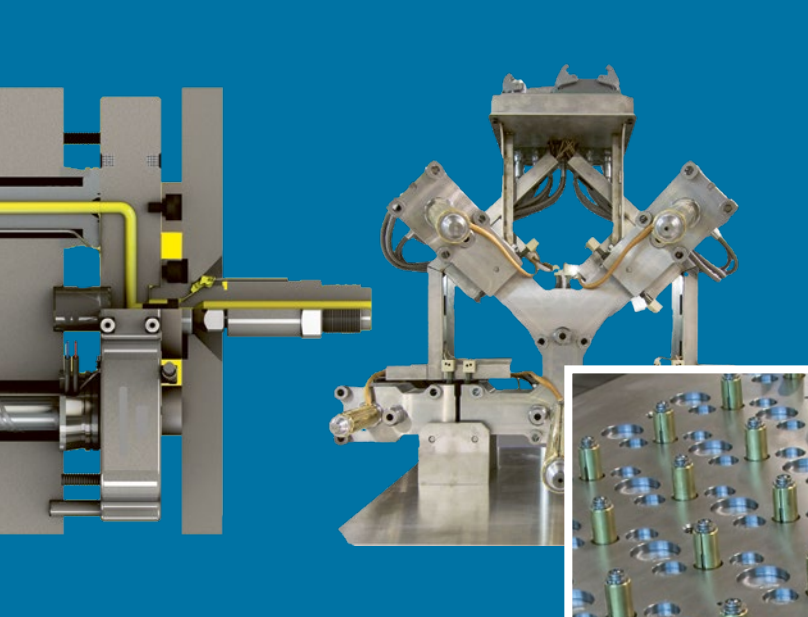
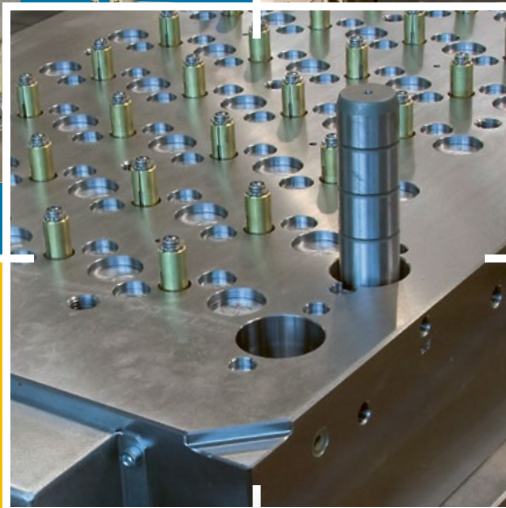




GRADA®



Lubomír Zeman

VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ 3

Vady výstřiků a jejich příčiny

Návrh systémových řešení pro praxi



SVOBODA



Grada
Publishing

Lubomír Zeman



VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ 3

Vady výstřiků a jejich příčiny

Návrh systémových řešení pro praxi

Lubomír Zeman

Vstřikování plastů 3

Vady výstřiků a jejich příčiny

Návrh systémových řešení pro praxi

Vydala Grada Publishing, a. s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, www.grada.cz
tel.: +420 234 264 401
jako svou 10102. publikaci

Odpovědný redaktor Petr Somogyi
Sazba Jakub Náprstek
Počet stran 224
První vydání, Praha 2025
Vytiskla tiskárna H.R.G., Litomyšl

© Grada Publishing, a. s., 2025
Cover Design © Grada Publishing, a. s., 2025

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.

Automatizovaná analýza textů nebo dat ve smyslu čl. 4 směrnice 2019/790/EU a použití této knihy k trénování AI jsou bez souhlasu nositele práv zakázány.

ISBN 978–80–271–1469–6 (ePub)
ISBN 978–80–271–1605–8 (pdf)
ISBN 978–80–271–5900–0 (print)

Obsah

Úvod	9
1 Základní rozdělení plastů vhodných pro vstřikování	12
1.1 Nadmolekulární struktura polymerů – termoplasty částečně krystalické, amorfní, polymerní kapalně krystalické LCP, kompozity, polymerní směsi a termoplastické elastomery	12
1.2 Modifikace polymerních látek	17
1.2.1 Úprava polymerů pro jejich technologické zpracování a následné použití	17
1.2.2 Příspěvky do polymerů, aditivace polymerů	18
1.3 Plniva – kompozitní materiály	24
1.4 Kompozitní polymerní slitiny	26
1.5 Termoplastické elastomery	27
2 Charakteristické teploty polymerů	30
3 Reologie polymerních tavenin, disipační ohřev tavenin, fontánový tok	32
4 Fyzikální procesy probíhající v polymerech při jejich zpracování vstřikováním	36
5 Fáze vstřikovacího procesu	38
5.1 Vliv jednotlivých fází vstřikovacího procesu na jakost výstřiků	39
5.1.1 Plastifikace – dávkování – vytváření vstřikované dávky polymerní taveniny před čelem šneku	39
5.1.2 Vstřikovací a kompresní fáze – plnění tvarových dutin formy polymerní taveninou	39
5.1.3 Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak	40
5.1.4 Dotlaková fáze	41
5.1.5 Fáze chlazení výstřiku v tvarové dutině formy	41
5.2 Váha vlivu a tolerance technologických parametrů, vymezení zpracovatelského okna formovatelnosti – zpracovatelské okno	42

6 Postup při výrobě prvních výstřiků	.49
6.1 Postup při výrobě prvních výstřiků – technologičnost konstrukce výstřiků z termoplastů	.49
6.2 Příprava výroby prvních výstřiků	.54
6.3 První nastavení strojních a technologických parametrů vstřikování	.54
6.4 Výroba prvních výstřiků	.55
6.5 První optimalizace vstřikovacího procesu	.56
6.6 Další optimalizační procesy	.56
6.7 Optimalizace: podklady pro výrobu výstřiků	.57
6.8 Podklady: technologické parametry	.57
6.9 Podklady: vstřikovaný materiál – index toku taveniny	.58
6.10 Podklady: tabulky	.60
7 Optimalizace procesu vstřikování termoplastů	.74
7.1 Optimalizace plnicí fáze vstřikovacího procesu	.74
7.2 Optimalizace dotlakové fáze vstřikovacího procesu	.74
7.3 Teplota formy – teplota tvarových dílů formy	.75
7.4 Optimalizace chladicí fáze vstřikovacího procesu	.76
8 Hodnocení kvality při výrobě prvních a následně optimalizovaných výstřiků z pohledu jejich kvality	.77
8.1 Vizuální hodnocení výstřiku	.77
8.2 Hodnocení stavu vstřikovací formy	.78
8.3 Popis základních vad výstřiků z termoplastů	.78
8.3.1 Vady výstřiků: mechanismus jejich vzniku a přehled faktorů ovlivňujících kvalitu výstřiků s definovanými jakostními parametry	.78
8.3.2 Vady výstřiků: plnění tvarové dutiny formy polymerní taveninou a děje v ní se odehrávající, orientace makromolekul	.79
8.3.3 Vady výstřiků: vnitřní pnutí ve výstřicích z termoplastů	.81
8.3.4 Vady výstřiků: výrobní smrštění a dosmrštění	.82
8.3.5 Vady výstřiků: studené spoje	.83
8.3.6 Vady výstřiků: tokové čáry, pruhy, stopy	.84
8.3.7 Vady výstřiků: nehomogenita nadmolekulární struktury, částečně krystalické plasty, primární a sekundární krystalizace	.84
8.3.8 Vady výstřiků: bubliny, puchýře, pórovitost	.85
8.3.9 Vady výstřiků: deformace, zkřivení (zakřivení), warp	.87
8.3.10 Vady výstřiků: nereálné rozměrové a geometrické tolerance výstřiků z termoplastů	.87
8.3.11 Vady výstřiků: vliv konstrukčních faktorů vstřikovací formy na kvalitu výstřiků z termoplastů	.88
8.3.11.1 Balancování: teplota, chlazení vstřikovacích forem	.89

8.3.11.2	Balancování: odvzdušnění tvarových dutin vstřikovacích forem	90
8.3.11.3	Nerovnováhy v systémech horkých rozvodů vstřikovacích forem	91
8.3.11.4	Balancování toku polymerních tavenin: změna viskozity při toku.	92
8.3.11.5	Balancování: rozmístění tvarových dutin v hlavní dělicí rovině formy, objem tvarových dutin	95
8.3.11.6	Balancování: postupné plnění tvarových dutin polymerní taveninou	98
8.3.12	Vady výstřiků: vliv vstřikovacího stroje na kvalitu výstřiků z termoplastů.	98
8.3.13	Vady výstřiků: vliv periferních zařízení na kvalitu výstřiků z termoplastů, sušárny a sušení vstřikovacích granulátů	99
8.3.14	Vady výstřiků: změna vstřikovaného materiálu nebo jeho barevného odstínu při výrobě výstřiků, černé tečky na výstřících	100
8.3.14.1	Čistící granuláty	101
8.3.15	Vady výstřiků: problémy vzniklé při zpracování drtí	101
8.3.16	Vady výstřiků: vady způsobené statickou elektřinou, elektrostatickým nábojem	102
9	Řešení problémů při vstřikování termoplastů.	103
9.1	Definice vybraných technologických pojmů	104
9.1.1	Časy	104
9.1.2	Rychlosti	106
9.1.3	Teploty	106
9.1.4	Tlaky	107
9.1.5	Síly	107
9.1.6	Dráhy.	108
9.1.7	Ostatní	109
9.2	Zkratky a názvy polymerních materiálů a plniv	109
9.3	Popis vad výstřiků z termoplastů a parametry možností pro jejich odstranění	114
9.3.1	Výstřiky vyrobené standardním vstřikováním	115
9.3.2	Strukturně lehčené výstřiky.	181
9.3.3	Výstřiky vyrobené technologií vícekomponentního vstřikování, vstřikování termoplastických elastomerů TPE.	195
	Literatura	217
	Rejstřík.	218

Úvod

Vstřikování termoplastů je velice komplexní výrobní proces. Při výrobě konkrétního výstřiku je nutné nastavit celou řadu strojních i procesně technologických parametrů, které mají vést k výrobě výstřiků s definovanou kvalitou. Prakticky každý procesně technologický parametr, stejně jako některé strojní parametry mohou mít vliv na výslednou kvalitu vyrobeného výstřiku.

Obvykle je nastavení vstřikovacích parametrů prováděno personálem příslušné vstřikovny, který má větší nebo menší kompetenci: zkušenosti a dovednosti získané časem, svoje osobní know-how, intuici (opět získanou časem). Teoretické a analytické přístupy se obecně nevyužívají příliš často. Při výrazném nedostatku kompetentních pracovníků jsou mnohdy vstřikovací parametry nastavovány méně zkušeným personálem, který často používá metodu pokus/omyl. Obecně to může snižovat, a to nejen v kritických situacích (nedostatek zakázek, tlak na termíny apod.), konkurenceschopnost příslušné firmy.

Potřebné znalosti lze získat v neucelené podobě na několika středních školách a odborných učilištích, ve školicích centrech, případně na školeních. Pořádají je zejména firmy, jež se primárně zabývají prodejem a aplikacemi simulačních programů, nebo firmy, které hodlají podpořit svoje nabídkové a prodejní portfolio na odborných seminářích a konferencích pořádaných pod patronací obchodních firem nebo odborných plastikářských skupin. Vysoké školy v dané oblasti selhávají: obor vstřikování plastů se komplexně nepřednáší, pozornost se věnuje pouze určitým tématům vytrženým z celku. Je to dáno i obrovským nedostatkem erudovaných odborníků, kteří by studentům škol všech typů a odborných učilišť, včetně pracovníků z praxe, své poznatky cíleně předávali.

Kromě školicích materiálů, skript, firemní literatury, informací publikovaných na odborném portálu pro plastikářský průmysl PlasticPortal (www.plasticportal.cz) je v češtině nebo slovenštině k dispozici už jen (bohužel nepočtená) odborná literatura z oboru vstřikování termoplastů. Od roku 2009 vyšly tyto publikace (řazené chronologicky):

- Zeman, Lubomír: Vstřikování plastů, Praha: BEN – technická literatura, 2009.
- Mézl, Milan: Základy technológie vstrekovania plastov, Olomouc: Mapro, 2009.
- Podolanová, Michaela: Plasty v dizajne, Košice: Technická univerzita, 2014.
- Kizlink, Juraj: Odpady – sběr, zpracování, zužitkování, zneškodnění, legislativa, 2014
- Řehulka, Zdeněk: Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů, Polymery, Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2015.
- Alexy, Pavel: Procesy spracovania polymérov, Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2016.
- Zeman, Lubomír: Vstřikování plastů, teorie a praxe, Praha: Grada Publishing, 2018.
- Zeman, Lubomír: Vstřikování plastů 2, Praha: Grada Publishing, 2021.
- Beaumont, John P.: Návrh a řešení vtokových soustav, Brno: Jan Svoboda, 2022 (překlad).

Ve svých předešlých knihách jsem se snažil relativně široce z teoretického, ale zejména z praktického hlediska předvést a popsat zákonitosti a postupy, které by mohly přispět k vašemu poznání a ke správnému procesu výroby výstřiků z termoplastů. V jaké míře se mi to podařilo, mohou posoudit pouze čtenáři, kteří některou z publikací ve své plastikářské praxi použili.



Určitá nepřehlednost a širší obsah jednotlivých publikací mě přiměla pokusit se vytvořit myšlenkově jednotného a systematicky uspořádaného průvodce technologií vstřikování, určeného zejména seřizovačům a technologům vstřikování (ale nejen jim), protože na nich obvykle leží největší a konečná zodpovědnost při výrobě výstřiků z termoplastů, u nich se sbíhají nitky vedoucí od procesů příjmu zakázky přes přípravu výroby, návrhu a výroby vstřikovací formy až po vlastní výrobu výstřiků.

Průvodce začíná pojednáním o vstřikovacích materiálech: podíváme se na rozdělení plastů, jejich nadmolekulární strukturu, aditivaci polymerů pro vznik vstřikovacího materiálu. Navazuje část popisující procesy probíhající v polymerech při jejich zpracování vstřikováním, včetně popisu jednotlivých fází vstřikovacího cyklu na jakost výstřiků. Po těchto přípravných zastávkách pokračuje průvodce návrhem postupu výroby prvních výstřiků, včetně optimalizačních kroků na výrobu prvních navazujících výstřiků. Poslední, nejobsáhlejší část, rozdělená na dva celky se stejným obsahem, se věnuje problematice jakosti výstřiků, postupům minimalizace a odstraňování vad vznikajících v procesu vstřikování výstřiků z termoplastů. První celek se v textové formě snaží přiblížit a popsat nástrahy vzniklé při vstřikování, druhý popisuje spíše vizuální formou možnosti odstraňování vad výstřiků a obsahuje (kromě řady fotografií vad) i popis základních příčin vady a možnosti jejího odstranění pomocí jedné z pěti skupin možných zásahů: vstřikovaný materiál, technologické parametry vstřikovacího procesu, vstřikovací stroj, vstřikovací forma, konstrukce výstřiku.

Je možné, že si mnozí (zejména mladší a počítači odkojení pracovníci) řeknou, k čemu potřebujeme údaje v papírové podobě, když vše potřebné lze dohledat na internetu, v poslední době i s využitím propagované umělé inteligence. Dovolím si tento názor nezpochybnit, ale na svoji obranu uvedu několik argumentů.

Jedním z hlavních argumentů je již v předešlém textu zmíněná malá dostupnost specializovaného vzdělání v daném oboru, ke které přispívá i malý rozsah odborné literatury v češtině. Běžný technolog vstřikování termoplastů nebo seřizovač vstřikovacích strojů obvykle nehledá na internetu odkazy, které by mu mohly pomoci v jeho práci. Pokud si tu práci dá, stráví u počítače mnoho času, najde nějaké údaje, ale ty jsou roztroušené v mnoha odkazech, bez návaznosti na problematiku jako celek atd.

A jak může při výrobě výstřiků a při odstraňování vad při vstřikování termoplastů pomoci umělá inteligence (Artificial Intelligence, AI)? Nejdříve definice: AI je inteligence projevovaná stroji, zejména počítači s vhodným programovým vybavením, a zároveň je to obor informatiky zabývající se tvorbou takových počítačových systémů.

Oblasti umělé inteligence existuje celá řada: strojové učení, robotika, neuronové sítě, počítačové vidění, bayesovské sítě, expertní systémy, dobývání znalostí, fuzzy logika, evoluční algoritmy, multiagentní systémy, prohledávání stavového prostoru, zpracování přirozeného jazyka. Pro úsek oboru vstřikování plastů, kterým se zabývá tato kniha, lze z metod umělé inteligence zmínit například tyto:

- Numerické a simulační metody: Metody využívající různý software pro návrh výstřiku, vstřikovací formy a procesních parametrů vstřikování, včetně simulačních výpočtů.
- Statistické experimenty DOE (Design of Experiments): Při výrobě prvních výstřiků se prakticky vždy experimentuje. Většinou se postupuje intuitivním způsobem, kdy se mění nastavení pouze u jednoho parametru vstřikování a při dosažení ucházejících vlastností výrobku se začne nastavovat další parametr. Takový přístup ale zanedbává vzájemné interakce mezi parametry, které mohou mít rozdílný efekt. U vstřikování plastů existuje mezi parametry nepřehledné množství interakcí, a proto je statisticky navržený experiment dobrou možností jak při zahájení výroby prvních výstřiků, tak při optimalizačních smyčkách, při ladění požadovaných jakostních vlastností výstřiku. DOE je zároveň metoda aktivního učení, takže poskytne cenné údaje o tom, jak určitý parametr ovlivňuje požadovanou vlastnost výstřiku v komplexním procesu vstřikování.
- Umělé neuronové sítě: Dobře připravená neuronová síť je ve svém výsledku pro uživatele „černou skříňkou“, která umí zobecňovat a predikovat, předpovídat kvalitní výsledky i s využitím nově získaných dat. Pro uživatele takového programu může být problém, že neví, jak systém k výsledkům došel, bez reálné zkoušky (stejně jako v případě DOE) nezjistí správnost uvedeného výsledku. Pod pojmem „dobře připravená“ se skrývá nutnost mít k dispozici oproti DOE (nižší desítky dat) relativně větší počet dat (stovky dat). Čím více dat, tím větší přesnost predikce – je tedy třeba mít k dispozici historická data.
- Monitorování a kontrola: Pomocí sběru dat a zpracování obrazu z kontrolních mechanismů mohou systémy AI rozpoznat vzorce chování a provádět na základě analýz úpravy procesu v reálném čase.

Aby uvedené systémy umělé inteligence mohly plnit svojí funkci, je potřeba relativně velká časová investice a odpovídající financování. Z běžného vstřikovacího procesu, jehož výsledkem je hodnocený výstřik, je nutné sbírat a zaznamenávat množství parametrů a ty porovnávat s daty danými příslušnými jakostními požadavky. AI může dále na základě faktorů, jako jsou změny materiálu, okolní teploty, opotřebení stroje, opotřebení nástrojů a další vlivy, určit, které parametry stroje je třeba změnit, aby byl výrobek vyroben v rámci svých kvalitativních tolerancí. Může to trvat měsíce, protože chyby se musí nejprve vyskytnout, aby se z nich systém poučil. To je prozatím z časových a finančních důvodů prakticky nerealizovatelné.



Pouhý sběr dat pro jejich zpracování pomocí AI, strojového učení nestačí. K jejich optimálnímu využívání jsou zapotřebí pracovníci s příslušnými znalostmi. A tímto konstatováním jsem se opět dostal na začátek svých úvah a ke zdůvodnění potřeby mít k dispozici zdroj a přehled znalostí i v papírové podobě. Děkuji tedy všem, že této knize věnují svůj čas!

Autor

Základní rozdělení plastů vhodných pro vstřikování

1.1 Nadmolekulární struktura polymerů – termoplasty částečně krystalické, amorfní, polymerní kapalně krystaly LCP, kompozity, polymerní směsi a termoplastické elastomery

Polymerní materiály – tedy vysokomolekulární látky, jejichž molekuly se skládají z opakujících se stavebních jednotek – se dělí na dvě hlavní skupiny:

- **Plasty:** Polymery, které je možné za vhodných podmínek tvarovat a po zafixování tvaru se chovají jako tuhá tělesa.
- **Elastomery:** Polymery, které je možné za vhodných podmínek tvarovat a po zafixování tvaru se chovají jako pružná (elastická) tělesa.

Plasty dělíme na další dvě skupiny:

- **Termoplasty:** Teplem tvarovatelné plasty, přičemž cyklus tvarování a fixace je opakovatelný (tedy po jejich převedení do taveniny a převzetí tvaru ochlazením je možné je opět roztavit do stavu taveniny a opět zchladit do daného tvaru).
- **Reaktoplasty:** Tvarovatelné plasty, které po fixaci tvaru již není možné opakovaně tvarovat, tedy při dalším ohřevu dochází k jejich tepelné degradaci.

Elastomery se – stejně jako plasty – také dělí na další dvě skupiny:

- **Termoplastické elastomery:** Teplem tvarovatelné, přičemž stejně jako u termoplastů je cyklus tvarování a fixace opakovatelný, spoje mezi makromolekulami jsou fyzikální povahy.
- **Vulkanizované elastomery, pryže:** Tvarovatelné elastomery, které po fixaci tvaru již není možné opakovaně tepelně tvarovat, spoje mezi makromolekulami jsou chemické povahy.

Polymerní látky, zejména lineární¹ a málo větvené, jsou schopné částečné krystalizace,² a to buď z velmi zředěných roztoků, nebo z taveniny, což je případ materiálů pro technologii vstřikování termoplastů.

Při krystalizaci se části makromolekul skládají a vytvářejí tak pravidelnou prostorovou strukturu. Skládají se do lamel, což jsou destičkovité útvary s tloušťkou cca 10 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) a s plošnými rozměry v řádu mikrometrů ($1 \text{ }\mu\text{m}$

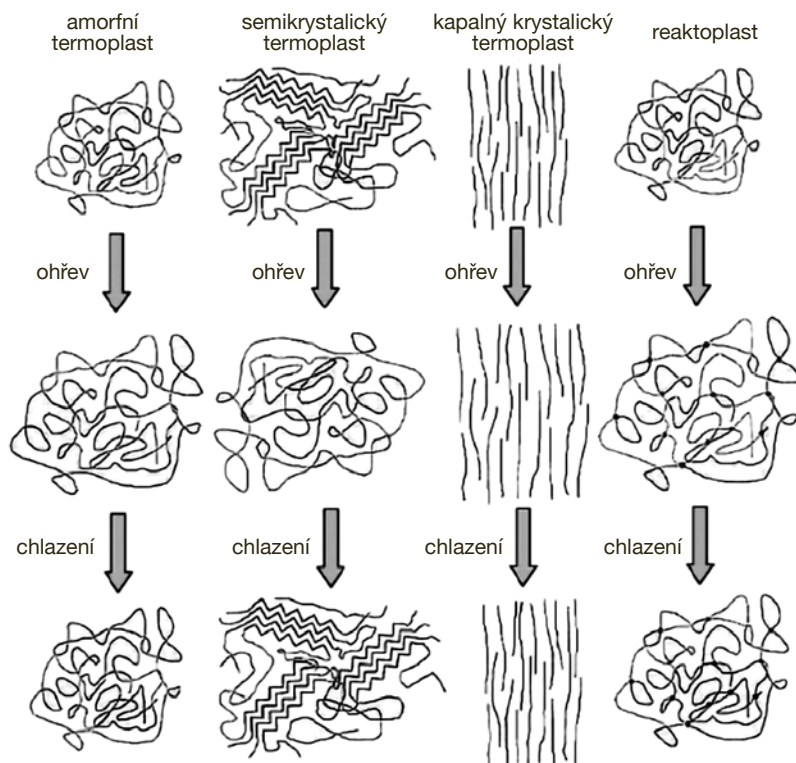
¹ Lineární polymer se skládá z monomerů spojených do řetězce způsobem „konec jednoho ke konci druhého“.

² Krystalizace je vytváření, růst pravidelné struktury, druh fázové přeměny, kdy působením tepla a chemického procesu dochází k pravidelnému uspořádání částic do krystalové mřížky.

$= 10^{-6}$ m). Lamely vyrůstají na sobě dendritickým³ způsobem a vytvářejí větší, téměř kulovité útvary, respektive shluky lamel, vycházející ze společného centra a rozrůstající se na všechny strany, často jsou vrtulovitě stočené a nazývají se sférolity. Částečná krystalizace znamená, že mezi krystalickou, tedy uspořádanou strukturou je i neuspořádaná amorf⁴ struktura. Částečně krystalické polymery se také označují jako semikrystalické⁵ materiály.

Pokud makromolekuly při přechodu z kapalného (polymerní tavenina) do tuhého stavu nemají schopnost se samovolně uspořádat (vytvářet krystalické struktury), řetězce zůstávají v nepravidelném stavu, v tzv. statistickém klubku i v tuhém skupenství, a jsou bez pravidelné nadmolekulární struktury, potom je nazýváme materiály amorfními. Uvedené konstatování nelze brát absolutně, protože existují polymerní kapalně krystalické (LCP, Liquid Crystal Polymers).

Nadmolekulární strukturu polymerních materiálů v závislosti na teplotě ukazuje obrázek 1.1.



Obrázek 1.1 Nadmolekulární struktura termoplastů v závislosti na teplotě

Kapalně-krystalický stav látek tvoří přechod mezi izotropní⁶ kapalnou fází a anizotropní⁷ pevnou fází. Znamená to, že látka s kapalně-krystalickou strukturou si zachovává i v kapalném stavu určité pravidelné molekulární uspořádání, charakteristické pro krystalickou fází.

³ Dendritický znamená rozvětvený, stromčkově větvený; z řečtiny *dendron*, strom.

⁴ Amorf⁴ní, z řečtiny „beztvarý“.

⁵ „Semi-“ je první část složených slov s významem polo-, poloviční.

⁶ Stejnorodá, stejná vlastnost ve všech směrech hodnocení.

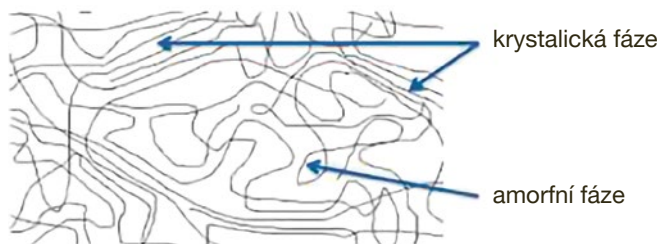
⁷ Nestejnorodá, směrově nestejně vlastnosti.

Fázové přeměny jsou rovnovážné procesy, probíhajícími určitými rychlostmi. Rychlost fázové přeměny z kapalně-krytalické do pevné fáze je relativně pomalá (až desítky minut). Je tedy možné rychlou změnou podmínek (ochlazením taveniny) uskutečnit přechod do pevné fáze se zachováním kapalně-krytalického stavu.

Možnost vzniku kapalně-krytalického stavu není dána nějakým určitým chemickým složením látek, ale především tvarem molekuly. Molekula musí mít tvar rigidní (tuhé) tyčinky. Rigidní molekuly s parametrem asymetrie (tedy poměrem délky k průměru) větším než 6,4 tvoří stabilní mezofázi (mezistupeň mezi kapalnou a pevnou fází) již z toho důvodu, že v daném objemu tělesa není možno anizotropně rozmístit dostatečně hustý systém tyčinkových částic. Příkladem může být krabička od zápalek, do které je možné uložit maximální počet zápalek jen tehdy, budou-li paralelně uspořádané. Stabilní mezofázi mohou ale vytvořit i ty tyčinkovité molekuly, které mají parametr asymetrie menší než 6,4. Může k tomu dojít tehdy, když vedle prostorových důvodů působí jako stabilizační faktor ještě interakce (vzájemné působení) mezi molekulami (přitažlivé a odpudivé Van der Waalsovy síly), jejichž velikost je dána chemickou strukturou.

LCP materiály mají taveniny s uspořádanými strukturními jednotkami, které se při vstřikování vysoce orientují, přičemž jejich orientace vzniká při působení i velmi malých smykových sil. V závislosti na smykovém napětí (jeho zvýšení) se u nich viskozita taveniny výrazně snižuje (výrazné zvýšení tekutosti), což umožňuje vstřikovat výstřiky s velmi malými tloušťkami stěn. Nízká viskozita (výborná tekutost) LCP polymerních tavenin umožňuje i výrobu kompozitních materiálů, kdy se do LCP matrice přimíchávají jak minerální, tak vyztužující vláknitá plniva (mastek, grafit, skleněná vlákna, uhlíková vlákna, atd.).

Jak u amorfních, tak u částečně krytalických polymerů jsou makromolekulární řetězce i jejich části v pevném stavu vázány k sobě mezimolekulárními silami. Na jejich intenzitě jsou závislé zejména mechanické vlastnosti příslušného polymeru. Dále platí, že účinek působení mezimolekulárních sil je nepřímo závislý na vzájemné vzdálenosti molekul, a ta je nejmenší u uspořádaných částí řetězců v krytalickém stavu. Krytalické polymery mají tedy oproti amorfním polymerům vyšší a na teplotě méně závislé mechanické vlastnosti. Krytalická fáze má také vyšší hustotu než fáze amorfní. Při krytalizaci dochází ke zmenšování objemu, a tedy tyto materiály mají větší smrštění.



Obrázek 1.2 Schéma rozložení amorfní a krytalické fáze v částečně krytalických polymerech

Obrázek 1.2 schematicky ukazuje rozložení amorfní a krytalické fáze v polykrytalických (částečně krytalických) látkách. Obě oblasti jsou fyzikálně i chemicky neoddělitelné. Důvodem neoddělitelnosti je skutečnost, že nejsou na sebe navázány náhlým rozhraním, ale je mezi nimi plynulý přechod. Jak již bylo uvedeno, obě složky polykrytalů mají rozdílné vlastnosti. Krytalické oblasti se vyznačují tvrdostí, křehkostí, pevností, odolností proti chemickým činidlům a rozpouštědlům. Amorfní části se vyznačují pružností, houževnatostí, ohebností, odolností proti nárazu. U polykrytalických látek se určuje tzv. stupeň krytalinity, který v procentech udává objemový podíl krytalické fáze ve fázi amorfní.

Dělení termoplastů na amorfní a částečně krytalické materiály je důležité jak z hlediska technologického procesu vstřikování, tak i z pohledu aplikačního použití. Každá z uvedených skupin termoplastů se chová při zahřívání jinak

(základní postup při vstřikování je příprava polymerní taveniny – přechod z pevného skupenství do kapalného, tedy do taveniny polymeru přívodem tepelné energie), což se projeví i na vlastnostech výstřiků z nich. Rozdíly mezi vybranými vlastnostmi obou skupin jsou uvedeny v tabulce 1.1 a v tabulce 1.2 je popsáno rozdílné chování amorfních a částečně krystalických polymerů v procesu vstřikování.

Tabulka 1.1 Základní informace pro výběr termoplastů – amorfní a částečně krystalické

Vlastnost	Amorfní polymery	Semikrystalické polymery
Mechanické vlastnosti (základní)	•	+
Ohybová pevnost	–	+
Vrubová citlivost	–	+
Tok za studena	+	•
Chemická odolnost	–	+
Teplota použití	•	+
Kritická teplota při zahřívání	T_g	T_m
Smrštění proti formě [%]	0,3–0,8	1–3

Legenda: + výhodnější (lepší); – méně výhodné (horší); • – průměrné (stejně).

Tabulka 1.2 Rozdílné chování amorfních a částečně krystalických polymerů při jejich vstřikování

Parametry procesu vstřikování	Amorfní polymery	Semikrystalické polymery
Významná teplota procesu	teplota zesklnění T_g	bod tání krystalického podílu T_m
Obsah aplikačního použití dílů	pod T_g	nad T_g , pod T_m
Zatuhnutí taveniny ve formě	ochlazením pod T_g	krystalizací pod T_m
Viskozita taveniny	velmi závislá na teplotě	málo závislá na teplotě
Závislost specifického objemu na teplotě	kontinuální změna	skoková změna
Doba plastikace (příprava dávky taveniny pro vstřik do formy)	nemá vliv na dobu vstřikovacího cyklu	důležitá pro dobu vstřikovacího cyklu
Dotlak	závislý na čase (je vhodná profilace dotlaku)	může být konstantní v celém čase dotlaku
Doba ochlazování	dlouhá (nutno ochladit výstřik pod T_g)	závisí na rychlosti krystalizace a je obvykle kratší
Nejzávažnější vady výstřiku při nevhodně zvoleném procesu	vnitřní pnutí (napětové trhlinky), propadliny	tvorba lunkrů (vakuol), rozměrová nepřesnost při nerovnoměrné krystalizaci

Obsah krystalické fáze, velikost a rozložení sférolitů závisí na chemické struktuře polymeru, délce větvení řetězce. Podle typu polymeru se obsah krystalického podílu (větší nebo menší uspořádání řetězců do formy svazků, lamel, fibril až sférolitů) pohybuje až do 90 % objemu.

Do skupiny částečně krystalických plastů patří například polyolefiny (PP, PE), POM, PA, PBT, PET, PPS, LCP, PEEK, PI, PCT. Mají větší smrštění než amorfní plasty (bez plniv cca 1 % až 3,5 %), jsou obvykle neprůhledné (sférolitická struktura zapříčiňuje neprůhlednost, její potlačení může zajistit transparentnost, například u PP), jejich tepelná odolnost je vysoko nad teplotou skelného přechodu (T_g). Ve většině případů se používají jako konstrukční materiály. Jejich vlastnosti jako tuhost, pevnost, houževnatost jsou závislé na obsahu krystalického podílu, který výrazně ovlivňuje ochlazovací fáze vstřikovacího procesu, tedy především teplota tvarových dílů vstřikovací formy a jejich temperační, respektive chladicí systémy. Teplota skelného přechodu není u částečně krystalických plastů významná, důležitější je teplota tání krystalického podílu (T_m), pod níž si výstřiky zachovávají určitou tuhost a pevnost, nad ní jsou již v oblasti taveniny

Amorfní plasty, například PS, HI-PS, SB, SAN, SBS, ASA, ABS, MABS, PC/ABS, PMMA, aromatický PA, PC, PPO, PSU, PES, PEI, PVC, jsou charakteristické menším smrštěním (bez plniv cca 0,2 % až 0,9 %). Je možné je vyrobit v transparentním stavu, jsou obvykle použitelné do teploty T_g . Teplota skelného přechodu limituje také teplotu vyjímání výstřiku z tvarové dutiny formy. Teploty skelného přechodu vybraných amorfních polymerů jsou uvedeny v tabulce 1.3. V téže tabulce najdeme kromě teplot skelného přechodu, které jsou důležité u amorfních termoplastů, i teploty tání krystalického podílu, jež jsou důležité pro částečně krystalické materiály.

Tabulka 1.3 Přehled teplot skelného přechodu a teploty tání krystalického podílu pro vybrané plasty

Polymer	Struktura	Název	Zkratka	T_g [°C]	T_m [°C]
TERMOPLAST	semikrystalické	Polyethylen nízkohustotní	PE-LD	-120	105 + 115
		Polyethylen vysokohustotní	PE-HD	-120	130 + 135
		Polypropylen	PP	-15	160 + 170
		Polyoxymethylen	POM	-50	165 + 185
		Polyamid 6	PA-6	50	215 + 225
		Polyamid 66	PA-66	50	250 + 260
		Polyethylentereftalát	PET	75	250 + 206
		Polybutylentereftalát	PBT	75	225 + 230
		Polytetrafluorethylen	PTFE	125	340 + 345
		Polyetheretherketon	PEEK	145	335 + 345
	amorfní	Neměkčený polyvinylchlorid	PVC-U	85	–
		Standardní polystyren	PS-GP	95	–
		Akrylonitril-butadien-styren	ABS	105	–
		Styren-akrylonitril-akrylát	SAN	105	–
		Akrylonitril-styren-akrylát	ASA	100	–
		Polymethylmetakrylát	PMMA	110	–
		Polykarbonát	PC	150	–
		Polysulfon	PSU	190	–
		Polyimid	PI	>400	–
VULKANIZOVANÝ ELASTOMER	amorfní	Přírodní kaučuk	NR	-70	–
		Butadien-styrenový kaučuk	SBR	-50	–
		Isoprenový kaučuk	IIR	-55	–
		Butylkaučuk	IIR	-75	–
		Chlorprenový kaučuk	CR	-40	–
		Ethylen-propylen-dién-terpolymer	EPDM	-60	–
		Silikonový kaučuk	Q	-85	–
		Epoxidová pryskyřice	EP	>75	–
REAKTOPLAST		Fenol-formaldehydová pryskyřice	PF	>150	–
		Novolaková epoxidová pryskyřice		>125	–
		Polyesterová pryskyřice	UP	>60	–

Metallocenové katalyzátory používané při výrobě polymerů (obdobně jako LCP materiály) do určité míry ovlivňují dělení termoplastů, respektive některých jejich vlastností v závislosti pro amorfní a částečně krystalické materiály. Metallocenový katalytický systém umožňuje například výrobu téměř transparentního (průhledného) polypropylenu (v zásadě částečně krystalický polymer; 93 až 96% transparence vztaženo k etalonu⁸ materiálu PET pro výrobu nápojových lahví), jehož vlastnosti a zpracovatelnost jsou srovnatelné s částečně krystalickým PP.

⁸ Standard, normál.

Na druhé straně umožňují výrobu částečně krystalického polystyrenu. Syndiotaktický PS se řadí mezi konstrukční termoplasty s vyšší teplotní a chemickou odolností než standardní PS. Obě vlastnosti má podobné jako PBT. Má nízkou specifickou hmotnost, velmi dobrou rozměrovou stálost, není navlhavý, jeho zpracování vstřikováním je bezproblémové, ale má jednu zásadní nevýhodu – je křehký.

V předchozím textu jsou popisovány „čisté“ makromolekulární syntetické⁹ polymerní látky. Tyto makromolekulární látky sice tvoří základ vstřikovacích materiálů, jsou matricemi pro materiály, které běžně zpracováváme a následně používáme, ale ve své vlastní podobě ke zpracování ani k použití vhodné nejsou. Obvykle nemají vhodné zpracovatelské ani užité vlastnosti, které jsou z pohledu funkce výstřiků požadovány. Pro výrobu výstřiků z termoplastů jsou uvedené látky modifikovány, tím získávají vlastnosti vhodné pro jejich využití.

1.2 Modifikace polymerních látek

Pojem modifikace polymerů (tedy záměrná přeměna vlastností polymerů prováděná za účelem získání nového polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi než měl nemodifikovaný materiál) v sobě zahrnuje škálu fyzikálních a chemických způsobů přeměny polymerů.

K přípravě modifikovaných polymerů se používají tyto základní způsoby:

- **Fyzikální modifikace:** Mechanické míchání, smísení dvou nebo více polymerů.
- **Mechanochemické modifikace:** Mechanickou cestou, například intenzivním hnětením, za podmínek a přítomnosti látek usnadňujících destrukci, vzniknou reaktivní úseky polymerních řetězců, které se buď navzájem propojí, nebo reagují s přítomným monomermi schopným polymerace.
- **Chemické modifikace:** Modifikace na základě chemických reakcí účinných látek s reaktivními skupinami polymerních řetězců; zmíním zde nejčastěji používanou metodu, kterou je síťování polymerů.

Pod pojmem „síťování polymerů“ rozumíme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. Obecně je možné uvést, že zesíťováním se u polymerů snižuje jejich rozpustnost (v rozpouštědlech pouze bobtnají, zvětšují svůj objem), ztrácí tavitelnost a termoplasticitu, ale naopak se u nich zvyšuje tvarová stálost za zvýšených teplot, u některých se zvyšuje i odolnost vůči chemikáliím. Čím má polymer hustší síť, tím obtížněji do něho vnikají nízkomolekulární látky a tím klesá jeho bobtnavost a i navlhavost.

1.2.1 Úprava polymerů pro jejich technologické zpracování a následné použití

Základní polymer, vyrobený jednou z polyreakcí,¹⁰ při níž přecházejí chemickou cestou monomerní jednotky na makromolekulární látky – polymery, nelze obvykle zpracovávat a aplikovat na výstřiky. Pro získání požadovaných zpracovatelských i užitných vlastností je nutné polymer upravit vhodnými přísadami – aditivami.

⁹ „Syntetický“ znamená souhrnný, souborný, uměle vyrobený, opakem je přírodní; založený na syntéze, což je reakce, při níž ze dvou nebo více látek vzniká jedna složitější látka; ze synonyma k tomuto slovu, „umělý“, je odvozen nesprávný název plastů – umělé hmoty (nesprávný proto, že nejde o nic umělého, ale o látky vzniklé syntézou).

¹⁰ Polymerace – výroba polyolefinů (PE, PP), styrenových polymerů (PS, Hl-PS, ABS, PC/ABS, SAN, ASA, ...), polyakrylátů (PMMA, PVC); polyadice – syntéza lineárních polyuretanů; polykondenzace – výroba polyamidů, polykarbonátů, nenasycených polyesterů (PET, PBT, LCP).

1.2.2 Přísady do polymerů, aditivace polymerů

Jak již bylo uvedeno, na výrobky z polymerních materiálů, v nichž polymer tvoří matici, jsou kladeny velmi různorodé kvalitativní požadavky, které „čisté“ polymery nejsou schopné splnit. Proto se upravují dalšími látkami (přísadami, aditivy, složkami, příměsemi), které spolu s polymery tvoří polymerní směsi. Tabulka 1.4 ukazuje rozdíly mezi vlastnostmi amorfních a částečně krystalických termoplastů, tabulka 1.5 obsahuje možnosti zlepšení vlastností polymerních materiálů.

Tabulka 1.4 Porovnání vlastností amorfních a částečně krystalických polymerních materiálů

Vlastnost Plast	Amorfní	Semikrystalický
Tání	pozvolné	ostrý bod tání
Optické vlastnosti	obvykle transparentní	obvykle neprůhledný a matný
Mechanické vlastnosti	dobré	velmi dobré
Hustota	nižší	vyšší
Pevnost a modul pružnosti v tahu	nižší	vyšší
Tažnost	vyšší	nižší
Odolnost proti tečení (creep)	malá	velká
Smrštění	nižší	vyšší
Rozměrová stabilita	velká	malá
Maximální teplotní použití	nižší	vyšší
Odolnost proti únavě materiálu	malá	velká
Chemická odolnost	nižší	vyšší
Schopnost spojování lepidly nebo rozpouštědly	snadná (vysoká povrchová energie)	obtížná (nízká povrchová energie)

Tabulka 1.5 Možnosti zlepšení vlastností polymerních materiálů jejich aditivací

Požadovaná vlastnost	Potřebná přísada
<i>Při zpracování</i>	
Optimální a konstantní viskozita taveniny (výkon, používání nižších teplot)	maziva, stabilizátory, změkčovadla
Odolnost proti degradaci při teplotě zpracování	tepelné stabilizátory, antioxidanty
Dobré a ekonomické vmíchání přísad do polymerů	změkčovadla, dispergační činidla
Zabránění nalepování polymeru na stěny forem (ulehčení vybírání)	maziva, separační činidla
Zabránění obroušení zařízení	maziva
Dobrá manipulace s výrobky (další zpracování)	kluzná a protikluzná činidla, antiblokovací činidla
<i>Při používání</i>	
Optické a povrchové vlastnosti (vzhled, lesk, barva, průhlednost, hladkost, malá špinivost, elektrická vodivost)	plniva, barviva, nukleační činidla, změkčovadla, antistatika, stabilizátory, antiblokovací činidla, optické zjasňovače
Mechanické vlastnosti (tvrdost, pevnost v tahu a ohybu, modul pružnosti, odolnost proti únavě, tvarová a rozměrová stálost, odolnost proti otěru, rázová houževnatost)	plniva a výztuže, změkčovadla, síťovací a vytvrzovací činidla (často se tyto vlastnosti modifikují vhodnými polymery)
Odolnost proti degradaci (tepelné, světelné, biochemické a chemické)	antioxidanty, světelné stabilizátory, pigmenty, vhodná plniva, biocidy
Regulovaná degradace (urychlená degradace)	stabilizátory, degradační činidla
Odolnost proti hoření a tvorbě dýmu	retardéry hoření, anorganická plniva
Nižší hmotnost a nižší cena	nadouvadla a plniva