlastnosti	55
I ČSN EN ISO 11403-3. 2015 – Část 3: Vliv prostředí na vlastnosti	55
1.9.3.6 Data pro simulační výpočty	56
1.9.3.7 Technologické parametry vstřikování	57
1.10 Recyklace termoplastů	58

2 Konstrukce výstřiků z termoplastů	61
2.1 Předvýrobní etapy výroby výstřiků z termoplastů	63
2.2 Technologičnost konstrukce výstřiků z termoplastů	64
2.3 Rozměrová a tvarová přesnost výstřiků z termoplastů, drsnost povrchů, měření jejich rozměrů a úchylek tvaru a polohy	78
2.3.1 Materiál výstřiků a smrštění	78
2.3.2 Konstrukce výstřiku a smrštění	80
2.3.3 Konstrukce vstřikovací formy a smrštění	86
2.3.4 Technologické parametry vstřikování a smrštění	87
2.3.5 Podmínky používání výstřiků a jejich vliv na rozměrovou přesnost výstřiků	88
2.3.6 Toleranční pole výstřiků z termoplastů a normalizace	91
2.3.7 Rozměrové a tvarové tolerování – předepisování přesnosti rozměrů, tvarů a polohy, drsnost povrchu	93
2.3.7.1 Tolerance nepředepsané a jejich přesnost	93
2.3.7.2 Tolerance předepsané	93
2.3.7.3 Předepsané tolerance – geometrické úchytky tvaru a polohy	94
2.3.7.4 Vztah mezi tolerancemi rozměrů a geometrickými tolerancemi	96
2.3.7.5 Drsnost povrchu	96
2.3.8 Měření a hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti výstřiků z termoplastů	101
2.3.8.1 Měření délkových rozměrů	102
2.3.8.2 Měření úchylek tvaru profilu a tvaru plochy a dalších geometrických úchylek	102
2.3.8.3 Souřadnicové měřicí stroje (SMS, CMM – Coordinate Measuring Machine)	102
2.3.8.4 3D skenování	104
I Bezkontaktní reflexivní skenery	105
3 Podmínky a koncepce zaformování výstřiků z termoplastů	114
4 Výběr varianty technologie vstřikování termoplastů	116
4.1 Vstřikovací cyklus – standardní technologie vstřikování	116
4.2 Modifikace technologie vstřikování termoplastů	117
4.3 Výběr vstřikovacího stroje a jeho periferních zařízení	118
4.3.1 Výběr vstřikovacího stroje	119
4.3.2 Periferní zařízení	124
4.3.2.1 Temperační zařízení vstřikovacích forem	125
4.3.2.2 Temperační systémy	126
4.3.3 Průmysl 4.0	127
4.3.3.1 Průmysl 4.0 a vzdělávání	130
4.3.3.2 Technologie vstřikování termoplastů a Průmysl 4.0 v současnosti	131
4.3.3.3 Wittmann Battenfeld – Industria 4.0, Wittmann 4.0	133
4.3.3.4 Engel – Inject 4.0	134
4.3.3.5 KraussMaffei – Plastics 4.0	134
4.3.3.6 Průmysl 4.0 a jeho budoucnost při vstřikování termoplastů	135
5 Metody Rapid Prototyping, RP-aditivní, subtraktivní a formativní technologie	136
5.1 Aditivní technologie RP	138
5.1.1 Technologie na bázi fotopolymerů	138
5.1.1.1 Stereolitografie (SLA)	138

5.1.2 Technologie na bázi práškových materiálů	138
5.1.2.1 Selective Laser Sintering (SLS)	138
5.1.3 Technologie na bázi tuhých materiálů	138
5.1.3.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	138
5.1.3.2 Laminated Object Manufacturing (LOM)	139
5.1.4 Freeformer – Arburg	139
5.1.5 Post Processing – dokončování RP dílů	139
5.2 Formativní (utvářející) technologie RP	139
5.2.1 Vakuové lící systémy	139
5.2.1.1 Plastic Vacuum Casting	139
5.2.1.2 Metal Pressure Vacuum Casting	140
5.3 Subtraktivní (odečítací) technologie RP	140
5.3.1 CNC frézování	140
6 Ověření návrhu konstrukce výstřiku pomocí prototypové formy	141
7 Konstrukce a výroba sériových vstřikovacích forem, uchopovačů, přípravků a zkoušení forem, údržba a opravy forem	144
7.1 Výroba a konstrukce temperačních systémů vstřikovacích forem	158
7.1.1 Význam temperace vstřikovacích forem	158
7.1.2 Temperace vstřikovacích forem	161
7.1.3 Konstrukce temperačních systémů vstřikovacích forem	167
7.2 Technologie vytváření tenkých vrstev – aplikace při výrobě vstřikovacích forem	168
7.2.1 CVD (Chemical Vapour Deposition), chemická depozice z plynné fáze	169
7.2.2 Technologie PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition), chemická depozice pomocí plazmatu, PECVD (Plasme Enhanced CVD), CVD iniciované plazmatem	169
7.2.3 Technologie PVD (Physical Vapour Deposition), kondenzace par pevného materiálu na povrch substrátu	170
7.2.4 Další technologie nanášení tenkých vrstev	171
7.2.5 Aplikace PVD a PACVD ve výrobě vstřikovacích forem	171
7.3 Technologie výroby vstřikovacích forem	173
7.3.1 Použití normálií při výrobě vstřikovacích forem	173
7.3.2 Konstrukce a výroba forem s podporou počítače	176
7.3.3 Technologie třískového obrábění	177
7.3.3.1 Frézování	178
I Vysokorychlostní obrábění	178
I Obrábění za sucha	179
I Obrábění velmi tvrdých materiálů	180
I Obráběcí strategie při vysokorychlostním frézování	180
7.3.3.2 Elektroerozivní technologie	181
I Elektroerozivní hloubení	182
I Elektrojiskrové obrábění – drátové řezání	184
7.3.3.3 Vrtání, vyhrubování, vystružování, vyvrtávání, navrtávání	184
I Vrtání	184
I Vyhrubování, vystružování	186
I Zahlubování	186
I Vyvrtávání	186
7.3.3.4 Technologie broušení	187

7.3.3.5 Úpravy povrchu (leštění, beztržkové metody, desénování)	188
Leštění	188
Beztržkové dokončovací metody	189
Desénování, gravírování, popisování, značení	190
7.3.3.6 Další výrobní technologie	191
Technologie vtláčování za studena	191
Technologie výroby galvanoplastických skořepin a skořepin žárovým nástřikem	191
Technologie DMLS	192
Technologie MIM	193
Hybridní technologie	194
7.3.3.7 Materiály pro výrobu vstříkovacích forem a jejich tepelné zpracování	194
Označování ocelí, normalizace	194
Používané konstrukční a nástrojové ocele	195
7.3.3.8 Metrologie při výrobě dílů vstříkovacích forem	197
Měření tvrdosti tvarových dílů vstříkovacích forem	198
7.3.4 Odvzdušnění vstříkovacích forem	201
7.3.4.1 Vliv technologických parametrů vstříkování na odvod vzduchu	202
7.3.4.2 Mechanismus vzniku studených spojů a jejich minimalizace, bubliny	202
7.3.4.3 Řešení odvzdušňovacích systémů vstříkovacích forem	204
7.3.4.4 Minimalizace studených spojů, technické prostředky pro jejich minimalizaci	206
7.3.4.5 Řešení odvzdušnění tvarových dutin vstříkovacích forem	207
7.4 Provoz, údržba a opravy vstříkovacích forem	207
7.4.1 Provoz vstříkovací formy	208
7.4.2 Údržba – důvody, definice, cíle	209
7.4.2.1 Proč údržba	209
7.4.2.2 Definice údržby	210
7.4.2.3 Typy údržby	210
Oprava po poruše (Breakdown Maintenance, Reactive Maintenance)	210
Plánovaná preventivní údržba (Planned Preventive Maintenance)	210
Prediktivní údržba (Predictive Maintenance)	211
Totálně produktivní údržba (Total Productive Maintenance)	211
7.4.2.4 Podpora údržby	212
7.4.2.5 Audit údržby	213
7.4.3 Vstříkovací formy a jejich údržba	213
7.4.3.1 Základní hlediska dělení vstříkovacích forem	213
7.4.3.2 Systém údržby forem	213
7.4.3.3 Plánovaná preventivní údržba forem a realita	215
7.4.3.4 Nejčastější úkony prováděné při údržbě forem	216
7.4.4 Údržba vstříkovací formy – čištění povrchů a desénů, mazání, odmašťování, separace povrchů, antikorozní ochrana	218
7.4.4.1 Povrchy vstříkovacích forem	218
7.4.4.2 Požadavky na prostředky pro údržbu vstříkovacích forem	219
Prostředky pro čištění forem a jejich odmaštění	219
Prostředky pro mazání	219
Prostředky pro konzervaci	219
Prostředky pro separaci, pro bezproblémové odformování	220
7.4.4.3 Čištění a odmašťování povrchů a desénů	220
Mechanické odstraňování nečistot – omílání	220

Rozpouštědlové odstraňování a odmašťování	221
Čištění povrchů suchým ledem	221
Ultrazvukové čištění povrchů	222
Termální čištění dílů vstřikovacích forem	222
Laserové čištění povrchů	223
7.4.4.4 Antikorozní ochrana vstřikovacích forem – konzervace forem	223
7.4.4.5 Mazání dílů vstřikovacích forem	223
7.4.4.6 Separace tvarových povrchů vstřikovacích forem – zlepšení odformování	224
7.4.4.7 Chyby při používání čistících, odmašťovacích, mazacích, konzervačních a separačních prostředků	224
7.4.5 Údržba vstřikovací formy – čištění temperačních systémů forem	225
7.4.6 Údržba vstřikovací formy – opravy vstřikovacích forem	226
7.4.6.1 Výrobní dokumentace pro opravy forem	226
7.4.6.2 Vlivy na volbu technologie a postupů oprav	226
7.4.6.3 Technologie povlakování	227
7.4.6.4 Opravy poškození vstřikovacích forem	227
Postup opravy vstřikovací formy – interní nebo externí oprava	228
Technologie svařování a navařování při opravách vstřikovacích forem	229
Údržba a opravy horkých systémů vstřikovacích forem	231
Údržba a opravy vstřikovacích forem – čištění hydraulických olejů	231

8 Výroba prvních výstřiků a optimalizace procesu vstřikování 233

8.1 Vstřikování termoplastů: fáze výrobního cyklu, pvT diagramy, smrštění, deformace a vnitřní pnutí 233

8.1.1 Fáze vstřikovacího cyklu	234
8.1.1.1 Plastikační fáze	234
8.1.1.2 Vstřikovací fáze	234
8.1.1.3 Dotlaková fáze	235
8.1.1.4 Fáze ochlazovací	235
8.1.1.5 Stav výstřiku a jeho kvalita	236
8.1.1.6 Tlak, teplota a měrný objem v průběhu vstřikovacího procesu (pvT diagramy)	236
8.1.1.7 pvT diagramy amorfních a částečně krystalických termoplastů a smrštění	239
8.1.1.8 Krystalizační pochody a jejich vliv na smrštění částečně krystalických termoplastů	241
8.1.1.9 Smrštění a propadliny (staženiny) povrchu, dutiny (lunkry)	242
8.1.1.10 Smrštění, možnosti jeho minimalizace	242
8.1.1.11 Smrštění a deformace výstřiků z termoplastů	245
8.1.1.12 Vnitřní pnutí ve výstřicích z termoplastů	245

8.2 Postup při výrobě prvních výstřiků 250

8.2.1 Popis postupu výroby prvních výstřiků	250
8.2.1.1 Příprava vstřikování	250
8.2.1.2 První nastavení strojních a technologických parametrů vstřikování	250
8.2.1.3 Výroba prvních výstřiků	251
8.2.1.4 První optimalizace vstřikovacího procesu	251
8.2.1.5 Další optimalizační procesy	252
8.2.1.6 Optimalizace – podklady pro výrobu výstřiků	252

8.3 Poznámky k přípravě vstřikování prvních výstřiků 254

8.3.1 Vstřikovací stroj	254
8.3.1.1 Stanovení uzavírací síly, tlaky při vstřikování termoplastů	254
8.3.1.2 Objem plastikační jednotky vstřikovacího stroje	256

8.3.1.3 Zpětný uzávěr na šneku	258
8.3.2 Periferní zařízení potřebná pro výrobu konkrétního výstřiku	260
8.3.3 Vstřikovací forma a její parametry	261
8.3.4 Vstřikovací materiály	261
8.4 Poznámky k výrobě prvních výstřiků	261
8.4.1 Vstřikovací forma – provoz formy	261
8.4.2 Nastavení strojních parametrů vstřikování a připojení periferních zařízení	265
8.4.2.1 Uzavírací jednotka vstřikovacího stroje	265
8.4.2.2 Plastikační a vstřikovací jednotka vstřikovacího stroje	266
8.4.2.3 Připojení a nastavení parametrů periferních zařízení	266
8.4.3 Fáze vstřikovacího procesu, technologické parametry vstřikování a jejich vliv na vlastnosti výstřiků z termoplastů	267
8.4.3.1 Plastikace, dávkování, příprava polymerní taveniny	268
8.4.3.2 Vstřikovací a kompresní fáze – plnění tvarových dutin formy polymerní taveninou	269
8.4.3.3 Způsob přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlakovou fázi	269
8.4.3.4 Dotlaková fáze	273
8.4.3.5 Fáze chlazení výstřiku v tvarové dutině vstřikovací formy	273
8.4.3.6 Zpracovatelské okno – vymezení formovatelnosti a přenos parametrů mezi vstřikovacími stroji	276
8.4.3.7 Problematika nastavení jednotlivých technologických parametrů vstřikování	277
Teplota formy	277
Teplota taveniny	278
Teplota horkého rozvodu vstřikovací formy	280
Vlivy na plastikaci – vytváření dávky polymerní taveniny	280
Velikost vstřikované dávky	281
Dekomprese před a po plastikaci	281
Zpětný odpor na šneku	282
Obvodová rychlost na šneku – otáčky šneku	282
Doba plastikace, doba setrvání polymerní taveniny v plastikační komoře vstřikovacího stroje a v horkém rozvodu vstřikovací formy	283
Vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost	285
Doba vstřiku – doba plnění tvarových dutin vstřikovací formy	286
Bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak	286
Dotlaková fáze – tlaková úroveň dotlaku a doba dotlaku	288
Pošťár	289
Postup nastavení parametrů plnicí a dotlakové fáze vstřikovacího cyklu	289
Doba ochlazování a chlazení, teplota vyhození výstřiku z formy	290
Doba manipulace	292
Tlakové křivky při vstřikování termoplastů	293
Tabulka jakosti, způsobilost procesu	294
8.5 Optimalizace procesu vstřikování termoplastů	295
8.6 Systémy jakosti a vstřikování termoplastů	298
8.7 Vstřikování druhotných materiálů	301
9 Vstřikování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí	304
9.1 Krátká historie použití plastů v osobních automobilech	304
9.2 Kompozitní materiály s termoplastickou maticí	306
9.2.1 Kompozity s krátkými vlákny	309
9.2.2 Kompozity s dlouhými vlákny	311

9.2.3 Uhlíková, rostlinná a další vlákna a plniva	313
9.2.4 Nanokompozity	315
9.2.5 Kompozity s reaktoplastickou matricí a další údaje o kompozitech	315
9.3 Konstrukční kompozity na bázi polypropylenu	318
9.3.1 Proč kompozity s polypropylenovou matricí	318
9.3.2 Vstřikování polypropylenu	319
9.3.3 Kopolymery polypropylenu	320
9.3.4 Kompozity se skleněnými vlákny	321
9.3.4.1 Krátká skleněná vlákna	321
9.3.4.2 Dlouhá skleněná vlákna	321
9.3.5 Polypropylen plněný skleněnými mikrokuličkami	322
9.3.6 Polypropylen plněný talkem (mastkem)	322
9.3.7 Polypropylen plněný uhlíčitánem vápenatým	322
9.3.8 Polypropylen plněný slídou	323
9.3.9 Polypropylen plněný wollastonitem	323
9.3.10 Polypropylenové kompozity s nanoplňivou	323
9.3.11 Polypropylenové kompozity s přírodními vlákny	324
9.3.12 Speciální polypropylenové kompaundy	325
9.4 Základy vstřikování kompozitů s termoplastickou matricí vyztužených dlouhými vlákny – LFRT	326
9.4.1 Vstřikování LFRT kompozitů	326
9.4.1.1 Vstřikovací stroj	326
Plastikační a vstřikovací šnek	326
Násypka granulátu a doprava pelet do ní	327
Zpětný uzávěr na šneku	327
Plastikační válec	327
Tryska plastikační komory	328
Volba velikosti vstřikovacího stroje	328
9.4.1.2 Vstřikovací forma	329
Výběr ocelí pro výrobu forem	329
Studený vtokový rozvod	329
Horké vtokové systémy a kombinované systémy	330
Ústí vtoku	330
Úkosy, desény	330
Odvzdušnění tvarových dutin formy	331
Temperace forem	332
Vyhazovací systémy forem	332
Údržba forem	332
9.4.1.3 Konstrukce výstřiků	332
9.4.1.4 Vstřikovací proces	333
Sušení granulátu	333
Teplota taveniny	333
Teplota formy	334
Čištění vstřikovací jednotky	334
Vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost	334
Tlaková úroveň dotlaku a doba dotlaku	335
Obvodová rychlost na šneku – otáčky šneku a zpětný odpor šneku	335
Zpracování drtě a regenerulátů	335
9.4.1.5 Shrnutí hlavních pravidel pro zpracování LFT kompozitů	336

9.5 Vodivé typy kompozitů s termoplastickou maticí, možnost náhrady kovových materiálů	337
9.5.1 Význam pojmů	337
9.5.1.1 Zdroje optického záření	337
9.5.1.2 Tepelná vodivost	339
9.5.1.3 Uhlíkové nanotrubic	339
9.5.1.4 Elektrická vodivost	340
9.5.1.5 EMC – elektromagnetická kompatibilita	340
9.5.1.6 Magnetické vlastnosti materiálů	341
9.5.2 Tepelně vodivé kompozity	342
9.5.2.1 Příklady tepelně vodivých termoplastů	342
9.5.3 Elektricky vodivé kompozity	343
9.5.3.1 Příklady elektricky vodivých termoplastů	344
9.5.4 Kompozity s magnetickými vlastnostmi	345
9.5.5 Technologie vstřikování tepelně vodivých, elektricky vodivých a magnetických kompozitů	346
9.5.5.1 Tepelně vodivé materiály	347
9.5.5.2 Elektricky vodivé materiály	347
9.5.5.3 Magnetické materiály	348
9.5.5.4 Praktické zkušenosti – vývoj tělesa reflektoru	348
9.6 Biologicky odbouratelné plasty – bioplasty	350
9.6.1 Bio výkladový slovník	350
9.6.2 Komentáře k pojmům a reálný stav v oblasti bioplastů	354
9.6.3 Pozice bioplastů na trhu	357
9.6.4 Náklady na aplikaci biopolymerů	358
9.6.5 Další otázky	358
9.6.6 Částečné biokompozity	358
9.6.7 Bioplasty a výrobky krátkodobé spotřeby – recyklace	359
9.6.8 Bioplasty a technologie vstřikování termoplastů	362
9.6.9 Vstřikování směsí na bázi polyamidů	363
9.6.10 Potenciál biopolyamidů	364
9.6.11 Bioplasty – růst přes problémy	365
9.6.12 Biodegradovatelné plasty – bioplasty	365
9.6.12.1 PET a polyolefiny na biologickém základě	365
9.6.12.2 Technické plasty	366
9.6.13 Bioplasty – shrnutí	366
10 Emisní a pachové chování termoplastů: interiérové automobilové výstřiky	368
10.1 Ovzduší a jeho znečištění	368
10.2 Emisní chování interiérových termoplastických materiálů	369
10.2.1 Emisivita materiálů, zdroje emisí, těkavost, emisní kinetika	369
10.2.2 Emise specifické	370
10.2.3 Emise nespecifické	370
10.3 Pachové zkoušky	371
10.4 Závěr k emisnímu a pachovému chování termoplastů	372
11 Měření barvy a lesku výstřiků z termoplastů, barevné koncentráty	373
11.1 Kolometrie – co to je barva?	373

11.1.1 Psychosenzorické (vjemové) hledisko	373
11.1.2 Fyzikální (objektivní) hledisko	373
11.1.3 Psychofyzikální hledisko	374
11.2 Aditivní a subtraktivní mísení barev	374
11.2.1 Aditivní (součtové) mísení barev	374
11.2.2 Subtraktivní (odečítací) mísení barev	375
11.3 Lesk, měření lesku	375
11.3.1 Měření lesku	375
11.4 Měření barvy	375
11.4.1 Standardizace podmínek pro hodnocení barev	376
11.4.2 Spektrofotometr	376
11.4.3 Geometrie měřicí soustavy	377
11.4.4 Zdroje světla	377
11.4.5 Pozorovatel	377
11.5 Kolorimetrické parametry	378
11.6 Metamerie	378
11.7 Světelné kabiny	380
11.8 Praktické zkušenosti s měřením barvy	380
11.8.1 Spektrofotometr	380
11.8.2 Místo měření	380
11.8.3 Zákaznický měrový standard	381
11.8.4 Výsledky měření spektrofotometrem a jejich porovnání se standardem	381
11.8.5 Způsoby měření	381
11.8.6 Vliv prostředí	381
11.8.7 Použití barevných koncentrátů	382
11.8.8 Měření ve světelných kabinách	382
11.8.9 Metamerie a světelné kabiny	382
11.8.10 Vliv technologických parametrů vstřikování	382
11.9. Barevné koncentráty, masterbatche	383

12 Vady výstřiků z termoplastů a jejich odstraňování

12.1 Vady výstřiků: plnění tvarové dutiny formou polymerní taveninou a děje v ní se odehrávající (orientace makromolekul)	386
12.2 Vady výstřiků: vnitřní pnutí ve výstřících z termoplastů	388
12.3 Vady výstřiků: výrobní smrštění a dosmrštění	389
12.4 Vady výstřiků: studené spoje	390
12.6 Vady výstřiků: nehomogenita nadmolekulární struktury, částečně krystalické plasty, primární a sekundární krystalizace	393
12.5 Vady výstřiků: tokové čáry	393
12.7 Vady výstřiků: dělení vad, jejich výběrový výčet	394
12.7.1 Vady zjevné	394
12.7.1.1 Vady zjevné: vady tvaru	394
12.7.1.2 Vady zjevné: vady povrchu	394
12.7.2 Skryté vady	395
12.7.3 Vady vzniklé při vlastním vstřikování	395
12.8 Vady výstřiků: popis, charakteristika, příčiny vzniku a odstranění vybraných vad	395

12.8.1	Neúplný výstřik	396
12.8.2	Přetoky a otřepy	397
12.8.3	Propadliny, vtaženiny	397
12.8.4	Deformace výstřiku	397
12.8.5	Změna barvy – barevný odstín výstřiku	399
12.8.6	Rozdíly v lesku, nevykopírovaný desén	399
12.8.7	Opalescence, optická anizotropie	399
12.8.8	Stříbření v důsledku vlhkosti ve vstřikovaném materiálu	402
12.8.9	Bílé, světlé nebo stříbřité pruhy, mapy, stopy na povrchu výstřiků	403
12.8.10	Jemně rýhovaný nebo pórovitý povrch výstřiku	403
12.8.11	Trhlinky a mikrotrhlinky na povrchu výstřiku	403
12.8.12	Tokové čáry na povrchu výstřiku	405
12.8.13	Rozvrstvování, delaminace povrchu výstřiku	405
12.8.14	Žloutnutí, hnědnutí materiálu výstřiku	405
12.8.15	Místní spálení materiálu výstřiku	407
12.8.16	Černé tečky na výstřiku	408
12.8.17	Volný tok polymerní taveniny – meandrový tok	408
12.8.18	Studené spoje	411
12.8.19	Vakuové bubliny – lunkry	414
12.8.20	Uzavírání vzduchu nebo plynných produktů ve stěnách výstřiků	414
12.8.21	Vnitřní pnutí ve výstřiku	432
12.8.22	Špatná mechanická pevnost výstřiků – jejich zkřehnutí	432
12.8.23	Nereálné rozměrové a geometrické tolerance výstřiků	432
12.8.24	Problémy vzniklé při zpracování drtě	433
12.8.25	Vady způsobené vstřikovací formou a vstřikovacím strojem	434
12.8.26	Vady způsobené statickou elektřinou, elektrostatickým nábojem	435

13	Využití měření teploty termokamerou (termogramů) při vstřikování termoplastů a kompozitních materiálů s termoplastickou maticí	439
13.1	Měření teploty	439
13.1.1	Krátký úvod pro měření termokamerou	440
13.1.2	Termokamera a jejich konstrukce	441
13.2	Měření termokamerou, praktické výsledky a závěry z měření	443
	Zkratky a názvy polymerních vstřikovacích termoplastů	451
	Rejstřík	452
	Literatura	455

Úvod

Plasty jsou syntetické nebo polosyntetické, případně přírodní materiály, které jsou z velké části tvořeny polymery – řetězci (řetězcová struktura molekul, tedy dlouhá lineární řada vzájemně spojených atomů nebo skupin atomů, jež odlišuje polymerní materiály od jiných druhů materiálů) převážně uhlovodíkových sloučenin. Pro jejich výrobu se používá jak ropa a uhlí, tak celá řada přírodních látek, například škroby. Není správné označovat je jako umělé hmoty, tento pojem je de facto nesmyslný (stejně jako igelit, což je původně obchodní název měkčeného PVC firmy IG Farben z roku 1935, který vznikl složením prvních písmen názvu firmy IG a koncovky v té době nejpoužívanějšího plastu, polyformaldehydové pryskyřice – reaktoplastu – bakELIT; „igelitové tašky“ se vyrábějí z termoplastů PP nebo LDPE).

Velkou výhodou plastů je obrovská variabilita jejich vlastností a tím i možností jejich použití, kdy kromě vlastních aplikací mohou nahrazovat jiné materiály.

Výroba a užití plastů rozhodující mírou přispěly k dosažení současné kvality života jak u nás, tak i ve světě. Přesto (respektive proto) se dostáváme do situace, kdy jsou vytvářeny tlaky na nalezení postupů vnímavějších k životnímu prostředí. K tomu by měly přispět tzv. udržitelné technologie, které sníží zátěž na životní prostředí, aniž by byl zastaven nebo výrazně přibrzděn rozvoj lidské společnosti. To je i jedním z úkolů technologií zpracovávajících plasty na výrobky s vlastnostmi více vyhovujícími environmentálním požadavkům.

Jak uvádí Česká technologická platforma PLASTY ve své zprávě „Strategická výzkumná agenda“ z června 2017, koncem 19. století se průmyslově celosvětově zpracovalo kolem 10 tisíc tun plastů za rok. V roce 1930 překročila roční světová výroba plastů hodnotu 30 tisíc tun, v roce 1949 to bylo již více než 1 milion tun a v současné době se pohybuje světová výroba na úrovni 335 milionů tun vyrobených plastů. V roce 2020 se očekává dosažení 400 milionů tun, v roce 2050 přesáhne výroba plastů 700 milionů tun (některé předpovědi, například od MacArthur Foundation, uvádějí až 1,1 milionu tun vyrobených plastů).

Na světové spotřebě se největší mírou podílejí polyolefiny (PP a PE) společně s PVC, PS, EPS (pěnový polystyren) a PET tvoří 85 % spotřeby. Prognóza do roku 2020 uvádí průměrný roční nárůst spotřeby plastů o 4,4 %. Největší dynamika se očekává u EPS (5,1 %), PP a PET (5 %). Spotřeba inženýrských plastů (PC, ABS, PET, PBT, POM, PA) má do roku 2026 růst průměrným ročním tempem 7,4 %.

V Evropě činila v roce 2016 celková spotřeba plastů 52 milionů tun, Česká republika se na uvedeném množství podílela 1 145 000 tunami, což představuje více než 100 kg spotřebovaných plastů na obyvatele.

S čísly o výrobě plastů úzce souvisejí i čísla vyjadřující podíl odpadních plastů. V EU se tento podíl pohybuje okolo 54 % z ročně zpracovávaného množství. V roce 2015 to bylo 25,8 milionu tun odpadních plastů, z nichž 30,8 % skončilo na skládkách, 29,6 % bylo recyklováno a 39,5 % se využilo energeticky ve spalovnách. Česká republika vykazuje 400 000 tun odpadních plastů a 63,5 % z nich skončí na skládkách.

Údaje o bioplastech se liší podle pramenů, z nichž data pocházejí. Nova-Institut uvádí výrobu v roce 2016 v množství 2,4 milionu tun, s výhledem do roku 2021 3,6 milionu tun. Asociace European Bioplastics uvádí pro rok 2016 4,2 milionu tun a do roku 2021 očekává růst na 6,1 milionu tun. Výrobci z Asie mají z uvedeného množství vyrobit

polovinu, čtvrtina se vyrobí v Evropě. Nejvíce se má vyrobit bio-PET, bio-PE a bio-PA. Noviny *K-Zeitung* dne 23. února 2017 publikovaly údaj uvádějící výrobu bioplastů v roce 2021 v množství 8,5 mil. tun. Podle těchto novin činil podíl bioplastů v roce 2017 na celkové světové výrobě 4 %.

Plasty jsou makromolekulární produkty, které lze tvářet a tvarovat, případně dalšími technologiemi zpracovávat na požadované výrobky nebo polotovary určené k dalšímu zpracování.

Mezi zpracovatelské technologie řadíme: přípravné operace – míchání a hnětení, granulaci, tabletování, recyklaci, sušení, barvení, aditivaci; hlavní zpracovatelské technologie – přímé lisování, přetlačování, válcování a kalandrování, vytlačování, vyfukování dutých těles, vstřikování, tvarování polotovarů za tepla a případně vakua; další technologie zpracování plastů – zpracování kapalných systémů – odlévání, lití, zalévání, máčení, natírání, impregnace, reakční vstřikování (RIM – Reaction Injection Molding, RRIM, SRIM), zvláknování; technologie nerozebíratelného spojování – svařování plastů, lepení; výrobu laminátů a součástí z vyztužených plastů – výrobu prepregů s reaktoplastickou a termoplastickou matricí, lisování za tepla, Injektform; navíjení; tažení – pultruze; laserové zpracování plastů – řezání laserem, strukturované vrtání laserem, laserové spojování – svařování a navařování, spoje plast – kov, laserové leštění plastů, korekce tvaru, odstraňování přetoků, odjehlování laserem, laserové značení; lehčení; spékání; rotační natavování polymerů; povrchové úpravy – kaširování, lakování, potiskování plastů, desénování plastů, leštění plastů, pokovování plastů, povrchovou ochranu povlakováním plasty nebo práškovými plasty, sametování – flokování; obrábění plastů; nerozebíratelná spojení; rozebíratelná spojení; radiační síťování; nekonvenční způsoby zpracování plastů.

Jednou z výrazných tvářecích technologií pro zpracování plastů je technologie jejich vstřikování.

Počátek historie vstřikování sahá do roku 1870, kdy byl v USA patentován materiál, z něhož později vznikl celuloid. Patent obsahoval i zařízení pro jeho vstřikování. K výraznějšímu rozvoji, zejména ke zpracování reaktoplastů, došlo po první světové válce. Z dnešního pohledu na technologii vstřikování plastů nastal nejvýraznější pokrok v padesátých letech minulého století, kdy byla patentována šneková vstřikovací jednotka, představen první elektroerozivní hloubicí stroj na výrobu tvarových dílů vstřikovacích forem, byl patentován první horký rozvod, při výrobě vstřikovacích forem se rozšířilo používání normalizovaných dílů. Na konci šedesátých let a v sedmdesátých letech 20. století pak byla zaváděna zpětnovazební regulace v řízení vstřikovacích strojů a mikroprocesorové řídicí systémy, dále sušení granulátů suchým vzduchem a první nasazení robotů. V osmdesátých letech minulého století se objevují první simulační programy, první zařízení pro technologie Rapid Prototyping, je zaváděna statistická procesní kontrola.

V souvislosti s technologickým vývojem vstřikování plastů a s vývojem vstřikovacích strojů a zařízení k nim (periferní zařízení jako sušárny, dopravníky, nasavače, dávkovače aditiv, roboty, temperační zařízení atd.) dochází k rozvoji automatizace vstřikovacího výrobního procesu. První automatizovaná vstřikovací pracoviště nezávisle na sobě představily firmy Battenfeld a Netstal v roce 1983 na světové výstavě Kunststoffe 83 v Düsseldorfu. Na výstavě předvedené automatizační koncepty se v propojení na více vstřikovacích strojů ukázaly jako málo pružné a drahé. V reálné praxi z nich vykristalizovala automatizace vstřikovacího stroje jako samostatného ostrůvku (nebo sestavy strojů vyrábějících jednu montážní skupinu).

V současné době, kdy technologie vstřikování plastů (včetně vstřikovacích strojů, periferních zařízení, vstřikovacích forem, měření atd.) urazila od svých počátků až po dnešní dobu velmi dlouhou a úspěšnou cestu, se před ní objevují další výzvy a požadavky. Tyto výzvy a požadavky je možné shrnout do tří základních oblastí:

- zkracování doby dodání výrobku na trh,
- zkracování inovačních cyklů,
- zvětšující se komplexita výrobků – integrace více funkcí do jednoho dílu,
- požadavky na zpracování velkého objemu dat,
- zvyšování flexibility,
- kolísání požadavků trhů,

- poptávky po výrobcích se stále více individualizují,
- individualizace hromadné výroby,
- tlak na vysokou produktivitu výroby,
- zvyšování účinnosti výroby,
- požadavky na snižování výrobních nákladů,
- snižování energetické náročnosti výroby,
- tlak na zvyšování využití materiálových zdrojů, environmentální požadavky.

Pro zajištění uvedených témat je k dispozici jediná technologie: již zmíněná automatizace, která se v různém stupni a různou rychlostí přesunuje do aktivit s názvem Průmysl 4.0.

Automatizace se dá charakterizovat čtyřmi časově posloupnými přístupy:

- dříve: oddělené automatizační technologie,
- nyní: vzájemně propojená automatizace,
- v blízké budoucnosti: optimalizace celého výrobního procesu pomocí nových inovativních softwarových systémů,
- ve vzdálenější budoucnosti: organizace a optimalizace výroby prostřednictvím kyberneticko-fyzických (CPS) systémů, chytré továrny, Průmysl 4.0.

K tomu, aby mohlo být dosaženo cílů aktivit Průmyslu 4.0, je nutné zajistit propojení průmyslu se vzděláním. Toto konstatování vychází ze skutečnosti, že výrobní zařízení lze nakoupit prakticky ihned, ale pracovníky s potřebnými znalostmi je potřeba s předstihem a dlouhodobě vychovávat. K tomu se snaží svým malým příspěvkem napomoci i tato kniha, která se na svých stránkách snaží komplexně popsat celý proces výroby výstřiků z termoplastů, a to jak v teoretické, tak zejména v praktické rovině.

Jednotlivé kapitoly mapují výrobu výstřiků z termoplastů a zabývají se následujícími tématy:

- požadavky kladené na výstřik: jakostní, funkční, pracovní prostředí, následné operace,
- návrh materiálu výstřiku,
- design a konstrukce výstřiku: tvar, rozměry, rozměrová a tvarová přesnost, jakost povrchu,
- konstrukční analýza možností vzniku vad a jejich následků (DFMEA, Design Failure Mode Effects Analysis),
- analýza zaformovatelnosti a úprava výstřiků podle zásad technologičnosti konstrukce výstřiků z termoplastů při zachování jejich jakostních a funkčních vlastností,
- výběr varianty technologie vstřikování, technologický proces,
- vizualizace, ověření tvarů, rozměrů, montážních závislostí atd. pomocí výroby dílu některou z technologií „rychlé výroby“ (RP, Rapid Prototyping),
- návrh zaformování výstřiků, násobnost formy, vtokový rozvod, temperace formy,
- vstřikovací stroj, periferní zařízení, automatizační zařízení,
- matematické simulace,
- konstrukce prototypové formy,
- výroba prototypové formy,
- ověření výstřiku výrobou na prototypové formě, včetně vyhodnocení požadavků kladených na výstřik,
- modifikace výstřiku podle výsledků simulací, výpočtů a výsledků z prototypové výroby,
- požadavky na konstrukční a výrobní provedení formy, včetně přípravků – měřicích, chladicích, rovnacích atd.,
- konstrukce formy a přípravků,
- výroba formy a přípravků,
- návrh technologických parametrů vstřikování s využitím technologických parametrů použitých při simulacích,
- oživení formy (počet optimalizačních kroků) smyček,
- hodnocení jakosti a zkoušení výstřiků,
- vypracování podkladů pro schvalování prvních výstřiků (PPAP, Production Part Approval Proces),
- vypracování podkladů pro sériovou výrobu,

- sériová výroba,
- hodnocení jakosti v rámci sériové výroby,
- údržba formy,
- opravy formy,
- údržba strojního vybavení vstříkovny.

Obecně lze říci, že každý výstřik je svým způsobem originál a před svojí ekonomickou výrobou s definovanou kvalitou by měl projít etapou vývoje dílu (Product Development) s návaznou etapou studie proveditelnosti (FS, Feasibility Study).

Studie proveditelnosti by v zásadě měla být co nejkomplexnější a koherentní, tedy co nejbliže k danému výstřiku. Jako se od sebe liší jednotlivé výstřiky, liší se i struktura témat řešených ve studiích proveditelnosti pro jednotlivé díly. Uvedené konstatování ovlivňuje i důraz, který je v projektu kladen na jednotlivé kapitoly studie, způsob a podrobnosti jejich zpracování.

Rozsah vývoje výstřiku a studie proveditelnosti je tedy na obecné a široké úrovni možné vymezit do výše uvedených bodů, přičemž je dobré si uvědomit, že se v mnoha případech tyto body vzájemně prolínají.

Výběr materiálu výstřiku vychází z požadavků, které musí výstřik po dobu své životnosti na základě požadavků zadavatele splňovat, a to včetně omezení vyplývajících z podstaty materiálové báze plastů.

1.1 Faktory ovlivňující výběr materiálu výstřiku – požadavky na materiál

Zadavatel výroby výstřiku musí ve spolupráci s designérem a konstruktérem výstřiku vzít v úvahu celou řadu faktorů, které nutně ovlivňují jak splnění kladených požadavků, tak i výběr vhodného materiálu pro výrobu výstřiku:

- **finanční:**
 - materiálová cena,
 - procesní náklady,
 - systémové náklady,
- **rozměrové:**
 - geometrie výstřiku,
 - rozměrová a tvarová přesnost,
 - hmotnost výstřiku,
 - rozměrová stabilita,
 - tvarová stabilita (deformace),
 - díl pro vnější nebo vnitřní použití,
 - materiál amorfní nebo částečně krystalický,
 - materiál kompozitní (druh plniva): nevytuzující, vytuzující, obsah plniva,
 - smrštění,
 - dodatečné smrštění,
- **mechanické:**
 - tuhost,
 - tvrdost,
 - rázová odolnost,
 - houževnatost,
 - únavové vlastnosti,
 - odolnost proti abrazi,
 - životnost,

- **environmentální:**
 - životnost,
 - tepelná odolnost (doba expozice),
 - odolnost UV záření,
 - chemická odolnost (které chemikálie),
 - odolnost vodě (hydrolyza),
- **regulátory:**
 - potraviny,
 - voda,
 - hračky,
 - medicína,
 - požární odolnost,
 - zakázané přísady,
- **elektrické:**
 - tloušťka stěny výstřiku,
 - stínění,
 - předpisy pro použití,
- **akustické:**
 - frekvence,
 - pohlcování zvuku,
- **procesní:**
 - zpracovatelská technologie:
vstříkávání, vytlačování, vyfukování, tvarování atd.,
- **následné operace:**
 - svařování:
ultrazvukové, vibrační, laserové, horkým vzduchem, konduktivní,
 - lakování,
 - lepení,
 - popisování laserem,
 - potiskování,
 - metalizace,
 - galvanické pokovování atd.

1.2 Stárnutí a koroze dílů z plastů

Koroze je rozrušení – stárnutí, degradace – plastů. Plasty na rozdíl od kovových materiálů nereagují na elektrochemické vlivy.

Stárnutí je nevratný chemický a fyzikální proces, který vyvolává degradaci polymerních materiálů: jde o změny chemické struktury se ztrátou mechanických vlastností, barvy, lesku, křehnutí, chemické odolnosti. Stárnutí ovlivňují fyzikální vlivy (teplota, světlo, UV záření, radiace, atmosférické vlivy, mechanická namáhání), dále fyzikálně chemické a chemické vlivy (difuze, bobtnání, destrukce chemickou reakcí), přičemž nesmíme zapomenout ani na biologické vlivy (biologická koroze účinkem mikroorganismů a plísní):

- **Difuze:** difundující látka ovlivňuje pohyb v makromolekulách, a to vyvolává změny vlastností. Díky svému uspořádání je difuze snadnější u amorfních materiálů než u částečně krystalických polymerů, míra difuze závisí i na propustnosti polymerů.