Europäische Union. Europäischer Fonds für regionale Entwicklung. Evropská unie. Evropský fond pro regionální rozvoj.

SN CZ
Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014 – 2020

Martin Seidl

KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ

Konstrukce plastových dílů

Martin Seidl

Autor: Ing. Martin Seidl, Ph.D.

Tato publikace byla vytvořena řešením projektu *č. 100252772 „Přeshraniční kooperativní výuka technologií zpracování plastů Zittau – Liberec (GreK)“*, který byl podpořen z prostředků Evropské unie (Evropského fondu pro regionální rozvoj) v rámci Programu spolupráce Svobodný stát Sasko – Česká republika 2014-2020.

Europäische Union. Europäischer Fonds für regionale Entwicklung. Evropská unie. Evropský fond pro regionální rozvoj.

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

Recenzent: *Ing. Jindřich Doležal, Ph.D. – A.Raymond Jablonec s.r.o.*
Editor: *Ing. Martin Borůvka; Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.*
Sazba, obálka: *Ing. Petr Weinlich, Ph.D.*

© Martin Seidl (Technická univerzita v Liberci) – 2019

ISBN 978-80-7494-461-1

Předmluva

V posledních desetiletích neustále roste význam a rozsah využití plastů, kterým se ve velké míře daří nahradit kovy, což je dáno především jejich velmi nízkou hustotou a dobrými pevnostními charakteristikami. Jedná se o materiály, jejichž vlastnosti lze velmi dobře modifikovat různými typy aditiv a plniv, což umožňuje potlačit i jejich nevýhody, mezi které patří například teplotní a časová závislost mechanických vlastností, nízká teplotní odolnost, hořlavost apod. Tato variabilita vlastností plastů a jejich kompozitů z nich tvoří velmi unikátní skupinu materiálů, které vyžadují specifický konstrukční přístup s ohledem na zpracovatelskou technologii, požadovanou přesnost dílu, jeho recyklovatelnost, automatizaci procesu apod. Konstruktéři plastových dílů nemohou spoléhat pouze na zkušenosti, které získali při navrhování kovových výrobků, ale musí vzít v úvahu celou řadu dalších aspektů, které výrazně ovlivňují jejich konečné vlastnosti a chování (viskoelasticitu, vnitřní napjatost apod.). S ohledem na množství technologií, které jsou pro zpracování plastů používány, a kdy každá z nich má své vlastní specifické nároky na výslednou konstrukci dílu, není při rozsahu těchto skript možné uvést všechny tyto aspekty a konstrukční varianty. Z tohoto důvodu je obsah výukových skript věnován zejména konstrukčním přístupům, které lze využít pro navrhování dílů vyráběných technologií vstřikování, jež patří k nejvíce používaným technologiím zpracování plastů.

Skripta jsou primárně určena studentům magisterského studia na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci a Vysoké školy v Žitavě/Zhořelci a jejich hlavním cílem je uvést studenty do problematiky konstrukce plastových dílů a srozumitelně jim vysvětlit základní konstrukční postupy a vliv vybraných faktorů na maximální spolehlivost a funkčnost výsledného plastového výrobku.

Martin Seidl

Poděkování

Zvláštní poděkování patří Martinu Borůvkovi, Pavlu Brdlíkovi, Jiřímu Habrovi, Jiřímu Bobkovi a Luboši Běhálkovi z Technické univerzity v Liberci za pomoc s grafickou úpravou skript, obrazových příloh a jejich editaci.

Obsah

1 Úvod do konstrukce plastových dílů **1**

2 Výběr materiálu **3**

3 Konstrukční koncepty **7**

3.1 Konstrukce s ohledem na typ materiálu 7
3.2 Konstrukce s ohledem na tuhost dílu 10
3.3 Konstrukce s ohledem na pevnost dílu 11
3.4 Konstrukce s ohledem na způsob namáhání dílu 12
3.4.1 Krátkodobá namáhání 14
3.4.2 Dlouhodobé namáhání 24
3.5 Konstrukce s ohledem na vzhled výrobku 27
3.6 Konstrukce s ohledem na přesnost dílu 29
3.7 Konstrukce zohledňující vyrobitelnost vstřikováním 30
3.8 Konstrukce s ohledem na recyklovatelnost dílu 31
3.9 Konstrukce zohledňující automatizaci výroby 33
3.10 Další konstrukční strategie 34

4 Obecné zásady navrhování plastových dílů **37**

4.1 Dělící rovina 37
4.2 Tloušťka stěny 38
4.3 Rádiusy a zaoblení 46
4.4 Rovinné plochy 48
4.5 Úkosy 49
4.6 Podkosy 50
4.7 Otvory 52
4.8 Vyztužující prvky 55
4.9 Závity 63

5 Dimenzování plastových dílů **69**

5.1 Viskoelastické chování plastů 69
5.2 Moduly pružnosti 74
5.3 Průřezové charakteristiky 80
5.4 Limitní hodnoty napětí 84
5.5 Bezpečnostní faktor 89
5.6 Průvodní jevy 91
5.7 Koncentrátory napětí 97
5.8 Teplotní namáhání plastových dílů 98

5.9 Tolerance rozměrů 100

6 Zásady mechanického spojování plastových dílů 106

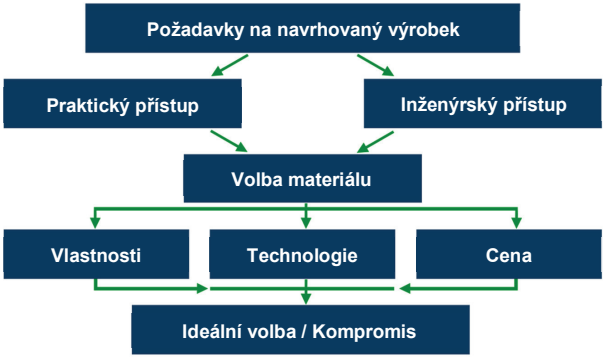
6.1 Rozebíratelné spoje 106
6.1.1 Západkové spoje 107
6.1.2 Cylindrické spoje 118
6.1.3 Sférické spoje 122
6.1.4 Torzní západky 124
6.2 Šroubové spoje 125
6.3 Tvarové vložky 135
6.4 Kloubové spoje 140
6.5 Lisované spoje 146

Použitá literatura 151

ÚVOD DO KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ

1

Konstrukční činností řešíme *návrh zcela nového dílu* nebo *úpravu konstrukce stávajícího výrobku*. Vždy je nutné vycházet ze znalostí materiálových vlastností, zpracovatelských možností a omezení, aby výrobek plnil všechny požadované funkce v potřebném rozsahu a po celou dobu své životnosti při využití nejefektivnějšího výrobního postupu a co nejnižších výrobních nákladech. V současnosti existuje takové množství polymerů a polymerních kompozitů, že lze pokrýt prakticky všechny požadavky kladené na finální díly a jejich aplikace. Největším omezením bývá výsledná cena materiálu. Konstruktér musí dále zvážit funkční a vzhledové požadavky. Kromě použitého materiálu a zvolené technologie (výrobních parametrů) je konečné chování dílu za daných podmínek výsledkem zejména jeho navržené geometrie. Optimální konstrukce plastového dílu je založena na efektivní koncentraci materiálu v oblastech, kde je díl namáhán, čímž je regulována jeho výsledná deformace. S využitím FEM analýz může konstruktér získat zpřesňující informace směřující k optimalizaci konstrukčního návrhu. Také dostupné prototypové technologie skýtají možnost otestování designu výrobku ještě před samotnou výrobou nákladného sériového nástroje, což je rovněž velmi důležitá zpětná vazba. Avšak zkušenosti konstruktéra zůstávají i nadále jedním z klíčových faktorů, které mohou urychlit a zefektivnit konstrukční proces (viz obr. 1.1).



Obr. 1.1 *Schéma konstrukčního postupu*

Prvním krokem konstrukčních prací je *sestavení základního konceptu*, což vychází ze shrnutí všech požadavků, které jsou na výrobek kladeny (působící podmínky, doba, velikost a typ zatížení, životnost výrobku apod.). Na základě těchto prvotních informací je následně zvolen koncept dílu a jeho materiál. Výsledné vlastnosti výrobku nemusí však vždy korespondovat s uvedenými vlastnostmi materiálu, neboť kromě vlivu geometrie dílu jsou tyto ovlivněny také mnoha negativně působícími faktory (např. průvodními jevy, které jsou příčinou anizotropie vlastností a vnitřního napětí ve výrobku).

Hlavní požadavky na výrobek mohou být rozděleny do několika základních skupin:

a) Požadavky, které budou mít vliv na ***životnost výrobku***
   - vlhkost prostředí, UV záření, hořlavost materiálu, jeho chemická a biologická odolnost apod.,

b) Požadavky, které budou mít vliv na ***funkci výrobku***
   - teplota, velikost a typ zatížení, doba zatěžování, anizotropie vlastností, kríp, relaxace napětí, elektrické a optické vlastnosti, izolační schopnosti, kluzné vlastnosti, legislativní požadavky, kvalita povrchu apod.,

c) Požadavky, které budou mít vliv na ***vyrobitelnost dílu***
   - smrštění, reologické vlastnosti (např. viskozita), délka a tvar makromolekul, tloušťka stěny, eliminace vnitřních a povrchových vad apod.,

d) Požadavky na ***minimalizaci výrobních nákladů***
   - recyklace technologického odpadu, ekonomické dimenzování výrobku, automatizace výroby, následné operace (montáž, povrchové úpravy apod.).

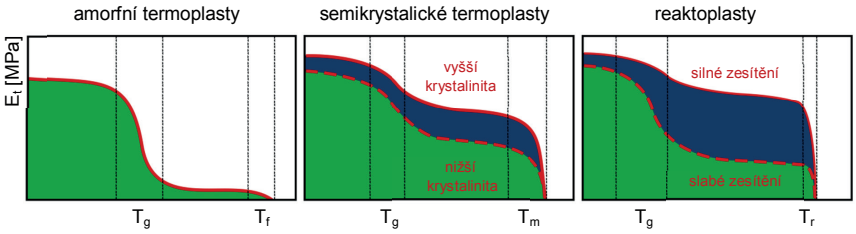
Po zvolení vhodného materiálu je možné provést prvotní konstrukční výpočty s využitím materiálových charakteristik (odvozené ze závislostí napětí-deformace, isochronních křivek, tokových závislostí apod.). Potřebné charakteristiky jsou k dispozici v dostupných materiálových databázích nebo je poskytuje výrobce materiálu na vyžádání. Při zvažování ekonomického faktoru je rovněž možné oslovit dodavatele materiálů a předložit jim kritické požadavky pro danou aplikaci. Na základě předpokládaného množství odebíraného materiálu následně dodavatel doporučí vhodný typ polymeru spolu s cenovou nabídkou.

VÝBĚR MATERIÁLU

2

Výběr materiálu vychází z požadavků na aplikaci, cenu a jeho zpracovatelnost zvolenou výrobní technologií. Plasty reprezentují velmi širokou škálu vlastností, přesto neexistuje jeden univerzální plast, který by skloubil všechny výhody a byl i cenově dostupný. Vždy je nutné se zaměřit na kritické charakteristiky pro danou aplikaci a vycházet z kompromisu (např. plasty s mechanickými vlastnostmi, které se vyrovnávají kovům, jsou obtížně zpracovatelné technologií vstřikování).

Polymery jsou především organické látky, které jsou tvořeny makromolekulárními řetězci. Chemické složení a geometrie těchto řetězců jsou základem nadmolekulární struktury plastů ovlivňující jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Podle nadmolekulárního uspořádání lze plasty dělit na *termoplasty* (s amorfní nebo semikrystalickou strukturou), *reaktoplasty* a *elastomery* (s typickou zesíťovanou strukturou). Pro zpracovatelnost těchto typů materiálů je rozhodující teplota. U termoplastů se zpracovatelnost (obvykle tekutost) s rostoucí teplotou zlepšuje až do teplotní meze, kdy dochází k degradaci materiálu (rozpadu makromolekulárních řetězců). Reaktoplasty a elastomery jsou zpracovatelné jen do relativně nízké teploty a při dalším ohřevu u nich dochází k chemickému zesítění struktury, což znemožňuje jejich další tváření, ale zároveň minimalizuje vliv rostoucí teploty na mechanické vlastnosti finálního výrobku, viz obr. 2.1.

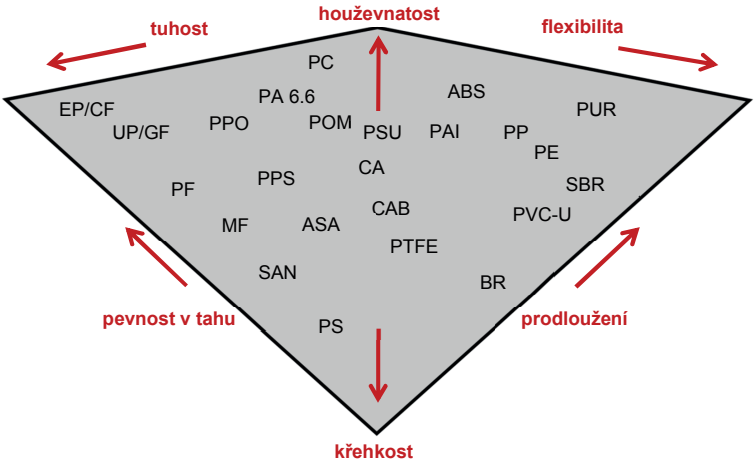


Obr. 2.1 *Závislost modulu pružnosti plastů na teplotě*

(E_t – modul pružnosti v tahu, T_g – teplota skelného přechodu, T_f – teplota viskózního toku, T_m – teplota tání krystalitů, T_r – teplota rozkladu)

Při ohřevu semikrystalických termoplastů s částečně uspořádanou strukturou, dochází při překročení relativně úzkého teplotního intervalu reprezentovaného

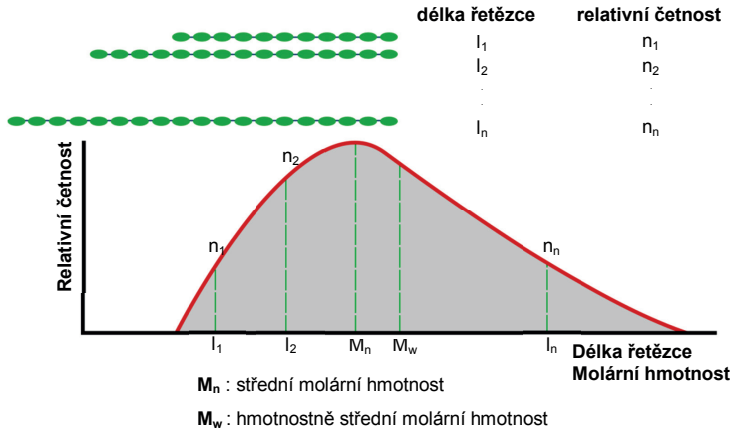
teplotou tání krystalitů (T_m) k přechodu z tuhého stavu do taveniny. U amorfních plastů není takto ostrý přechod definován a pro jejich mechanické vlastnosti je kritická teplota skelného přechodu (T_g), která je nad teplotou okolního prostředí (23 °C). Při překročení teploty skelného přechodu (T_g) dochází k postupnému měknutí a přechodu amorfních plastů do stavu vysoce viskózní taveniny, jejíž tekutost se pozvolna zvyšuje. Maximální teplota použitelnosti amorfních termoplastů je proto (10 ÷ 20) °C pod teplotou skelného přechodu (sklovitý stav materiálu) a u semikrystalických termoplastů (20 ÷ 40) °C pod teplotou tání krystalitů (houževnatý stav materiálu), vždy s ohledem na způsob, velikost a dobu namáhání. Při běžné teplotě okolí jsou amorfní plasty tedy většinou tvrdé a křehké, semikrystalické plasty jsou houževnaté (viz obr. 2.2). Rostoucí teplota použití (zejména nad T_g a v okolí T_m) způsobuje významný pokles mechanických vlastností a má tak významný dopad na použitelnost jednotlivých plastů.



Obr. 2.2 *Schéma možných aplikací vybraných typů plastů z hlediska jejich tuhosti*

Pro orientační určení vhodného polymeru pro danou aplikační teplotu je možné využít tabulkové přehledy nebo diagramy. Další významnou vlastností polymerů je délka a tvar jejich makromolekul. Délka je definována molekulovou hmotností a typickou distribuční křivkou (viz obr. 2.3). Čím delší a hladší jsou makromolekulární řetězce polymeru (a čím četnější je jejich zastoupení), tím lepší mechanické

vlastnosti lze očekávat. Naproti tomu se materiál vyznačuje horší zpracovatelností (roste viskozita taveniny). Podobný efekt poklesu tekutosti taveniny s rostoucí délkou makromolekulárních řetězců lze pozorovat i u plastů s rozvětvenými řetězci. Čím delší a složitější jsou boční větve, tím vyšší je viskozita taveniny a tím hůře tvoří polymer během tuhnutí uspořádanou (krystalickou) nadmolekulární strukturu.



***Obr. 2.3** Ukázka distribuční křivky molárních hmotností plastů*

Délka makromolekul je proto určující i pro výběr zpracovatelské technologie, která je pro daný plast vhodná, viz tab. 2.1. Materiál, který prošel zpracovatelským procesem a případně byl vystaven dalším degradačním vlivům (UV záření, chemickým a biologickým činidlům apod.), může obsahovat zkrácené řetězce, které již nedokáží vytvořit strukturu požadovaných vlastností, a proto nemůže být znovu použit pro danou aplikaci (nebezpečí využití recyklátu v opětovné výrobě).

***Tab. 2.1** Reologické požadavky na plasty dle zpracovatelské technologie*

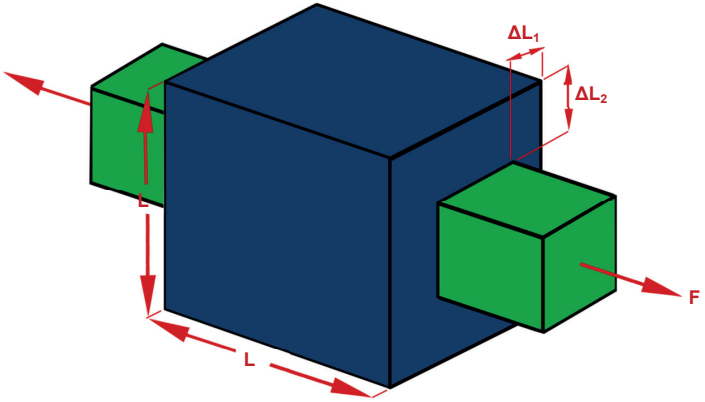
Proces	Index toku taveniny (MFR) [g/10 min]
Vstřikování	5 ÷ 100
Rotační tváření	5 ÷ 20
Vytlačování fólií	0,5 ÷ 6
Vytlačování profilů	0,1 ÷ 1
Vyfukování	0,1 ÷ 1

Zde je možné tedy vidět vzájemnou provázanost jednotlivých faktorů, které ve výsledku ovlivňují výběr vhodného materiálu pro danou aplikaci, a nutnost optimalizovat design nejen s ohledem na požadavky aplikace, ale také je nutné vzít v úvahu výhody a nevýhody zpracovatelských technologií. Mezi zásadní materiálové charakteristiky řadíme koeficient lineární teplotní roztažnosti, koeficient tření a Poissonovu konstantu:

- ***Koeficient lineární teplotní roztažnosti*** je zásadní, pokud je plastový díl součástí vetší sestavy složené i z jiných materiálů a provozní teploty se pohybují v širším rozsahu, viz kapitola 5.8.
- ***Koeficient tření*** je ovlivněn mnoha aspekty, mezi které patří např. drsnost a tvrdost povrchů, teplota, tlak, rychlost posuvu, typ a množství přísad apod. Třecí síly jsou u plastů ovlivněny rychlostí posuvu a velikostí zatížení. Obecně je u většiny termoplastů statický koeficient tření nižší než dynamický.
- ***Poissonovo číslo* (*μ*)** vyjadřuje míru kontrakce (ε_l) materiálu na úkor jeho prodloužení ve směru zatěžování (ε), přičemž deformace ve směru kolmém na působící napětí má záporný charakter, viz rovnice (1), což je patrné z obr. 2.4.

$$\varepsilon_l = -\mu \cdot \varepsilon \tag{1}$$

Poissonovo číslo se pro většinu plastů pohybuje v rozmezí 0,3 ÷ 0,5 (hodnota 0,5 je typická pro pryže) a je závislé na teplotě materiálu, míře jeho navlhnutí, orientaci plniva apod.



Obr. 2.4 *Kontrakce tělesa vlivem působícího napětí*

KONSTRUKČNÍ KONCEPTY

3

Na začátku konstrukčních činností je vždy nutné si shrnout všechny požadavky kladené na výrobek (aplikační prostředí, doba, velikost a typ zatížení, životnost apod.). Dále je nutné zvážit množství funkcí, které do plastového výrobku bude možné integrovat pro optimalizaci výsledného počtu prvků sestavy a maximálního funkčního využití dílu. Konstruktér musí následně zvolit optimální geometrické řešení, které spolu s použitým materiálem zajistí rovnováhu mezi vnějším namáháním, velikostí deformací a napětím v dílu při minimální spotřebě materiálu. Využít lze různých přístupů a zaměřit se tak na preferovaný konstrukční faktor (tuhost, pevnost, vzhled, přesnost apod.).

3.1 Konstrukce s ohledem na typ materiálu

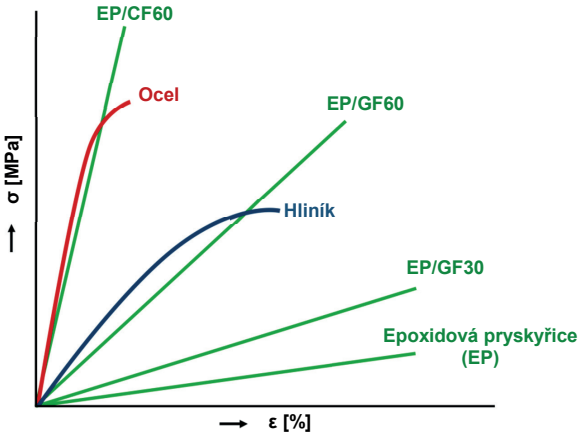
S ohledem na velmi širokou škálu polymerů a kompozitů bývá výběr vhodného materiálu složitý a může být i časově velmi náročný, mimo jiné i proto, že hodnoty uváděné v různých přehledech a materiálových listech jsou naměřeny na standardizovaných tělesech se specifickým tvarem a tloušťkou stěny a mohou tak být výrazně větší, než je u vstřikovaných dílů běžné. Tabulkové hodnoty slouží proto pouze pro vzájemné porovnání materiálů, ale nejsou zcela vypovídající vzhledem k jejich reálné použitelnosti. Většina prezentovaných hodnot je měřena při krátkodobém zatěžování, a proto nejsou využitelné pro konstrukční výpočty a analýzy určené pro dimenzování dlouhodobě zatěžovaných dílů. Volba materiálu je výrazně ovlivněna také tepelným namáháním dílu, protože mechanické a fyzikální vlastnosti se výrazně mění se změnou teploty.

Dalším významným hlediskem je i environmentální zatížení, tedy všechny pevné, plynné a kapalné látky, se kterými se plast dostane do styku během životnosti dílu. K těmto vlivům se řadí i UV záření, vlhkost, biologické a další faktory, kterým je výrobek vystaven zejména při exteriérových aplikacích. Důležitými kritérii pro výběr materiálu je i jeho dostupnost a případná zastupitelnost jiným materiálem. Zvolený materiál musí vyhovovat také požadovaným montážním nárokům (vhodnost pro ultrazvukové svařování apod.). Při kombinaci plastu s jiným materiálem, především

kovem, je nezbytné vzít v úvahu velmi rozdílný koeficient tepelné roztažnosti, který je v tomto případě u plastů až desetkrát vyšší. Naopak výrazně nižší je u plastů koeficient teplené vodivosti (na rozdíl od kovů). Při volbě materiálu musí konstruktér vzít v úvahu i požadovaný vzhled a kvalitu povrchu dílu pro případné dokončovací operace. Povrch dílu může být ovlivněn například přítomností plniva (především skelných vláken). Při kombinaci materiálů v rámci sestavy mohou difundovat aditiva z jednoho materiálu do druhého (např. difuze změkčovadel z povrchu PVC hadiček do tuhého polymeru, na který jsou připojeny, čímž dochází ke křehnutí tužšího polymeru). Další vadou, ovšem pouze vzhledovou, je u některých plastů (během kondicionování výrobku za vyšších teplot) migrace zbytkových monomerů k povrchu dílu, čímž zde vytváří světlé nebo až bílé mapy (např. u polyamidových dílů).

- ***Vyztužené polymery***

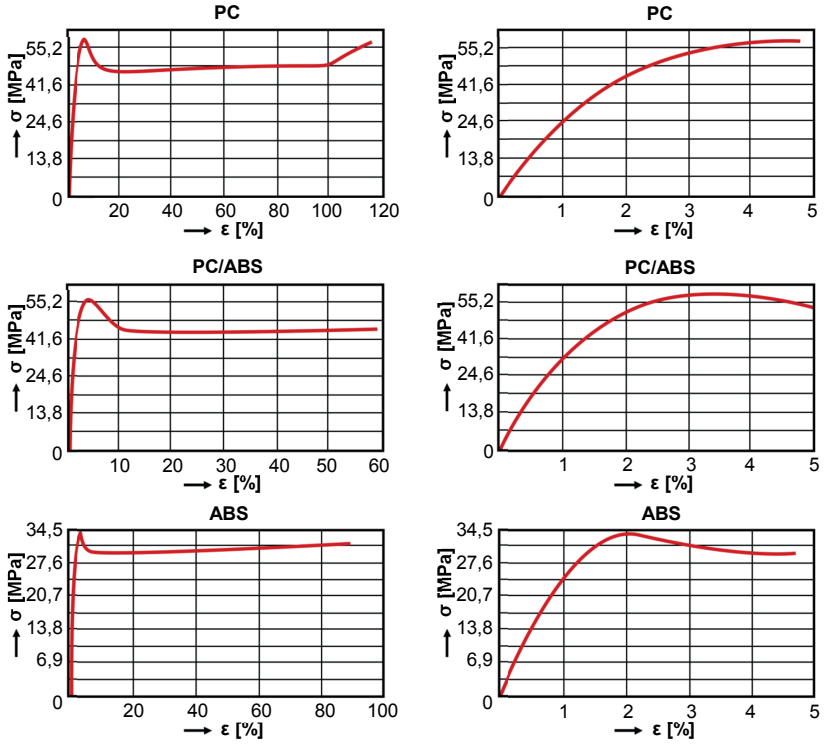
Vyztužené polymery nabízejí velmi zajímavou možnost kombinace pevnosti a nízké hmotnosti. Podle typu a tvaru výztuže mohou tyto kompozity dosáhnout mechanických vlastností srovnatelných s kovy při výrazně nižší hustotě, viz obr. 3.1. U vyztužených plastů je důležitý tvar plniva. Vlákenné typy výztuže způsobují vysokou anizotropii konečných vlastností, zatímco v případě částicových plniv (prášky, destičky apod.) nebo při použití rohoží (organoplechy) není rozdíl vlastností v jednotlivých směrech tak výrazný.



Obr. 3.1 *Porovnání tahových vlastností vybraných materiálů*

- ***Polymerní směsi***

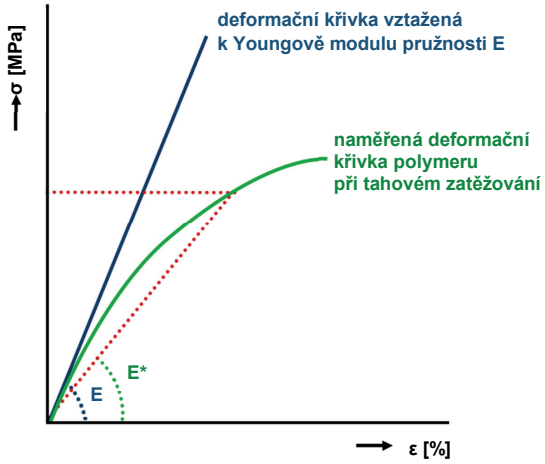
Přestože jsou plasty mezi sebou v zásadě nemísitelné, existují skupiny materiálů, které jsou do určité míry kompatibilní a jsou schopné vytvořit směsi. Mísitelné polymery tvoří směs s jednofázovou strukturou, zatímco u směsí z částečně mísitelných polymerů můžeme rozeznat jednotlivé fáze, které však mají vzájemně dobrou adhezi (PC/ABS), viz obr. 3.2. Vzájemná interakce jednotlivých složek směsi se dá modifikovat různými kompatibilizátory, čímž se zvyšuje rozsah použitelnosti výsledného materiálu a při vhodné modifikaci mezifázového rozhraní lze do určité míry kombinovat i jinak vzájemně nemísitelné polymery. Kombinací různých plastů je možné získat materiál s velmi specifickými vlastnostmi nebo pouze snížit jeho výslednou cenu.



Obr. 3.2 *Ukázka tahových křivek polymerních směsí (vpravo detail do deformace 5 %)*

3.2 Konstrukce s ohledem na tuhost dílu

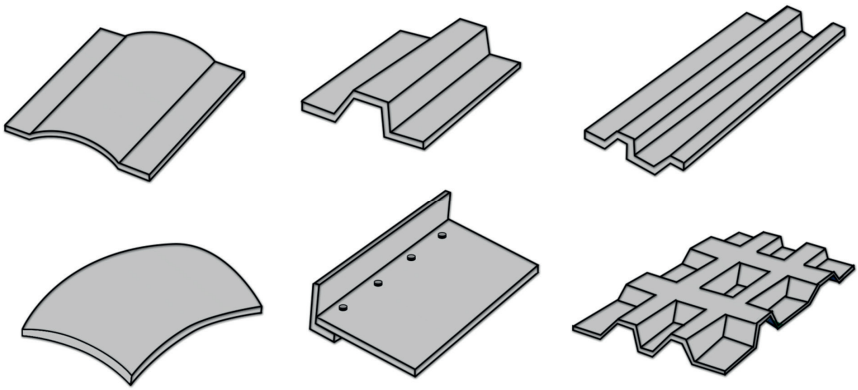
Nejčastěji používanou konstrukční strategií je *konstrukce s ohledem na tuhost*. Tento přístup je volen primárně při náhradě stávajících materiálů, především kovů a to za účelem minimalizace hmotnosti dílu při zachování jeho tuhosti. Tuhost je definována jako vztah mezi aplikovaným napětím a deformací dílu a je vyjádřena modulem pružnosti, viz obr. 3.2. Limitním parametrem je míra deformace, která nesmí překročit kritickou mez snižující životnost dílu nebo omezující jeho funkčnost. Z tohoto hlediska může být za kritickou mez považována i oblast elastických deformací, na rozdíl od strategie založené na pevnosti dílu. Primárně je tuhost řízena materiálem (chemickým složením, plnivem apod.), ale neméně významnou roli hraje geometrie výrobku. Cíleně lze tuhost výrobku zvyšovat zvýšením tloušťky jeho stěny nebo využitím vyztužujících prvků, kterými jsou žebra a vypouklé či prolomené profily, viz obr. 3.3. Neefektivní předimenzování tloušťky stěny však vede k materiálovému a ekonomickému plýtvání a často je spojeno i se zvýšeným výskytem výrobních vad. Tuhostí dílu se blíže zabývá kapitola 5.



Obr. 3.2 *Znázornění modulu pružnosti na grafu znázorňující pevnost materiálu*

U aplikací řízených velikostí napětí je nutné identifikovat oblasti dílu, ve kterých bude soustředěno zatížení, a kde je vhodné zvýšit tloušťku stěny nebo použít vyztužujících prvků tak, aby napětí bylo přenášeno největším množstvím materiálu.

U aplikací řízených velikostí deformace je nutné dosáhnout požadovaného odklonu (průhybu) bez nutnosti zvyšovat působící sílu, čímž by hrozilo překročení limitního napětí. Příkladem jsou filmové nebo kloubové spoje, kde je oblast vystavená největší deformaci naopak cíleně ztenčena, viz kapitola 6.4.



Obr. 3.3 *Ukázka vyztužujících profilů pro zvýšení pevnosti dílu*

3.3 Konstrukce s ohledem na pevnost dílu

Pevnost dílu vychází rovněž z materiálových charakteristik, konstrukce dílu a způsobu jeho zatěžování, viz tab. 3.1. Na rozdíl od tuhosti je však pevnost definována jako maximální síla, kterou je díl schopen přenést před jeho porušením. Pro aplikaci je limitním kritériem kritická míra poškození součásti, nikoliv velikost její deformace. Může se jednat o prvotní náznaky prasklin až po celkový kolaps dílu.

Tab. 3.1 *Vliv různých faktorů na mechanické vlastnosti plastů*

Pevnostní charakteristiky	↑Teplota	↑ Rychlost zatěžování	↑ hm. % GF
Napětí na mezi pevnosti	↓	↑	↑
Napětí na mezi kluzu	↓	↑	↑
Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	↑	↓	↓

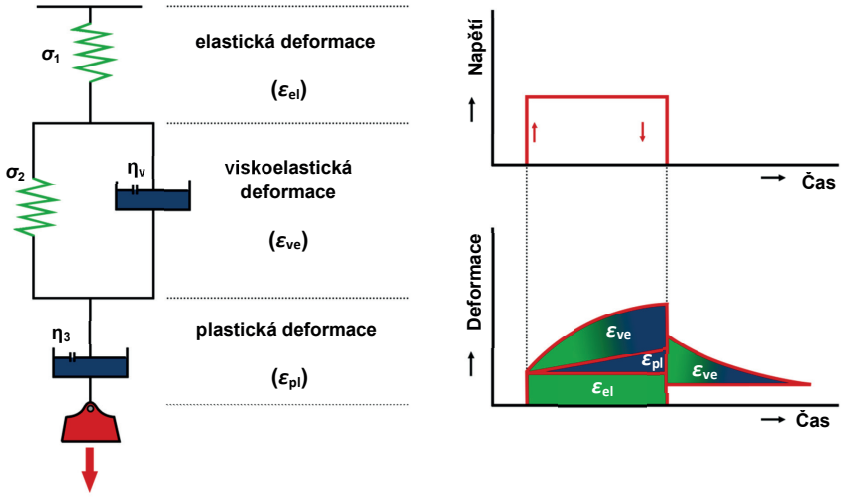
Pevnostní charakteristiky jsou opět odečítány ze standardních křivek napětí-deformace, přičemž nejdůležitější hodnotou je mez pevnosti. Konstrukce založená na konceptu definované pevností dílu by se měla řídit několika pravidly:

- vyhnout se koncentrátorům napětí (ostrým rohům, vrubům, náhlým přechodům v tloušťkách stěny apod.),
- vyhnout se přílišnému ztenčení tloušťky stěny (hlavně u závitů),
- optimálně transformovat tahové namáhání na tlakové (plasty mívají vyšší mez pevnosti v tlaku než v tahu),
- pro maximální pevnost koncentrovat materiál co nejdále od neutrální osy (viz kapitola 5.3).

3.4 Konstrukce s ohledem na způsob namáhání dílu

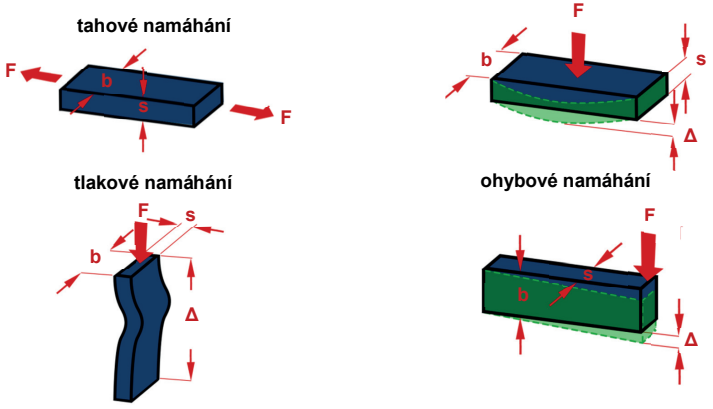
Plasty patří mezi *viskoelastické materiály* (viz kapitola 5.1), což znamená, že na každý typ zatížení reagují jinak v závislosti na mnoha aspektech, např. vnitřní struktuře (amorfní, semikrystalické a zesíťované), okolní teplotě atd. Jejich obecnou výhodou je tlumení rázů a vibrací. ***Viskoelastické materiály*** *mají časově závislou odezvu deformace na napětí a naopak*. Příkladem je plastový nosník, který je deformován ihned do úrovně odpovídající jeho zatížení, ale při konstantním působení síly se jeho průhyb nezastaví, ale naopak neustále roste. Podobný průběh mají i relaxační procesy, které v nosníku probíhají po odstranění vnějšího napětí. Na druhé straně kovy jsou charakteristické deformací nezávislou na době působení zatížení.

Samotná deformace viskoelastického materiálu se skládá ze tří základních složek: *plastické*, *elastické* a *zpožděně elastické deformace*, viz obr. 3.4. Při dynamickém namáhání se dále v materiálu kombinují procesy *krípu* a *relaxace*. Jak bylo zmíněno výše, na rozdíl od kovů je průběh deformace plastových dílů silně závislý na okolní teplotě, zatímco kovy vykazují konstantní modul pružnosti v širokém rozsahu působících podmínek (teplot atd.). V širším rozsahu okolních podmínek lze u plastů považovat modul pružnosti za konstantní pouze v případě vyztužených reaktoplastů a několika inženýrských plastů. Pro stanovení rozdílných výpočtových modulů použitelných pro různé podmínky namáhání bylo zavedeno několik metod, viz kapitola 5.2.



Obr. 3.4 *Schéma využívané pro popis deformačního chování plastů*

Způsoby namáhání se dají dělit na dvě základní skupiny, a to s ohledem na dobu zatěžování (dlouhodobé a krátkodobé) a charakter působící síly (statické a dynamické). Dle způsobu zatěžování a směru působící síly je možné dále rozeznat namáhání: tahové, tlakové a ohybové, viz obr. 3.5.



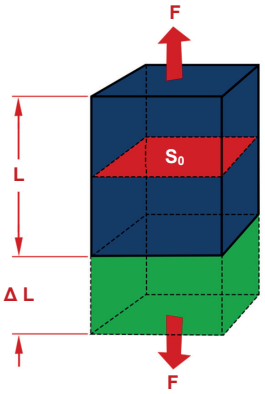
Obr. 3.5 *Základní typy namáhání*

3.4.1 Krátkodobá namáhání

Tahové namáhání

Tahové namáhání je typickým způsobem zatěžování pro definování základních mechanických vlastností dílu. Během zatěžování tělesa jednoosým tahem vzniká v tělese normálové napětí (σ), které je přímo úměrné aplikované síle (F) a nepřímo úměrné původní ploše (S_0) průřezu tělesa kolmého na působící sílu, viz obr. 3.6.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \, [Pa] \tag{2}$$



Obr. 3.6 *Standardizovaná zkouška tahem – jednoosé namáhání*

Těleso je deformováno ve směru působící síly a výsledná deformace odpovídá podílu velikosti prodloužení (ΔL) k původní délce tělesa (L_0), čímž je definováno relativní prodloužení (ε):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \, [\%] \tag{3}$$

Mezi oběma parametry existuje závislost vyjádřená *Hookeovým zákonem* (viz rovnice 4), který je však použitelný pouze v lineární části závislosti napětí-poměrné prodloužení.

$$\sigma = E_t \cdot \varepsilon \, [Pa] \tag{4}$$

Průběh deformací v závislosti na napětí je pro každý plast jiný a z materiálového hlediska je ovlivněn především morfologií, přítomností a orientací aditiv. Tyto faktory však potlačují lineární odezvu deformace s rostoucím napětím, čímž vymizela oblast platnosti standardního modulu pružnosti, která je charakteristická pro kovy. Přehled modulů pružnosti (E_t) a meze pevnosti v tahu (σ_m) pro vybrané materiály je uveden v tab. 3.2 a tab. 3.3.

***Tab. 3.2** Typické tahové vlastností vybraných termoplastů*

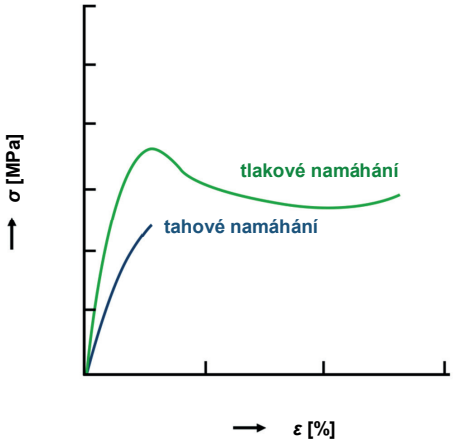
Termoplasty	E_t [MPa]	σ_m [MPa]
PE-HD - Vysokohustotní polyethylen	700 ÷ 1 400	18 ÷ 35
PE-LD - Nízkokohustotní polyethylen	200 ÷ 500	8 ÷ 23
PS - Polystyren	3 200	45 ÷ 65
PA 6 (vlhký) - Polyamid 6	1 100 ÷ 1 500	45 ÷ 50
PC -Polykarbonát	2 100 ÷ 2 400	56 ÷ 67
PMMA - Polymetylmethakrylát	2 700 ÷ 3 200	50 ÷ 77
PVC-U - Neměkčený polyvinylchlorid	1 000 ÷ 3 500	50 ÷ 75
PVC-P - Měkčený polyvinylchlorid	1 ÷ 1 000	10 ÷ 25
PP - Polypropylen	1 100 ÷ 1 300	21 ÷ 37
ABS - Akrylonitril-butadien-styren	1 900 ÷ 2 700	32 ÷ 45
POM - Polyoxymethylen | Polyacetal | Polyformaldehyd	2 800 ÷ 3 200	62 ÷ 70
PET - Polyethylentereftalát	2 700 ÷ 3 100	40 ÷ 47
PEEK - Polyetheretherketon	3 350 ÷ 4 700	72 ÷ 113
SAN - Styren-akrylonitril	3 600	75
PP/GF30 - Polypropylen s 30 hm. % skelných vláken	5 600 ÷ 6 600	85 ÷ 110
PA 6/GF30 (vlhký) - Polyamid 6 s 30 hm. % skelných vláken	5 100 ÷ 6 500	90 ÷ 110
PP/T - Polypropylen s talkem	2 400 ÷ 4 900	25 ÷ 30
PP/M - Polypropylen s minerálním plnivem (křídou)	3 000	32
PVC/M - Polyvinylchlorid s minerálním plnivem (křídou)	3 200	32

***Tab. 3.3** Typické tahové vlastnosti vybraných reaktoplastů*

Reaktoplasty	E_t [MPa]	σ_m [MPa]
PF - Fenol-formaldehydová pryskyřice	5 600 ÷ 12 000	25
UF - Močovinoformaldehydová pryskyřice	7 000 ÷ 10 500	30
MF - Melamin-formaldehydová pryskyřice	4 900 ÷ 9 100	30
UP - Nenasycený polyester	14 000 ÷ 20 000	30
EP - Epoxidová pryskyřice	21 500	30 ÷ 40

Tlakové namáhání

Tlakové namáhání je obdobou tahového, proto tlakové charakteristiky jsou analogií tahových. Z pohledu deformace se jedná o inverzní průběh tahové zkoušky. Směr působící síly je zcela opačný. Z tlakových křivek napětí – deformace lze rovněž stanovit modul pružnosti a pevnost v tlaku. Mezní hodnota odpovídající porušení tělesa se označuje jako stlačitelnost. Pokud nejsou výsledky tlakových zkoušek k dispozici, tak se využívají tahové limity, které bývají nižší, viz obr. 3.7. Přehled pevností v tlaku (σ_M) vybraných materiálů je uveden v tab. 3.4.



***Obr. 3.7** Porovnání tahových a tlakových vlastností polymeru*

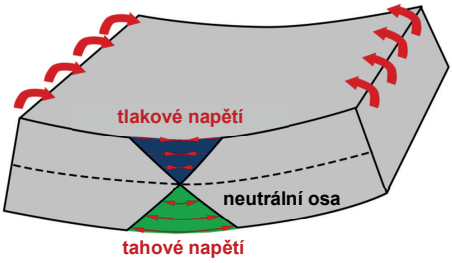
***Tab. 3.4** Typická pevnost v tlaku vybraných polymerů*

Termoplasty	σ_M [MPa]
PMMA - Polymethylmethakrylát	110
PTFE - Polytetrafluorethylen	12
PP/GF30 - Polypropylen s 30 hm. % skelných vláken	60
PA 6/GF30 - Polyamid 6 s 30 hm. % skelných vláken	160
PA 6.6/GF30 - Polyamid 6.6 s 30 hm. % skelných vláken	170
Reaktoplasty	**σ_M [MPa]**
PF - Fenol-formaldehydová pryskyřice	170
UF - Močovinoformaldehydová pryskyřice	200
MF - Melamin-formaldehydová pryskyřice	200
PUR - Polyurethan	100

Ohybové namáhání

Ohybové namáhání je jedním z nejčastějších způsobů mechanického nahání, kterému jsou plastové díly vystaveny. Při zatížení ohybovým momentem se v části tělesa tvoří tahové napětí a v části tlakové, a to dle polohy neutrální osy, viz obr. 3.8. Napětí v nosníku je definováno vztahem (5), kde (M) je ohybový moment, (c) je vzdálenost vnějších vláken od neutrální osy a (I) je moment setrvačnosti. Vztah mezi momentem setrvačnosti a vzdáleností vnějších vláken od neutrální osy lze nahradit průřezovým modulem (W):

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M}{W} \; [Pa] \tag{5}$$

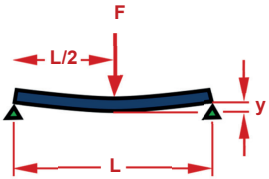


***Obr. 3.8** Rozložení napětí v řezu tělesa při ohybovém namáhání*

Průhyb vetknutého nosníku je popsán vztahem (6), kde (F) je působící síla, (L) je délka vetknutého nosníku, (E) je modul pružnosti a (I) moment setrvačnosti. Při použití modulu pružnosti v tahu (E_t) je výsledný průhyb (y) přibližně o 13 % nižší než při použití modulu pružnosti v ohybu (E_f). Přehled ohybových charakteristik vybraných plastů je uveden v tab. 3.5. Další vztahy pro napětí a průhyb, dle charakteru působící síly a způsobu podpory a fixace nosníku, jsou zobrazeny na obr. 3.9.

$$y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \ [mm] \tag{6}$$

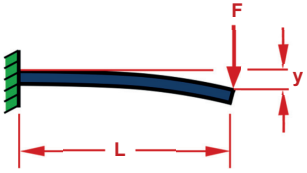
Staticky určitý nosník na dvou podporách zatížený osamělou silou



$$\sigma = \frac{F \cdot L}{4 \cdot W} \ [MPa]$$

$$y = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \ [mm]$$

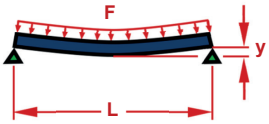
Staticky určitý vetknutý nosník zatížený osamělou silou



$$\sigma = \frac{F \cdot L}{W} \ [MPa]$$

$$y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \ [mm]$$

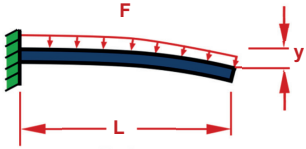
Staticky určitý nosník na dvou podporách zatížený spojitou silou



$$\sigma = \frac{F \cdot L}{8 \cdot W} \ [MPa]$$

$$y = \frac{5 \cdot F \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I} \ [mm]$$

Staticky určitý vetknutý nosník zatížený spojitou silou



$$\sigma = \frac{F \cdot L}{2 \cdot W} \ [MPa]$$

$$y = \frac{F \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot I} \ [mm]$$

Obr. 3.9 *Vybrané vztahy pro napětí a průhyb dle charakteru působící síly a způsobu podpory a fixace nosníku*

***Tab. 3.5** Typické ohybové charakteristiky vybraných plastů*

Termoplasty		E_f [MPa]	σ_{fm} [MPa]
ABS - Akrylonitril-butadien-styren		2 300	74
POM - Polyoxymetylen	kopolymer	2 590	90
	homopolymer	2 830	97
PA6 - Polyamid 6	2,5 % vlhkosti (vlhký stav)	2 827	-
	≤ 0,2 % vlhkosti (suchý stav)	1 207	-
PC - Polykarbonát		2 340	93
PE - Polyethylen		861	-
PP - Polypropylen		1 295	48

Smykové namáhání

Dva objemy materiálu se po sobě v mezní linii „kloužou“ vlivem působících (smykových) sil. Při tomto způsobu namáhání je deformace velmi obtížně měřitelná. Smykové napětí (τ) vzniká tangenciálně v rovinách orientovaných paralelně vůči působícím silám, viz obr. 3.10. I při tomto druhu deformace platí Hookeův zákon, kde smykové napětí je přímo úměrné tuhosti materiálu charakterizované smykovým modulem (G) a zkosem (γ), viz rovnice (7).

$$\tau = G \cdot \gamma = \frac{F}{S_0}\ [Pa] \tag{7}$$

$$S_0 = b \cdot c\ [mm^2] \tag{8}$$

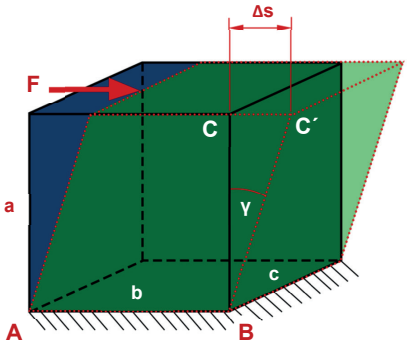
Zkos je definován jako poměr smykové deformace (Δs) na ramenu (a):

$$tg(\gamma) = \frac{\Delta s}{a} \tag{9}$$

Smyková deformace může být vyjádřena rovnicí (10):

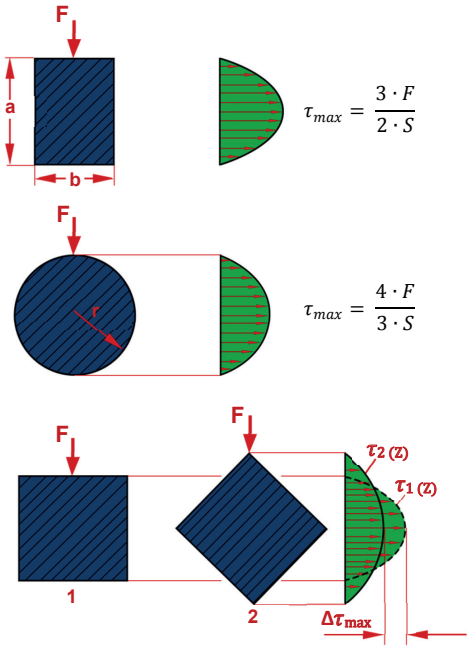
$$\Delta s = \frac{F \cdot a}{G \cdot S_0}\ [mm] \tag{10}$$

Smykem jsou nejčastěji namáhány plastové díly, jako jsou např. nýty, šrouby nebo těsnící a vyrovnávací pryžové elementy. U těchto aplikací je většinou smyk kombinován i s ohybem, který však dosahuje pouze zanedbatelné úrovně. Maximální smykové napětí je opět na vnějších vláknech.



Obr. 3.10 *Smyková deformace tělesa*

Na obr. 3.11 je znázorněno rozložení smykového napětí v různých profilech tělesa. Limitní smykové napětí je možné zjednodušeně odhadnout z tahových charakteristik materiálu jako 0,5 napětí na mezi kluzu nebo 0,58 meze pevnosti.



Obr. 3.11 *Průběh napětí průřezem tělesa při smykovém namáhání*

Vztah mezi modulem pružnosti ve smyku (G) a v tahu (E_t) je vyjádřen rovnicí (11), která názorně ukazuje význam Poissonovy konstanty (υ), i když ta vznikla především pro popis lineárního deformačního chování kovů.

$$G = \frac{E_t}{2\,(1+\upsilon)}\ [Pa] \tag{11}$$

Rázové namáhání

Při rázovém namáhání jsou tělesa zatěžována pulsy, přičemž struktura materiálu a profil dílu by měly být schopny tyto rázy (kinetickou energii) pohltit, viz obr. 3.12. Schopnost odolat rázovému namáhání závisí také na působící teplotě a rychlosti zatěžování. Obecně tomuto typu namáhání odolává lépe materiál s vysokou houževnatostí. Nejvýznamnějším konstrukčním požadavkem pro profily, které mají odolávat rázovému namáhání, je minimalizace koncentrátorů napětí, viz kapitola 5.7. Namáhání by mělo být rozprostřeno na co největší ploše. Jednou z metod stanovení napětí, které vznikne rázovým namáháním, je výpočet průhybu dílu při statickém namáhání. S využitím zesilujícího a statického prohnutí lze přibližně stanovit napětí a deformaci při dynamickém namáhání. Výpočty jsou orientační a je nutné je verifikovat experimentálním měřením. Zesilující faktor (K_D) je možné stanovit s využitím rovnice (12), která obsahuje závislost mezi statickým průhybem (y_{stat}) a výškou dopadu tělesa (h) způsobujícího rázové namáhání.

$$K_D = 1 + \sqrt{1 + \frac{2\,h}{y_{stat}}} \tag{12}$$

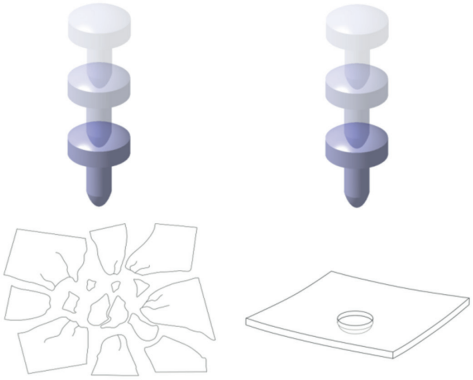
Dynamický průhyb (y_{dyn}) a napětí (σ_{dyn}) v tělese jsou následně stanoveny z rovnic (13) a (14).

$$y_{dyn} = K_D \cdot y_{stat}\ [mm] \tag{13}$$

$$\sigma_{dyn} = K_D \cdot \sigma_{stat}\ [Pa] \tag{14}$$

Dostupné informace o rázové houževnatosti polymerů (viz tab. 3.6) vycházejí ze standardizovaných testů (především metody Izod a Charpy). Zkušební tělesa jsou ale poměrně tlustostěnná a tabulkové hodnoty proto nedávají informaci o reálném chování dané geometrie plastového dílu při jeho rázovém namáhání (jsou použitelné

pouze pro vzájemné porovnání různých materiálů). Vlivem interakce mnoha faktorů je důležité provést optimalizaci dílu dimenzovaného na rázové namáhání při odpovídajícím zatěžování.



***Obr. 3.12** Deformace dílu při rázovém namáhání: křehká (vlevo), houževnatá (vpravo)*

***Tab. 3.6** Přehled rázových vlastností vybraných polymerů*

Polymer	Modifikace	Hustota	Vrubová houževnatost Charpy		Rázová houževnatost Charpy	
			23°C	-30°C	23°C	-30°C
		[g/cm^3]	[kJ/m^2]	[kJ/m^2]	[kJ/m^2]	[kJ/m^2]
ABS	-	1,04	22	8	180	100
POM	-	1,41	5,5	x	150	x
PA 6*	-	1,20	5	4	N	N
PA 6*	CF30	1,26	11	7,5	70	65
PA 6*	GF30	1,41	12	9	80	60
PA 6.6	-	1,14	4,5	x	N	X
PA 6.6	GF30	1,37	12	x	70	X
PC	-	1,19	10	10	N	N
PC/ABS	GF20	1,25	5	x	30	x
PBT	GF30	1,55	8	10	42	40
PBT	-	1,31	8	7	N	x
SAN	-	1,08	2	x	16	16
PP	GF30; homopolymer	1,13	9	8	48	45
PP	kopolymer	0,90	74	10	N	N
PET	GF30	1,60	8,8	8,8	28	28
PET	-	1,32	6	x	N	x

** suchý stav; x – neměřeno; N – bez přeražení; GF – skelná vlákna; CF – uhlíková vlákna*

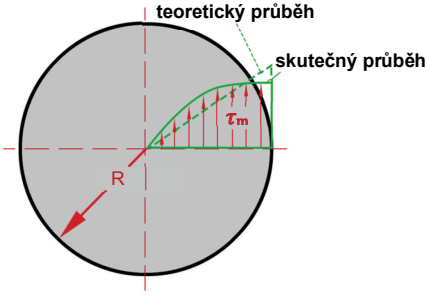
Torzní namáhání (namáhání v krutu)

Smykové napětí se uplatňuje i při torzním namáhání a k porušení dílu tak dochází při překročení smykové pevnosti materiálu. Na rozdíl od tahového a ohybového namáhání napětí nepůsobí kolmo na průřez, ale přímo v rovině průřezu, viz obr. 3.13. Deformace se neprojevuje změnou délky tělesa, ale pootočením jeho elementů, viz obr. 3.14. Pokud nejsou známy konkrétní hodnoty pro daný materiál ze zkoušek v krutu, za horní hranici smykového namáhání se uvažuje polovina pevnosti v tahu. Smykové napětí je vyjádřeno rovnicí (15), kde (M_K) je krouticí moment, (r) je poloměr tyče a (J_P) polární kvadratický moment, který se dá nahradit průřezovým modulem v krutu (W_K).

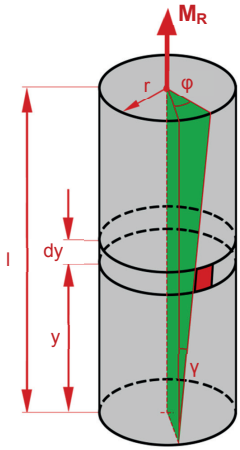
$$\tau = \frac{M_K \cdot r}{J_P} = \frac{M_K}{W_K} \, [Pa] \tag{15}$$

Úhel zkroucení je možné vyjádřit vztahem (16), kde již mimo známých veličin je (G) modul pružnosti ve smyku a (L) délka kroucené tyče:

$$\varphi = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{M_K \cdot L}{G \cdot J_P} \, [rad] \tag{16}$$



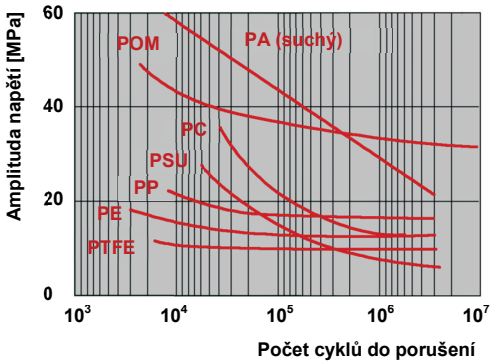
Obr. 3.13 *Rozložení napětí v průřezu tělesa při torzním namáhání*



Obr. 3.14 *Deformace tělesa při torzním namáhání*

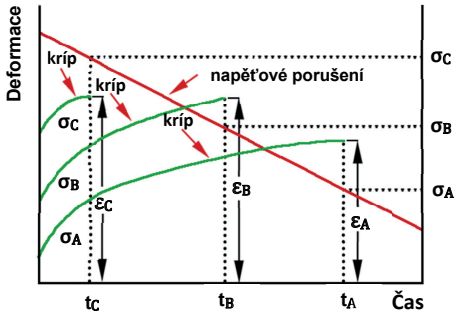
3.4.2 Dlouhodobé namáhání

Z konstrukčního hlediska mají mnohem větší vypovídající hodnotu materiálové charakteristiky, které jsou stanoveny při dlouhodobém namáhání (minimální doba namáhání je 1 000 hodin, v čase pod 100 hodin nejsou výsledky vypovídající, viz obr. 3.15).



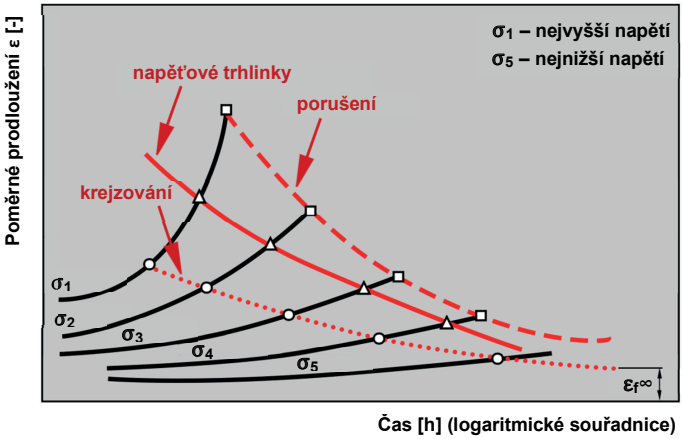
Obr. 3.15 *Wöhlerova křivka pro různé druhy plastů*

Při dlouhodobém zatěžování jsou uvažovány dva typy namáhání: statické a dynamické (cyklické – symetrické, nesymetrické, míjivé apod.). Při dlouhodobém statickém zatěžování se projevuje *krip* a při dlouhodobém dynamickém (cyklickém) zatěžování se projevují *únavové lomy* (náhlé porušení soudružnosti materiálu). Průběh obou jevů je závislý na typu materiálu, velikosti zatížení, zatěžovacím prostředí a konstrukci dílu. Naměřené krípové charakteristiky jsou prezentovány v logaritmických souřadnicích (deformace-čas, viz obr. 3.16). Z grafické závislosti lze stanovit únavový limit, který definuje maximální napětí, které je možné použít pro zabezpečení životnosti dílu při dané době zatěžování. U neplněných plastů odpovídá únavový limit obecně (20 ÷ 30) % napětí na mezi pevnosti stanovené z krátkodobých zkoušek.

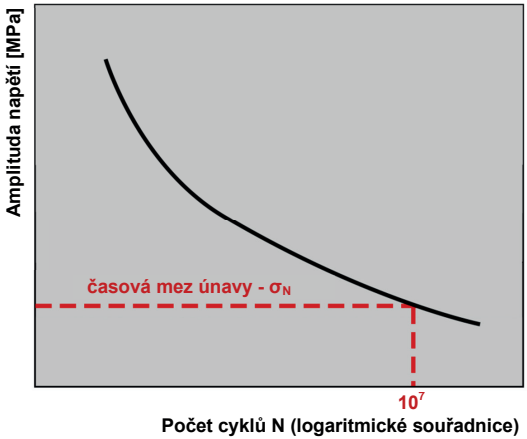


Obr. 3.16 *Únavový limit určený prostřednictvím krípových křivek*

S dynamickým, resp. cyklickým namáháním dílu je spojena především únava materiálu. Při tomto způsobu zatěžování dochází k porušení dílu i při hodnotách napětí, které by při krátkodobém zatěžování porušení nezpůsobily. Příčinou je především šíření mikrotrhlin v materiálu. V první fázi narušení struktury únavovým lomem (při dlouhodobém namáhání) se objevují tzv. *krejzy* (vady, které vytváří velké množství dutin, jež mohou být iniciátorem porušení, viz obr. 3.17). Jsou typické pro amorfní termoplasty (PMMA, PC, PS, PVC). U semikrystalických materiálů se vyskytují také, ale nejsou tak dobře viditelné. V další fázi (vlivem působícího napětí) dochází ke vzniku napěťových trhlinek. Únavové vlastnosti materiálu jsou standardně prezentovány ve formě S-N křivek (únavové křivky: napětí-počet cyklů do přerušení), ze kterých lze odečíst i limitní napětí pro cyklické namáhání, tzv. *mez únavy*.



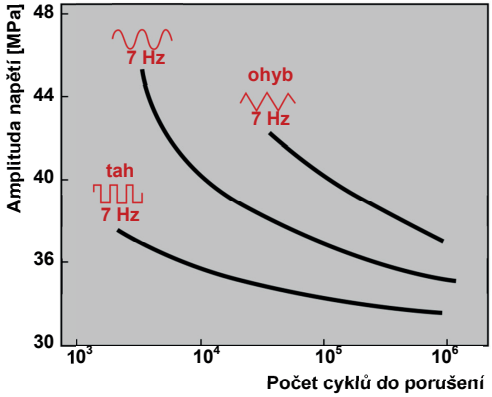
Obr. 3.17 *Deformace polymerů při dlouhodobém namáhání (krípová křivka)*



Obr. 3.18 *Únavová křivka napětí (Wöhlerova křivka)*

Působící napětí by se mělo pohybovat optimálně pod mezí značenou jako mez únavy nebo mez odolnosti, viz obr. 3.18. Jak vyplývá ze znázorněné závislosti, s rostoucím počtem cyklů výrazně klesá velikost přípustného zatížení. S rostoucí frekvencí a teplotou se odolnost proti únavě snižuje, viz obr. 3.19. Vzhledem k viskoelastickým vlastnostem plastů, může během cyklického namáhání dojít ke

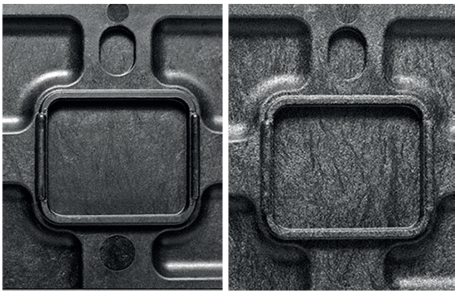
tření uvnitř materiálu a uvolňování tepla. Semikrystalické plasty jsou poněkud náchylnější na únavové poškození než amorfní plasty.



Obr. 3.19 *Únavová křivka napětí (Wöhlerova křivka) pro PA 6.6/GF při různých typech cyklického zatěžování*

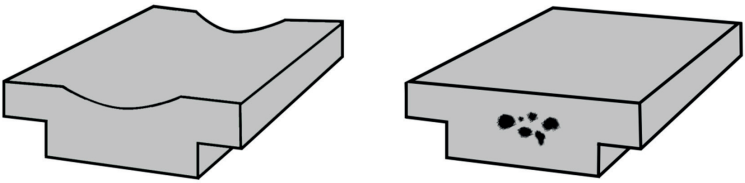
3.5 Konstrukce s ohledem na vzhled výrobku

Dosažení požadované kvality povrchu a optických vlastností dílu je opět spojeno s důkladnou volbou materiálu. Plasty plněné např. skelnými vlákny jsou velmi náchylné na snížení kvality povrchu výrobku s ohledem na měnící se technologické parametry výroby, viz obr. 3.20.



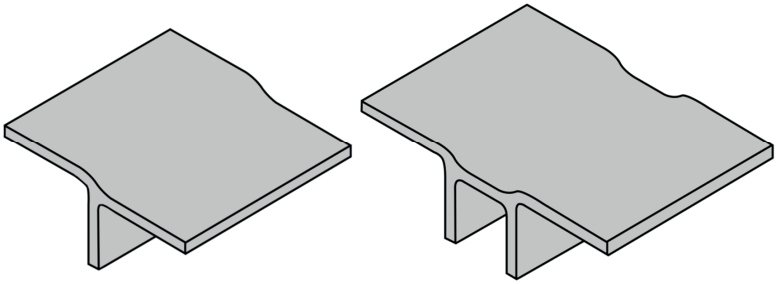
Obr. 3.20 *Vliv teploty formy na kvalitu povrchu výstřiku z plastu plněného skelnými vlákny (vlevo: vyšší teplota formy, vpravo: nižší teplota formy)*

Z konstrukčního hlediska je možné zásadním způsobem ovlivnit tvorbu propadlin, studených spojů, minimalizovat oblasti uzavírání vzduchu atd. Tyto vady jsou dále úzce spojeny především s konstrukcí formy (rozmístěním a dimenzováním vtoků, použitím odvzdušňovacích kanálků apod.). Problematickými tvary jsou především ostré rohy a náhlé změny tloušťky stěn, které mohou způsobit degradaci materiálu. Kromě zhoršení mechanických vlastností dochází v okolí těchto kritických oblastí ke změnám barvy nebo ke změnám lesku dílu (v porovnání s ostatními jeho oblastmi). Další skupinou vad, které výrazným způsobem negativně ovlivňují vzhled výrobku, jsou *propadliny*, případně *staženiny*, viz obr. 3.21.



Obr. 3.21 *Vliv nerovnoměrné tloušťky stěny na tvorbu propadlin (vlevo) a staženin (vpravo)*

Tyto vady jsou způsobeny především hromaděním materiálu (neúměrným místním zesílením stěny, napojením žeber apod.) a omezenou možností působit dotlakem. Z designového hlediska lze malé propadliny zakrýt povrchovou texturou nebo odskokem, který naruší rovinnost povrchu, na němž propadliny vznikají, viz obr. 3.22.



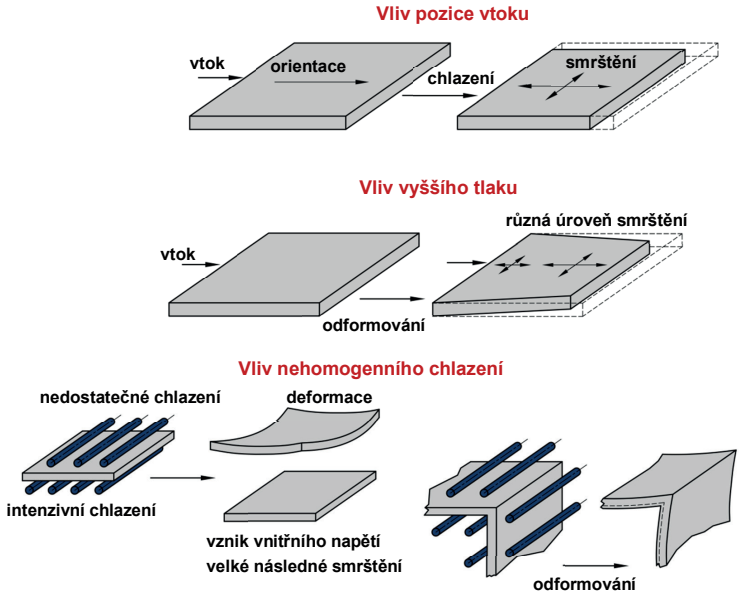
Obr. 3.22 *Možnosti odstupňování profilu za účelem minimalizace tvorby vzhledových vad (propadlin, prokreslení žebra apod.)*

Vzhled výrobku může být negativně ovlivněn také *studenými spoji*, které jsou blíže popsány v kapitole 5.6. Studené spoje vznikají obecně při spojení dvou čel taveniny a mohou být nejen vzhledovou, ale i funkční vadou. Jejich polohu lze předvídat s využitím numerických analýz plnění dutiny formy. Změnou umístění vtokových ústí a konstrukce dílu lze studené spoje přesunout do oblastí, kde nebudou představovat nebezpečí porušení plastového dílu. Změna polohy vtokových ústí u stávající formy bývá však nákladná, zejména při použití horkých vtoků.

3.6 Konstrukce s ohledem na přesnost dílu

Každá výrobní technologie umožňuje různé rozsahy přesností plastových výrobků. Nejpřesnějších rozměrů dosahujeme u technologie vstřikování a vytlačování. U vstřikování hraje významnou roli také přesnost výrobního nástroje a rozmístění vtokových ústí. Faktory, které ovlivňují výslednou přesnost výrobku, jsou dány materiálem, konstrukcí stroje, nástroje a technologickými parametry procesu. Schopnost dodržet velmi úzká toleranční pole je spjata s přesnou kontrolou procesu a kompenzací smrštění materiálu ve fázi chlazení. *Smrštění* je problematické především pro semikristalické materiály, protože při chladnutí dochází k fázové změně (krystalizaci části objemu). V menší míře se smrštění projevuje i při zpracování amorfních polymerů. Přídavkem anorganických plniv se smrštění plastu obecně snižuje. Vláknitá plniva však zvyšují anizotropii smrštění. Ve směru plnění (orientace) je míra smrštění vlákny vyztužených polymerů výrazně nižší než kolmo na směr plnění, tedy zcela opačně, než je tomu u neplněných plastů, viz obr. 3.23.

Dalším důležitým faktorem je schopnost materiálu absorbovat vodu, která výrazným způsobem mění výslednou geometrii dílu. Na výsledný rozměr a přesnost dílu má však vliv mnohem více faktorů, viz kapitola 5.9. Obecná konstrukční doporučení jsou založena na dodržení jednotné tloušťky stěn výrobku a eliminaci obtížně chlazených profilů (tenkých dlouhých profilů, rohů apod.). Tenké stěny jsou náchylné na orientaci makromolekul, protože tenkostěnné díly se musí plnit rychle, ale odvod tepla limituje proces relaxace materiálu a působení dotlaku, který kompenzuje smrštění materiálu. Velmi důležitou roli proto hraje i dimenzování vtoků, které musí být výsledkem kompromisu mezi přesností dílu a produktivitou výroby. Při konstrukci přesných dílů je potřeba brát v úvahu potřebné odformovací úkosy.

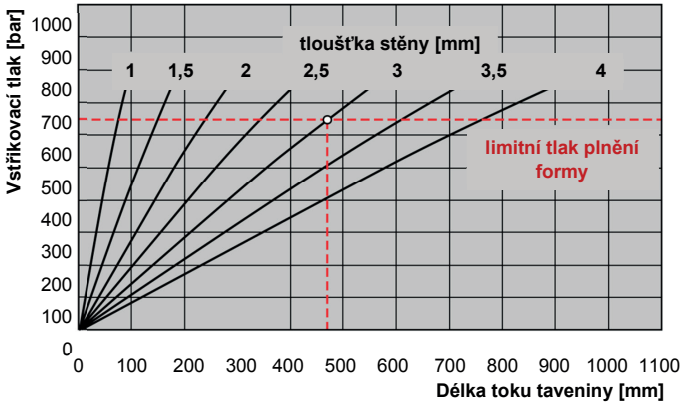


Obr. 3.23 *Rozdíl ve smrštění výrobku vzhledem k orientaci makromolekul a plniva (ve směru toku taveniny a kolmo na směr toku taveniny)*

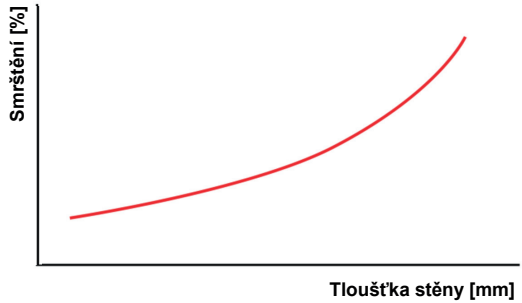
3.7 Konstrukce zohledňující vyrobitelnost vstřikováním

Jedním z posledních konstrukčních kroků před výrobou (konstrukcí) nástroje je optimalizace geometrie dílu s ohledem na jeho vyrobitelnost zvolenou technologií. Cílem je získat finální díl bez nutnosti dalších operací a bez nutnosti navrhovat příliš komplexní výrobní nástroje. Ideálně by měly být plastové díly navrhovány tak, aby výroba mohla probíhat v plně automatickém režimu. Tato konstrukční strategie zohledňuje reologické vlastnosti materiálů (viskozitu) a z toho vycházející maximální délku toku taveniny s ohledem na tloušťku stěny výrobku, viz obr. 3.24.

Dále je nutné vzít v úvahu následné jevy (smrštění, orientaci makromolekul a plniva apod.), rovnoměrné a rychlé naplnění dutiny formy, nutnost zajistit rovnoměrný odvod tepla z celého objemu výrobku a vyvarovat se příliš velkým nebo příliš malým tloušťkám stěn, viz obr. 3.25.



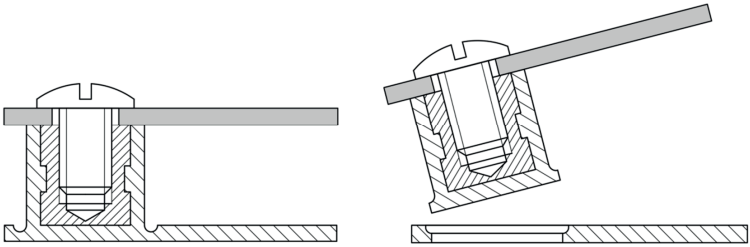
Obr. 3.24 *Maximální dosažitelná délka toku taveniny v závislosti na tloušťce stěny výrobku a dalších technologických parametrech*



Obr. 3.25 *Závislost mezi tloušťkou stěny a smrštěním plastového dílu*

3.8 Konstrukce s ohledem na recyklovatelnost dílu

Současné trendy upřednostňují konstrukční řešení, která zahrnují i nakládání s díly po ukončení jejich životnosti. Recyklované plasty lze použít pro aplikace, kde nejsou na materiál kladeny vysoké kvalitativní nároky. Vyšší celky, které kombinují různé materiály, by měly být snadno rozebíratelné (využívají se integrované spojovací prvky a speciální geometrie pro snadné vyjímání kovových insertů, viz obr. 3.26), aby nedocházelo ke směšování obecně nemísitelných plastů (viz tab. 3.7).



Obr. 3.26 *Lokální ztenčení stěny pro snadnou demontáž vložky z odlišného materiálu*

Z hlediska recyklovatelnosti je nejméně vhodné spojovat plasty pomocí adheziv, která kontaminují povrch. Pro snadnou identifikaci plastových dílů jsou na nich použity recyklační značky, které usnadňují nakládání s plastovým odpadem. Prvních šest skupin představuje nejčastěji používané plasty, viz tab. 3.8.

Tab. 3.7 *Mísitelnost vybraných druhů plastů*

Plast	PE	PVC	PS	PC	PP	PA	POM	SAN	ABS	PBT	PET	PMMA
PE	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
PVC	□	■	□	□	□	□	□	■	●	□	□	■
PS	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□
PC	□	○	□	■	□	□	□	■	■	■	■	■
PP	■	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
PA	□	□	○	□	□	■	□	□	□	○	○	□
POM	□	□	□	□	□	□	■	□	□	○	□	□
SAN	□	■	□	■	□	□	□	■	■	□	□	■
ABS	□	●	□	■	□	□	○	□	■	□	○	■
PBT	□	□	□	■	□	○	□	□	□	■	□	□
PET	□	□	○	■	□	○	□	□	□	□	■	□
PMMA	□	■	○	■	□	□	○	■	■	□	□	■

■ - kompatibilní
● - kompatibilní s omezením
○ - kompatibilní jen v malých množstvích
□ - nekompatibilní

***Tab. 3.8** Používané recyklační symboly*

Zkratka	Symbol	Nejčastější použití
PET		jednorázové nádoby na potraviny a nápoje
HD-PE		láhve od čisticích prostředků a šampónů, jogurtové obaly, atd.
V / PVC		dětské hračky, nafukovací lehátka a různé lahve od čisticích prostředků
LD-PE		sáčky na potraviny
PP		brčka, jednoúčelové kelímky a nádoby na potraviny
PS		obalový průmysl, zateplování budov, atd.
-		

Dle způsobu recyklace rozlišujeme tři základní způsoby nakládání s výrobky:

- ***mechanickou recyklaci***, která zahrnuje třídění plastových výrobků, čištění, drcení a/nebo regranulaci a opětovné zařazení do výrobního procesu,
- ***recyklaci základních chemických komponent***, kdy je polymer chemicky rozložen na základní složky použitelné pro nové sloučeniny,
- ***spalování plastů***, které patří v současnosti mezi nejrozšířenější způsob nakládání s plastovým odpadem, při kterém se uvolní velké množství dále využitelné energie, jež je v plastech vázána. Pro spalování se využívají speciální vysokoteplotní kotle s filtry. Nedokonalým spalováním polymerů a oxidačních meziproduktů vznikají zdraví nebezpečné látky (např. fosgen z PVC).

3.9 Konstrukce zohledňující automatizaci výroby

Automatizace, především montážních procesů, by měla vést ke zvýšení efektivity, flexibility, ekonomičnosti a kvality výroby i výsledného produktu. Výrobek by měl být konstruován tak, aby v něm bylo zahrnuto co nejvíce funkčních prvků, což snižuje nároky na počet dalších komponent a podsestav. Automatizace výroby zahrnuje i následnou manipulaci s výrobkem po jeho odformování z formy a kompletaci sestav. Množství integrovaných prvků by mělo snížit počet manipulačních a montážních kroků a racionalizovat celý výrobní proces. Optimálně je navrhováno

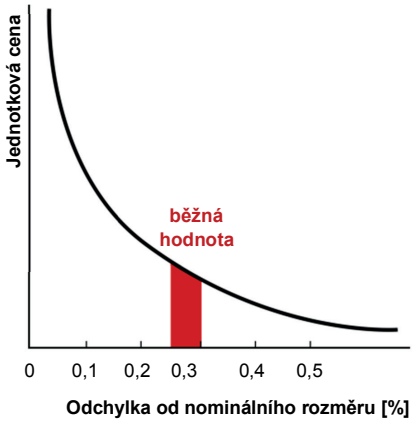
šasi, na které jsou napojeny další prvky s využitím západkových spojů. Šrouby a bajonetové systémy patří pro kompletaci sestav k nejnáročnějším a tedy i nejdražším spojovacím metodám. Součástí dílů by měly být i prvky, které usnadní vzájemné polohování dílů a zajistí jednoznačnou a nezaměnitelnou orientaci spojovaných součástí. Prvky optimálně navržené pro automatizaci plní zpravidla i požadavky na snadnou recyklovatelnost. Hlavními zásadami jsou jednoduchá geometrie a přístupnost montážních ploch. Ideální montáž je v ose Z (orientované vertikálně) bez nutnosti rotace dílu nebo jiných nelineárních pohybů. Pro manipulaci nejsou vhodné díly z houževnatých materiálů. Pokud jsou díly před kompletací odebírány ze zásobníků, měly by být vzájemně dobře separovatelné. Při návrhu upínacích prvků (zácvaků) je nutné brát v úvahu pořadí montáže a tomu přizpůsobit jejich design a rozměrové tolerance.

3.10 Další konstrukční strategie

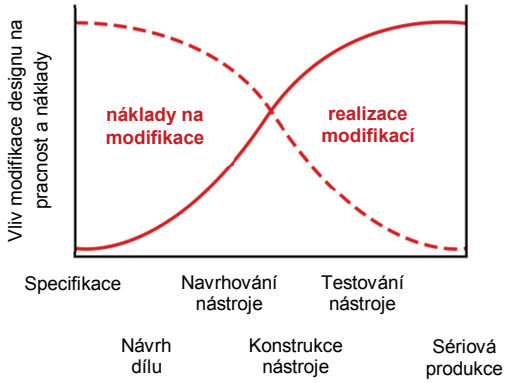
Konstruktér musí vzít v úvahu i další faktory, které mají zásadní vliv na kvalitu a efektivitu výroby.

Konstrukce s ohledem na cenu dílu je v praxi jeden z nejvýznamnějších faktorů. Mnoho konstruktérů si však neuvědomuje, jak tento faktor ovlivňuje zvolený tvar dílu a především jeho požadovanou přesnost, viz obr. 3.27. Použití úzkých tolerančních polí výrazně zvyšuje nároky na výrobní nástroj a kontrolu technologických parametrů a zvyšuje nebezpečí výroby kvalitativně nevyhovujících (neshodných) dílů. Dimenzování dílu by mělo být provedeno s ohledem na minimální spotřebu materiálu a co nejkratší výrobní cyklus bez negativního dopadu na kvalitu výroby. Ideální je jednoduchá geometrie dílu bez podkosů a oblastí se zvýšenou koncentrací materiálu.

Při optimalizaci navrhované konstrukce by měla být využita také prototypová výroba, která ověří její funkčnost a design. Po výrobě sériového nástroje je již jakákoliv úprava designu výrobku spojena s vysokými náklady, viz obr. 3.28.



Obr. 3.27 *Vliv rozměrové přesnosti dílů na jejich výslednou cenu*



Obr. 3.28 *Diagram znázorňující růst nákladů na provedení úprav výrobku*

Konstrukce s ohledem na legislativní požadavky. Výrobky dále musejí splňovat i legislativní požadavky. Patří sem faktory, jakými je např. netoxičnost plastů a jejich aditiv, které mají přijít do styku s potravinami, s lidskou pokožkou nebo sliznicí. Tento požadavek je důležitý i při výrobě hraček, kde je nutné dodržet také omezení související s minimální velikostí dílů (aby je nebylo možné vdechnout) a eliminací ostrých hran.

Konstrukce s ohledem na bezpečnost. Jak již bylo zmíněno výše, tak úspěšná konstrukční strategie je založena na přesném definování všech působících aspektů a volbě faktoru bezpečnosti s ohledem na míru ohrožení lidského zdraví při porušení dílu, viz kap. 5.5. Bezpečnostní faktor je závislý na mnoha hlediscích: působící teplotě, přítomnosti chemikálií, typu, velikosti a době zatížení, míře nebezpečí přetížení apod., viz tab. 3.9.

Tab. 3.9 *Návrh pevnosti dílu s ohledem na bezpečnostní faktor*

Doporučovaná pevnost* dílu při jeho konstrukci s ohledem na bezpečnost		
	Nekritické porušení	Kritické porušení
Občasné namáhání (pod mezí únavy)	(20 ÷ 50) %	(10 ÷ 25) %
Kontinuální namáhání	(10 ÷ 25) %	(5 ÷ 10) %

*doporučený procentuální podíl krátkodobé pevnosti (z materiálových listů), vzhledem k typu namáhání a maximální teplotě

Konstrukce s ohledem na životnost dílu. Přítomnost chemických a biologických látek i UV záření mohou být příčinou stárnutí polymerů, ty jsou však ve výpočetních vztazích používaných konstruktéry obtížně kvantifikovatelné. V běžné praxi lze životnost dílu prodloužit návrhem dílu pro nízkou míru napětí a deformaci, absencí ostrých rohů a hran apod., viz kap. 4.

OBECNÉ ZÁSADY NAVRHOVÁNÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ

4

Ve srovnání s ocelí jsou plasty „novým“ materiálem. Při navrhování plastových dílů bývá často snahou využít zkušeností z konstruování kovových dílů, což však není zcela vhodný přístup. Navíc rozdílné chování a vlastnosti lze pozorovat i mezi různými typy plastů (plněnými a neplněnými, amorfními a semikrystalickými apod.), proto jsou jednotlivé konstrukční prvky dimenzovány ve specifických rozsazích tak, aby bylo možné maximálně eliminovat vznik vad a zajistit požadovanou výrobní kvalitu.

Konstrukční zásady vycházejí především z povahy plastů, z požadovaného designu výrobku a s ním spojené výrobní technologie. Kromě těchto faktorů má zvolená technologie přímý dopad také na tvarovou a rozměrovou přesnost výrobku, možnosti jeho dimenzování (tloušťky stěny, využití vyztužujících profilů apod.) a tím celkovou produktivitu výroby, která by měla být maximální při požadované výrobní kvalitě. Nejrozšířenější metodou zpracování plastů je technologie vstřikování, a proto budou níže uvedené základní zásady konstrukce plastových dílů zaměřeny především na tuto výrobní technologii.

Optimální design výrobku by měl být co nejjednodušší, přičemž hlavním cílem je zajištění jeho požadované funkce. Při současných trendech, kdy je snahou integrovat do jednoho dílu co nejvíce funkcí, roste složitost výsledného konstrukčního návrhu. Se zvyšující se složitostí konstrukce dílu roste také nebezpečí vzniku výrobních komplikací. Vzhledem k povaze výrobního procesu a především k nutnosti odformovat díl po jeho vstříknutí a ztuhnutí z výrobního nástroje, je nezbytné v prvním kroku vzít v úvahu polohu dělící roviny.

4.1 Dělící rovina

Dělící rovina tvoří rozhraní mezi pevnou a pohyblivou částí vstřikovací formy. Měla by být provedena natolik precizně, aby negativně neovlivnila přesnost a kvalitu povrchu dílu. Tato nepřesnost nemusí být pouze výrobní, ale může vzniknout i postupným opotřebením dělící roviny. Z těchto důvodů je nezbytné se vyhnout úzkým tolerancím rozměrů, které jsou navázány na dělící rovinu. Tomu odpovídá

také rozdělení tolerancí pro ***rozměry vázané*** a ***nevázané formou***, viz kapitola 5.9. Dělící rovina by v ideálním případě měla být kolmá na směr otevírání formy, ale může být orientována i pod určitým úhlem. Umístění a profil dělící roviny má vliv na mnoho aspektů, jakými jsou např. odvzdušnění, umístění vtoků apod., ale především vhodné dimenzování a návrh odformovacích úkosů. Pomocné dělící roviny vznikají začleněním bočních jader a dalších mechanismů formy (např. čelistí apod.).

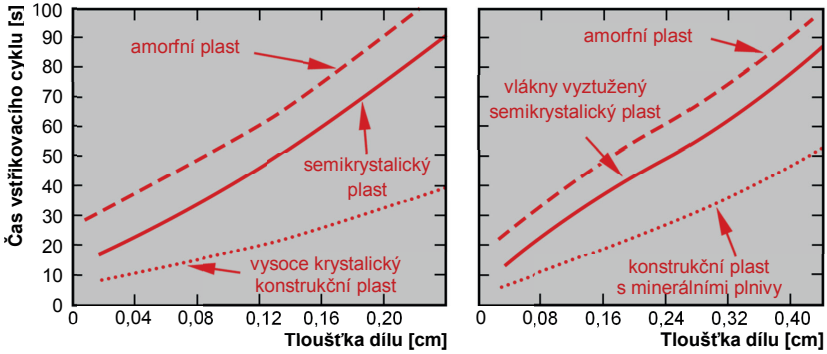
Dalším velmi důležitým prvkem, který definuje tvar dělící roviny, jsou rádiusy, jejichž primární funkce bude vysvětlena v kapitole 4.3. Na obr. 4.1 je zjednodušeně přiblížena problematika umístění vnitřních a vnějších rádiusů v dělící rovině. Ostré hrany se obecně u vstřikovaných dílů nedoporučují, ale pokud jsou z hlediska funkce výrobku vyžadovány, tak jedinou oblastí, kde je možné je bez větších komplikací a investic do formy vyrobit, je právě dělící rovina. Vnitřní rádiusy jsou součástí tvárníku, tvárnice nebo jádra a jejich výroba není nijak komplikovaná. Ostré hrany se standardně tvoří pomocí vložek, protože jejich výroba obráběním je časově náročnější, zvláště u tenkostěnných profilů. Vnější rádiusy musí být zahloubeny pod dělící rovinu do tvárníku nebo tvárnice, aby byly minimalizovány nepřesnosti v navázání kontur jdoucích přes dělící rovinu.

Obr. 4.1 *Způsoby zaformování vnitřního a vnějšího rádiusu*

4.2 Tloušťka stěny

Tloušťka stěny výrobku je kritický parametr, který zásadním způsobem ovlivňuje jak tuhost celého dílu, tak i vyrobitelnost danou technologií a zároveň ekonomičnost celého výrobního procesu (neefektivní zvyšování spotřeby materiálu, prodlužování výrobního cyklu, rostoucí smrštění apod.). V rámci zpracování plastů platí *obecné*

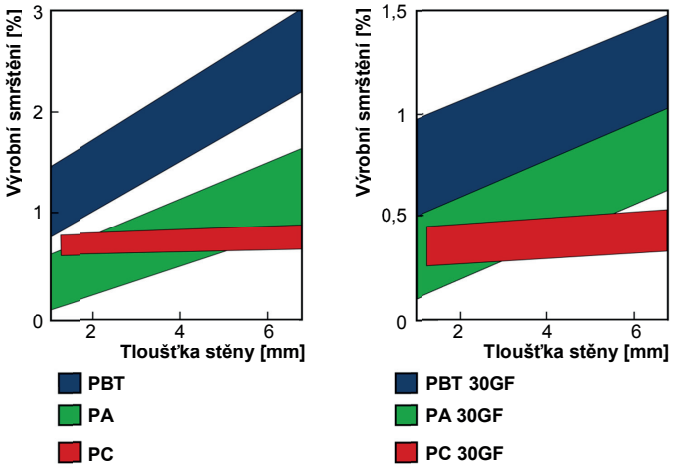
pravidlo udržet jednotnou a co nejmenší tloušťku stěny v rámci celého produktu. Samotná tloušťka stěny by měla být kompromisem mezi spotřebou materiálu, rychlostí výrobního cyklu a požadovanou tuhostí dílu. Jinak řečeno, tloušťka stěny výrobku by měla být dostatečná, aby díl byl schopen přenášet působící zatížení v přípustném rozsahu deformací, ale zároveň, aby produktivita výroby nebyla zbytečně snižována rostoucí dobou chlazení, která je spojená se zvyšující se koncentrací a spotřebou materiálu. Při dvounásobném navýšení tloušťky stěny se doba chlazení zvýší více než dvakrát (viz obr. 4.2), protože výrobek nemůže být odformován z formy dříve, než je ve všech jeho oblastech dostatečně tuhý.



Obr. 4.2 *Vliv tloušťky stěny dílu na dobu cyklu při vstřikování*

Minimální tloušťka stěny je zároveň v souladu s environmentálními požadavky při použití syntetických polymerů, které nejsou biodegradabilní a jsou obtížně recyklovatelné (úspora energie a neobnovitelných zdrojů). S tloušťkou stěny je spojena i velká řada výrobních omezení především pro vstřikování. Zásadním problémem je nárůst smrštění plastů při růstu tloušťky stěny (viz obr. 4.3 a tab. 4.1).

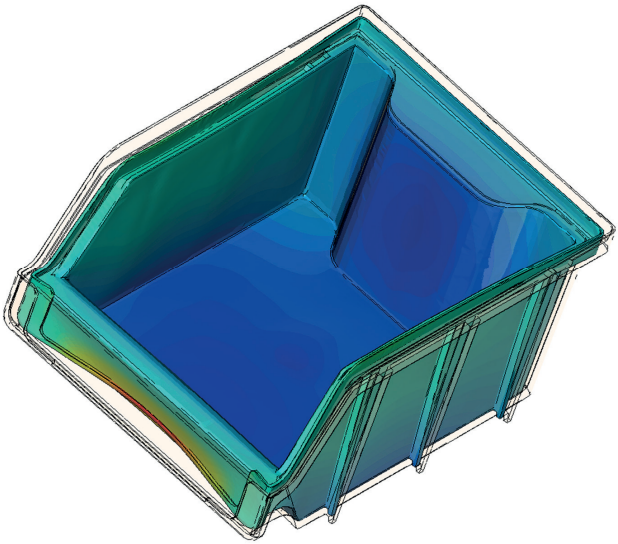
Pokud nebude tloušťka stěny celého výrobku vhodně profilována, dojde vlivem různého smrštění v důsledku různých podmínek tuhnutí materiálu v odlišných částech výrobku k jeho tvarové deformaci (viz obr. 4.4). Velikost smrštění může dosáhnout až úrovně, kdy se budou tvořit staženiny a propadliny (viz obr. 3.21), což hrozí zejména u semikrystalických plastů.



Obr. 4.3 *Vztah mezi tloušťkou stěny dílu a jeho výrobním smrštěním*

Tab. 4.1 *Míra smrštění v závislosti na tloušťce stěny u vybraných polymerů*

Polymer	Smrštění [%]	
	3 mm	6 mm
ABS	0,4	0,7
ABS/GF30	0,1	0,15
POM	1,7	2,1
POM/GF30	0,3	0,4
PA 6	1,3	1,6
PA 6/GF30	0,35	0,45
PA 6.6	1,6	2,2
PA 6.6/GF30	0,5	0,55
PC	0,5	0,7
PC/GF30	0,1	0,2
PES	0,6	0,7
PES/GF30	0,2	0,3
m-PPE	0,5	0,8
m-PPE/GF30	0,1	0,2
PP	1,5	2,5
PP/GF30	0,35	0,4
PE-HD	1,5	3
PEI	0,5	0,7
PEI/GF30	0,2	0,4
PS	0,4	0,6



Obr. 4.4 *Tvarová deformace dílu vlivem různých podmínek tuhnutí materiálu*

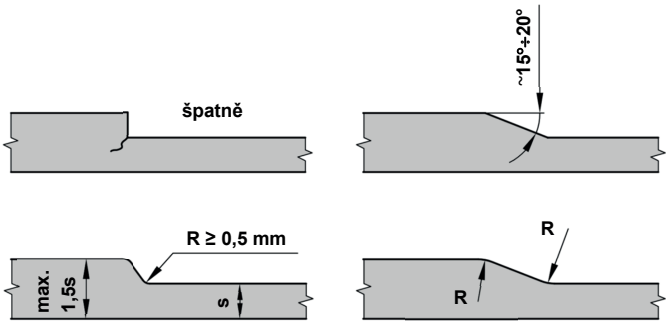
Plasty mají obecně relativně malou hustotu, a proto by i celý design výrobku měl na uživatele působit odlehčeně bez tlustostěnných profilů (žebra, otevřené profily apod.). Zdánlivě objemné díly lze vyrábět pomocí technologií, které jsou tomu uzpůsobené (GIT, WIT, MuCell apod.). Doporučené tloušťky stěny výrobku pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Za tenkostěnné se obecně označují výrobky s tloušťkou stěny do 1,5 mm. U vstřikovaných dílů se obvykle používají tloušťky stěny (1 ÷ 3) mm, v extrémních případech až do 6 mm. S ohledem na omezení procesu vstřikování se nedoporučují tloušťky pod 0,5 mm a nad 8 mm. Amorfní plasty jsou méně náchylné na vady spojené s nevhodně dimenzovanou tloušťkou stěny, protože úroveň smrštění je obecně mnohem menší než u semikrystalických plastů. Ještě menšího stupně smrštění dosahují plněné plasty, ale v rámci jejich zpracování je limitujícím faktorem nízká tekutost těchto vícefázových systémů (obtížné plnění tenkých profilů zvláště dále od ústí vtoku). Z výše uvedených důvodů by konstruktér měl udržet tloušťku výrobku jednotnou v maximální možné míře. Při zvyšování tuhosti dílu je možné tloušťku stěny do určité míry lokálně modifikovat. Každý přechod profilu tloušťky

stěny je spojen s nebezpečím zanášení vnitřního napětí (možná slabina výrobku), proto je nutné tyto přechody řešit velmi citlivě.

Tab. 4.2 *Typická nominální tloušťka stěny pro vybrané polymery*

Polymer	Typické rozmezí tloušťky dílu [mm]
ABS	1,1 ÷ 3,6
POM	0,8 ÷ 3,0
LCP	0,2 ÷ 3,0
Dlouhými vlákny vyztužené plasty	1,9 ÷ 25,4
PPE (modifikovaný)	1,1 ÷ 3,6
PA 6	0,3 ÷ 2,9
PC	1,0 ÷ 3,8
PET, PBT	0,6 ÷ 3,2
TPC	0,6 ÷ 3,3
PE	0,8 ÷ 5,0
PPS	0,5 ÷ 4,6
PP	0,6 ÷ 3,8
PS	0,9 ÷ 3,8
PSU	1,5 ÷ 3,8
PUR	2,0 ÷ 19,0
PVC	1,0 ÷ 3,8
SAN	0,9 ÷ 3,8

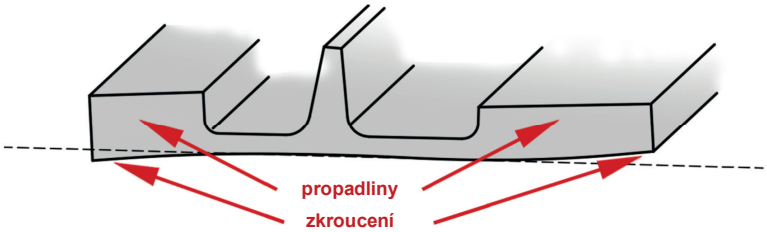


Obr. 4.5 *Způsoby řešení přechodů v tloušťce stěny*

Přechod tenkého profilu na silnější nesmí být ostrý a náhlý. Tavenina polymeru je velmi viskózní a musí mít dostatek prostoru pro pozvolné vyplnění celého průřezu, aby nedocházelo k jejímu zvíření a vzniku vrubu (izolovaná část taveniny, která ztenčuje nosný / funkční průřez). Možnosti řešení vycházejí z využití rádiusů, a to

ideálně buďto jednoho s velkým poloměrem nebo dvou menších, které jsou vzájemně propojeny úkosem (viz obr. 4.5).

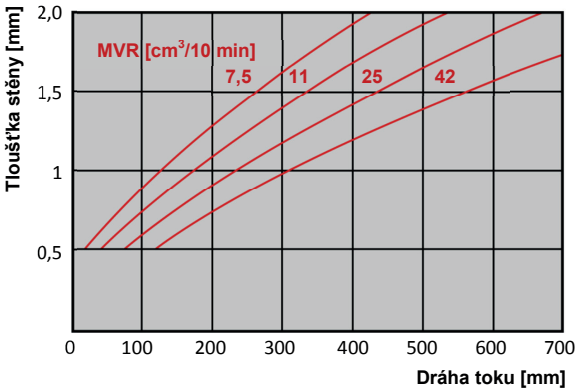
U plněných plastů je možné tloušťku stěny lokálně zvýšit maximálně o 50 % nominální tloušťky, resp. u amorfních plastů o 25 % a u semikrystalických plastů max. o 15 %. Přechod mezi tloušťkami stěny by měl být vyrovnáván na délce odpovídající trojnásobku rozdílu tloušťky stěny. Při dodržení těchto limitních hodnot nebude mít rozdílný profil negativní vliv na technologičnost výroby (především tvorbu propadlin) a vznik vnitřního napětí. Při velkém rozdílu v tloušťce stěny na sebe navazujících profilů dojde k deformaci tenčí části, protože silnější oblast se smršťí výrazně více a do již zatuhlé části bude zanášet velké vnitřní napětí způsobující až tvarové změny profilu, viz obr. 4.6.



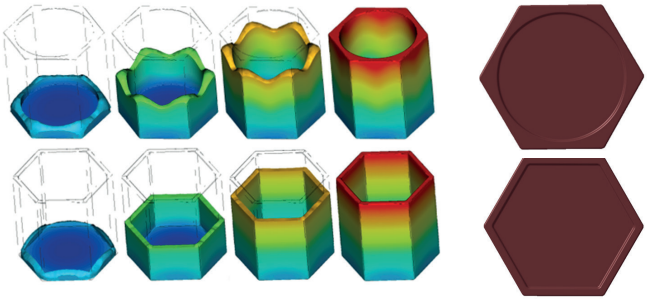
Obr. 4.6 *Deformace dílu vlivem velkého rozdílu v tloušťce stěny výrobku*

Omezení tloušťky stěny vychází i z použití studených vtokových kanálů. Jde o kritickou délku toku taveniny, což je spojeno s poklesem teploty a tlaku na čele taveniny. Čím delší vzdálenost musí tavenina urazit od poslední zóny, kde je jí dodáváno teplo v rámci vstřikovacího stroje (obvykle je to tryska vstřikovací jednotky), tím větší musí být tloušťka stěny výrobku, aby tavenina plastu dotekla až do nejzazší části výrobku (viz obr. 4.7). Příliš tenká stěna může vlivem ochlazení taveniny způsobit až předčasné zastavení jejího toku. Pro každý polymerní materiál je tedy dosažitelná tloušťka stěny funkcí viskozity taveniny polymeru, která se mění především v závislosti na teplotě. Pro zajištění rychlého vyplnění tvarové dutiny formy je nutné během výrobního procesu optimalizovat teplotu taveniny, vstřikovací rychlost a tlak. Příliš vysoké technologické parametry však mohou vést až k nadlimitnímu zatěžování polymeru. S tloušťkou stěny výrobku je spojeno i umístění

ústí vtoku, které by mělo být v nejsilnější části výrobku (výjimkou jsou strukturní pěny). Pro minimalizace vnitřního napětí a namáhání materiálu by měly být vtoky vhodně dimenzovány (měly by dosahovat minimálně 2/3 tloušťky stěny výrobku).



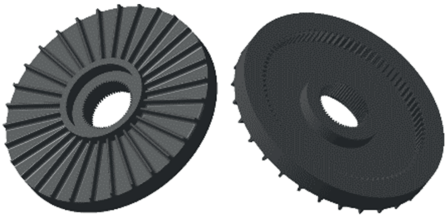
Obr. 4.7 *Dráha toku vs. tloušťka stěny pro různou tekutost POM (objemový index toku taveniny: MVR)*



Obr. 4.8 *Vliv tloušťky stěny výrobku na plnění dílu (nahoře - nerovnoměrná tloušťka stěny: nebezpečí vzniku studeného spoje; dole - rovnoměrná tloušťka stěny a rovnoměrný průběh plnění dutiny formy)*

Vzhledem k podmínkám v okolí vtoku, by tento měl být umístěn mimo oblast, která bude namáhána vnějším zatížením. Tavenina proudí primárně oblastmi s nejmenšími hydraulickými odpory. Během vstřikování se proto plní nejdříve nejsilnější části dílů a až poté zabíhá tavenina do tenkostěnných profilů, viz obr. 4.8. Tento jev se využívá

i pro optimalizaci způsobu plnění tvarové dutiny vstřikovací formy. Využívají se tzv. promotéry a inhibitory toku. Promotéry (nebo rovněž technologická žebra) zajišťují primární nasměrování toku taveniny do požadované oblasti (viz obr. 4.9), zatímco inhibitory (např. lokální ztenčení stěny) limitují šíření taveniny ve směru svého umístění.

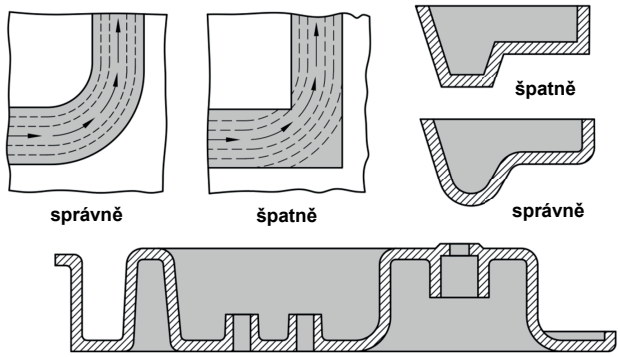


Obr. 4.9 *Využití technologických žeber pro zajištění optimálních podmínek plnění*

Během plnění dílu taveninou plastu dochází vlivem působících tlaků k orientaci makromolekul polymeru ve směru toku. Pokud dojde k rychlému ochlazení dílů (vlivem tenké stěny výrobku a nízké teploty formy), tak se makromolekuly zafixují v takto orientovaném stavu a v dílu vyvolávají vnitřní napětí, s čímž je spojena jeho velká tvarová nestabilita. Vnitřní napětí se z výrobku uvolní zejména při působení zvýšené teploty, kdy dojde k samovolné deformaci plastového dílu. Jak již bylo zmíněno dříve, s rostoucí tloušťkou stěny roste i potřebná doba chlazení a také čas, který má materiál k dispozici pro relaxaci, čímž se výrazným způsobem snižuje míra vnitřního napětí. Orientace makromolekul způsobuje i anizotropii vlastností plastového dílu. Příkladem je pevnost dílu, která je vyšší ve směru orientace makromolekul, ale ve směru kolmém na orientaci makromolekul (kolmém na směr toku taveniny) pevnost klesá, viz kapitola 5.6. Mnohem výraznější dopad na výsledné vlastnosti plastového dílu má orientace vyztužujícího plniva (zejména, pokud je ve formě vláken), které se v tomto ohledu chová obdobně jako makromolekuly. Z těchto důvodů musí mít konstruktér potřebné informace o způsobu plnění kritické části výrobku, která bude primárně zatěžována. Simulační programy jsou v současnosti schopny poskytovat velmi přesné analýzy plnění, které predikují chování taveniny polymeru ve výrobním nástroji (vstřikovací formě) v průběhu všech fází výrobního cyklu.

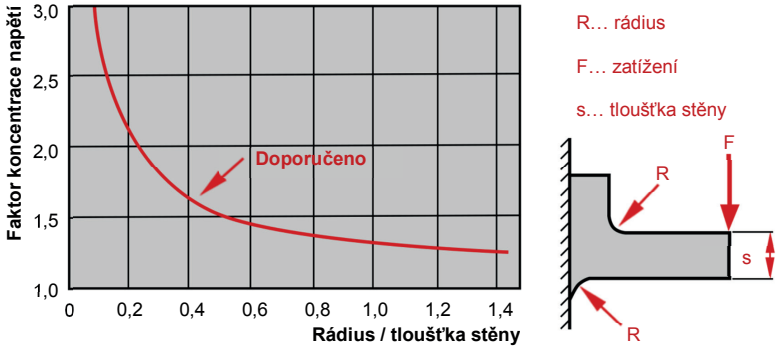
4.3 Rádiusy a zaoblení

Proces vstřikování je založen na velmi rychlém a plynulém zaplnění tvarové dutiny formy taveninou plastu. Tavenina plastu je velmi viskózní a není schopna se přizpůsobit tvarovým změnám obtékaných profilů tak rychle jako nízkomolekulární kapaliny, proto všechny oblasti, kde taveniny při svém proudění mění směr toku, musí být zaobleny, aby byl pokles tlaku na čele taveniny co nejmenší. Jinými slovy všechny rohy musí být zaobleny alespoň minimálním rádiusem, který snižuje hydraulické ztráty proudící taveniny, viz obr. 4.10. Dalším nebezpečím, které s sebou přinášejí ostré rohy, je vrubový efekt, viz kapitola 5.7, protože za ostrými rohy a kouty by docházelo k lokálním vírům a následnému vzniku vnitřního napětí. Jak již bylo uvedeno, ostré hrany mohou být lokalizovány pouze v dělící rovině, protože tyto geometrické prvky rovněž zapříčiňují uzavírání vzduchu ve tvarové dutině formy a umístění ostrých hran kdekoliv jinde ve tvarové dutině formy by vyžadovalo zajistit efektivní odvzdušnění této oblasti. Z bezpečnostních důvodů (aby nedošlo k pořezání výrobních pracovníků nebo konečného uživatele) by měl být všude použit alespoň minimální rádius 0,25 mm. Nevýhodou rohů a koutů s malými rádiusy je však jejich obtížné chlazení při současné velké koncentraci tepla, což vede k tvarovým deformacím výrobku. Obecné doporučení pro velikost rádiusů vychází z tloušťky stěny (s), na kterou je rádius napojen a má hodnotu 0,25 až 0,75 (s).

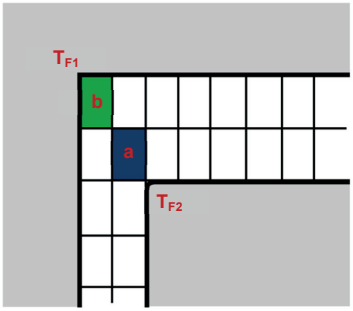


Obr. 4.10 *Vliv přítomnosti rádiusů na průběh plnění dílu*

Z hlediska pevnosti dílu snižuje rádius výrazným způsobem velikost vnitřního napětí, které se tvoří v oblasti rohu výrobku. Optimální vztah mezi tloušťkou stěny a zvoleným rádiusem definuje tzv. *faktor koncentrace napětí*. Z obr. 4.11 vyplývá, že k efektivnímu snížení napětí dochází od okamžiku, kdy je rádius roven 0,25 (s). Pokud je rádius menší, tak skutečné napětí ve výrobku při jeho deformaci silou (F) je až 3krát vyšší než teoreticky vypočítaná hodnota. V případě rázového namáhání platí, že čím větší je rádius, tím větší je schopnost dílu absorbovat rázy. Pro tento účel může velikost rádiusu výrazně přesahovat doporučený rozsah.



Obr. 4.11 *Faktor koncentrace napětí v závislosti na poměru rádiusu a tloušťky stěny*

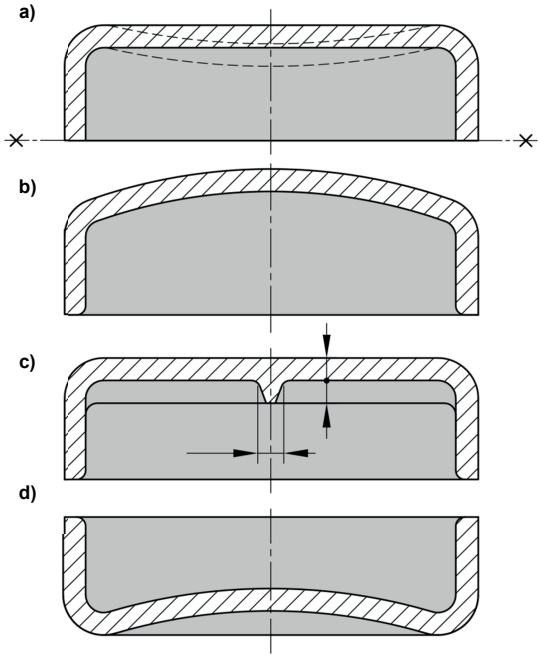


Obr. 4.12 *Koncentrace materiálu způsobující tvarové deformace dílu při tuhnutí*
T_F – teplota formy; a,b – kritická místa chlazení výstřiku

Pokud má rádius zajistit pouze plynulý průtok taveniny, tak navyšování jeho velikosti nad hodnotu 0,75 násobku tloušťky stěny zvýší jen spotřebu materiálu

a faktor koncentrace napětí se výrazněji nesnižuje. Rozdíl mezi vnitřním a vnějším rádiusem by měl mít hodnotu pouze tloušťky stěny. Pokud bude rádius použitý pouze na vnitřní straně, tak dojde ke koncentraci materiálu bez přispění k tuhosti dílu, která způsobí jeho tvarovou deformaci vlivem rozdílné míry smrštění tenkostěnných a tlustostěnných oblastí, viz obr. 4.12. V rámci rádiusu by dále neměla být měněna ani tloušťka stěny. Při obtížích s lokálním svíráním dílce (tvarovou deformací) lze úmyslným zeslabením tloušťky stěny v místě rádiusu vytvořit kloub, který zvýší flexibilitu profilu a umožní vyrovnání některých deformací (viz kapitola 6.4).

4.4 Rovinné plochy



Obr. 4.13 *Vhodné konstrukční řešení rovinných ploch*

a – tvarová deformace rovinné plochy; b – záměrné vyboulení plochy; c – zajištění rovinnosti využitím žeber; d – možné řešení dna nádob

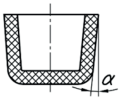
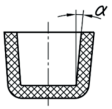
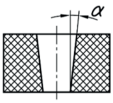
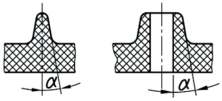
Jedním z nejnáročnějších konstrukčních profilů u plastových dílů je přesná rovina, zvláště u materiálů s velkým smrštěním. Velmi důležitou roli zde hrají i technologické parametry, které musí být velmi přesně řízeny. V celé ploše musí být teplo odváděno se stejnou intenzitou, což je problematické především v okamžiku, kdy se v rámci této plochy mění tloušťka stěny výrobku. Při vyšších nárocích na rovinnost plastových dílů musí být plocha vyztužena žebry. Pokud je rovina pouze vzhledový prvek, tak je lepší se jí vyhnout a konstruovat záměrně mírně konkávní nebo konvexní vyboulení, viz obr. 4.13.

4.5 Úkosy

Na konci výrobního cyklu, během tuhnutí taveniny, dochází k výraznému smrštění plastu, jehož velikost se liší dle typu materiálu a použitých technologických parametrů. Toto smrštění generuje síly, které drží výrobek ve formě i při jejím otevření. Aby bylo možné výrobek odformovat z výrobního nástroje, jsou podobně jako ve slévárenství používány *úkosy*, viz tab. 4.3. Díly se primárně smršťují na části formy, které tvoří vnitřní kontury (jádra a tvárník), proto se doporučuje pro tyto oblasti dílu používat až dvakrát větší úkos než pro vnější kontury výrobku. Minimální doporučené úkosy pro nejčastěji používané materiály jsou uvedeny v tab. 4.4. Tyto úkosy jsou však použitelné pro krátké odformovací dráhy, přičemž s růstem vzdálenosti, kterou je potřeba během odformování překonat, by měla být použita i větší velikost úkosů.

Z hlediska mechanických vlastností lze obecně při běžné pokojové teplotě rozdělit plasty na křehké (amorfní - pod teplotou skelného přechodu) a houževnaté (semikrystalické - nad teplotou skelného přechodu), viz kapitola 2. Pokud bude plast při teplotě odformování pod teplotou skelného přechodu, bude výrobek velmi citlivý na působící vyhazovací síly a poroste nebezpečí jeho poškození. Za těchto podmínek je nutné použít větších odformovacích úkosů. Rovněž drsnost povrchu výrazně ovlivní míru ulpívání výrobku na tvárníku. S rostoucí drsností povrchu formy by měly být opět použity větší odformovací úhly. Pískované struktury nebo různé textury (dezény) působí jako miniaturní podkosy, proto se obecně používá úkos 1° na každých 0,015 mm hloubky textury. Minimální úkosy nevyztužených plastů jsou 0,5°, ale u křehkých vyztužených materiálů se používají úkosy alespoň 1,5°.

Tab. 4.3 Doporučené hodnoty úkosů pro různé konstrukční prvky

Směr úkosu	Umístění	Úhel sklonu
	Vnější plochy	(15'), 30', (45'), **1°**, 2°
	Vnitřní plochy	(15'), 30', 1°, **2°** 3°
	Díry až do hloubky 2d	(15'), 30', **1°**
	Žebra, nálitky, atd.	2°, 3°, 5°, 10°

*pozn.: tučně vyznačené hodnoty jsou přednostní

Tab. 4.4 Doporučené úkosy pro vybrané typy plastů

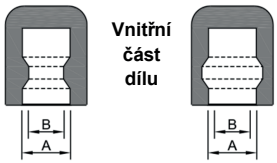
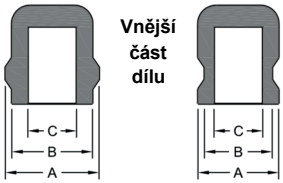
Plast	Úkos [°]
PA, POM PE-HD, ABS, PP	0,5
PBT, SB	1
PS, SAN, PC	1,5

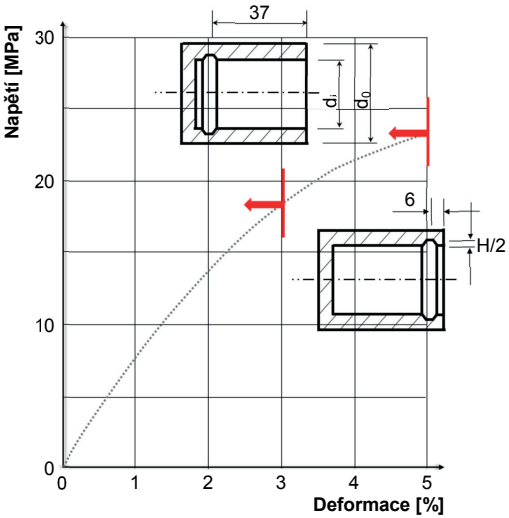
4.6 Podkosy

Z funkčního či technologického důvodu mohou na výrobku být umístěny *podkosy* (negativní úkosy), které komplikují odformování dílu z formy. Ať už jsou vnitřní nebo vnější, tak svým tvarem *brání vyjímání výrobku z formy*, a proto je nutné na jejich uvolnění použít speciální elementy (čelisti, rozložitelná jádra atd.), které výrazně zvýší cenu výrobního nástroje a tím i konečného produktu. Navíc oblasti tvarové dutiny s těmito mechanismy lze jen obtížně chladit a vzniklé teplotní rozdíly na povrchu formy tak vnášejí do výrobku další vnitřní napětí, případně dochází k jeho tvarovým deformacím. Navíc dochází k prodlužování doby chlazení a celého

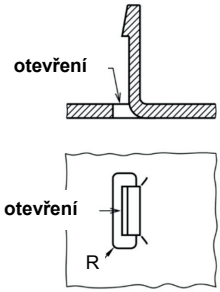
výrobního cyklu (rostou výrobní náklady). Určité geometrie je možné odformovat i bez použití těchto speciálních částí forem, ale díl bude během vyjímání z formy elasticky deformován. Přetažení podkosu přes kritickou geometrii je proto možné pouze u houževnatých materiálů, viz kapitola 5.2. Oblast formy, přes kterou bude profil přetahován, musí mít rádiusy, aby došlo k pozvolnému uvolnění dílu. Materiál nesmí během této operace překročit mez kluzu, což lze zajistit i odformováním dílu za vyšší teploty. Limitní deformace se obecně doporučuje na 70% deformace na mezi kluzu nebo 50% deformace na mezi pevnosti pro materiály bez výrazné meze kluzu. Navíc pro nejčastěji používané materiály mnozí dodavatelé poskytují informace o maximální velikosti úkosu odformovatelného přetažením při doporučené odformovací teplotě, viz tab. 4.5. Převlečení podkosu je jednodušší u větších rozměrů, u kterých představuje limitní deformace potenciálně větší možnost nárůstu rozměru. Napětí potřebné pro odformování vnitřního podkosu je znázorněno na obr. 4.14. Podkosům se lze do určité míry vyhnout při optimalizaci geometrie dílu, viz příklad na obr. 4.15.

Tab. 4.5 *Maximální doporučená velikost podkosů pro vybrané plasty*

Termoplasty	Průměrný maximální odformovatelný podkos [mm]	Příklady
ABS - Akrylonitril-butadien-styren	1,8	% Podkos = $\frac{(A-B)\cdot 100}{B}$ 
PA 6 - Polyamid 6	1,5	
PC - Polykarbonát	1,0	
PE - Polyethylen	2,0	
PP - Polypropylen	1,5	% Podkos = $\frac{(A-B)\cdot 100}{B}$ 
PS - Polystyren	1,0	
PSU - Polysulfon	1,5	
PVC-P - Polyvinylchlorid (měkčený)	2,5	



Obr. 4.14 *Růst potřebných odformovacích sil v závislosti na geometrii podkosů*

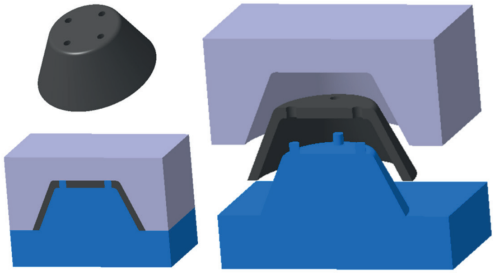


Obr. 4.15 *Ukázka možnosti řešení konstrukce podkosů pro jejich odformování bez nutnosti použití čelistí*

4.7 Otvory

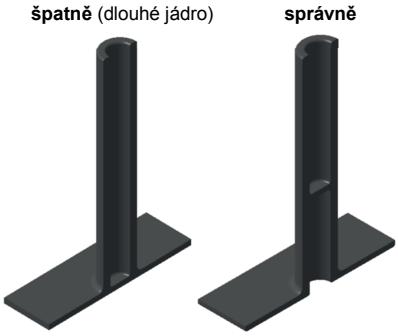
V rámci konstrukce plastových dílů rozeznáváme *dva typy otvorů*, a to *průchozí* a *neprůchozí*. Otvory jsou tvořeny jádry, která ale způsobují rozdělení toku taveniny a následnou tvorbu studených spojů. Nejsnáze vyrobitelné otvory jsou orientovány ve směru otevírání formy (kolmo na dělící rovinu, viz obr. 4.16). U otvorů vytvořených pomocí jader je omezení v jejich délce. Průměr jádra může být proměnlivý, přičemž

směrodatnou hodnotou je průměr jádra v místě jeho vetknutí do formy (D). Pro neprůchozí otvory je maximální délka jádra rovna (3 D ÷ 4 D) a u průchozích otvorů je tento limit přibližně dvojnásobný (6 D ÷ 8 D). Důvodem tohoto omezení jsou velké tlaky působící na jádra během vstřikovacího cyklu a nebezpečí jejich vyosení (průhybu). Jádro vetknuté na jednom konci je deformováno 48krát více než jádro, které je ukotveno na obou koncích.

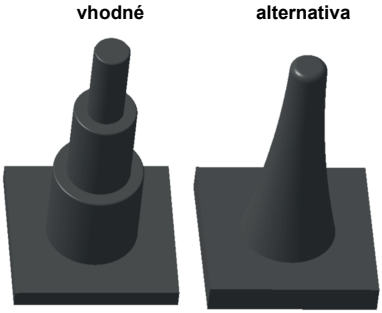


Obr. 4.16 *Otvor orientovaný kolmo na dělící rovinu*

Otvory by měly být dimenzovány pouze pro zajištění požadované funkce, viz obr. 4.17. Pokud má pracovní část otvoru malý průměr, lze otvor odstupňovat tak, aby jádro mohlo být delší, při dodržení výše zmíněných pravidel, viz obr. 4.18. Pokud mají mít otvory jiný než kruhový průřez, musí být všechny hrany na jádru, za účelem eliminace víření taveniny, zaobleny rádiusem.

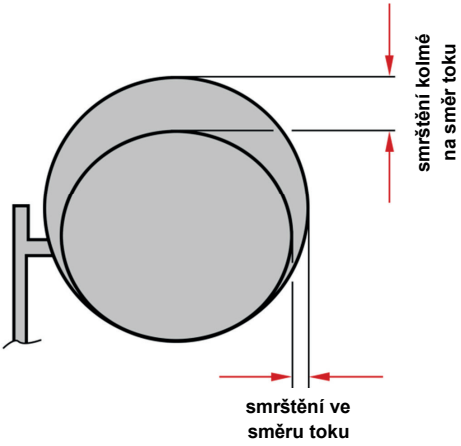


Obr. 4.17 *Optimální dimenzování otvorů*
(vpravo rozdělení otvoru na funkční část a odlehčovací část)

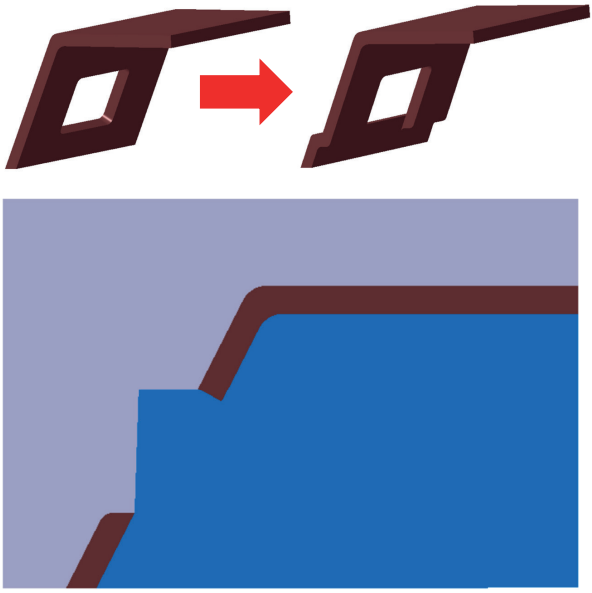


Obr. 4.18 *Odstupňování délky jader pro tvorbu prodloužených otvorů*

Významným průvodním jevem, který ovlivňuje výsledný tvar otvoru, je smrštění materiálu (jiné je ve směru tečení a jiné kolmo na směr tečení, viz obr. 4.19). Pokud jsou otvory orientovány kolmo na směr otevírání formy nebo pod jiným úhlem, je jejich výroba komplikovanější. I tyto otvory lze však konstrukčně navrhnout tak, aby nebylo nutné použít bočních jader a formovat je pouze sevřením tvárníku a tvárnice, viz obr. 4.20. Takto řešená geometrie dílu pak neklade žádné vyšší požadavky na výrobní nástroj. Dosedací úhel mezi tvárníkem a tvárnicí se volí (3 ÷ 5)°, aby se obě části formy vzájemně vhodně vycentrovaly a minimalizovalo se riziko vzájemného zadírání.



Obr. 4.19 *Vliv nerovnoměrného smrštění na kruhovitost otvoru*



Obr. 4.20 *Modifikace designu pro formování otvoru interakcí mezi tvárníkem a tvárnicí*

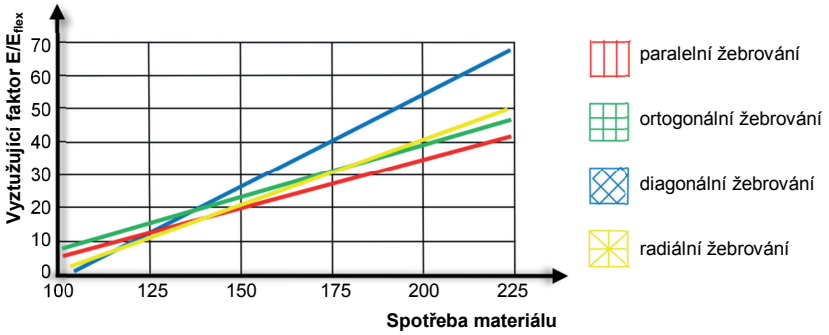
4.8 Vyztužující prvky

Pro zvýšení strukturní tuhosti plastového dílu jsou využívány dvě základní metody. První je založena na materiálovém přístupu a druhá na konstrukčním. Z materiálového hlediska jde o využití vyztuženého materiálu s vyšším modulem pružnosti, mezi konstrukční metody patří zvyšování tloušťky stěny výrobku nebo prolamování či začlenění vyztužujících elementů (žeber) do konstrukce dílu, což je nejelegantnější řešení. Při použití vyztužujících elementů je nutné zajistit, aby co nejvíce materiálu bylo umístěno co nejdále od neutrální osy, což je definováno průřezovými charakteristikami, viz kap. 5.3.

- ***Žebra***

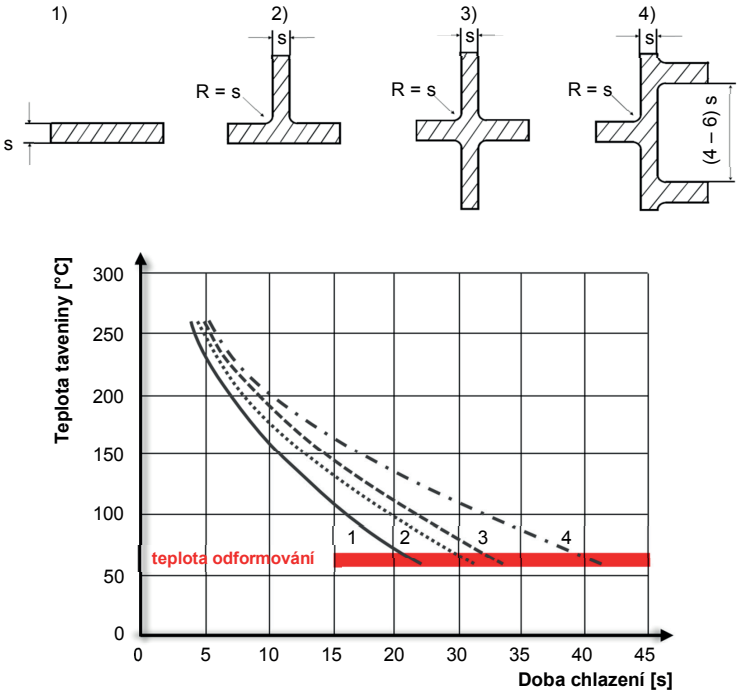
Zvyšování tloušťky stěny nevede k ekonomickému zvyšování tuhosti dílu. Spolu s vyšší spotřebou materiálu mají tlustostěnné díly sklon k tvorbě propadlin a prodlužuje se doba chlazení a výrobního cyklu. Nejpoužívanějšími vyztužujícími elementy jsou

proto žebra. Pro zajištění tuhosti mají být žebra orientována kolmo k působícímu ohybovému momentu. Proti namáhání v krutu se používají žebra diagonální. Ze standardních konstrukcí jsou nejefektivnější konfigurací žebra křížová. Dále je možné použít žebra jednosměrná, ortogonální nebo radiální, viz obr. 4.21. Křížení žeber může být také řešeno více způsoby, viz obr. 4.22. Standardním způsobem je jednoduché křížení, které zajišťuje velmi dobré rozložení napětí. V kontaktních bodech dochází ale k nárůstu objemu materiálu. Tento nedostatek řeší přesazení žeber, které však nedosahují takové vyztužující úrovně.

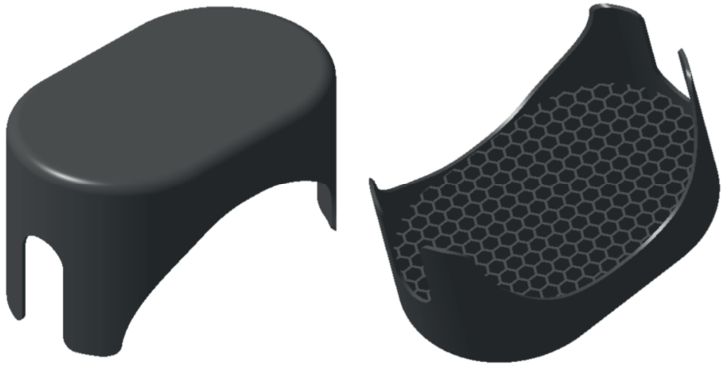


Obr. 4.21 *Vliv orientace žeber na výslednou tuhost výrobku*

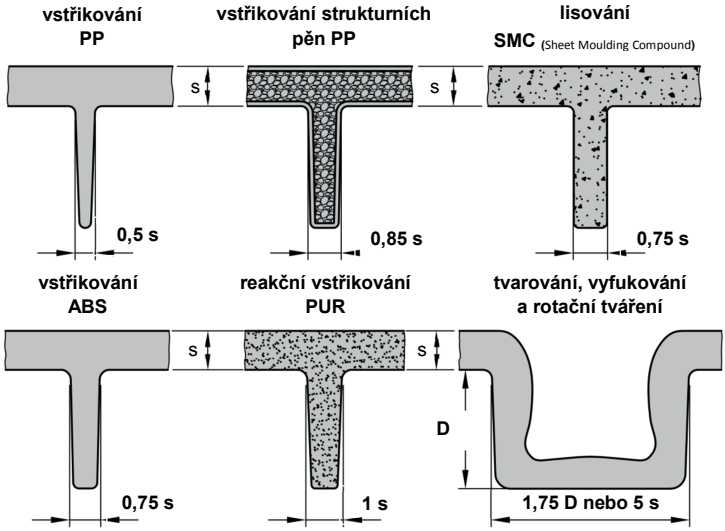
Z hlediska směrování žeber vůči toku taveniny by mělo být cílem konstruktéra vhodně orientovat makromolekuly a zvláště plnivo v celém průřezu žebra, čehož je dosaženo natočením žeber paralelně se směrem toku taveniny. Nejlepším konstrukčním provedením jsou proto vzájemně propojené hexagonální profily, které tvoří tzv. včelí plástev (viz obr. 4.23). Tento profil umožňuje jak velmi plynulé plnění bez ostrých změn směru toku taveniny, tak minimalizaci oblastí s vysokou koncentrací materiálu a zároveň zajišťuje velmi rovnoměrné rozložení napětí. Tento profil je preferován především u konstrukcí, kdy není zcela zřejmá výsledná orientace působícího zatížení. Funkce žeber je vždy stejná (vyztužující faktor), z hlediska designu však platí jiná pravidla pro navrhování žeber z amorfního nebo semikristalického polymeru. Zcela odlišný přístup se používá při konstrukci žeber u dílů zhotovených technologií tvarování, vyfukování nebo speciálními metodami vstřikování (GIT/WIT, Mucell, vstřikování reaktoplastů apod.), viz obr. 4.24.



Obr. 4.22 *Vliv uspořádání žeber na průběh chlazení profilu*



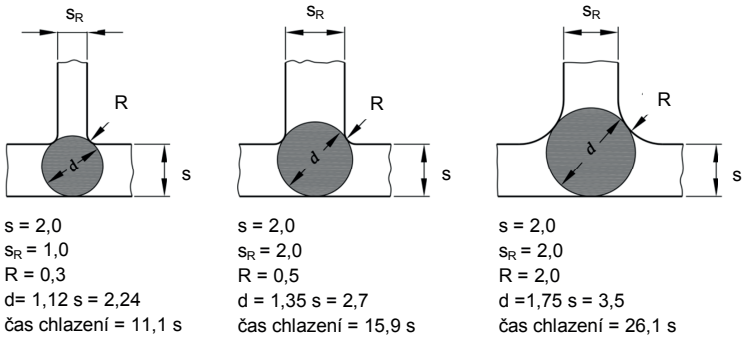
Obr. 4.23 *Uspořádání žeber do „včelích pláství“*



Obr. 4.24 *Příklad konstrukčního řešení žeber pro různé výrobní technologie*

V rámci technologie vstřikování vycházejí limitní hodnoty z individuálních vlastností jednotlivých skupin polymerů a jsou vždy vztaženy k tloušťce stěny výrobku (s), do které je žebro vetknuto. Rozhodujícím faktorem je míra smrštění polymeru. Obecně lze říci, že pro semikrystalické materiály je maximální doporučená tloušťka stěny žebra 0,6násobek nominální tloušťky stěny výrobku (s), na kterou je žebro napojeno. Pro amorfní materiály může být tloušťka až (0,8s) a u plněných materiálů s nejmenším smrštěním se může tloušťka žebra shodovat s tloušťkou stěny výrobku. Do tloušťky stěny 1 mm (tenkostěnné díly) se pro žebra požívá stejná tloušťka jako je tloušťka stěny i pro semikrystalické a amorfní materiály. Při překročení těchto omezení se vlivem koncentrace materiálu zvyšuje nebezpečí tvorby propadlin na protilehlé stěně (většinou pohledové). Pokud je nutné pro konstrukci dílu použít tyto mezní hodnoty, je vhodné navrhnout menší žebro (nižší a tenčí) a po provedení funkčních testů ho následně zvětšit až ve výrobním nástroji. Vždy je jednodušší a levnější materiál z formy odebírat (zvětšovat tvarovou dutinu), než ho komplikovaně navařovat zpět. I u žeber je ovšem nezbytné řešit přechod mezi stěnou dílu a žebrem pomocí rádiusů. Aby bylo minimalizováno množství materiálu

v místě vetknutí žebra do stěny výrobku, používá se minimální rádius o velikosti (0,25s), viz obr. 4.25. Nejefektivnějším parametrem, který přispívá k tuhosti vyztuženého profilu, je výška žebra, která je limitována pouze velikostí použitého úkosu, kterým musí být žebro rovněž opatřeno. Úkos nesmí způsobit příliš velké ztenčení žebra na jeho vrcholu (nesmí vzniknout ostrá hrana, která by se obtížně plnila taveninou plastu, a docházelo by zde k uzavírání vzduchu, případně by se takto tenký profil odtrhával při odformování výrobku). Obecné doporučení pro výšku žebra je 3 až 5násobek tloušťky stěny (s). Ve většině případů se využívá minimální rádius 0,5°, pokud však nedojde k přílišnému ztenčení profilu žebra, je výhodnější používat rádiusy 1° až 2°. Do výšky žebra (2s) není nezbytně nutné řešit odvzdušnění žebra. Minimální efektivní výška je však 2,5 až 3 násobek tloušťky stěny (s).



s = 2,0
s_R = 1,0
R = 0,3
d= 1,12 s = 2,24
čas chlazení = 11,1 s

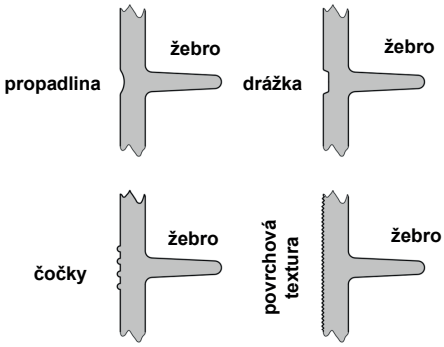
s = 2,0
s_R = 2,0
R = 0,5
d = 1,35 s = 2,7
čas chlazení = 15,9 s

s = 2,0
s_R = 2,0
R = 2,0
d =1,75 s = 3,5
čas chlazení = 26,1 s

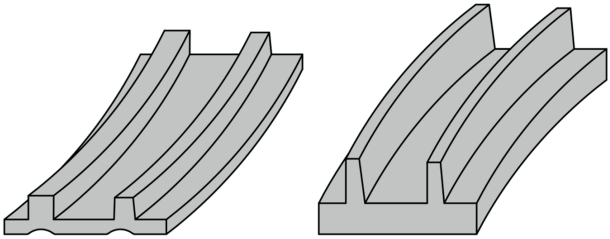
Obr. 4.25 *Vliv velikosti radiusů na koncentraci materiálu způsobující propadliny na protilehlé stěně*

Tvorbu propadlin lze řešit i dalšími způsoby, např. lokálním odsazením protistrany v místě žebra. Jde však již spíše o řešení následků s využitím textur na pohledové straně dílu nebo jiných dekorativních prvků, které poruší rovinnou (lesklou) plochu, na které propadliny výrazně vynikají, viz obr. 4.26. Další možností je použití nadouvadel. Je třeba zvážit i vzdálenost mezi dvěma žebry. Pro zajištění dostatečně intenzivního chlazení oblasti vyztužené žebrem by měla být minimální mezera mezi sousedícími žebry alespoň (5 s), ale optimálně by měly být mezery mezi žebry alespoň 10násobek tloušťky stěny výrobku (s). Při vyšší hustotě žeber je nutné

výrobní nástroj opatřit vložkami z materiálu s vyšším součinitelem teplotní vodivosti, což opět vyžaduje vyšší investice do nástroje.



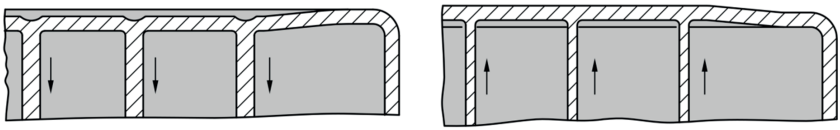
Obr. 4.26 *Možnosti designového řešení pohledové strany výrobku, aby se na ni neprokreslovala žebra*



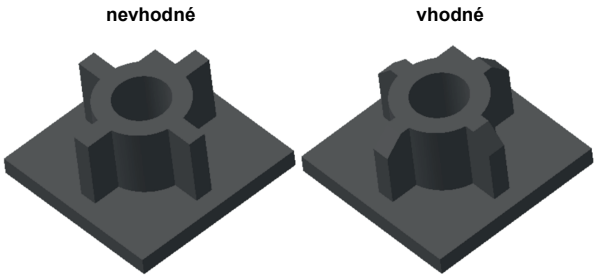
Obr. 4.27 *Vliv tloušťky žebra na deformaci výrobku (příliš tlustá vlevo a příliš tenká vpravo)*

Extrémně tenká žebra na rovinné desce nebo naopak příliš tlustá žebra mohou způsobit deformaci dílu, protože tuhnou relativně rychle ve srovnání se silnější částí výrobku, resp. relativně pomalu ve srovnání s tenčí částí výrobku, viz obr. 4.27. Tohoto jevu je možné příležitostně využít k vyrovnání jinak deformovaného výrobku. Tento proces však klade vyšší nároky na zkušenosti konstruktéra. Vhodné je používat více menších žeber dimenzovaných dle výše uvedených limitů. Dále je nutné odpovídajícím způsobem dimenzovat chlazení výrobního nástroje tak, aby byl odvod tepla z celého výrobku rovnoměrný. Pokud žebra spojují dvě protilehlé stěny, tak příliš tlustostěnná žebra způsobují mimo propadlin i vtahování stěn (přibližování stěn k sobě). Naopak příliš tenká žebra nejsou dostatečně tuhá, aby udržela obě

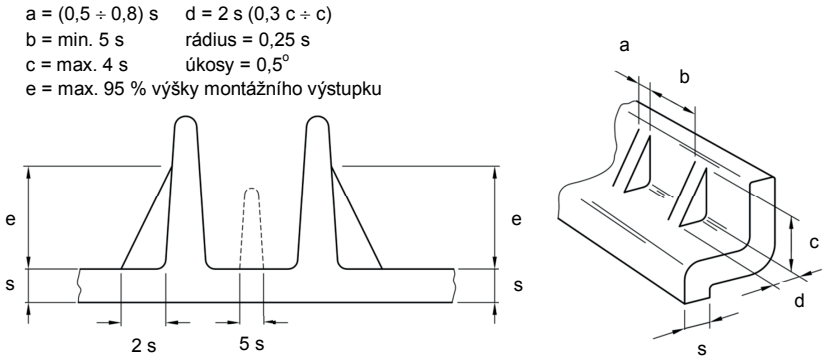
stěny v požadované pozici a nedocházelo tak k vyboulení stěn, viz obr. 4.28. Veškeré tyto deformace lze predikovat již na základě provedených výpočtů, simulací plnění
a tuhnutí výrobku.



Obr. 4.28 *Příliš silná žebra způsobující přitahování protilehlých stěn (vlevo), příliš tenká žebra nezajišťují dostatečnou tuhost stěn (vpravo)*



Obr. 4.29 *Řešení geometrie žeber vyztužujících montážních komínků (vlevo nevhodné, vpravo vhodné)*



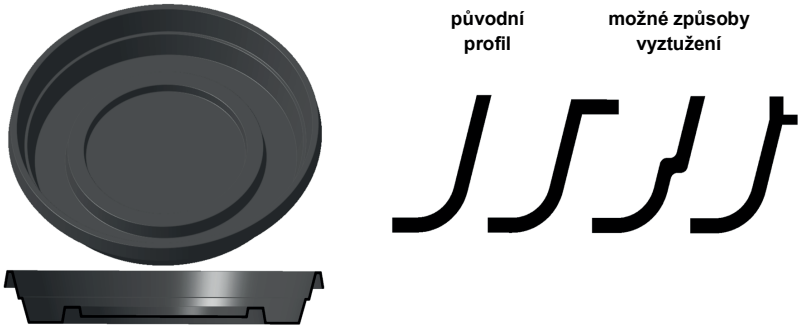
Obr. 4.30 *Doporučené dimenzování žeber ve vztahu k přilehlé stěně*

Pro dosažení maximálního vyztužujícího efektu by měla být žebra napojena až na okraj výrobku nebo na další elementy, jako jsou např. montážní komínky apod. Dále by měla mít žebra také konstantní výšku a šířku v celé své délce.

Šikmá / boční žebra jsou elementy, které vyztužují dva vzájemně kolmé prvky. Obecně pro ně platí stejná pravidla jako pro standardní žebra. Z hlediska uzavírání vzduchu je i v těchto případech nutné se vyvarovat ostrým rohům a přechodům, viz obr. 4.29. Doporučené rozměry pro boční žebra jsou přehledně znázorněny na obr. 4.30. Také u těchto žeber je nutné použít úkosy a rádiusy v místě jejich napojení na stěny výrobku.

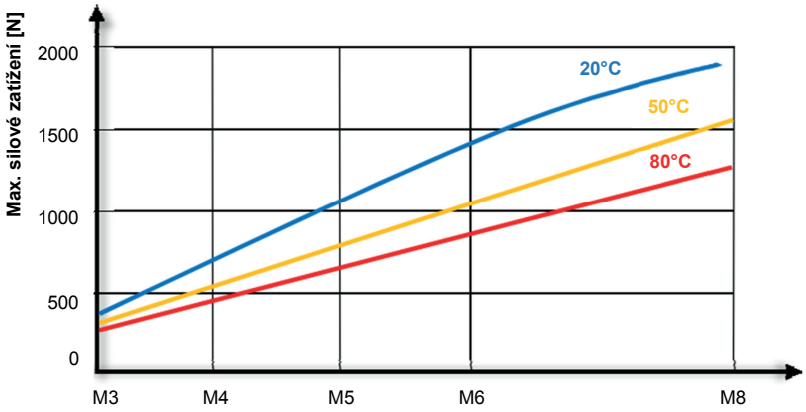
- ***Prolamování***

Prolamování (nebo i mírné vyboulení stěny, viz obr. 4.31) je vhodné pro zvýšení tuhosti dílu, protože nevyžaduje přílišné zvyšování spotřeby materiálu a neprodlužuje tak dobu jeho chlazení. Prolamování je účinné pouze tehdy, je-li nutné zvýšit odolnost proti průhybu při ohybovém namáhání, přičemž musí být opět orientováno kolmo na ohybový moment. Z hlediska využití materiálu ve vztahu k tuhosti dílu je prolamování mnohem účinnější než použití žeber, viz kapitola 5.3, kde je zachycen vliv momentu setrvačnosti a nejefektivnější profily prolomení. Nevýhodou může být méně atraktivní vzhled prolomených stěn, ale hlavně je nutné tento design zahrnout už do prvotního konstrukčního konceptu. Dodatečné úpravy prolomených profilů ve formě jsou pro následné zvýšení tuhosti dílu mnohem náročnější než u žeber. Nevýhodou prolamovaných stěn bývá jejich zanášení nečistotami či zadržování vody, což je problematické zejména u pohledových dílů.



Obr. 4.31 *Profilování stěny výrobku za účelem zvýšení jeho tuhosti*

Mezi základní geometrické profily, které jsou na plastových dílech využívány, jsou i *závity*. Vzhledem k velmi proměnlivým vlastnostem polymerů jsou plastové díly s vnitřním nebo vnějším závitem velmi citlivé na působící teplotu, okolní prostředí, velikost zatížení apod., viz obr. 4.32. Proto jejich použití v aplikacích s vyššími požadavky na stabilitu a spolehlivost je velmi omezené a primárně jsou využívány u užitkových aplikací.

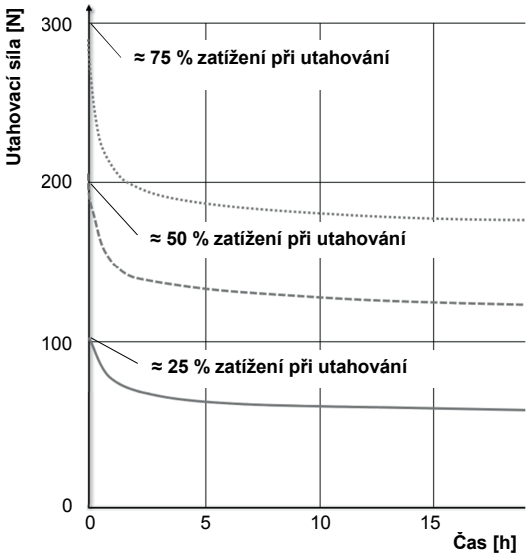


Obr. 4.32 *Vliv působící teploty na pevnost plastového šroubu*

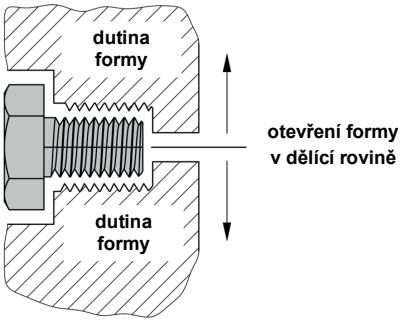
Aby bylo dosaženo maximální životnosti šroubu, používá se v rámci jednotlivých aplikací standardně (25 až 30) % maximálně použitelné síly (limitní pevnosti) pro danou velikost plastového šroubu. Jednou z hlavních nevýhod použití plastů je relaxace napětí a tím i ztráta požadovaného předpětí spoje, které ve velmi krátké době klesá až na polovinu, viz obr. 4.33. Největšími výhodami plastů u šroubových spojů jsou jejich elektrické a tepelně izolační vlastnosti, odolnost proti korozi nebo pohlcování rázů a vibrací.

Plastové šrouby mohou být využity i pro speciální aplikace. Při interakci s dalším plastovým dílem se projevuje vysoký koeficient tření, což je vhodné pro citlivé nastavování parametrů pomocí otáček plastového šroubu, který se sám fixuje v dané pozici (bez samovolného protáčení).

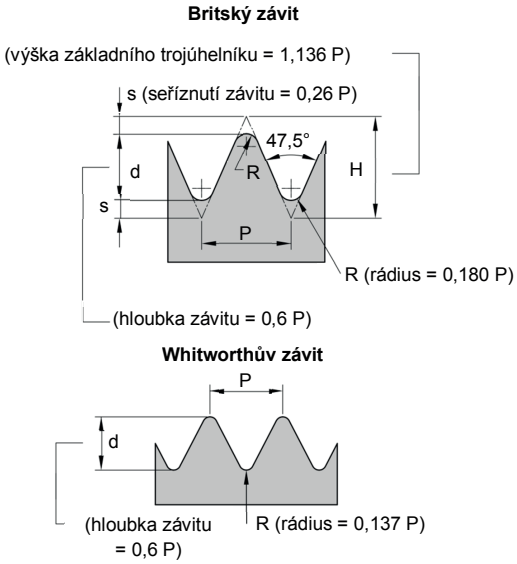
Vnější závity nejsou z výrobního hlediska nijak problematické, pokud je polovina profilu s vnějším závitem tvořena tvárníkem a druhá polovina tvárnicí, viz obr. 4.34. Nejvýznamnějším požadavkem je zajištění rádiusů na všech hranách závitu, což však nesplňuje geometrie metrického závitu. Optimální pro vstřikování jsou svou geometrií závity *Whitworthův*, *britský standardizovaný* apod., viz obr. 4.35.



Obr. 4.33 *Pokles předpětí ve šroubovém spoji vlivem krípu (PA 6.6)*

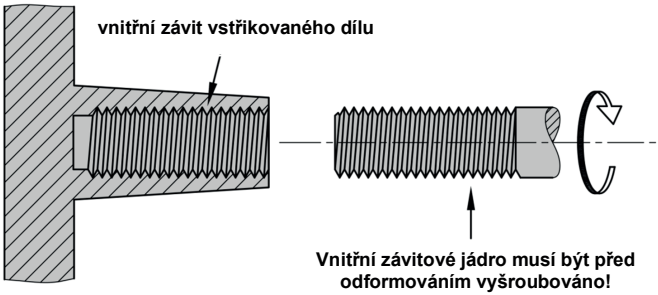


Obr. 4.34 *Odformování vnějšího závitu*



Obr. 4.35 *Vhodné geometrie závitu pro vstřikované díly*

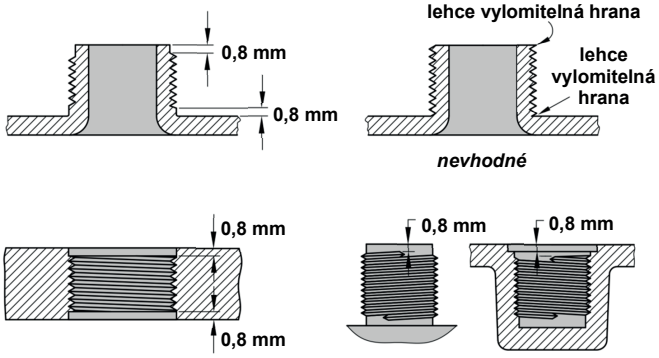
Vnitřní závity tvoří podkosy a proto jsou na výrobu mnohem náročnější. Možností jejich výroby je několik. Velmi elegantním řešením jsou rozložitelná jádra. Nákladnější je využití vyšroubovávacího mechanismu (viz obr. 4.36) nebo vyměnitelných vložek, které je však nutné v rámci sekundárních operací z výrobku vyjmout.



Obr. 4.36 *Schéma vyšroubovávacího mechanismu pro tvorbu vnitřních závitů*

Pokud je materiál dostatečně pružný a design závitů zahrnuje rádiusy, je možné je při odformování převléci přes jádro bez nutnosti použití komplikovaných mechanismů, viz kap. 4.6. Pokud jsou voleny ostré rohy, výrazně tím roste nebezpečí praskání dílů při jejich odformování vlivem vrubového efektu.

Závity s jemným stoupáním (pod 1,25 mm) jsou výrobně problematické a snadno dochází k jejich stržení. Délka akčního závitu by měla být větší než 1,5 násobek průměru šroubu. Závit by měl začínat alespoň 1 mm od konce šroubu a končit přibližně ve stejné vzdálenosti od hlavy šroubu, přičemž by měl plynule přecházet do plochy stěny šroubu / otvoru. Pravidlo o zamezení vybíhání závitu v plastovém dílu až do začátku nebo konce otvoru platí i pro vnitřní závity, viz obr. 4.37.



Obr. 4.37 *Omezení délky závitu ve vztahu k okraji vstřikovaného dílu*

Důvodem pro předčasné ukončení závitu je případná ostřina s nízkou životností, která by u běžně vybíhajícího závitu byla součástí jádra formy. Tloušťka stěny kolem vnitřního závitu by měla být větší než 0,6násobek průměru závitu. Při kombinaci s ocelovým protikusem je vhodnější, pokud je plastový díl stlačován a závit by tak měl být konstruován na vnějším obvodu plastového dílu. Vzdálenost mezi otvorem pro šroub a okrajem dílu by měla být obecně minimálně stejně velká, jako je průměr šroubu, nebo dosahovat alespoň dvojnásobku tloušťky stěny dílu, podle toho co je větší.

Utahovací moment (M_h) lze stanovit využitím rovnice (17):

$$M_h = F.\left(\mu_h \cdot R + \frac{\mu_t \cdot r}{cos\alpha} + \frac{P}{2 \cdot \pi}\right) [Nm] \qquad (17)$$

kde (F) je axiální síla působící na šroub, (R) průměrný poloměr hlavy šroubu, který je v kontaktu s protějším dílem, (P) stoupání závitu, (r) průměr závitu šroubu, (α) boční úhel závitu, (μ_h) koeficient tření mezi hlavou šroubu a protějším dílem, (μ_t) koeficient tření mezi závity. První člen v závorce vyjadřuje část momentu potřebného k interakci mezi hlavou šroubu a plochou protikusu pod ní a další dva členy vyjadřují moment (M_t) potřebný pro překonání tření mezi závity, viz rovnice (18):

$$M_t = F.\left(\frac{\mu_t \cdot r}{cos\alpha} + \frac{P}{2 \cdot \pi}\right) [Nm] \tag{18}$$

Rozdílný koeficient tření je uveden z důvodu možného použití maziva, jiné drsnosti povrchu apod. Normálové tahové napětí, které se v plastovém šroubu tvoří, je vyjádřeno rovnicí (19):

$$\sigma_{ax} = \frac{F}{S} \ [Pa] \tag{19}$$

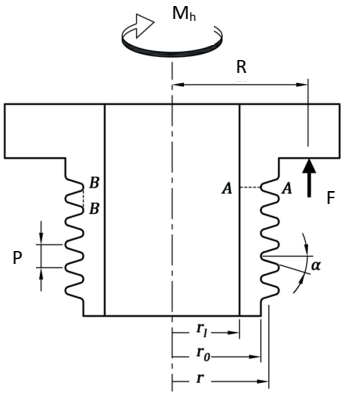
Při plném šroubu je plocha v řezu (S) rovna:

$$S = \pi \cdot r_0^2 \ [mm^2] \tag{20}$$

a při použití dutého šroubu má tato plocha velikost:

$$S = \pi \cdot (r_0^2 - r_i^2) \ [mm^2] \tag{21}$$

kde (r_i) představuje poloměr vnitřní dutiny ve šroubu a (r_o) je rádius jádra šroubu, viz obr. 4.38.



Obr. 4.38 *Řez plastovým šroubem s vyznačenými charakteristickými rozměry*

Smykové napětí ve šroubu lze určit vztahem (22):

$$\tau = r_0 \cdot \frac{M_t}{I_p} \ [Pa] \tag{22}$$

kde (I_p) představuje moment setrvačnosti daného průřezu, což je pro dutý šroub:

$$I_p = \pi \cdot \frac{r_o^4 - r_i^4}{2} \ [mm^4] \tag{23}$$

Redukované napětí (viz kapitola 5.4), které je možné porovnat s mezními hodnotami pevnostních charakteristik (σ_{max}) má hodnotu:

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_{ax}^2 + 3 \cdot \tau^2)} \leq \sigma_{max} \ [Pa] \tag{24}$$

Napětí na jednotlivých závitech není rozloženo symetricky, největší je na několika prvních závitech z pohledu matky. Těchto prvních několik závitů přenáší přibližně 50% celkového namáhání, čímž je dán i požadavek na minimální délku závitu. Z těchto důvodů je kontrolováno i napětí v kořenu závitu (řez B-B, viz obr. 4.38). Smykové namáhání odpovídá velikosti:

$$\tau = \frac{F}{4 \cdot \pi \cdot p \cdot r_o} \ [Pa] \tag{25}$$

Redukované napětí v tomto průřezu má velikost:

$$\sigma_{red} = \sqrt{3 \cdot \tau^2} \leq \sigma_{max} \ [Pa] \tag{26}$$

DIMENZOVÁNÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ

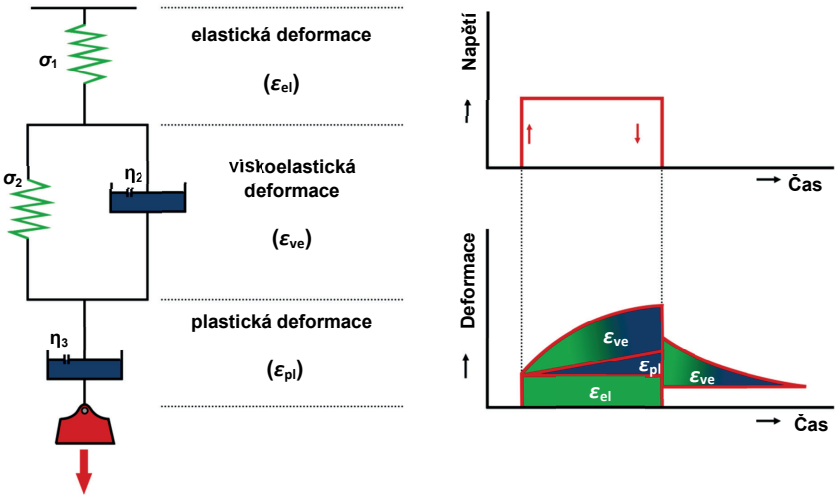
5

Při *dimenzování vstřikovaných dílů*, a to jak z hlediska jejich funkčnosti, tak i životnosti, je nutné respektovat mnoho faktorů: viskoelastické chování, omezenou použitelnost mechanických vlastností měřených při krátkodobém namáhání, specifická pravidla tolerování rozměrů apod. Pro odhad životnosti dílů z termoplastů byly zavedeny také základní vztahy založené na geometrických faktorech a typickém chování těchto materiálů. Zatímco u plastů je pevnost pouze o řád nižší než u kovů, tak tuhost termoplastů charakterizovaná modulem pružnosti je přibližně o dva řády nižším než u kovů, a to vlivem rozdílného deformačního chování. Větším rizikem je proto u plastových dílů spíše nadměrná deformace než nebezpečí jejich prasknutí. S technologií vstřikování je spojeno i mnoho průvodních jevů, které lze do těchto prvotních výpočtů jen obtížně zanést. Pro dosažení ustáleného stavu struktury je navíc nutné některé navlhavé polymery (např. polyamidy) kondicionovat, aby bylo dosaženo rovnovážného obsahu vlhkosti v celém objemu výrobku.

5.1 Viskoelastické chování plastů

V kap. 2 jsou vymezeny přechodové teploty a popis základního chování plastů v mezích těchto teplot (pod teplotou skelného přechodu je materiál tuhý a křehký, nad teplotou skelného přechodu je houževnatý a nad teplotou tání krystalitů nebo teplotou viskózního toku přechází v taveninu). Kromě působících teplot je velmi důležitá i rychlost působícího zatížení. Při rázovém namáhání nestihnou proběhnout relaxační procesy a materiál se jeví jako křehký, zatímco při pomalu působícím namáhání za jinak stejných podmínek se totožný materiál může chovat velmi houževnatě. Plasty se tak řadí mezi *viskoelastické materiály* a jejich chování je definováno dvěma stavy, které jsou reprezentovány ideálně elastickým tělesem a viskózní kapalinou. Ideálně elastické těleso se vyznačuje lineární závislostí mezi napětím a deformací, která je popsána *Hookeovým zákonem*. V mechanických schématech je tento vztah představován pružinou, která se okamžitě deformuje úměrně k působícímu napětí. Všechna energie vyvolaná deformací se v tělese uloží a po uvolnění napětí se pružina okamžitě vrací do původního stavu. Chování tekutiny

při aplikaci vnějšího napětí popisuje *Newtonův zákon* a na modelech je reprezentováno netěsným pístem. Veškerá energie se okamžitě mění na trvalou deformaci. Celý proces je však ovlivněn faktorem času. Jinak řečeno, materiál teče po celou dobu působení vnější síly a celková deformace roste s dobou namáhání. Viskoelastické materiály se svým chováním pohybují mezi těmito limitními stavy. Reakce na vnější namáhání se proto skládá z několika složek. Elastická deformace po odstranění vnější zátěže odezní buďto okamžitě anebo v průběhu určitého časového intervalu (zpožděně elastická složka). Dále zůstávají pouze plastické deformace (viz obr. 5.1), které jsou tím větší, čím větší je působící zatížení, čím delší dobu je díl zatěžován a čím vyšší teplotě je díl vystaven. Při hodnocení celkového průběhu napětí v závislosti na deformaci tvoří u krátkodobých testů čistě elastická složka u většiny plastů méně než tisícinu naměřeného rozsahu. Rozsah platnosti Hookeova zákona, jež definuje modul pružnosti, je tedy výrazně menší než reálně akceptovatelná deformovatelnost dílu.



Obr. 5.1 *Schéma využívané pro popis deformačního chování plastů*

Typickými projevy viskoelastického chování při dlouhodobém zatěžování jsou ***kríp*** (z angl. creep, což znamená tečení za studena) a ***relaxace napětí***. Pro kríp jsou typické dva stavy. Prvním je překročení rozměru dílu za hranici použitelnosti a druhým je porušení dílu. Krípové chování je ovlivněno velikostí zatížení, teplotou

a dobou zatěžování, viz tab. 5.1. Důvodem trvale rostoucí deformace je postupné rozbalování a orientace makromolekul ve směru působící síly a jejich následný vzájemný pohyb (tok).

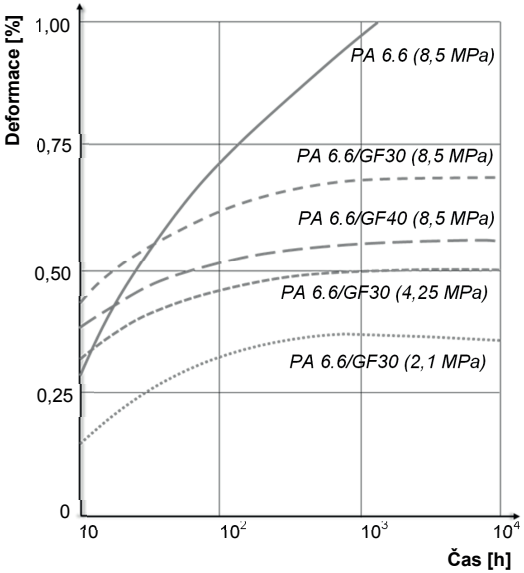
***Tab. 5.1** Krípový modul v ohybu pro vybrané plasty (23 °C)*

Polymer	E_{c1} [MPa]	E_{c1000} [MPa]
ASA	1 850 ÷ 2 200	1 100 ÷ 1 650
PBT	1 200 ÷ 3 200	700 ÷ 2 500
PBT/GF20	5 100 ÷ 7 500	2 300 ÷ 7 000
PBT/GF30	7 800 ÷ 11 000	5 200 ÷ 10 000
PBT/GF50	8 900 ÷ 15 000	3 900 ÷ 11 600
PC	2 100 ÷ 2 200	1 700 ÷ 1 900
PC/GF10	3 600	2 900
PC/GF20	3 700 ÷ 5 900	3 500 ÷ 5 400
PC/GF30	4 700 ÷ 5 700	3 900 ÷ 5 000
PC/ABS		1 600
PE-HD	670 ÷ 1 200	340 ÷ 680
POM	1 300 ÷ 3 000	650 ÷ 1 700
PP	800 ÷ 1 400	400 ÷ 1 260
PP/GF20	2 300 ÷ 3 400	1 300 ÷ 2 400
PP/GF30	4 800 ÷ 5 800	3 200 ÷ 3 800
SAN	3 500	2 800

E_{c1}, E_{c1000} - krípový modul (1 h, 1 000 h)

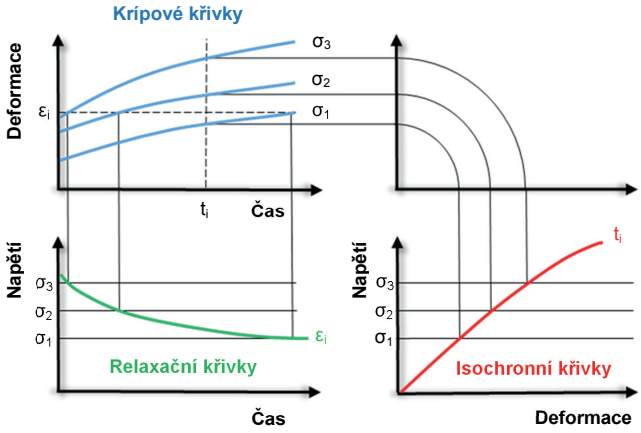
Pro co nejpřesnější odhad chování dané konstrukce při dlouhodobém namáhání jsou používány *krípové křivky*, které mohou být sestaveny na základě tahového, tlakového nebo ohybového zatěžování a zpravidla se graficky vynáší v závislosti na čase v logaritmických souřadnicích, viz obr. 5.2. Materiálové charakteristiky měřené při dlouhodobém namáhání jsou primárně získávány právě ve tvaru krípových křivek, které jsou následně transformovány na *křivky relaxační* nebo *isochronní*, viz obr. 5.3. Přes dostupnost dat z krípových zkoušek může být pro konstruktéra obtížné tyto správně použít pro danou aplikaci. Z hlediska velké časové náročnosti dlouhodobých testů je nezbytné používat i interpolovaná a extrapolovaná data. Z hlediska extrapolace se nedoporučuje přesáhnout odhad o více než jednu jednotku logaritmických souřadnic (měřeno alespoň 1 000 hodin, extrapolováno na 10 000 hodin). Extrapolovat lze proto pouze data získaná při zatěžování silou do 25 % limitního napětí naměřeného při krátkodobých zkouškách, kdy teplota zatěžování nepřesahuje 2/3 rozdílu okolní teploty a teploty průhybu při zatížení HDT (pro 1,8 MPa). Při překročení těchto limitů je nebezpečí prudkého poklesu krípového modulu

po 1 000 hodinách zatěžování. Aplikace těchto odhadů je ještě komplikovanější pro semikrystalické materiály, které jsou využitelné jak pod teplotou skelného přechodu, tak zejména nad ní, přičemž mechanické chování se v okolí přechodové teploty velmi výrazně mění.

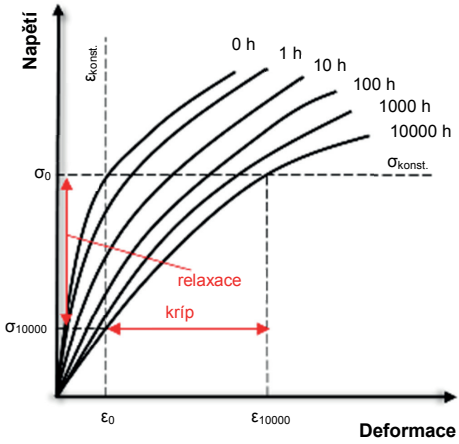


***Obr. 5.2** Krípové křivky v ohybu pro polyamid 6.6*

Dalším projevem spojeným s viskoelastickým chováním polymerů je relaxace napětí. Jde o postupné uvolňování napětí zatíženého dílu při jeho konstantní deformaci, což je velmi důležité především pro montážní operace a postupy (šroubové spoje, inserty, západkové spoje, lisované spoje apod.). Je-li díl deformován na hodnotu (ε_0) je v materiálu vyvoláno napětí o hodnotě (σ_0), viz obr. 5.4. Po určité době se napětí z výrobku postupně uvolní (elastická část deformace se mění na plastickou) a pro zachování deformace snížené elastické složky je potřeba jen zbytkové napětí (σ_{10000}) úměrné právě elastické složce deformace.

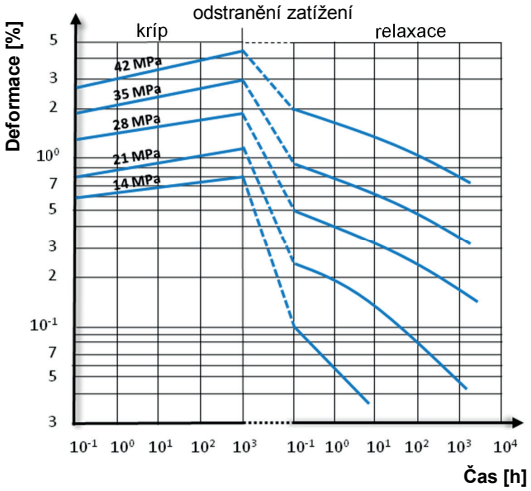


Obr. 5.3 *Vztah mezi krípovými, relaxačními a isochronními křivkami*



Obr. 5.4 *Ukázka krípových křivek pro různou dobu zatěžování (relaxační a krípové procesy)*

Křivky relaxace napětí (viz obr. 5.5) jsou velmi podobné krípovým křivkám deformace a může z nich být odvozen relaxační modul, podobně jako při krípových zkouškách modul krípový. Relaxační charakteristiky však nejsou dostupné ve stejné míře jako krípové. Pro odhad snížení napětí vlivem jeho relaxace je možné použít modul získaný z krípových dat.



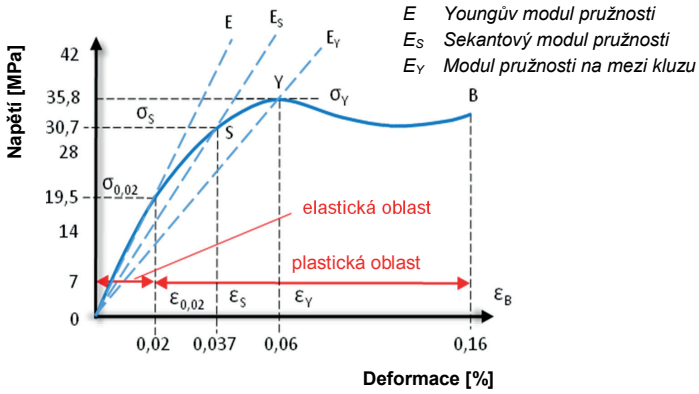
***Obr. 5.5** Ukázka relaxačních křivek*

5.2 Moduly pružnosti

Jak již bylo uvedeno, mechanické vlastnosti plastů (především jejich tuhost) jsou silně závislé na faktorech, jako je teplota, chemické prostředí, velikost, způsob a doba zatěžování, ale také geometrie dílu apod. Konstruktér musí proto pracovat s údaji a hodnotami naměřenými za podmínek, které v maximální míře odpovídají podmínkám dané aplikace (s daty měřenými za kritických teplot a dlouhodobém namáhání, která jsou relevantní pro zamýšlenou dobu životnosti dílu). Pro prvotní odhady je možné do určité míry používat údaje z materiálových listů dodávaných výrobcem. Tyto hodnoty jsou však použitelné předně pro vzájemné porovnání materiálů (tzv. jednoparametrické srovnání) než pro potřeby přípravy konstrukčního konceptu, protože jsou měřeny za podmínek specifikovaných příslušnou normou (ASTM, ISO apod.) a většinou vyjadřují pouze určitý stav tělesa / materiálu a nikoliv proměnlivost jeho vlastností v závislosti na změně působících vlivů (včetně času). Za konstantní lze v širším rozsahu působících faktorů (zejména teploty) považovat pouze mechanické vlastnosti (zejména modul pružnosti) vyztužených reaktoplastů a několika málo termoplastů určených pro konstrukční - inženýrské aplikace.

V současnosti je definováno několik modulů pružnosti (viz obr. 5.6), které jsou využívány při konstrukčních výpočtech, protože reálná deformace výrobku nabývá

mnohem větších hodnot, než zahrnuje normou stanovený rozsah platnosti Youngova modulu.

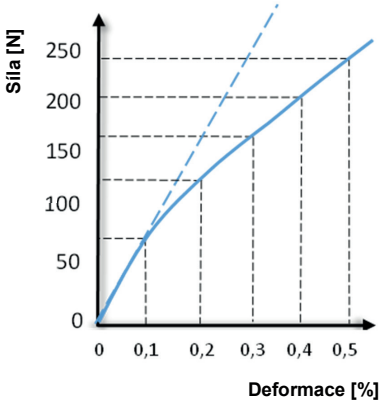


Obr. 5.6 *Moduly pružnosti, které lze stanovit z krátkodobých křivek napětí-deformace*

Jedním z prvotních konstrukčních přístupů byla volba konstrukčního (sekantového) modulu, který byl stanoven z krátkodobých zkoušek a to při deformaci 1 % nebo tvořil 85 % modulu pružnosti naměřeného při krátkodobé tahové deformaci. Zvolené limity byly ale pro semikrystalické materiály a kompozity příliš omezující, protože relativní deformace mohou při reálném použití dosahovat i několika procent. ***Sekantový modul*** již proto není omezen jednotnou hodnotou deformace pro všechny materiály, ale je stále definován jako spojnice mezi počátkem a bodem odpovídající dané deformaci, viz obr. 5.7. Dodavatelé materiálu i různé materiálové databáze uvádějí již pro různé materiály, způsoby namáhání a především teploty maximálně přípustné deformace, viz tab. 5.2. Pokud nejsou k dispozici konkrétní data a doporučení, je možné sekantové moduly a především *maximální přípustnou deformaci* určit dle následujícího doporučení, které vychází z typu zatížení, kterým bude těleso vystaveno. Konkrétní limity jsou odvozeny od chování materiálu při krátkodobých tahových zkouškách. Nejnebezpečnějším typem zatížení plastových dílů je dlouhodobé spojité zatížení, kdy dochází ke kontinuálnímu krípu.

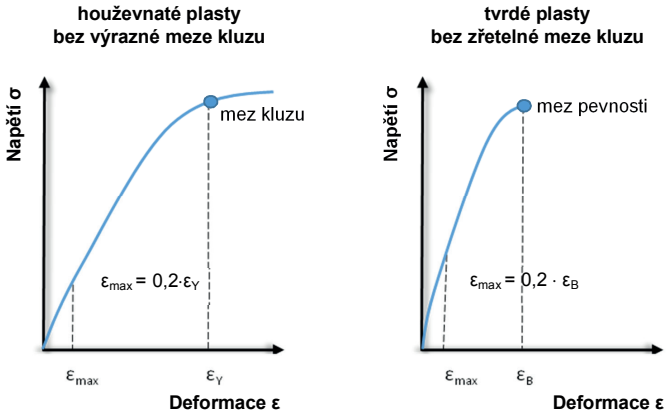
Pokud jde o houževnatý materiál s výraznou mezí kluzu, tak maximální přípustná deformace představuje 20 % z hodnoty deformace na mezi kluzu. Amorfní plasty pod teplotou skelného přechodu jsou tvrdé a křehké a v grafické závislosti napětí-

deformace nemají výraznou mez kluzu. V tomto případě je maximální přípustná deformace dána 20 % deformace na mezi pevnosti, viz obr. 5.8.



Deformace [%]	E_S [MPa]
0,4 ÷ 0,5	1 330
0,3 ÷ 0,4	1 420
0,2 ÷ 0,3	1 570
0,1 ÷ 0,2	1 770
0 ÷ 0,1	2 050
0	2 120

Obr. 5.7 *Sekantový modul pro PE-HD v různých oblastech deformace, v nichž je stanoven*



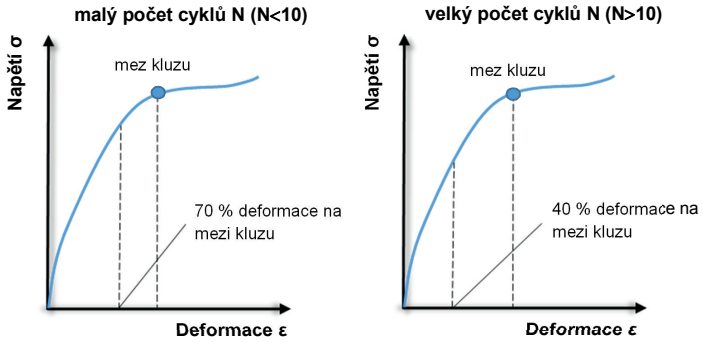
Obr. 5.8 *Limity sekantového modulu pro dlouhodobé statické zatížení*

***Tab. 5.2** Doporučené maximální deformace při krátkodobém zatěžování (23 °C)*

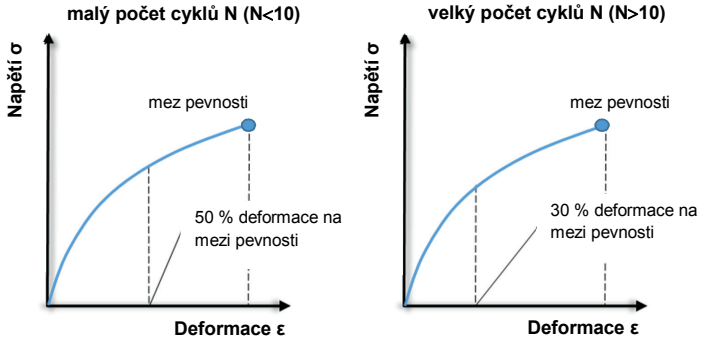
Polymer	Doporučená max. deformace (suchý/vlhký stav)
	ε [%]
PA 6	2,5 / 10,0
PA 6/GF(15÷35)	1,8 / 2,8
PA 6/GF(40÷50)	1,5 / 2,0
PA 6-IM/GF	2,3 / 4,0
PA 6.6	2,5 / 10
PA 6.6/GF (15÷35)	1,8 / 2,8
PA 6.6/GF (40÷50)	1,5 / 2,0
PA 6.6-IM/GF	2,3 / 4,0
PBT	2,5
PBT-FR	3,2
PBT-IM	2,8
PBT/GF(15÷30)	1,5
PBT/GF(15÷30) FR	1,3
PBT-IM/GF20	2
PET	2,8
PET/GF(20÷35)	1,3
PET/GF50	1

GF – skelná vlákna; IM – modifikátor houževnatosti; FR – retardéry hoření

Při cyklickém namáhání plastů je významným parametrem i počet cyklů, kterým bude plastový díl během své životnosti vystaven, přičemž jako mezní hodnoty bylo zvoleno 10 cyklů (např. omezený počet montáže a demontáže celků s integrovanými spoji – západky, kloubové spoje apod.). Při cyklickém namáhání houževnatých plastů a malém počtu cyklů (do 10cyklů) je možno těleso deformovat více a maximální hodnota je v tomto případě stanovena na 70 % deformace na mezi kluzu. Při vyšším počtu cyklů limitní deformace klesá na 40 % deformace na mezi kluzu, viz obr. 5.9. Podobně jsou formulována doporučení i pro tvrdé, křehké plasty, přičemž v případě malého počtu cyklů je maximální použitelná deformace 50 % deformace na mezi pevnosti. Při rostoucím počtu cyklů tento limit klesá na 30 % deformace na mezi pevnosti, viz obr. 5.10.

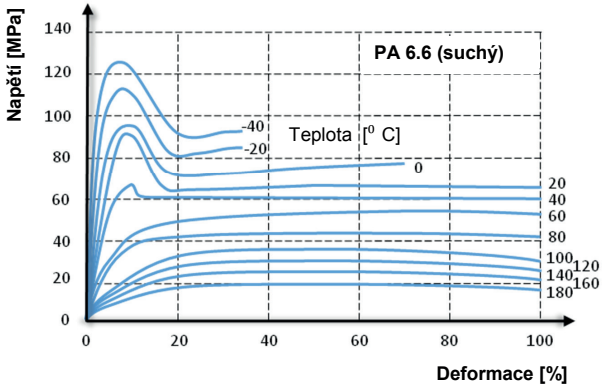


Obr. 5.9 *Limity sekantového modulu pro cyklické zatěžování houževnatých plastů*



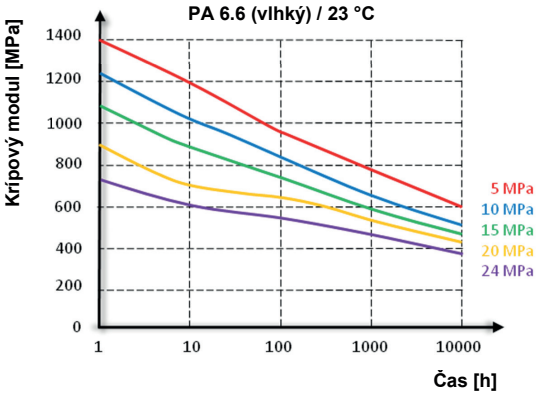
Obr. 5.10 *Limity sekantového modulu pro cyklické zatěžování křehkých plastů*

Důležitým faktorem při určování max. přípustných deformací a sekantových modulů je vždy odečítání dat z krátkodobých tahových zkoušek měřených při kritické teplotě použití. Právě teplota bude rozhodujícím faktorem, který určí, jestli materiál bude za daných podmínek vykazovat křehké nebo houževnaté chování. Krátkodobé zkoušky v širokém spektru působících teplot jsou běžně k dispozici v různých databázích nebo na vyžádání u dodavatele materiálu, viz obr. 5.11.



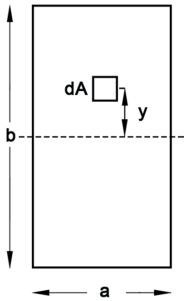
Obr. 5.11 *Tahová křivka napětí-deformace při různých teplotách*

Pro konstruktéry je však z hlediska použitelnosti vhodnější použít ***krípový modul*** (v literatuře označovaný také jako zdánlivý nebo viskózní modul), který je měřen při reálném dlouhodobém zatěžování materiálu. Krípová data jsou obecně vymezena teplotou, typem zatěžování a atmosférickými podmínkami, viz obr. 5.12. Jak již bylo uvedeno, data lze také omezeně extrapolovat, musí být však zaznamenávána alespoň 1 000 hodin (do 100 hodin jsou nepoužitelná).



Obr. 5.12 *Krípový modul v závislosti na velikosti působícího napětí*

Viskoelastické vlastnosti jsou spojeny s materiálem, ale jedním ze základních konstrukčních faktorů, který může být při dimenzování tuhosti dílu využit, jsou jeho průřezové charakteristiky. Nejvýznamnějšími jsou ***moment setrvačnosti*** *(I)* a ***průřezový modul*** *(W)*. Jde o velmi podobné průřezové veličiny. Moment setrvačnosti charakterizuje tuhost (je definován jako odpor průřezu proti přetvoření). Nejdůležitější momenty setrvačnosti jsou vztaženy k osám těžiště průřezu a jsou označovány jako (I_x, I_y a I_z). Každý objem materiálu, který neleží v neutrální ose, zvyšuje při ohybovém a smykovém namáhání tuhost výrobku, přičemž největší napětí je v krajních vláknech. Moment setrvačnosti obdélníkového průřezu roste s třetí mocninou vzdálenosti krajních vláken od neutrální osy (viz obr. 5.13, rozměr b/2) a pouze lineárně s šířkou podél neutrální osy (viz obr. 5.13, rozměr a).

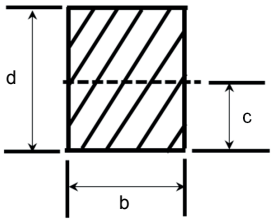


Obr. 5.13 *Schématické znázornění významu momentu setrvačnosti pro konstrukci výrobku*

Momenty setrvačnosti a průřezové moduly základních geometrických profilů jsou uvedeny na obr. 5.14. Složitější geometrické profily se musejí dopočítávat. Průřezové moduly (W) se používají při výpočtu napětí v tělesech namáhaných na ohyb. Ke každé ose těžiště se počítají dva moduly průřezu, které se vztahují vždy ke krajnímu vláknu průřezu v maximální vzdálenosti od těžiště osy. Pokud je osa těžiště zároveň osou symetrie, jsou oba průřezové moduly vztažené k dané ose stejné. Napětí v ohýbaném profilu může být s použitím definovaných průřezových charakteristik vyjádřeno rovnicí (27),

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M}{W} \; [Pa] \qquad (27)$$

kde (M) je ohybový moment, (c) je vzdálenost vnějších vláken od neutrální osy a (I) je moment setrvačnosti.

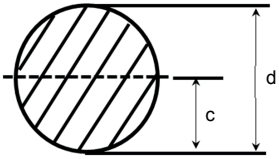


$$S = b \cdot d$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12}$$

$$W = \frac{b \cdot d^2}{6}$$

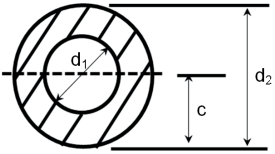


$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

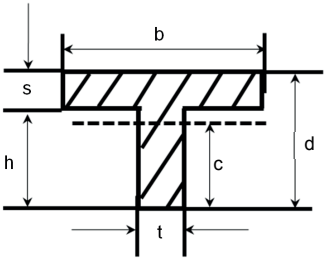


$$S = \frac{\pi \cdot (d_2 - d_1)^2}{4}$$

$$c = \frac{d_2}{2}$$

$$I = \frac{\pi \cdot \left({d_2}^4 - {d_1}^4\right)}{64}$$

$$W = \frac{\pi \cdot \left({d_2}^4 - {d_1}^4\right)}{32 \cdot d_2}$$



$$S = b \cdot s + h \cdot t$$

$$c = d - \frac{d^2 \cdot t + s^2(b - t)}{2(b \cdot s + h \cdot t)}$$

$$W = \frac{t}{c}$$

$$W' = \frac{t}{d - c}$$

$$I = \frac{t \cdot c^3 + b(d - c)^3 - (b - t) \cdot (d - c - s)^3}{3}$$

Obr. 5.14 *Vybrané průřezové charakteristiky*

Při záměně materiálu s cílem zachovat tuhost se vychází z jednoduchého předpokladu založeného na konstantním průhybu při stejných podmínkách zatížení. Elementární průhyb (y_{elem}) je primárně funkcí modulu pružnosti (E) zvoleného materiálu a průřezové charakteristiky (momentu setrvačnosti I). Jeho velikost lze zjednodušeně popsat rovnicí (28).

$$y_{elem} = E \cdot I \ [mm] \tag{28}$$

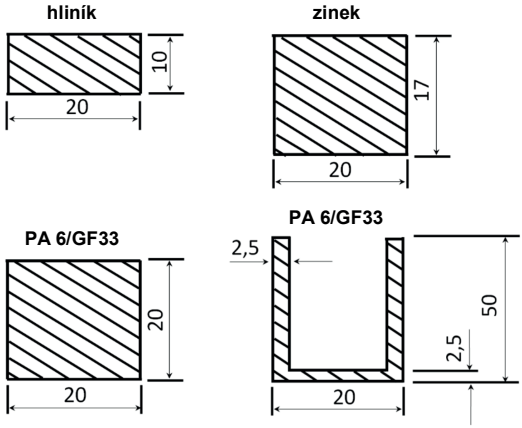
Pro materiálovou záměnu má vztah podobu rovnice (29),

$$E_{mat\,1} \cdot I_1 = E_{mat\,2} \cdot I_2 \tag{29}$$

přičemž pro obdélníkový průřez nabývá tloušťka stěny dílu z nového materiálu (s_2) velikost:

$$s_2 = \sqrt[3]{\frac{E_{mat\,1} \cdot s_1^3}{E_{mat\,2}}} \ [mm] \tag{30}$$

Příklady záměny materiálů pro jednoduché geometrické profily jsou uvedeny na obr. 5.15.

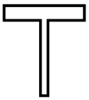
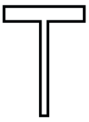


Obr. 5.15 *Porovnání profilů se stejnou výslednou tuhostí v závislosti na použitém materiálu*

Tento výpočet se využívá pouze pro orientační odhad potřebné tloušťky stěny, protože uvažovaná deformace často výrazně překračuje oblast lineárních závislostí.

Pro přesnější analýzu deformací komplexních dílů se následně používá metoda konečných prvků (FEM). Pro plastové díly jsou tyto orientační výpočty využívány především pro prvotní dimenzování vyztužujících žeber (jejich počet a efektivní výšku). Vliv nejdůležitějšího rozměru z hlediska vyztužujícího potenciálu žebra (výšky) je pro názornost uveden v tab. 5.3, kde je zachyceno i porovnání nárůstu tuhosti vůči hmotnosti, což prezentuje efektivitu využití materiálu.

Tab. 5.3 *Vliv výšky žebra na výslednou tuhost profilu*

Příklad	Tvar	Velikost žebra (šířka x výška) [mm]	Výška žebra: tloušťka stěny	Přírůstek hmotnosti [%]	Přírůstek tuhosti [%]
0		-	-	-	-
1		-	-	100	700
2		3,2 x 3,2	1:2	3,12	23
3		3,2 x 6,4	1:1	6,25	77
4		3,2 x 12,5	2:1	12,5	349
5		3,2 x 19	3:1	19,0	925
6		3,2 x 25,4	4:1	25,0	1901
7		3,2 x 32	5:1	31,0	3352

Dalším využívaným vyztužujícím profilem je *prolamování*. Při vzájemném porovnávání tuhosti žebrovaných a prolamovaných profilů je prolamování ca o 50 % účinnější (při použití profilu prolomení „U“). Naopak „V“ profil v porovnání s žebrováním vykazuje při stejné celkové ploše průřezu nižší tuhost, viz obr. 5.16. Toho si byli vědomi i letečtí konstruktéři. Např. u letounů Junkers z 20. a 30. let minulého století byly použity prolamované profily i na vnější kryt stroje.

Prolomení „V“

Plocha průřezu: 52,57 mm^2

Moment setrvačnosti: 348,6 mm^4

Žebra

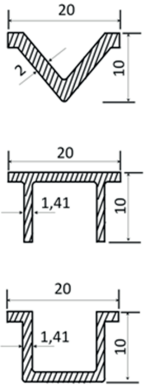
Plocha průřezu: 52,57 mm^2

Moment setrvačnosti: 480,6 mm^4

Prolomení „U“

Plocha průřezu: 52,57 mm^2

Moment setrvačnosti: 668 mm^4



Obr. 5.16 *Porovnání tuhosti profilu vyztuženého žebry a prolomením („U“ a „V“)*

5.4 Limitní hodnoty napětí

Běžné inženýrské aplikace jsou typické víceosým namáháním, ale základní materiálové charakteristiky jsou měřeny standardizovanými metodami při jednoosé napjatosti. *Maximální dovolené namáhání*, kterému může být daný profil vystaven, je odvozeno od mezních hodnot definovaných právě při jednoosém namáhání (meze kluzu, meze pevnosti nebo napětí způsobující kritickou deformaci), a proto bylo nutné zavést hypotézy a kritéria, která umožňují vzájemné porovnání těchto limitů s reálným namáháním dílu. Tahové, tlakové a ohybové limity jednotlivých materiálů jsou zpravidla snadno dohledatelné. Pro smykové namáhání (síly působí v rovině paralelní s rovinou řezu, nikoliv kolmo na průřez tělesa) může být limitní hodnota smykového napětí (τ) odvozena od normálového napětí (σ) dle rovnice (31):

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 0{,}58 \cdot \sigma \ [Pa] \qquad (31)$$

U hypotézy Tresca-Guest rozhoduje o stavu napjatosti maximální smykové napětí, viz obr. 5.17. Pevnostní podmínka je popsána rovnicí (32):

$$\tau_{max} \leq \tau_{dovolené} \tag{32}$$

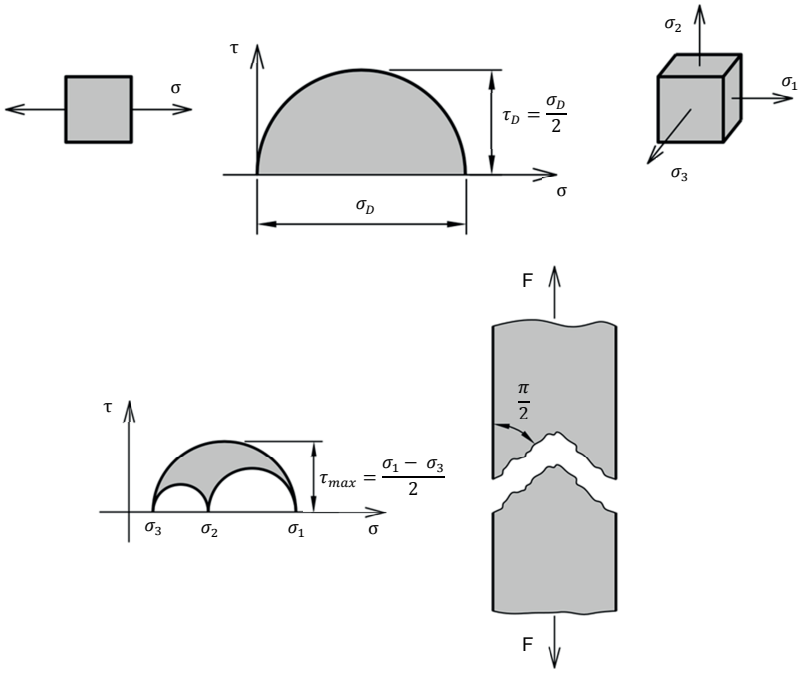
kde ($\tau_{dovolené}$) je limitní smykové napětí při jednoosé napjatosti (dovolené namáhání) a (τ_{max}) je maximální smykové napětí, kterému může být zkoumaná oblast vystavena. Maximální smykové napětí při prostorové napjatosti vyjádřené hlavními napětími ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) je vyjádřeno rovnicí (33):

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad [Pa] \tag{33}$$

Pevnostní podmínka lze poté převést na výraz:

$$\tau_{max} \leq \tau_{dovolené} \tag{34}$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \frac{\sigma_{dovolené}}{2} \tag{35}$$



Obr. 5.17 *Maximální smykové napětí (hypotéza Tresca-Guest)*

Pro člen (σ_1 - σ_3) byl zaveden výraz redukované napětí (σ_{red}), které převádí víceosou napjatost na pevnostní ekvivalent napjatosti jednoosé:

$$\sigma_{red} = \sigma_1 - \sigma_3 \ [Pa] \tag{36}$$

$$\sigma_{red} \leq \sigma_{dovolené} \tag{37}$$

Tato hypotéza je vhodná především pro houževnaté materiály se stejnou pevností v tahu a tlaku.

Při využití hypotézy HMH (Huber, von Mises, Hencky) rozhoduje o stavu napjatosti její měrná energie (hustota deformační energie) a pevnostní podmínka vychází ze změny tvaru. Po dosazení příslušných energií lze získat vyjádření ve tvaru zahrnující všechna hlavní napětí, viz rovnice (38):

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)} \leq \sigma_{dovolené} \tag{38}$$

přičemž i zde lze opět využít redukované napětí, viz rovnice (39):

$$\sigma_{red} \leq \sigma_{dovolené} \tag{39}$$

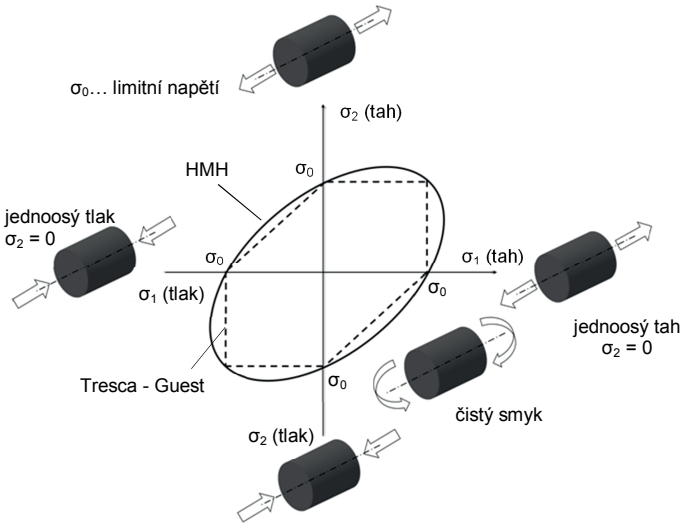
takže výsledné tvary mají poté podobu:

$$\sigma_{red} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{40}$$

nebo

$$\sigma_{red} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2)} \tag{41}$$

Hypotéza se využívá pro houževnaté materiály (jako Tresca-Guest hypotéza), obě dosahují vzájemně srovnatelných výsledků (viz obr. 5.18), ale HMH hypotéza je mírnější (rozměry dimenzované na základě HMH hypotézy nejsou tak předimenzované jako u Tresca-Guest hypotézy).

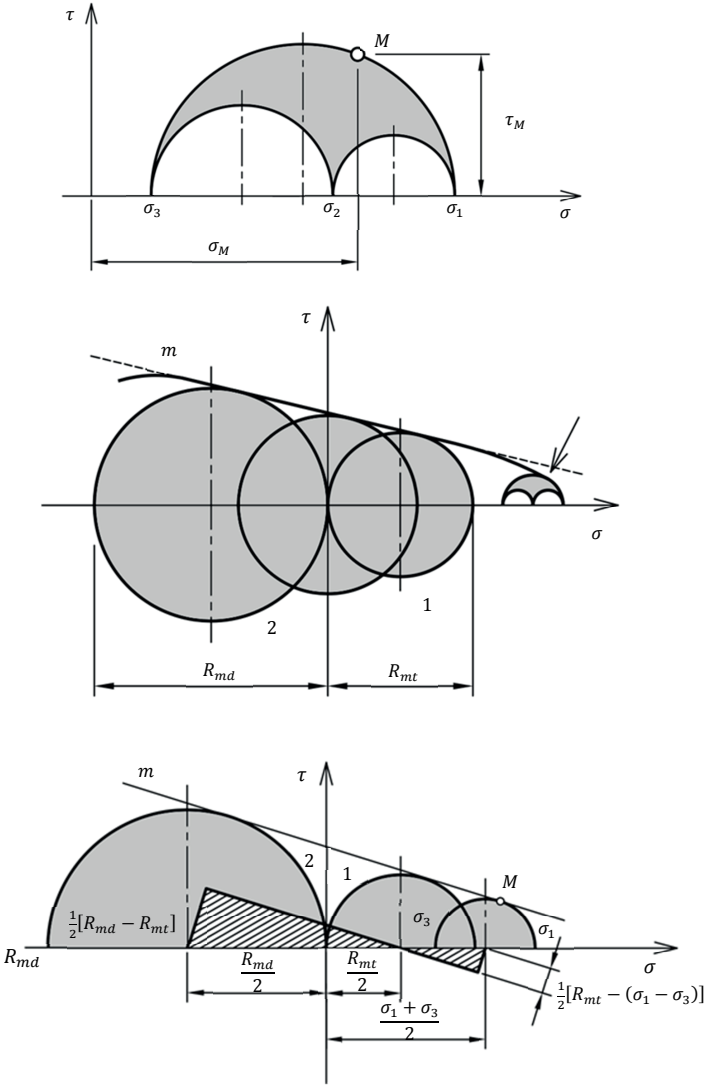


Obr. 5.18 *Porovnání limitních napětí dle hypotéz HMH a Tresca-Guest (napětí přesahující elipsu / šestistěn způsobuje defekt)*

Mohrova hypotéza je využívána u křehkých materiálů s rozdílnou pevností v tahu a tlaku, kde o stavu napjatosti rozhoduje jak normálové tak smykové napětí (kritické hodnoty σ_m a τ_m). K porušení tělesa dojde v rovině, která je na Mohrově kružnici zobrazena bodem M (specifická kombinace normálového a smykového namáhání). Pro různé napjatosti vzniká pro tahové/tlakové namáhání přímka (m), kde (R_{mt}) je mez pevnosti v tahu a (R_{md}) je mez pevnosti tlaku, viz obr. 5.19.

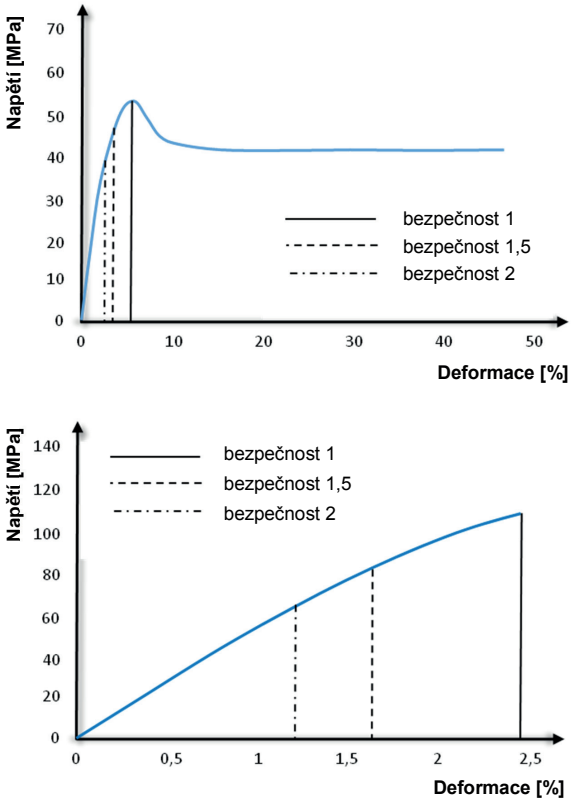
Ze sestrojeného systému Mohrových kružnic lze odvodit rovnici (42) s pevnostní podmínkou:

$$\sigma_1 - \frac{R_{mt}}{R_{md}}\sigma_3 \leq \sigma_{dovolené} \qquad (42)$$



Obr. 5.19 *Systém Mohrových kružnic (Mohrova hypotéza)*

Používání bezpečnostních faktorů je běžnou inženýrskou praxí pro konstrukci využívající všechny materiály a jsou voleny tak, aby díl neselhal za působení všech předpokládaných podmínek. Na *bezpečnostní faktor* má velký vliv jak požadovaná životnost dílu (vyšší předimenzování prodlužuje životnost, viz obr. 5.20), tak i přesnost jednotlivých součástí (požadovaná vysoká přesnost plastových dílů je obtížně udržitelná po dlouhou dobu životnosti). Bezpečnostní faktor musí rovněž eliminovat nepřesnosti v konstrukčních výpočtech a případná zjednodušení, při kterých byly zanedbány některé faktory.



Obr. 5.20 *Grafické znázornění vlivu bezpečnostního faktoru na použitelné limitní napětí*

Naopak přehnané bezpečnostní faktory zvyšují spotřebu materiálu, hmotnost výrobku a celkové náklady. Výsledná hodnota bezpečnostního faktoru se skládá z více složek, jakými jsou *konstrukční bezpečnostní faktor*, *bezpečnostní faktor materiálových vlastností* (důsledkem velké citlivosti polymerů na působící podmínky), *procesní bezpečnostní faktor* (výsledné vlastnosti vstřikovaných dílů jsou závislé na procesních parametrech - tepelné ovlivnění materiálu, opotřebení nástroje, zanesení vnitřního napětí apod.). Neexistují však striktně definované hodnoty, které lze univerzálně použít. Konstruktér má k dispozici pouze doporučené rozsahy. Obecně lze bezpečnostní faktor (BF) vyjádřit rovnicí (43),

$$\sigma_{dovolené} \geq BF \cdot \sigma_{max} \tag{43}$$

kde limitní dovolené napětí ($\sigma_{dovolené}$) je nejčastěji hodnota pevnosti na mezi kluzu (nebo napětí odpovídající maximální akceptovatelné deformaci) a maximální skutečné napětí (σ_{max}) je vyvozené působící silou na konkrétní průřez. Pokud na těleso působí víceosé napětí, je nutné pomocí různých hypotéz (HMH, Guestovy apod., viz kap. 5.4) určit redukované napětí, které se následně porovná s maximálním dovoleným napětím.

***Tab. 5.4** Možné způsoby určení bezpečnostního faktoru (BF)*

1. přístup	▪ Nespojité zatěžování, nepůsobící únavu, selhání není kritické (BF 2÷4) ▪ Nespojité zatěžování, nepůsobící únavu, selhání je kritické (BF 4÷10) ▪ Kontinuální zatěžování, selhání není kritické (BF 4÷10) ▪ Kontinuální zatěžování, selhání je kritické (BF 10÷20)
2. přístup	▪ Krátkodobé statické zatěžování (BF min. 2) ▪ Dlouhodobé statické zatěžování (BF min. 4) ▪ Proměnlivé zatěžování (min. 4) ▪ Opakované / Únavové zatěžování (min. 5) ▪ Rázové zatěžování (min. 10)
3. přístup	▪ Západkové nerozebíratelné spoje pro materiály s výraznou mezí kluzu (BF min. 1,5) ▪ Západkové rozebíratelné spoje pro materiály s výraznou mezí kluzu (BF min. 2,5) ▪ Západkové nerozebíratelné spoje pro materiály bez výrazné meze kluzu (plněné polymery, BF min. 2, vychází se z meze pevnosti) ▪ Západkové rozebíratelné spoje pro materiály bez výrazné meze kluzu (plněné polymery, BF min. 3,25, vychází se z meze pevnosti)

U všech přístupů, které navrhují velikost bezpečnostního faktoru, lze pozorovat shodnou tendenci založenou na růstu hodnoty bezpečnostního faktoru s rostoucím

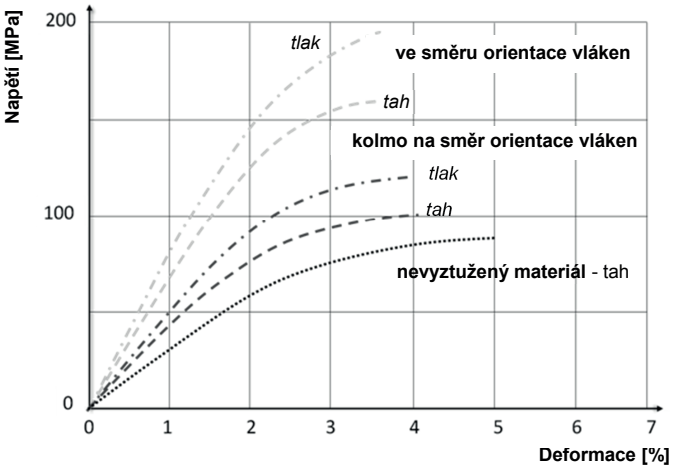
nebezpečím ohrožení zdraví uživatele při případném porušení dílu. Primární přístup vychází z typu působícího zatížení. Dále je možné dohledat doporučení pro různé aplikační účely, viz tab. 5.4. Případné poddimenzování prvotního návrhu se primárně řeší zvýšením tloušťky stěny výrobku nebo přidáním vyztužujících prvků (žeber apod.).

5.6 Průvodní jevy

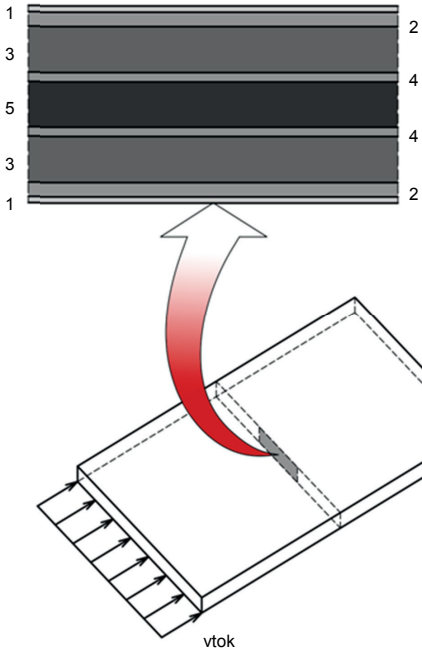
Vstřikování plastových dílů je velmi specifická výrobní technologie, která je provázena charakteristickými ději. Nejdůležitějšími jevy jsou vznik vnitřního napětí (ať již vlivem procesních parametrů nebo přítomností koncentrátorů napětí), orientace makromolekul nebo plniva způsobující anizotropii vlastností a vznik studených spojů.

- ***Anizotropie vlastností***

Jedním z nejvýznamnějších efektů spojených se vstřikováním plastů je anizotropie vlastností dílů vyvolaná orientací makromolekul a plniva. Tento efekt je nejvýraznější u materiálů plněných vláknitým plnivem. Rovnice používané pro odhad pevnosti a deformace dílu však faktor anizotropie nezahrnují. K orientaci makromolekul a plniva dochází vlivem působících sil, kterým jsou během vstřikování termoplasty vystaveny (při zpracování reaktoplastů dochází pouze k orientaci vláknitého plniva). Dlouhé makromolekulární řetězce jsou orientovány ve směru působících sil, a pokud vyplní intenzivně chlazené tenké profily, dojde k jejich zatuhnutí ještě dříve, než se stihnou přeskupit do tvarů s výhodnějším energetickým stavem odpovídající maximální entropii. Proces přeskupení se tímto zafixováním makromolekul pouze dočasně potlačí, ale zcela neodstraní. Důsledkem je velké vnitřní napětí v dílu, které se v závislosti na okolní teplotě a čase nakonec vždy projeví tvarovou deformací dílu. Z hlediska mechanických vlastností je mnohem vyšších pevnostních limitů dosaženo ve směru orientace makromolekul. U plastů plněných vláknitým plnivem (např. skelnými vlákny) jsou vlákna primárně orientována ve směru toku taveniny. Plněný kompozit je schopen přenášet maximální zatížení v hlavním směru orientace vláken, která jsou řádově pevnější než polymerní matrice, viz obr. 5.21.



Obr. 5.21 *Porovnání mechanických vlastností plastů ve směru a kolmo na směr orientace plniva*



1 vnější povrchová vrstva téměř bez vláken

2,4 náhodná orientace vláken

3 vlákna orientovaná převážně ve směru toku taveniny

5 vlákna orientovaná převážně kolmo na směr toku taveniny

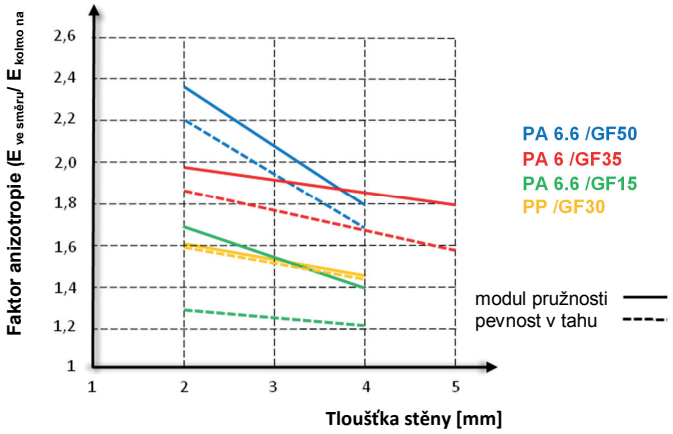
Obr. 5.22 *Orientace skelných vláken v průřezu vstřikovaného dílu*

Síly působící kolmo na směr toku taveniny jsou přenášeny menším množstvím vláken a naopak do výsledné pevnosti se ve větší míře promítá nižší pevnost matrice. Detailní studie však odhalily, že tato problematika je mnohem komplexnější. Při analýzách řezů dílů vyrobených z plastů plněných skelnými vlákny bylo zaznamenáno mnohem více vrstev s odlišnou orientací vláken, viz obr. 5.22. Velmi tenká povrchová vrstva (vrstva 1) je v optimálním případě téměř bez vláken. Přechodové vrstvy (vrstvy 2 a 4) jsou opět velmi tenké a vlákna již obsahují. Jejich orientace je však chaotická. Výsledné mechanické vlastnosti dílu vyztuženého vláknitými plnivy jsou řízeny vrstvami 3 a 5 a jejich vzájemným poměrem. Ve vrstvách 3 jsou vlákna orientována ve směru toku taveniny, zatímco vlákna ve vrstvě 5 jsou orientována kolmo na směr toku taveniny.

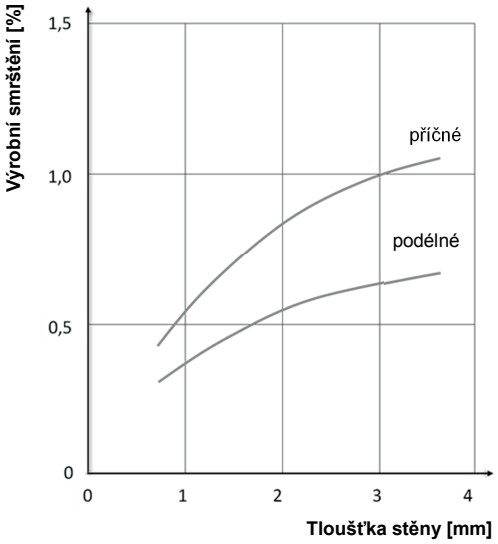
U tenkostěnných dílů jsou hlavními nositelkami mechanických vlastností vrstvy 3, které symetricky obklopují vrstvu 5 tvořící střed příčného řezu. S růstem tloušťky stěny výrobku roste i tloušťka vrstvy 5, čímž se vyrovnávají výsledné vlastnosti ve směru toku taveniny a ve směru kolmém na směr toku taveniny a snižuje se faktor anizotropie. Velikost těchto vrstev (především však třetí a páté) je dána primárně třemi parametry:

- ***Reologickým chováním polymeru*** – pokud má tavenina polymerní matrice nižší viskozitu, tak se ztenčují vnější vrstvy a naopak vrstvy tvořící jádro výrobku jsou silnější (celková anizotropie dílu je menší),
- ***Procesními parametry*** – největší vliv na orientaci vláken v dominantních vrstvách má vstřikovací rychlost a teplota formy (při pomalém plnění je pátá vrstva minimalizována a u viskózních polymerů může být zcela potlačena; vyšší velikost a délka dotlaku rovněž potlačují vznik páté vrstvy),
- ***Geometrií výrobku*** – obecně s rostoucí nominální tloušťkou výrobku roste i tloušťka páté vrstvy.

O vlivu jednotlivých vrstev vypovídá faktor anizotropie mechanických vlastností, který je znázorněn na obr. 5.23. Z diagramu a výše uvedených poznatků lze vyvodit dva závěry. Prvním je převládající orientace vyztužujících vláken ve směru toku taveniny do tloušťky stěny 2 mm, čemuž by mělo být uzpůsobeno plnění tvarové dutiny formy s ohledem na směr zatěžující síly. Druhým závěrem je účelné zvyšování tloušťky stěny (dle předchozích pravidel o max. 50 %) v oblasti, kde na díl bude působit víceosé zatížení, aby anizotropie vlastností byla minimalizována.



Obr. 5.23 *Faktor anizotropie vstřikovaných dílů v závislosti na tloušťce stěny*



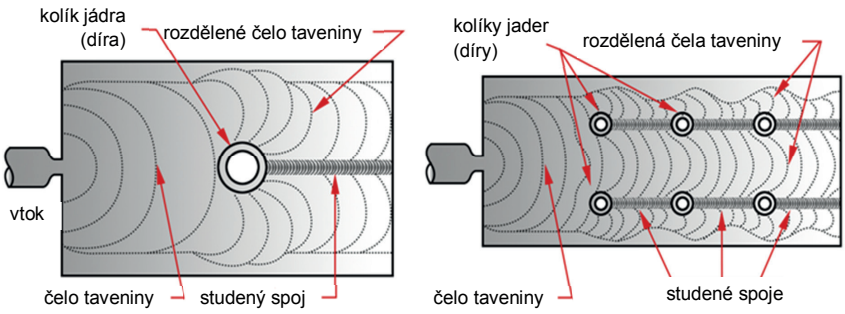
Obr. 5.24 *Smrštění plastového dílu s ohledem na orientaci skelných vláken*

Dalším problematickým místem je vtokové ústí, kde je orientace vláken zcela náhodná a vzniká zde i velké vnitřní napětí. Z tohoto důvodu by ústí vtoku nemělo být umisťováno do oblastí, které budou mechanicky namáhány. Orientace vláken rovněž

významně ovlivňuje i smrštění plastového dílu, které je ve směru orientace mnohem nižší, než ve směru kolmém k toku taveniny, viz obr. 5.24.

- ***Studené spoje***

Při obtékání překážky (např. jádra tvořící otvor) dochází k rozdělení toku taveniny na dva nebo více proudů, které se za překážkou opět spojují, viz obr. 5.25. Dle podmínek, za kterých tyto spoje vznikají (především teploty a tlaku taveniny), se více či méně vytváří vzhledové nebo funkční vady. Rozeznat lze dvě úrovně studeného spoje. Pokud je kontaktní úhel mezi čely taveniny menší než 135°, je studený spoj dobře viditelný. Pokud však je kontaktní úhel větší, makromolekuly obou proudů taveniny mají orientaci téměř shodnou s hlavním směrem toku a stopa po studeném spoji přestává být zřetelná. Z hlediska mechanických vlastností je studený spoj nebezpečným místem, neboť nemusí nutně schopný přenášet takové zatížení jako spojitý materiál. Přítomnost studeného spoje dolehá nejvíce na vlastnosti vyztužených polymerů, protože vyztužující plnivo nepronikne (nebo pronikne pouze omezeně) na rozhraní obou ztékajících se čel taveniny, a proto je zde pevnost dána pouze mechanickými vlastnostmi matrice, které jsou až o řád nižší. U amorfních a semikrystalických polymerů dále platí, že čím menší je houževnatost daného plastu, tím nebezpečnější je studený spoj z hlediska funkčnosti dílu, viz tab. 5.5.

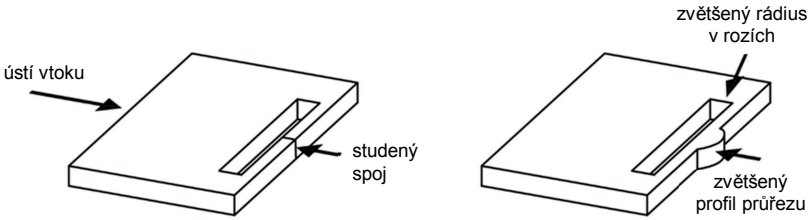


Obr. 5.25 *Schéma vzniku studeného spoje za otvorem (obtékaným jádrem)*

Snížení mechanických vlastností studeného spoje je zapříčiněno i tím, že mezi čely taveniny se uzavírá vzduch a může být zde koncentrována vlhkost, případně nečistoty, které tavenina strhla při plnění dutiny formy. Umístění studeného spoje se

dá regulovat polohou vtokového ústí, technologickými parametry a tloušťkou stěny. Optimalizace jsou prováděny s využitím numerických analýz plnění tak, aby byly maximálně eliminovány negativní dopady přítomnosti studeného spoje. Oblasti, kde se bude spoj s největší pravděpodobností tvořit, se vyztužují žebry nebo je zde možné lokálně zvětšit tloušťku stěny, viz obr. 5.26.

Studené spoje vznikají také u forem, jejichž tvarová dutina je plněna více vtoky a v některých případech i při nevhodné kombinaci tenké a silnější stěny nebo v okolí žeber.



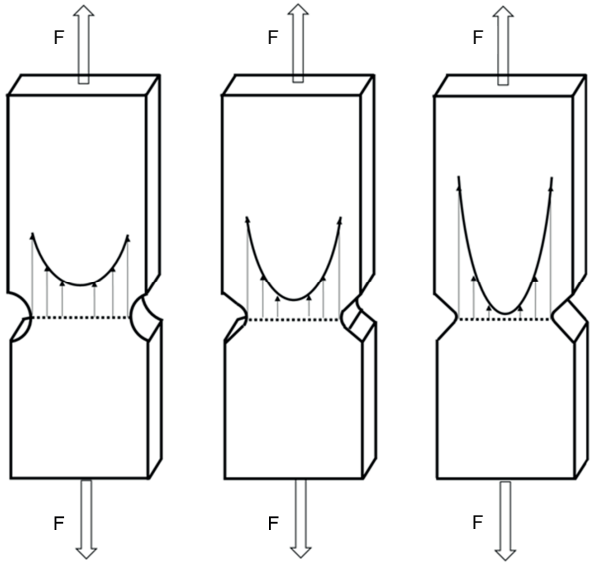
***Obr. 5.26** Možné zvýšení tuhosti oblasti s nebezpečím vzniku studeného spoje*

***Tab. 5.5** Faktor tuhosti studeného spoje pro zvolené typy plastů*

Polymer	Dynamické namáhání	Rázové namáhání
PA 6	≈ 1	
PA 6/GF30	0,6	
PA 6.6	≈ 1	0,22
PA 6.6/GF35	0,55	
PE-HD	≈ 1	0,2
PP	0,92	
PBT	0,95	
PBT/GF30	0,57	
PS	0,64	
SB	0,9	
ABS	≈ 1	0,6
ABS/GF15	0,55	0,3
PC/GF10	0,85	
PC/GF20	0,58	
PC/GF40	0,47	

5.7 Koncentrátory napětí

Jedním ze základních rozdílů v konstrukci plastových dílů ve srovnání s díly kovovými (obráběnými) je skutečnost, že nelze použít téměř žádných ostrých rohů. Ostré rohy a hrany představují *koncentrátory napětí* a z funkčního hlediska snižují schopnost dílu přenášet požadované napětí. Pro zpřesněný odhad vlivu velikosti rádiusu na koncentraci napětí je možné použít faktor koncentrace napětí, jehož velikost lze odvodit z grafického průběhu na obr. 5.27. Tento faktor násobí teoretické napětí, které se v tělese nachází a posouvá ho tak k reálným hodnotám. Kromě ostrých rohů působí jako koncentrátory napětí i nepravidelné profily s náhlými změnami reliéfu, mezi které patří např. otvory, náhlé změny v tloušťce stěny apod. Dodržování konstrukčních doporučení a omezení, uvedené v kap. 4, umožní předcházet nebo minimalizovat vznik těchto oblastí, které mohou významně snižovat výslednou životnost plastového dílu.



Obr. 5.27 *Vliv geometrie vrubu na vnitřní napětí v tělese*

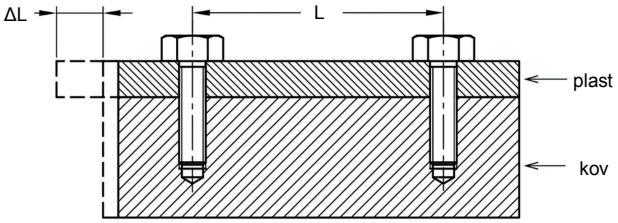
V porovnání s ostatními skupinami technických materiálů (kovy, keramikou apod.) jsou plasty citlivější na působení teploty, a to již v relativně úzkých intervalech okolo standardní teploty okolí. Mezní teploty spojené s fázovými přechody, jsou uvedeny v kapitole 2. Dalším významným faktorem je relativně velký koeficient teplotní roztažnosti, například ve srovnání s kovy (až 10násobně vyšší).

Napětí (σ_t) vyvolané v tělese změnou jeho rozměrů lze stanovit pomocí modifikovaného Hookeova zákona, viz rovnice (44):

$$\sigma_t = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \ [Pa] \tag{44}$$

přičemž modul pružnosti (E) i koeficient lineární teplotní roztažnosti (α) nabývají kladných hodnot a pokud člen vyjadřující změnu teploty je také kladný (ΔT > 0), vytváří se v tělese tlakové napětí. Vzhledem k viskoelastické povaze materiálu podléhá i napětí vyvolané změnou teploty relaxačním procesům, tj. časem se snižuje.

Pokud jsou dva prvky sestavy vzájemně fixovány, viz obr. 5.28, bude se díl z materiálu s vyšší teplotní roztažností při změně teploty deformovat vlivem vzniklého tlakového napětí. Kritická hodnota vyvolaná provozní teplotou by neměla přesáhnout limit vyjádřený rovnicí (44).



Obr. 5.28 *Napětí v tělese, která je fixováno bez možnosti kompenzovat teplotní dilatace*

Také koeficient teplotní roztažnosti vykazuje určitý stupeň anizotropie a to především u plněných polymerů. Ve směru orientace vláken je až o polovinu menší, než ve směru kolmém na orientaci vláken, viz tab. 5.6.

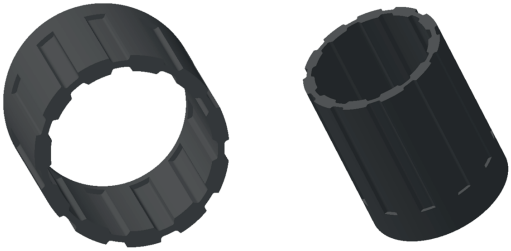
Pro minimalizaci vnitřního napětí, které je vyvolané změnou působící teploty, je nejčastěji využíváno rozdělení kritické geometrie dílu na více kratších segmentů s dilatačními spárami, viz obr. 5.29, nebo jsou do profilu vloženy extrémně

tenkostěnné prvky, které se mohou do určité míry deformovat při nárůstu rozměru a kompenzují tak výslednou dilataci dílu, viz obr. 5.30.

Tab. 5.6 *Koeficient lineární teplotní roztažnosti u vybraných plastů (0 °C ÷ 200 °C)*

Polymer	ve směru toku taveniny $\alpha.10^{-6}$ [cm·cm/°C]	kolmo na směr toku taveniny $\alpha.10^{-6}$ [cm·cm/°C]
PA 6.6	70	x
PA 6.6-FR	65	x
PA 6.6/GF	20	55
PA 6.6/GF-FR	20	55
PA 4.6/GF-FR	25	60
PA 6.12/GF	23	50
PBT/GF	25	60
PET/GF	25	60
PPS/GF	22	55
LCP/GF	14	40

Obr. 5.29 *Konstrukční úprava pro minimalizaci vnitřního napětí ve výrobku způsobené teplotní roztažností*



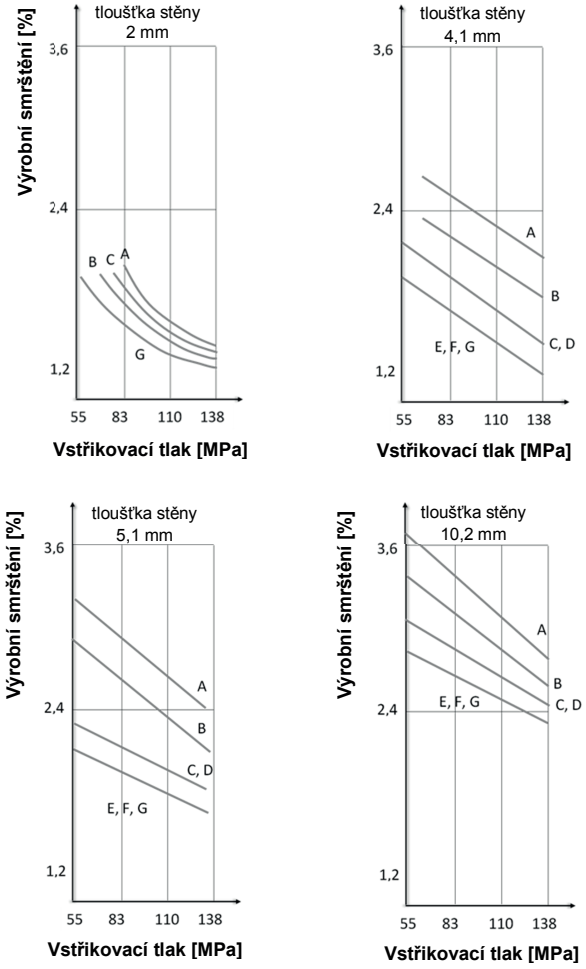
Obr. 5.30 *Konstrukční úprava pro minimalizaci rozměrových změn výrobku způsobené teplotní roztažností*

5.9 Tolerance rozměrů

Na rozdíl od kovových dílů má na konečnou přesnost plastových výrobků vliv mnoho souběžně působících faktorů, přičemž dosažitelná a tedy použitelná toleranční pole jsou omezena jak velikostí nominálního rozměru, tak použitým materiálem, úrovní kontroly procesu, polohou tolerovaného rozměru vůči dělící rovině formy apod. Tvar dílu a rozmístění vtoků má přímý vliv na průběh plnění tvarové dutiny, rovnoměrný odvod tepla a celkové smrštění dílu, které je ovlivněno i tloušťkou stěny, viz obr. 5.31. Pro maximální eliminaci vlivu smrštění, které výrazně ovlivňuje výslednou přesnost tolerovaného rozměru, je vhodné umístit ústí vtoku co nejblíže místu s úzkým tolerančním polem. Na tvarové a rozměrové změny má během smrštění primární vliv uspořádání, tvar a délka makromolekul (mění se i v rámci dodávaných šarží materiálu), přítomnost dalších aditiv (barviva, plniva apod.), tepelná historie materiálu, přípravné operace (sušení apod.) a proměnlivá viskozita materiálu (teplota, vlhkost, distribuce aditiv apod.). Kromě smrštění patří mezi nejdůležitější faktory ovlivňující teplotní roztažnost dílu, schopnost absorpce vody (viz obr. 5.32) a sekundární (dodatečné) smrštění spojené především s dokrystalizací semikrystalických termoplastů. Celková přesnost dílu je ovlivněna i zvoleným designem a provedením výrobního nástroje. S rostoucím počtem tvarových dutin klesá přesnost jednotlivých dílů, která je dále časem v okolí pohyblivých členů proměnlivá. Mezi další důležité faktory z hlediska formy patří rozmístění vyhazovačů, dimenzování vtokového systému a temperačních okruhů, slícování formy, dostatečné odvzdušnění, deformace tenkých jader a profilů vlivem působení vysokých tlaků apod.

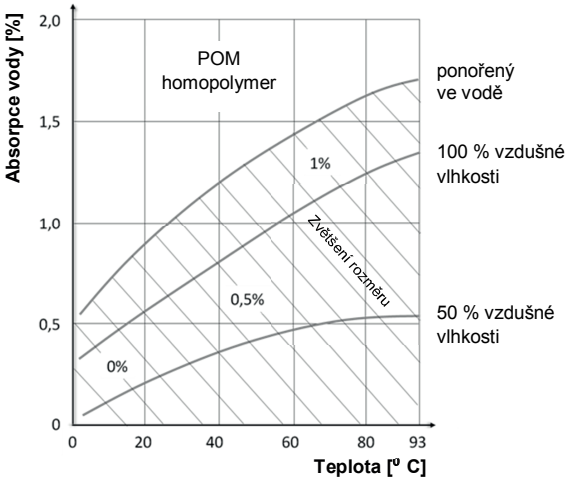
Důležitou roli z hlediska přesné opakovatelnosti jednotlivých pohybů (tlaků a rychlostí) plní stroj. Akční a kontrolní prvky musí zajistit minimální kolísání teplot v tavící komoře vstřikovacího stroje, přesné vedení částí formy atd. Každá vstřikovací jednotka stroje má svá omezení a objem jednotlivých vstřikovaných dávek musí odpovídat optimálnímu objemu, který je dán velikostí (průměrem) šneku. Pro každou vyráběnou sérii by měly být použity identické technologické parametry optimalizované pouze s ohledem na případné změny v dodávaných šaržích zpracovávaného materiálu. Technologické parametry se ustálí až po několika výrobních zdvizích (po ustálení provozní teploty nástroje), proto by měly být první zhotovené díly z výroby vyřazeny. Pokud se prodlouží časové intervaly mezi

jednotlivými výrobními zdvihy, např. vlivem technologického zásahu (materiál zůstává déle v tavící komoře) mělo by se rovněž několik následujících zdvihů z výroby vyřadit. Následná manipulace s výrobkem (dochlazení výrobku po jeho odformování) a působení různých prostředí také ovlivňuje jeho výsledný rozměr.



Materiál: kopolymer POM, *teplota taveniny*: 200 ^{0} C, *smrštění měřeno ve směru toku taveniny, plocha průřezu vtoku*: A - 1,9 mm^2, B - 3,9 mm^2, C - 7,7 mm^2, D - 12,2 mm^2, E - 18,1 mm^2, F - 23,9 mm^2, G - 31,3 mm^2

Obr. 5.31 *Vliv vybraných faktorů na výsledné smrštění a tím i přesnost dílu*

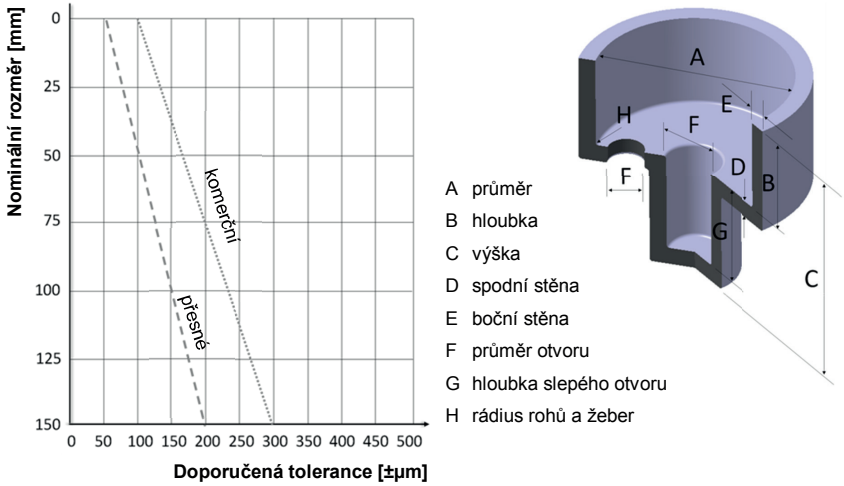


Obr. 5.32 *Změna rozměrů plastového dílu v důsledku absorpce vody*

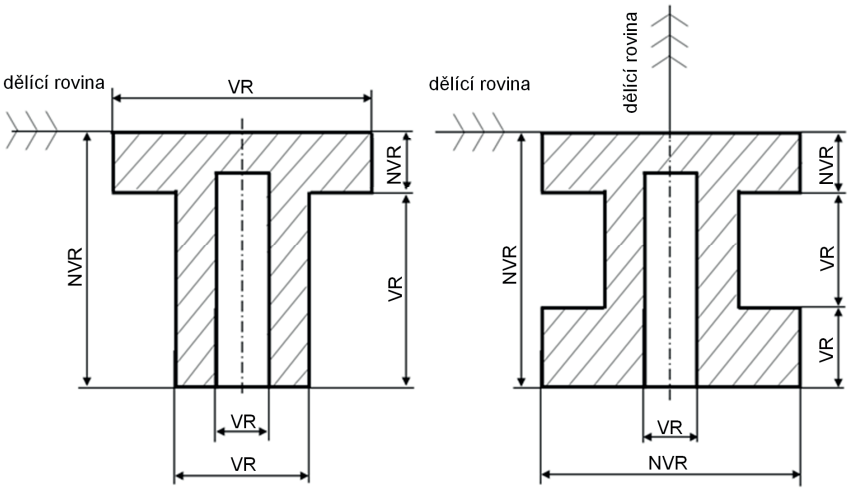
Úzká toleranční pole by se měla používat pouze tam, kde je to nezbytně nutné z hlediska aplikace. Nerealistické a nadužívané tolerance výrazně zvyšují zdánlivou zmetkovitost výroby a prodražují výrobní nástroj a tím i samotný výrobek. V praxi jsou však tolerance používané pro vstřikované díly často až příliš úzké.

Pro prvotní odhad použitelných tolerancí je možno vycházet z přístupu, který je založen na lineárním vztahu tolerančního pole k nominálnímu rozměru plastového dílu. Pro standardní vstřikování je využitelná tolerance 1 % nominálního rozměru. Při vstřikování technických výlisků dosažitelná tolerance klesá na 0,6 % nominálního rozměru a pro přesné vstřikování je využitelná tolerance 0,3 % nominálního rozměru. Dodavatelé materiálů poskytují informativní přehled použitelných tolerancí nejrozšířenějších materiálů v závislosti na charakteristice jednotlivých rozměrů (otvor, zahloubení apod., viz obr. 5.33.).

Komplexní postup pro určení vhodného rozsahu tolerancí, kterým by se měl každý konstruktér vstřikovaných dílů řídit, je uveden ve standardu DIN 16 742. Doporučené hodnoty v závislosti na velikosti nominálního rozměru jsou rozděleny do devíti tříd přesnosti, přičemž každá třída je dále dělena do dvou základních skupin, které zohledňují umístění tolerovaného rozměru s ohledem na polohu dělící roviny.



Obr. 5.33 *Informativní přehled použitelných tolerancí poskytovaný dodavateli materiálu*



Obr. 5.34 *Vázané a nevázané rozměry dle jejich vztahu k pozici dělící roviny*

Pokud je obrys dimenzovaného rozměru tvořen jednotným množstvím kovového materiálu (*rozměr vázaný formou*), může být tolerance užší. Pokud je však dimenzovaný rozměr přerušen dělící rovinou (*rozměr nevázaný formou*) nebo je jeho

kontura tvořena pohyblivými členy formy (čelistmi), lze předpokládat, že se forma časem opotřebuje (vymačká), nebo se do dělící roviny mohou dostat nečistoty, a proto by měla být použitá tolerance volnější než u rozměru vázaného formou, viz obr. 5.34.

Použitelná třída přesnosti je stanovena pomocí vztahu, který zahrnuje úroveň kontroly výrobního procesu, mechanické vlastnosti materiálu (tvrdost a modul pružnosti), variabilitu smrštění atd. Ukázka doporučených tolerancí pro jednotlivé třídy přesnosti je v tab. 5.8. Pro jiné výrobní technologie jsou dosažitelné jiné (většinou menší) úrovně přesnosti dílů, viz tab. 5.7.

Tab. 5.7 *Doporučené rozsahy tolerančních polí pro extrudované profily*

		PS-HI	PC, ABS	PP	PVC-U	PVC-P	PE-LD
nominální rozměr [mm]	≤ 3	±0,1778	±0,254	±0,254	±0,1778	±0,254	±0,3048
	≤ 10	±0,3048	±0,508	±0,381	±0,254	±0,381	±0,635
	≤ 25	±0,4318	±0,635	±0,508	±0,381	±0,508	±0,762
	≤ 40	±0,635	±0,6858	±0,6858	±0,508	±0,762	±0,889
	≤ 50	±0,762	±0,889	±0,889	±0,635	±0,889	±1,016
	≤ 80	±0,889	±0,9398	±0,9398	±0,762	±1,016	±1,143
	≤ 100	±1,27	±1,27	±1,27	±1,143	±1,651	±1,651
	≤ 130	±1,651	±1,651	±1,651	±1,524	±2,3622	±2,3622
	≤ 180	±2,3622	±2,3622	±2,3622	±1,905	±3,175	±3,175
	≤ 250	±3,175	±3,175	±3,175	±2,3622	±3,81	±3,81

Tab. 5.8 *Doporučené rozsahy tolerančních polí pro plastové vstřikované díly (DIN 16 742)*

Toleranční skupina		Nominální rozměr [mm]															
		1 až 3	≤ 6	≤ 10	≤ 18	≤ 30	≤ 50	≤ 80	≤ 120	≤ 180	≤ 250	≤ 315	≤ 400	≤ 500	≤ 630	≤ 800	≤ 1000
TG1	VR	±0,007	±0,012	±0,018	±0,022	±0,026	±0,031	±0,037	±0,044	x	x	x	x	x	x	x	x
	NVR	±0,012	±0,018	±0,022	±0,026	±0,031	±0,037	±0,044	±0,050	x	x	x	x	x	x	x	x
TG2	VR	±0,013	±0,020	±0,029	±0,035	±0,042	±0,050	±0,060	±0,090	±0,13	±0,15	±0,16	±0,18	±0,20	x	x	x
	NVR	±0,020	±0,029	±0,035	±0,042	±0,050	±0,060	±0,090	±0,13	±0,15	±0,16	±0,18	±0,20	±0,22	x	x	x
TG3	VR	±0,020	±0,031	±0,05	±0,06	±0,070	±0,08	±0,10	±0,15	±0,20	±0,23	±0,26	±0,29	±0,40	±0,55	±0,63	±0,7
	NVR	±0,031	±0,050	±0,06	±0,07	±0,080	±0,10	±0,15	±0,20	±0,23	±0,26	±0,29	±0,40	±0,55	±0,63	±0,7	±0,77
TG4	VR	±0,03	±0,05	±0,08	±0,09	±0,110	±0,13	±0,15	±0,23	±0,32	±0,35	±0,41	±0,45	±0,63	±0,88	±1,	±1,15
	NVR	±0,05	±0,08	±0,09	±0,11	±0,130	±0,15	±0,23	±0,32	±0,35	±0,41	±0,45	±0,63	±0,88	±1	±1,15	±1,3
TG5	VR	±0,05	±0,08	±0,11	±0,14	±0,170	±0,20	±0,23	±0,36	±0,50	±0,58	±0,65	±0,70	±1,00	±1,4	±1,6	±1,8
	NVR	±0,08	±0,11	±0,14	±0,17	±0,200	±0,23	±0,36	±0,50	±0,58	±0,65	±0,70	±1,00	±1,40	±1,6	±1,8	±2,1
TG6	VR	±0,07	±0,12	±0,18	±0,22	±0,260	±0,31	±0,37	±0,57	±0,80	±0,93	±1,05	±1,15	±1,60	±2,2	±2,5	±2,8
	NVR	±0,12	±0,18	±0,22	±0,26	±0,310	±0,37	±0,57	±0,80	±0,93	±1,05	±1,15	±1,60	±2,20	±2,5	±2,8	±3,1
TG7	VR	±0,13	±0,20	±0,29	±0,35	±0,420	±0,50	±0,60	±0,90	±1,25	±1,45	±1,60	±1,80	±2,60	±3,5	±4	±4,5
	NVR	±0,20	±0,29	±0,35	±0,42	±0,500	±0,60	±0,90	±1,25	±1,45	±1,60	±1,80	±2,60	±3,50	±4	±4,5	±5
TG8	VR	±0,20	±0,31	±0,45	±0,55	±0,650	±0,80	±0,95	±1,40	±2,00	±2,30	±2,60	±2,85	±4,00	±5,5	±6,25	±7
	NVR	±0,31	±0,45	±0,55	±0,65	±0,800	±0,95	±1,40	±2,00	±2,30	±2,60	±2,85	±4,00	±5,50	±6,25	±7	±7,75
TG9		±0,30	±0,49	±0,75	±0,90	±1,050	±1,25	±1,50	±2,25	±3,15	±3,60	±4,05	±4,45	±6,20	±8,5	±10	±11,50

VR: vázaný rozměr *NVR: nevázaný rozměr* *U toleranční skupiny TG9 se rozlišování vázaného a nevázaného rozměru nevyžaduje*

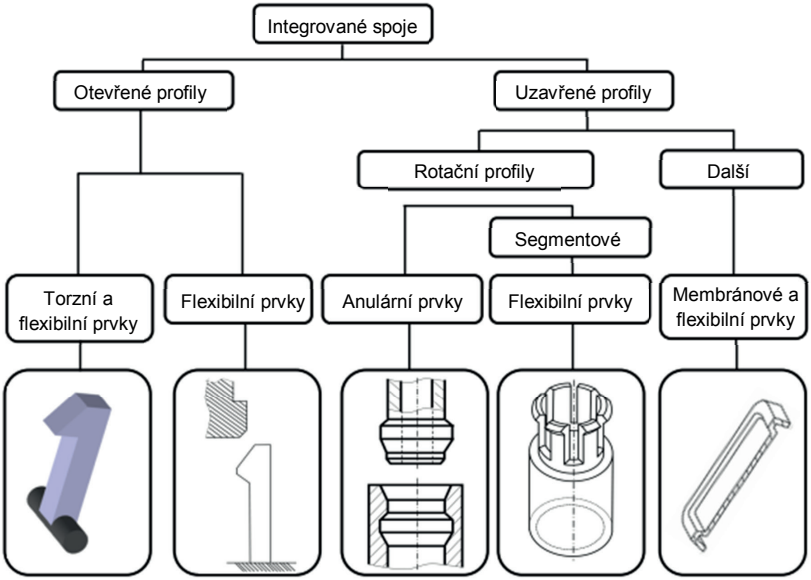
6 ZÁSADY MECHANICKÉHO SPOJOVÁNÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ

Při tvorbě konstrukčních sestav je řešena problematika *mechanického spojování plastových dílů*, přičemž využít lze několik technik vycházejících z požadavků na spoj (spoje mohou být *rozebíratelné* nebo *trvalé*) a vlastností použitých materiálů (spojování stejných nebo různých typů plastů, případně jejich kombinaci s dalšími materiály). Spoje musí být schopny udržet sestavu i při jejím zatížení působící silou navzdory omezením plastových dílů (krípu, relaxaci napětí, velké teplotní roztažnosti v porovnání s kovy apod.). Kromě standardních plastových spojů jsou v této kapitole uvedeny také spoje, které využívají kovových šroubů a vložek nebo specifické profily, které plní funkci integrovaného propojení dvou prvků, tzv. filmový nebo kloubový spoj.

6.1 Rozebíratelné spoje

Rozebíratelné spoje integrované do plastového dílu jsou nejvhodnější z ekonomického i environmentálního hlediska. Integrované spojovací prvky jsou výhodné především vzhledem k jejich ekonomické výrobě společně s plastovým dílem a jsou výhodné také z hlediska racionalizace celého procesu spojování dvou plastových výrobků (lze je však použít i na spojování jinak obtížně kombinovatelných materiálů). Z pohledu konečných aplikačních možností byly vyvinuty četné konstrukční návrhy integrovaných spojovacích prvků. Důležitým faktorem, pokud jde o výrobu dílů se západkami, je umístění vtoku způsobem, aby nedocházelo k nerovnoměrnému plnění této oblasti, bylo dosaženo příznivé orientace plniva a nevznikalo zde nadměrné vnitřní napětí.

V rámci rozdělení integrovaných rozebíratelných spojů lze zavést dvě skupiny a to *otevřené* a *uzavřené profily*. Mezi otevřené profily lze řadit klasické západky a mezi uzavřené profily patří např. trubkové spoje s různým stupněm uložení nebo sférické a cylindrické spoje, viz obr. 6.1.



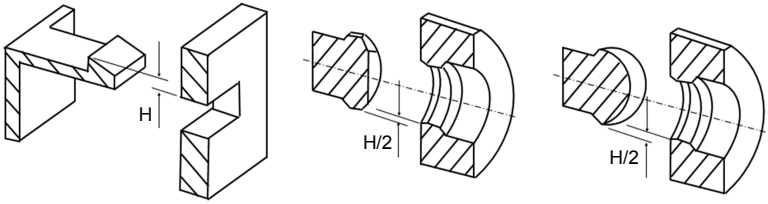
Obr. 6.1 *Základní typy integrovaných spojů dle geometrického hlediska*

6.1.1 Západkové spoje

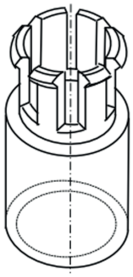
Západkové spoje poskytují velmi rychlý a levný způsob spojování plastových dílů, ale mají také svá omezení, jako je nebezpečí snížené přesnosti výsledného spoje, relativně nízké demontážní síly a možné zvýšení nároků na výrobní nástroj vzhledem k jejich integraci do dílu. Nejrozšířenějšími typy jsou *standardní západky*, *cylindické* a *sférické spoje*, viz obr. 6.2. Spojení je založeno na elastické deformaci obou členů, přičemž samotná západka je pružnější a druhý člen, který je zpravidla tužší, tvoří zámek. Západkové spoje, které jsou založeny na deformaci členu spoje krutem, jsou používány výjimečně. Po dokončení montážní operace se oba členy vrací zpět do původního tvaru nebo mohou zůstat částečně deformované. Standardní západky se deformují pouze ohybem, zatímco sférické a cylindrické spoje jsou založeny na radiálním rozpínání pouzdra. Oba tyto způsoby západkového spojení jsou tužší, ale nepřenášejí krouticí moment. Přechodovou geometrii tvoří standardní západky seskupené do kruhu, viz obr. 6.3. Cylindrické spoje jsou obecně pevnější, ale k jejich

montáži je potřeba větší síly než u západek. Vzhledem k dočasnému a krátkému působení montážních sil se u západkových spojů obecně uvažuje s vyšším přípustným napětím a nižším bezpečnostním faktorem.

Největšími riziky západkových spojů jsou koncentrátory napětí, nadměrný kríp (trvalá deformace západky, pokud se po montáži nevrátí zpět do přirozené polohy) a únavové praskliny, které vznikají při jejich opakované montáži a demontáži. Pro tyto aplikace jsou preferovány materiály, které dobře odolávají únavovému zatěžování (semikrystalické plasty s dlouhými řetězci makromolekul, které jsou schopny vytvářet strukturu s vysokým stupněm krystalinity a vysokou rázovou houževnatostí). Výběr materiálu může být proveden také na základě porovnání únavových křivek (závislosti amplitudy napětí na počtu cyklů), které představují očekávaný počet cyklů při dané teplotě a zátížení, kterému je schopen materiál odolat do porušení. Hodnocení materiálu pomocí těchto křivek je poměrně konzervativní, protože normativně stanovená frekvence zatěžování je mnohem vyšší než při reálných aplikacích západkových spojů.



Obr. 6.2 *Nejrozšířenější typy západkových spojů (zleva - standardní západky, cylindrické a sférické spoje)*



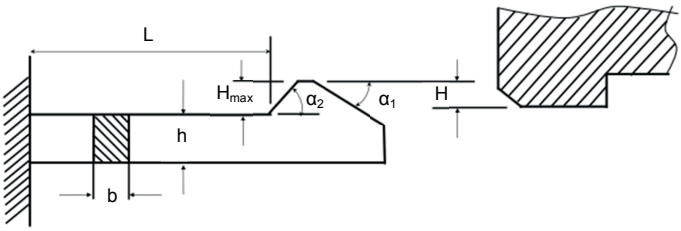
Obr. 6.3 *Standardní západky seskupené do kruhu*

Konvenční západkový spoj je tvořen samotnou západkou a protikusem tvořící zámek. Standardní západky se skládají ze dvou částí. První je nosná, která začíná v místě vetknutí západky do dílu a plynule přechází v nosník, viz obr. 6.4, jehož délka a profil určují výslednou deformaci. Nosníková část je zakončena retenčním profilem (zácvakem), který zapadne do zámku na druhém dílu sestavy. Pevnost spoje vychází z typu (interakce) mechanické vazby a z velikosti třecí síly. Síla, kterou západka přenese, může být až stokrát větší než síla, která je potřeba ke kompletaci sestavy. Pokud jde o geometrii západkových spojů, projevuje se u nich ve velké míře kríp a relaxace napětí, které mohou vést k porušení spoje. Výhody a nevýhody západkových spojů jsou souhrnně uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 *Výhody a nevýhody západkových spojů*

Výhody	▪ Snadná integrace prvku do dílu ▪ Kompaktní forma s malými požadavky na prostor ▪ Zajišťuje i další funkce (centrování, tlumení apod.) ▪ Možnost snížit počet jednotlivých prvků sestavy
Nevýhody	▪ Spojení dílů je slabší než při svařování a lepení ▪ Průvodní jevy při vstřikování mohou negativně ovlivnit funkčnost prvku ▪ Kríp při dlouhodobém namáhání prvku ▪ Problematické udržení úzkých tolerancí

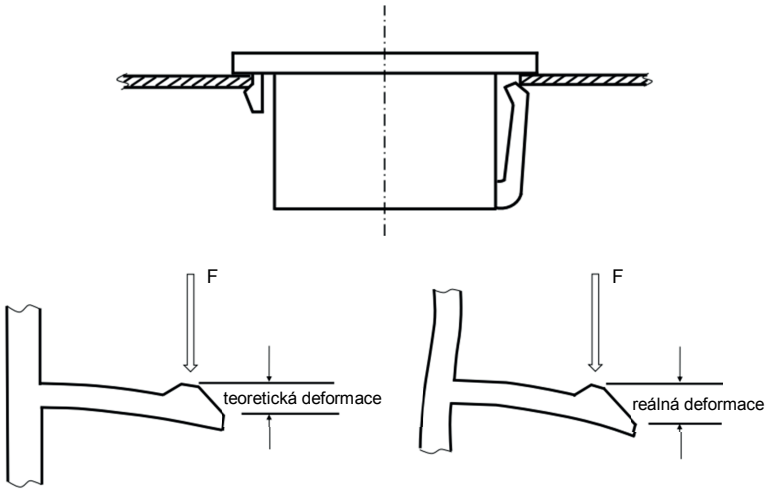
Hlavními prvky zácvaku jsou náběhový a uvolňovací úhel, přičemž uvolňovací úhel je mnohem větší než náběhový. Čím více se uvolňovací úhel blíží 90°, tím obtížnější je demontáž sestavy a v krajním případě může dojít k nerozebíratelnému spojení (uvolňovací úhel 89° ÷ 90°).



Obr. 6.4 *Schéma standardní západky*

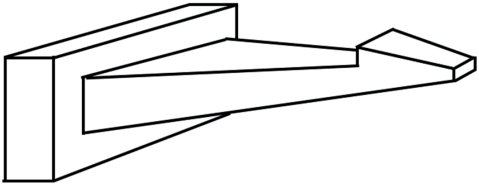
α_1 – náběhový (montážní) úhel; α_2 – uvolňovací úhel; L – délka nosníku; H – výška výběžku (retenčního prvku); b – šířka průřezu západky; h – výška průřezu západky

Celková délka západky je tvořena délkou nosníku a délkou retenčního prvku (zácvaku). Pro stanovení potřebného průhybu je uvažována pouze nosníková část a výška zácvaku. Ostatní geometrie profilu retenčního prvku spolu s jeho délkou mohou být řešeny až v následných vývojových krocích. Délka nosníkové části by měla být (5 ÷ 10)násobek jeho tloušťky v místě vetknutí. Vyšší poměry délky k tloušťce nosníku jsou vhodnější pro tuhé a křehké plasty. Pokud je však delší než 10násobek tloušťky stěny, může dojít k problémům s plněním profilu během vstřikování a s jeho tvarovou deformací. Kratší nosník bude výrazným způsobem deformovat i stěnu výrobku, viz obr. 6.5. Délka nosníkové části, která zajišťuje, aby nedocházelo k deformaci stěny v místě vetknutí, odpovídá poměru (8 ÷10) : 1. Pro přesnější odhad deformace krátkých nosníků byl zaveden tzv. faktor deformace, který by měl být použit spolu s konvenčními vzorci. Výsledná deformace se zvyšuje s plným využitím potenciálu dané konstrukce. Při návrhu nového západkového spoje je doporučeno ověřit si jeho deformačně-pevnostní chování metodou konečných prvků (FEM) nebo pomocí prototypových dílů (prototypy z 3D tisku, nebo výrobky z prototypové formy, které přesněji odpovídají finálnímu výrobku).



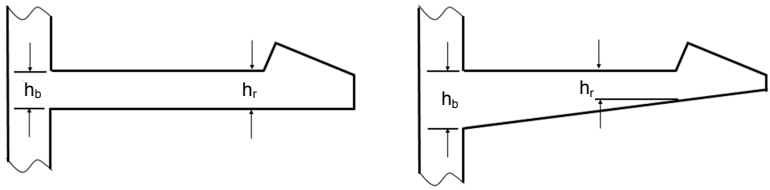
Obr. 6.5 *Konstrukce obtížně a snadno deformovatelných západek (nahoře) a deformace stěny výrobku vlivem krátké nosníkové části západky (dole)*

Šířka nosníkové části západky, viz obr. 6.6, ovlivňuje také velikost montážní a demontážní síly. Výsledná deformace ale není přímou funkcí šířky nosníku. Tímto parametrem je možné pouze mírně regulovat pevnost spoje. Pro většinu aplikací je používána konstantní šířka. Obecně je doporučováno, aby šířka nosníku byla menší než jeho délka (maximálně by měla být rovna délce nosníkové části).



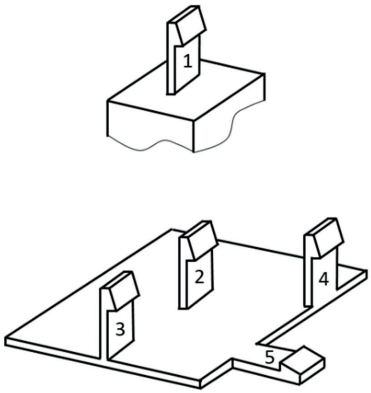
Obr. 6.6 *Šířka nosníkové části západky*

Pro optimální využití materiálu v nosníkové části západky je mnohem efektivnější kónický design profilu (ca o 50 %), kdy je napětí po celé délce západky rozloženo mnohem rovnoměrněji, viz obr. 6.7. Optimální poměr tloušťky nosníku ve vetknutí a v oblasti retenčního členu je 1: (0,8 ÷ 0,4). Většího ztenčení v daném rozmezí se využívá pro kratší západky, ale snižuje se síla, kterou je schopen spoj přenést než dojde k jeho demontáži nebo porušení.



Obr. 6.7 *Původní (vlevo) a optimalizovaný (vpravo)í kónický design nosníkové části západky*

Směr vetknutí nosné části západky do stěny dílu může být různý, viz obr. 6.8. Pokud je kolmý na přilehlou stěnu, doporučuje se tloušťka vetknutí (50 ÷ 60) % tloušťky stěny. Při použití tenčího nosníku může dojít k problémům se zaplněním profilu. Silnější profily mohou v oblasti vetknutí tvořit propadliny. Pokud je nosník prodloužením stěny výrobku, jeho tloušťka by měla být shodná s tloušťkou dílu.

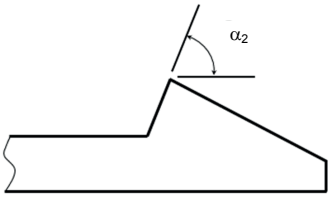


Obr. 6.8 *Možné směry vetknutí nosné části západky do stěny dílu (pozice 1,2 a 3 vykazují nejnižší sklony k deformaci, pozice 4 a 5 naopak nejvyšší)*

Výška retenčního prvku (H) určuje potřebnou míru deformace západky. Reálně potřebná deformace je však nižší, protože dochází současně i k deformaci západky. Deformace nabývají poměrně významných hodnot, proto modul pružnosti zjištěný z krátkodobých testů nelze použít a využívá se sekantového modulu (viz kap. 5.2), který je definován maximální přípustnou deformací, viz tab. 6.2. Trvalé zatížení (deformace) západek po montáži se nedoporučuje s ohledem na kríp a relaxaci napětí. Při poměru délka/tloušťka nosníku 5:1 by měla být výška retenčního prvku menší než je tloušťka nosníku v jeho vetknutí. Při poměru 10:1 může být výška výstupku rovna tloušťce nosníku.

Velmi významnými parametry retenčního prvku jsou *náběhový* a *uvolňovací úhel*. Čím větší je náběhový úhel, tím vyšší montážní síly je potřeba. Běžně užívané úhly se pohybují v rozsah 25° ÷ 35° (nejčastěji 30°). Úhly nad 45° se nepoužívají, protože montáž se jimi výrazně komplikuje. Během návrhu se začíná s nejmenším použitelným úhlem a postupně se zvyšuje. Uvolňovací (separační) úhel definuje velikost síly potřebné pro deformaci nosníku při demontáži západkového spoje. Pro aplikace, kde nepůsobí žádná demontážní síla proti západkovému spoji, je možné použít uvolňovací úhel 35°. Tento úhel se využívá u spojů, které jsou konstruovány často jako rozebíratelné, aby se snížila velikost cyklického zatěžování západky a zámku. S klesajícím počtem uvažovaných cyklů může být uvolňovací úhel vyšší (přibližně 45°). Pokud má spoj přenášet velká zatížení, aniž by došlo k jeho uvolnění, jsou doporučeny úhly nad 80°, které tvoří hranici pro nerozebíratelné spoje.

Soudržnost spoje je dána uvolňovacím úhlem, ale také třením mezi oběma díly sestavy. Při vzájemném koeficientu tření $>$ 0,3 se uvolňovací úhel o velikosti 80° chová už jako pravý úhel (nerozebíratelný spoj). Tento rozdílový úhel (viz obr. 6.9), který je využíván především kvůli větší robustnosti retenčního elementu a lepší odformovatelnosti, lze určit z rovnice (45). Průběh montážní a demontážní síly je možné také vhodně upravit zakřivením profilů místo rovinné plošky na náběhové a/nebo retenční části západky.



α_2 ~ 45° pro uvolnění spoje bez potřeby vnějšího zatížení

α_2 > 55° pro uvolnění spoje za použití nízkého vnějšího zatížením

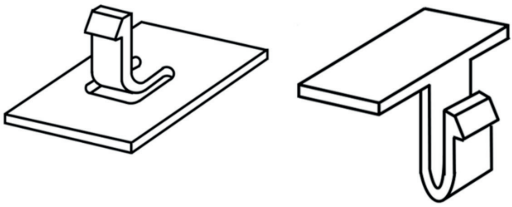
α_2 ~ 80° ÷ 90° pro nerozebíratelné spoje

Obr. 6.9 *Možnosti konstrukce retenční plochy západky*

Dalším faktorem snižující pevnost spoje je deformace stěny v oblasti vetknutí západky. Reálná deformace této oblasti zvyšuje celkový průhyb západky a navyšuje se tak úhel vychýlení od nezatížené polohy, což snižuje sílu potřebnou pro jeho oddělení. Tento jev je zohledněn deformačním faktorem, viz níže. Na velikost celkové deformace při kompletaci spoje v reálných podmínkách má významný vliv i deformace členu, který tvoří protějšek západky (zámek), a to především pokud je tento protikus z houževnatého a dobře deformovatelného materiálu v porovnání s materiálem západky. Účinek deformace zámku je podobný jako deformace stěny v místě vetknutí. Vhodné určení potřebné montážní síly lze pomocí grafického porovnání deformací obou členů (každý je deformován absolutně tuhým tělesem). Pro určení profilu křivek je potřeba znát pouze dva až tři body. Při výpočtu deformace zámku se jako výchozí bod používá výška retenčního prvku. Deformace zámkového členu je v porovnání s deformací západky záporná. Superponováním obou průběhů vznikne průsečík, který je určující pro skutečnou sílu potřebnou pro montáž i demontáž spoje.

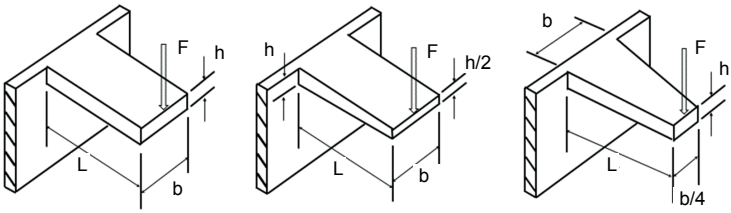
Pro určité aplikace nemohou být použity standardní tvary západek, zejména v případech, kdy nelze s ohledem na zástavbový prostor dodržet výše uvedená základní doporučení. Pokud je potřeba dále zvýšit flexibilitu západkového spoje

podmíněnou zvýšením délky západky, jsou nejčastěji využívány profily ve tvaru písmen „U“ a „L“, viz obr. 6.10. Zvýšená možnost deformace těchto geometrií umožňuje použít i relativně tužší materiály. Profil “L” může být konstruován na okraji výrobku nebo může být umístěn do uzavřené plochy, pak je ale nezbytné kolem nosníku vytvořit štěrbinu, která nemusí být pro všechny aplikace akceptovatelná. Profil “U” poskytuje spoji ještě vyšší stupeň flexibility (je vhodný i pro materiály plněné vyšším procentem skelných vláken), ale musí být používán s rozvahou, aby zbytečně nekomplikoval vyrobitelnost daného dílu, především jeho odformování z formy.



Obr. 6.10 *Profily západek ve tvaru písmen „U“ a „L“ pro lepší schopnost deformace západky*

Při počátečních pevnostních výpočtech západkových spojů je nutné vzít v úvahu obecně několik faktorů. Jedním z nich jsou oblasti koncentrace napětí, které snižují maximální použitelnou deformaci dané konstrukce. Koncentraci napětí je možné snížit použitím rádiusů, viz kap. 4.3. Pro prvky namáhané na ohyb je dále vhodné vycházet z mechanických vlastností naměřených při ohybových analýzách. Pokud nejsou tyto k dispozici, používají se charakteristiky získané při tahovém zatěžování. Materiály s výraznou mezí kluzu je možné pro nerozebíratelná spojení zatěžovat do deformace odpovídající až 70 % deformace na mezi kluzu, resp. až 40 % pro případy s opakovatelnou montáží a demontáží. Při použití materiálu bez výrazné meze kluzu se pro nerozebíratelný spoj využívá hodnoty maximálně do 50 % deformace na mezi pevnosti, resp. pro rozebíratelný spoj až 30 %. Integrita spoje je řízena tuhostí kotevní části západky a mírou jejího požadovaného průhybu. Tuhost kotevní části může být zvýšena změnou materiálu nebo zvýšením momentu setrvačnosti. Rovněž platí, že čím vyšší je samotný zácvak, tím větší deformace je potřebná k jeho uvolnění. Maximální deformace obou částí spoje vyvolaná působícím napětím nesmí překročit deformační limit daného plastu / geometrie. Vliv konstrukce nosné části na celkovou tuhost zácvaku je zřejmý z obr. 6.11.

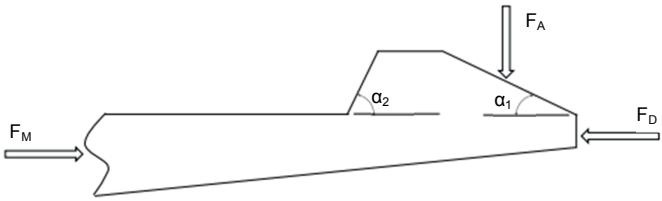


Obr. 6.11 *Vliv designu nosné části na celkovou tuhost zácvaku*

Montážní a demontážní síla je funkcí ohybové tuhosti profilu a tření. Velikosti přípustných deformací pro vybrané neplněné plasty jsou uvedeny v tab. 6.2. Pokud je západka konstruována jako nerozebíratelný spoj, je možné využít až dvojnásobek doporučených hodnot deformací, kterým je krátkodobě vystavena.

Montážní (F_M) a demontážní sílu (F_D) lze vyjádřit rovnicí (45), kde (μ) je koeficient tření, (F_A) deformační síla, význam ostatních symbolů je uveden na obr. 6.12:

$$F_M = F_A \cdot \frac{\mu + tg\ \alpha_1}{1 - \mu \cdot tg\ \alpha_1}\ [N] \tag{45}$$



Obr. 6.12 *Schématické znázornění symbolů pro výpočet velikosti montážní a demontážní síly západkového spoje*

Pro demontáž se ve výpočtu pouze nahradí náběhový úhel vodící plochy (α_1) za separační úhel kotvící plochy (α_2). Jedná se o rovnici využívající řadu zjednodušení, která zahrnuje pouze obecné charakteristiky materiálu a geometrie. Je však vhodná pro prvotní odhad funkčnosti spoje.

Při obdélníkovém průřezu nosníkové části západky, který je konstantní po celé délce (L), je maximální průhyb (y) vyvolaný deformační silou (F_A):

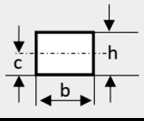
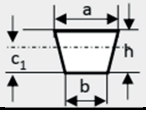
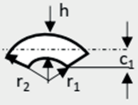
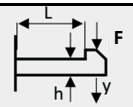
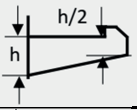
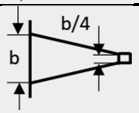
$$y = \frac{2}{3} \cdot \frac{L^2}{h} \cdot \varepsilon\ [mm] \tag{46}$$

$$F_A = \frac{b \cdot h^2 \cdot E_s}{6 \cdot L} \cdot \varepsilon \ [N] \qquad (47)$$

kde (E_s) je sekantový modul, (L) délka nosníku, (h) výška (tloušťka) nosníku, (b) šířka nosníku a (ε) max. povolená deformace.

Tato rovnice předpokládá, že maximální deformaci je vystavena pouze nosníková část západky. V reálných aplikacích se částečně deformuje i stěna výrobku, ve které je západka vetknuta a výsledná deformace nosníku je tak menší. Tento rozdíl může být vnímán jako bezpečnostní faktor. Rovnice pro stanovení průhybů a průřezových charakteristik nosníků jsou pro nejpoužívanější průřezy uvedeny v tab. 6.2.

***Tab. 6.2** Průhyby a průřezové charakteristiky nejpoužívanějších průřezů*

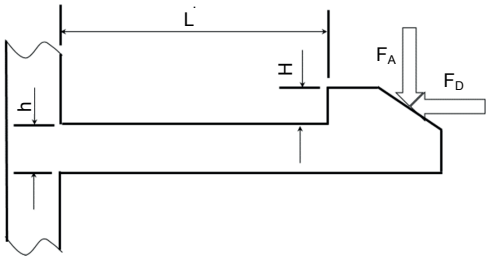
		Profil průřezu: obdélníkový, lichoběžníkový, prstencový		
				
Provedení	Profil 1 	$y = 0{,}67 \cdot \varepsilon \cdot L^2 / h$	$y = (a + b_{(1)}) \cdot \varepsilon \cdot L^2 / [(2a + b) \cdot h]$	$y = K \cdot \varepsilon \cdot L^2 / r_2$
	Profil 2 	$y = 1{,}09 \cdot \varepsilon \cdot L^2 / h$	$y = 1{,}64 \cdot (a + b_{(1)}) \cdot \varepsilon \cdot L^2 / [(2a + b) \cdot h]$	$y = 1{,}64 \cdot K \cdot \varepsilon \cdot L^2 / r_2$
	Profil 3 	$y = 0{,}86 \cdot \varepsilon \cdot L^2 / h$	$y = 1{,}28 \cdot (a + b_{(1)}) \cdot \varepsilon \cdot L^2 / [(2a + b) \cdot h]$	$y = 1{,}28 \cdot K \cdot \varepsilon \cdot L^2 / r_2$
Deformační síla	Profil 1 Profil 2 Profil 3	$F = b \cdot h^2 \cdot E_s \cdot \varepsilon / (6l)$	$W = W \cdot E_s \cdot \varepsilon / l$	$F = W \cdot E_s \cdot \varepsilon / l$

E_s - sekantový modul, y - přípustný průhyb, I - moment setrvačnosti, W - průřezový modul, F - deformační síla, K - geometrický faktor

Pro snížení míry deformace mohou být v zásadě změněny čtyři prvky. Potřebná síla se sníží postupným zúžením nosníkové části. Tato kónická geometrie zlepší distribuci napětí po celé délce západky. Lepší míru deformace vykazuje také delší

nosníková část západky (při výpočtu průhybu se uvažuje s druhou mocninou této délky). Čím větší je šířka výběžku (b), tím větší je potřebná deformační síla. Pokud se zmenší výběžek (H), zmenší se i požadovaná deformace, nevýhodou však je nebezpečí snížení pevnosti spoje. Pro čtvercový průřez nosné části lze určit maximální výšku výběžku z rovnice (48), kde (L) je délka nosníkové části, (h) tloušťka (výška) nosníkové části a (ε_{max}) max. přípustná deformace, viz obr. 6.13:

$$H_{max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{L^2}{h} \cdot \frac{\varepsilon_{max}}{100} \ [mm] \qquad (48)$$

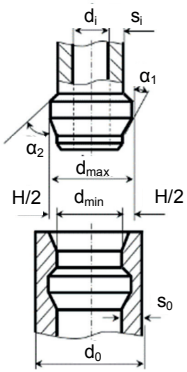


Obr. 6.13 *Schématické znázornění symbolů pro výpočet maximální výšky výběžku západkového spoje*

Jak bylo uvedeno výše, při reálné deformaci nosníku dochází také k průhybu stěny, ve které je ukotven. Jeho výsledné napětí a deformace jsou tedy menší než vypočtené hodnoty. Větší deformace přilehlé stěny se projevuje u kratších západek a je do výpočtu zohledněna deformačním faktorem. Použití deformačního faktoru zpřesňuje velikost deformace pro dané zatížení, což vede ke stanovení nižších montážních a demontážních sil, a tím ke snížení síly, kterou je schopen spoj přenášet. Ve standardních výpočtech je pro krátké západky definován mnohem menší průhyb, než který je uvažován u vetknutých nosníků. Stěna, na kterou je západka napojena, je uvažována jako zcela tuhá, což lze předpokládat u delších západek. Při deformaci krátkých západek ale dochází k výrazné deformaci stěny výrobku.

6.1.2 Cylindrické spoje

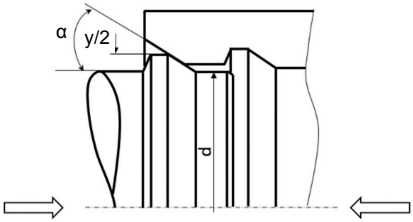
Cylindrické (anulární nebo prstencové) *spoje*, viz obr. 6.14, jsou využívané pro spojování kruhových a eliptických dílů. Geometrie spoje je specifická především tvarem pouzdra, které je tvořeno dutinou nebo průchozím otvorem s podkosem. Podkosy jsou problematické především z hlediska odformování dílu z výrobního nástroje (viz kap 4.6), proto je s výhodou používáno především houževnatých plastů.



Obr. 6.14 *Základní rozměry a značení cylindrických / anulárních spojů*
d_{max} – největší průměr cylindrického spoje; d_{min} – nejmenší průměr cylindrického spoje; d_0 – průměr vnějšího dílu; s_0 – tloušťka stěny vnějšího dílu; d_i – průměr vnitřního dílu; s_i – tloušťka stěny vnitřního dílu; α_1 – náběhový úhel; α_2 – uvolňovací úhel

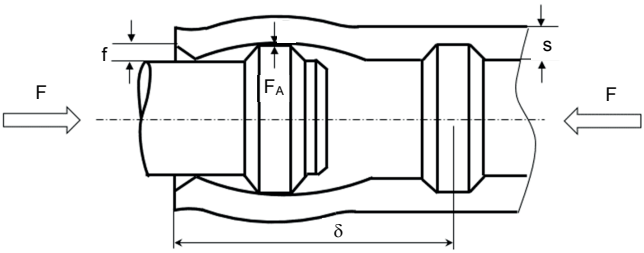
Plasty plněné sklem nebo jinými vyztužujícími aditivy nejsou pro tyto aplikace příliš vhodné. Tuhost spoje je závislá na tloušťce stěny pouzdra (tuhosti pouzdra) a na vzdálenosti upevňovacích prvků od místa, kde začíná působit montážní síla při kompletaci spoje. Upevňovací prvky jsou umístěny do vzdálenosti vyjádřené rovnicí (49), kde (d) je průměr hřídele a (s) tloušťka stěny trubky, viz obr. 6.15.

$$\delta \approx 1{,}8\sqrt{d \cdot s}\ [mm] \qquad (49)$$

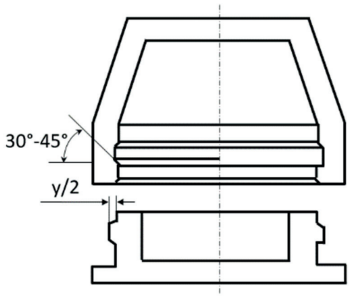


Obr. 6.15 *Umístění fixačních elementů cylindrického spoje*

Pokud jsou upevňovací prvky umístěny ve větší vzdálenosti (odlehlé od okraje pouzdra), je deformační a montážní síla zjednodušeně uvažována za konstantní. Čím blíže jsou upevňovací prvky k okraji pouzdra, tím menší je jeho deformace a montážní síla klesá až na 1/3 ve srovnání se silou, která je potřebná pro kompletaci spoje s upevňovacími prvky vzdálenými od okraje pouzdra, viz obr. 6.16. Cylindrické spoje nepřenáší krouticí moment.



Obr. 6.16 *Fixační prvky odlehlé vůči okraji nábojnice*



Obr. 6.17 *Geometrie fixačního prvku pro rozebíratelné spoje*

Pro snazší montáž je výhodné použít na hřídeli náběh pod úhlem 20° ÷ 30°. Uvolňovací úhel pro rozebiratelné spoje má nejčastěji velikost 30°÷ 45° a pro nerozebiratelné spoje 90°, viz obr. 6.17.

Pro dimenzování pouzdra je především důležitá kontrola obvodového napětí. Pro čistě kruhové geometrie spoje s konstantní tloušťkou stěny je možné odvodit deformaci z rozdílu průměrů spojovacích elementů na hřídeli a pouzdře, přičemž pouzdro je roztahováno a hřídel stlačována. Pokud je v rámci spoje jedna část tvořena plastem a druhá pevnějším materiálem (např. kovem, sklem apod.), měl by být plastový díl stlačován, protože plasty vykazují mnohem lepší pevnostní charakteristiky v tlaku než v tahu. Vzhledem k tomuto způsobu deformace se kruhové uspořádání standardních západek, viz obr. 6.18, nepovažuje za cylindrický spoj, neboť jsou při kompletaci spoje deformovány hlavně ohybem.

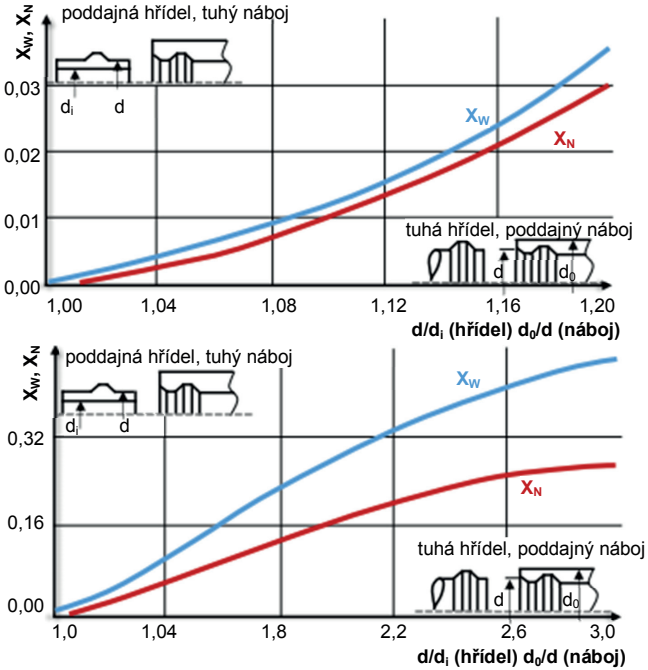
Výpočet montážní síly je u cylindrických spojů komplexnější, protože dochází ke znatelné deformaci pouzdra na relativně velké ploše kolem montážního prvku. Maximální dovolená deformace pouzdra je u tvrdých materiálů nejčastěji definována jako 50 % deformace na meze pevnosti, u houževnatých materiálů se limit posouvá až na (60 ÷ 70) % deformace na mezi kluzu. Deformační síla působící radiálně na osu spoje je pro přilehlé upínací prvky zjednodušeně definována rovnicí (50):

$$F_A = f \cdot d \cdot E_S \cdot X \ [N] \tag{50}$$

kde (f) je výška upevňujícího prvku, (X) je faktor geometrie, (d) vnitřní průměr a (E_S) sekantový modul. Faktor geometrie zohledňuje tuhost hřídele a pouzdra, viz obr. 6.18.

Pokud je náboj (vnější spojovací část) poddajný (houževnatý) a hřídel (vnitřní část) tuhá, pak faktor geometrie ($X = X_N$) nabývá hodnoty dle rovnice 51, kde (d_0) je vnější průměr trubky, (d) průměr ve spoji a (υ) Poissonovo číslo materiálu náboje:

$$X_N = 0{,}62 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\left(\frac{d_0}{d}-1\right)}{\left(\frac{d_0}{d}+1\right)}}}{\frac{\left[\left(\frac{d_0}{d}\right)^2+1\right]}{\left[\left(\frac{d_0}{d}\right)^2-1\right]^2}+\nu} \tag{51}$$



Obr. 6.18 *Faktor geometrie zohledňující tuhost hřídele a pouzdra*

V případě, že je náboj tuhý a hřídel poddajná, potom je geometrický faktor dán rovnicí (52), kde (d_i) je průměr dutiny v hřídeli, (d) průměr ve spoji a (υ) Poissonovo číslo materiálu hřídele:

$$X_W = 0{,}62 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\left(\frac{d}{d_i}-1\right)}{\left(\frac{d}{d_i}+1\right)}}}{\frac{\left[\left(\frac{d}{d_i}\right)^2+1\right]}{\left[\left(\frac{d}{d_i}\right)^2-1\right]^2}-\nu} \qquad (52)$$

Výsledná montážní síla je vyjádřena rovnicí (53), kde (F_P) je síla rozevírající pouzdro (náboj), (α) náběhový úhel a (μ) koeficient tření.

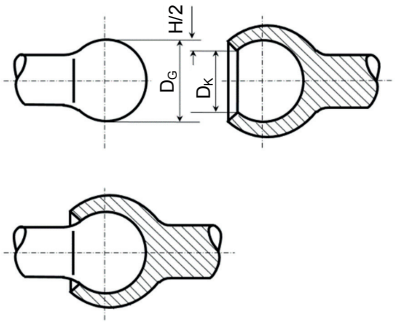
$$F_M = F_A \cdot \frac{\mu + tg\ \alpha}{1 - \mu \cdot tg\ \alpha}\ [N] \qquad (53)$$

Maximální použitelný přesah je definován mechanickými vlastnostmi materiálu (maximální přípustnou deformací), viz rovnice 54, kde (d) je vnější průměr hřídele.

$$H_{max} = \frac{\varepsilon_{max}}{100} \cdot d \ [mm] \tag{54}$$

6.1.3 Sférické spoje

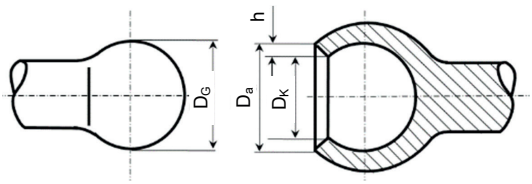
Sférické spoje jsou další variantou cylindrických spojů, které jsou tvořeny pouzdrem, odpovídající přesnému negativu kulovitého protikusu, viz obr. 6.19. Sférické spoje však umožňují rotační pohyb ve všech směrech s výrazně menším omezením.



Obr. 6.19 *Schéma sférického spoje*

Způsob deformace pouzdra je velmi podobný jako u cylindrických spojů, při montáži je rozevřeno kulovitým protikusem. Na rozdíl od cylindrických spojů se sférické spoje konstruují pouze ve variantě s fixačními prvky přilehlými k okraji dílu. Velikost přesahu (viz obr. 6.19) je vyjádřena rovnicí (55):

$$H = D_G - D_K \ [mm] \tag{55}$$

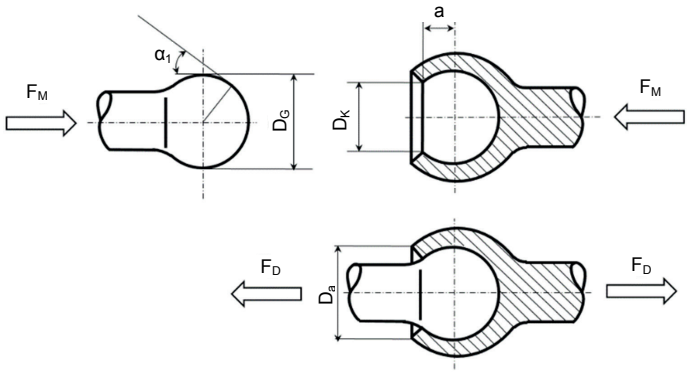


Obr. 6.20 *Základní rozměry sférického spoje*

Celková deformace pouzdra během kompletace spoje je:

$$\varepsilon = \frac{H}{D_K} \cdot 100 \ [\%] \tag{56}$$

Potřebnou montážní (F_M) a demontážní sílu (F_D), viz obr. 6.21, lze vypočítat z rovnice (57), kde (p) je tlak ve spoji, který je vyvíjen pouzdrem na kulovitý protikus, viz rovnice (58), (D_G) průměr kloubu, (a) délka deformace a (μ) koeficient tření.



Obr. 6.21 *Schématické znázornění symbolů definujících pevnost sférického spoje*

$$F_M = F_D = p \cdot \pi \cdot D_G^2 \cdot \frac{a}{D_G} \cdot \frac{\mu + tg\alpha}{1 - \mu \,.\, tg\alpha} \ [N] \tag{57}$$

$$p = \frac{h}{D_K} \cdot E_S \cdot \frac{1}{X} \ [Pa] \tag{58}$$

Výška podkosu je značená (h), viz obr. 6.20, (D_K) otevírací průměr pouzdra, (E_s) sekantový modul a (X) geometrický faktor, viz rovnice (59).

$$X = \frac{\left(\frac{D_a}{D_K}\right)^2 + 1}{\left(\frac{D_a}{D_K}\right)^2 - 1} + 1 \tag{59}$$

6.1.4 Torzní západky

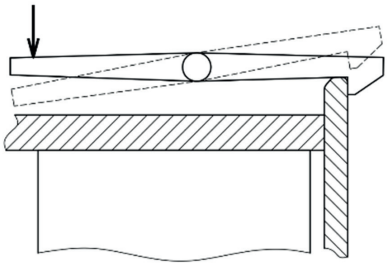
Pro častou a jednoduchou montáž a demontáž jsou *využívány torzní západky*, jež jsou však z výrobního hlediska poměrně složité na odformování z výrobního nástroje. Deformovaný prvek torzních západek je představován integrovanou hřídelkou, která je namáhána především krutem, viz obr. 6.22. Zatímco u standardních západek je s ohledem na rozebiratelnost spoje určujícím prvkem velikost odformovacího úhlu, u torzní západky se většinou pro dosažení potřebné přítlačné síly vůči protikusu v sestavě používá separační úhel o velikosti 85° ÷ 90° a o rozebiratelnosti spoje rozhoduje umístění hřídelky vůči fixační části západky (zobáčku, viz obr. 6.23). Rozebíratelný spoj torzní západky je založen na pákovém mechanismu, který umožňuje použít relativně malé demontážní síly i pro velmi pevný spoj. Míra zkroucení by měla být co nejmenší, jen aby byla fixační část západky vysunuta ze zámku. Minimální úhel rotace (φ) je tedy definován výškou zácvaku (f) a jeho vzdáleností od osy hřídelky (l), viz obr. 6.24.

$$\varphi = \frac{\pi \cdot f}{180 \cdot l} \tag{60}$$

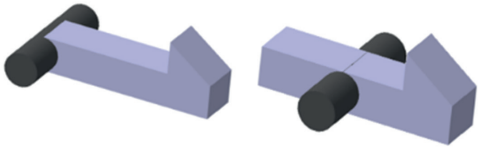
Potřebná síla na odchýlení (deformaci) západky je vyjádřena rovnicí (61),

$$F_A = \frac{\pi^2 \cdot r^4 \cdot E \cdot f}{180 \cdot l^2 \cdot l_T} \ [N] \tag{61}$$

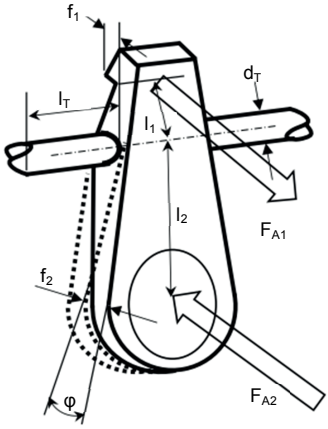
kde (r) je poloměr hřídelky (torzní tyče) a (l_T) její délka. Při použití pákového mechanismu je potřebná síla na demontáž ovlivněna délkou páky.



Obr. 6.22 *Schéma torzní západky*



Obr. 6.23 *Možné umístění hřídelky (nerozebíratelný spoj vlevo, rozebíratelný vpravo)*



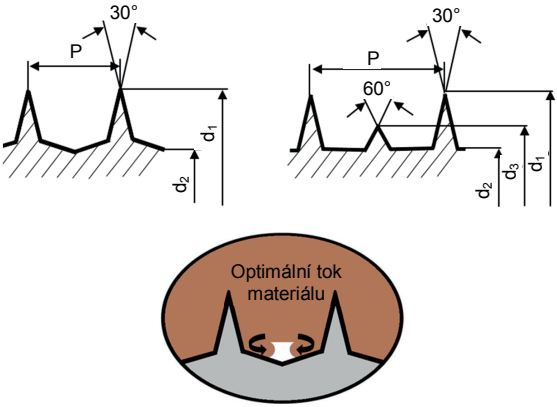
Obr. 6.24 *Rozměry a značení geometrie torzní západky*

$F_{A1,2}$ – deformační síly; l_T – délka torzní tyče; d_T – průměr torzní tyče; φ - torzní úhel; $f_{1,2}$ – pružná dráha (výška) zácvaku; $l_{1,2}$ – délka ramene páky

6.2 Šroubové spoje

Další možností rozebíratelného spojení plastů (vzájemného nebo i s jinými materiály) je využití *šroubových spojů*. Při použití kovových šroubů jsou u plastových dílů využívány nejčastěji tzv. montážní komínky (výstupky se slepým nebo průchozím otvorem), jejichž konstrukce se vyznačuje určitými specifiky. V současnosti existuje široká škála geometrií šroubů (závitů), které umožňují přenášet relativně velká zatížení, aniž by bylo do montážních komínků vnášeno velké vnitřní napětí. Šrouby rozdělujeme v zásadě na *závitořezné* a *závitotvorné*. Závitořezný typ se zachytí v montážním komínku vyřezáním závitu za současného odstranění materiálu, zatímco závitotvorný typ zajišťuje svojí geometrií tok materiálu za studena uvnitř

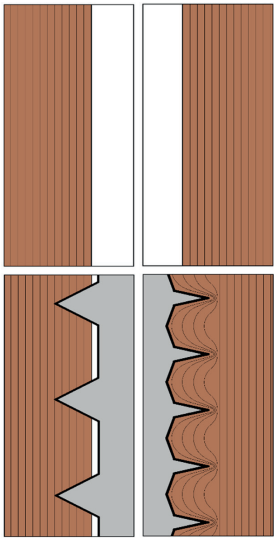
montážního komínku během spojování dílů, aniž by byl materiál fyzicky odstraněn. Závitotvorné šrouby mohou být dotahovány na vyšší moment při menším riziku stržení závitu v montážním komínku. Přesun materiálu však způsobuje velké vnitřní napětí, a proto jsou používány především při spojování houževnatých materiálů. Šrouby do plastů by měly mít malý úhel závitu (30° - 40°) a relativně velké stoupání (P), viz obr. 6.25.



Obr. 6.25 *Ukázka profilů šroubů vhodných do plastů s optimálním tokem materiálu při zašroubování*

Úhel závitu 30° snižuje obvodové napětí, které je vyvolané standardně používanými šrouby pro ocele (úhel závitu 60°). Závitořezné šrouby vyžadují pro zavedení do montážního komínku menší utahovací moment a zároveň snižují obvodové napětí. Nevýhodou je malá opakovatelnost montážního procesu. Jsou vhodné pro křehké materiály (amorfní plasty, plasty vyztužené skelným vláknem apod.), viz obr. 6.26. Pokud je úhel závitu v rozmezí 8°÷ 10° nebo menší (menší než je třecí úhel vyjádřený rovnicí (62)), tak šroub nemá tendenci se samovolně povolovat (axiální síly nevyvolávají žádný moment). Tento efekt se zvyšuje také např. při použití jiného než kruhového průřezu šroubu, viz obr. 6.27.

$$f = \mathrm{tg}\,\phi \qquad (62)$$

Závitořezné šrouby		Závitotvorné šrouby
Narušení kontinuity materiálu jeho odebíráním bez tečení plastu		Materiál není vyřezáván ale tvářen uvolněným teplem a geometrií závitu
Menší kontaktní (třecí) plocha mezi šroubem a plastem		Maximální kontaktní (třecí) plocha mezi šroubem a plastem
Díra pro šroub by měla být dostatečně hluboká pro třísky vyříznuté závitem		Pevnější spoj, lépe odolává vibracím

Obr. 6.26 *Rozdíl mezi závitořezným a závitotvorným šroubem*

Obr. 6.27 *Nekruhový průřez šroubu*

Závitořezné šrouby jsou preferovány především pro tuhé, křehké materiály (vyztužené plasty, reaktoplasty apod.) a závitotvorné jsou využity především u termoplastů. Při výběru vhodného typu šroubu je zvažována tuhost plastu. Materiál s modulem pružnosti $< 1\,500$ MPa je vhodný pro závitotvorné šrouby (materiál se deformuje bez výrazného nárůstu obvodového napětí), u materiálů s modulem pružnosti (1 500 až 3000) MPa je možné použít oba dva typy (preferovány jsou však závitořezné) a pro plněné plasty s modulem pružnosti v rozmezí $(3\,000 \div 7\,000)$ MPa jsou nejvhodnější závitořezné šrouby. Materiály s modulem pružnosti $> 7\,000$ MPa (s vysokým stupněm plněním) jsou velmi křehké a mezi závity se drolí, a proto se pro ně doporučují šrouby s velmi jemným závitem (typ T). Opakované použití šroubu je

však velmi obtížné (používají se kovové vložky nebo postupně šrouby s větším průměrem, pokud to velikost montážního komínku dovolí). Pro maximální využití potenciálu materiálů jsou navrženy speciální tvary kovových šroubů, které jsou určeny pro plastové díly. Typ AB a B jsou závitořezné šrouby určené pro vysoké rychlosti utahování. Typ BP je opatřen kuželovitou špičkou s úhlem 45° pro lepší navádění šroubu do otvoru. Typ U je závitořezný šroub pro trvalý spoj (není doporučený pro opakovanou demontáž).

Šroubové spoje dimenzujeme na sílu a/nebo moment:

- *Omezujícím faktorem pevnosti spoje* je ***maximální síla***, kterou může být spoj zatížen před vytržením šroubu. Tato síla je dána především průměrem šroubu, materiálem montážního komínku a délkou závitu, který je v interakci s komínkem. Síla potřebná k vytržení šroubu (F) může být vypočítána s použitím rovnice (63), kde (d_1) je vnější průměr šroubu, (l_S) akční délka závitu, (τ_y) limitní smykové napětí a (S) bezpečnostní faktor:

$$F = \frac{d_1 \cdot \pi \cdot l_S \cdot \tau_Y}{S} \ [N] \tag{63}$$

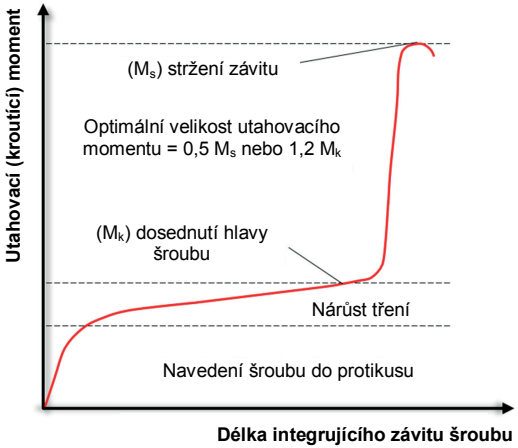
Smyková pevnost materiálu (τ_y) může být určena z meze kluzu nebo meze pevnosti, viz rovnice (64):

$$\tau_Y = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \ nebo \ \frac{\sigma_B}{2} \ [Pa] \tag{64}$$

Smyková pevnost materiálu může být nahrazena konstrukčním napětím, které se stanovuje ze standardních krípových křivek dle předpokládané doby životnosti spoje. Při dimenzování šroubového spoje se běžně používá bezpečnostní faktor 2 až 3.

- *Dalším funkčním omezením bývá* ***maximální utahovací moment***, po jehož překročení dojde ke stržení závitu v plastu. Utahovací moment by měl být alespoň 1,2krát větší než moment, který je potřebný pro vytvoření závitu, ale neměl by přesáhnout polovinu maximálního momentu, který způsobuje stržení závitu. Protože dovolená deformace u plastů souvisí výrazně s deformační rychlostí, je třeba uvážit i maximální otáčky. Pro automatickou montáž se doporučuje 500 ot/min. Při vyšších rychlostech dochází k natavení materiálu. Potřebný utahovací moment se zvyšuje přibližně až do hloubky 2,5krát větší, než je průměr šroubu a je závislý na koeficientu tření a poměru velikosti mezi průměrem šroubu a otvorem montážního výstupku.

Schéma růstu potřebného utahovacího momentu v montážním komínku je zobrazeno na obr. 6.28.



Obr. 6.28 *Diagram růstu potřebného utahovacího momentu v montážním komínku*

Rovnice pro výpočet minimálního momentu potřebného pro tvorbu závitu má podobu:

$$M_S = \frac{\sigma_Y \cdot (d_1 - d_0)}{\sqrt{3}} \cdot \left[tg\frac{\beta}{2} + \sqrt{\left(1 + tg^2\frac{\beta}{2}\right)\left(\frac{d_1 + 2\,.\,d_0}{3}\,.\,\pi\right)^2 + P^2\,.\,\left(\frac{d_1 + 2\cdot d_0}{6}\right)} \right.$$

$$\left. + \frac{(1+\alpha)\cdot\mu\cdot l_S\cdot(d_1 - d_0)}{4\cdot P\cdot cos\frac{\beta}{2}} \sqrt{\frac{d_1 + d_0}{2}\cdot\pi + P^2} \right] \; [Nm] \qquad (65)$$

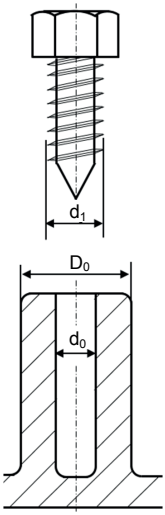
kde (σ_y) je mez kluzu, (P) stoupání závitu, (β) úhel stoupání závitu, (μ) koeficient tření, (α) geometrický faktor a (d_0) průměr montážního otvoru.

S rostoucími otáčkami klesá moment, který je potřebný pro tvorbu závitu (uvolňuje se teplo a materiál měkne). Mezní moment, při kterém dojde ke stržení závitu je vyjádřen rovnicí (66), kde (P) je stoupání závitu a (μ) koeficient tření. Konkrétní hodnoty je možné dohledat v katalogu výrobce.

$$M_{OT} = \frac{\sigma_Y \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot l_S \cdot (P + \pi \cdot \mu \cdot d_1)}{2\sqrt{3}\,(\pi \cdot d_1 - \mu \cdot P)} \; [Nm] \qquad (66)$$

Údaje však poskytují pouze orientační informace o působících silách. V případě závitotvorného spoje je reálně dosahováno vyšších mezních hodnot. Pro nejvíce používané plasty jsou dostupné informace o maximálních silách, které jsou schopné spoje přenášet při definované velikosti šroubu, viz tab. 6.3.

Tab. 6.3 *Dimenzování montážních komínků doporučené dodavateli plastových materiálů*



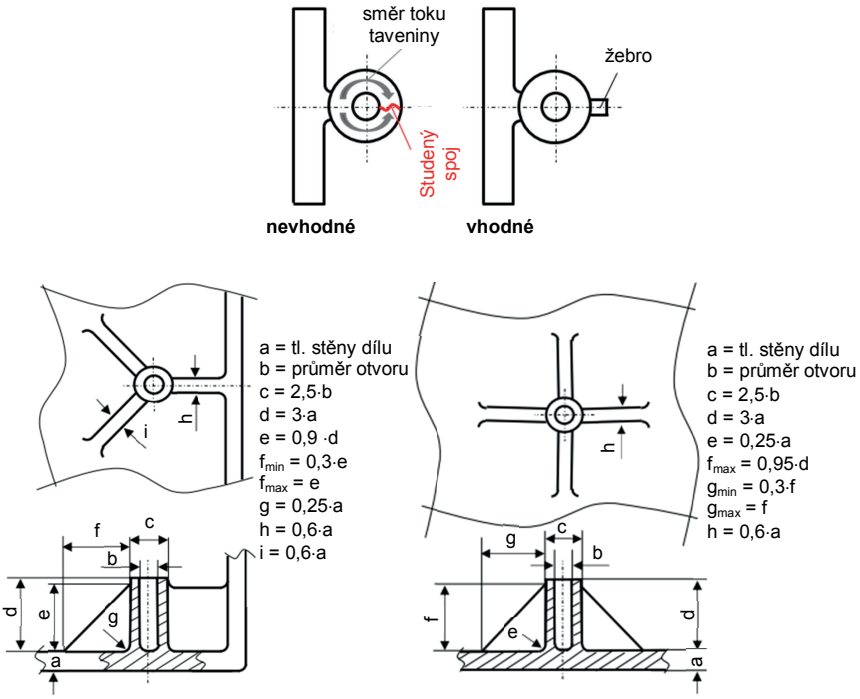
		Velikost šroubu					
Jmenovité rozměry [mm]		M6	M7	M8	M10	M12	M14
	d_1	3,6	4	4,3	4,9	5,6	6,5
	D_O	8,9	10	10,8	12,2	14	16,2
	d_O	2,9	3,3	3,5	4,1	4,7	5,5
Síla potřebná k vytržení šroubu [N]	Polymer						
	POM	3 100	3 800	4 500	5 250	6 500	9 000
	POM/GF20	3 050	3 600	4 250	4 950	6 000	8 300
	PA 6.6	2 250	3 250	3 850	4 300	5 100	6 400
	PA 6.6	2 200	3 100	3 400	3 700	4 400	5 900
	PA 6.6/GF30	2 300	3 200	3 500	3 900	4 850	6 200
	PA 6.6/M40	3 200	3 330	5 370	5 690	8 710	10 220
	PA 6.6/MP40	2 880	3 200	3 540	4 510	5 070	6 480
	PET/GF30	3 300	4 100	4 400	4 900	x	x
	PET/GF45	4 300	4 470	4 500	5 660	6 020	x
	PET/GF50	2 480	2 940	2 740	3 780	4 120	x

- ***Montážní komínky***

Pro kompletaci montážních celků šroubovými spoji se velmi často využívají *montážní komínky*. Konstrukční omezení vycházejí především z nebezpečí tvorby propadlin v oblasti přímého napojení montážního komínku na stěnu výrobku. Montážní komínek je s výhodou umisťován ve volné ploše výrobku (je více flexibilní) nebo může být napojen i na stěnu výrobku prostřednictvím žebra, viz obr. 6.29.

Použití pouze jednoho žebra není optimální a to vzhledem k tvorbě studeného spoje naproti žebru. Pro zesílení tuhosti montážního komínku v oblasti vzniku studeného spoje se využívá další žebro. Montážní komínek musí být dimenzován tak, aby vydržel zatížení při montáži šroubu a byl schopen přenášet síly, jejichž působení bude šroub vystaven během životnosti spoje. Montážní komínky jsou většinou opatřeny slepými otvory, které by měly dosahovat až na úroveň nominální

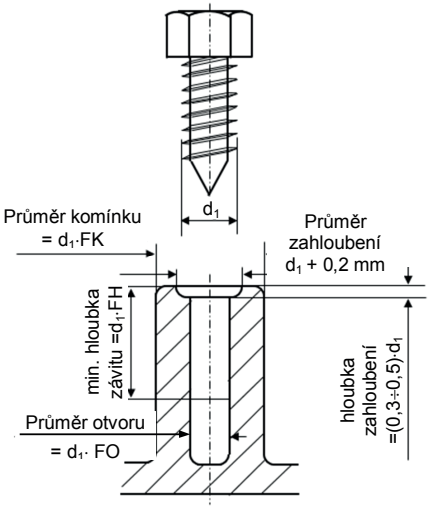
tloušťky výrobku, případně mohou zasahovat až do 30 % stěny výrobku. Při takovémto zahloubení se okolo komínku používá zápich do stejné hloubky, jako je vnitřní otvor, aby se minimalizovala koncentrace materiálu, viz obr. 6.30. Geometrie neprůchozího otvoru se řídí pravidly uvedenými v kapitole 4.7.

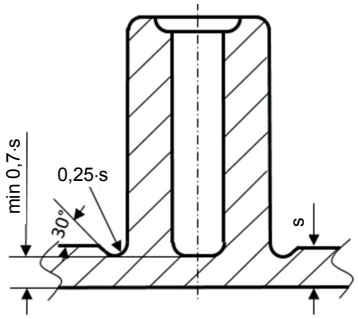


Obr. 6.29 *Konstrukce montážního komínku s ohledem na jeho umístění a možnou tvorbu studeného spoje*

Vnitřní otvor musí být opatřen úkosy 0,5° ÷ 1°, aby bylo možné jádro, které ho vytváří, odformovat. Pro optimální pevnost spoje by měla být akční délka vnitřního otvoru (2 ÷ 2,5)násobek průměru šroubu. Vnitřní otvor montážního komínku by měl mít optimálně kruhovou geometrii o průměru, odpovídající (0,8 ÷ 0,9)násobku průměru šroubu, kdy menší průměr je doporučován pro poddajné materiály a větší pro křehké. Geometrické poměry je vhodné si ověřit v katalogu dodavatele šroubů. Vzhledem ke ztenčení stěny komínku vlivem vnitřních i vnějších úkosů není vhodné,

aby jeho akční část začínala již od vrchního okraje komínku. Tato část otvoru je proto rozšířena a slouží k centrování šroubu. Obvodové napětí tak nepůsobí na nejslabší část komínku. Používaný průměr tohoto zahloubení odpovídá běžně 1,1násobku průměru šroubu a zasahuje až do hloubky 0,5násobek průměru šroubu.

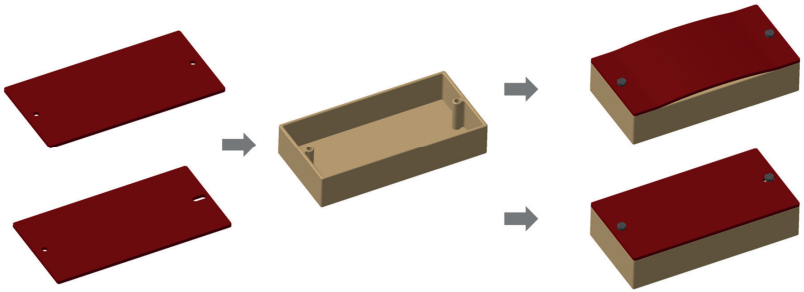




Obr. 6.30 *Zápich minimalizující koncentraci materiálu*

E_t plastu [MPa]	Doporučený typ šroubu
< 1 400	závitotvorný
1 400 ÷ 2 800	závitotvorný nebo závitořezný
2 800 ÷ 6 900	závitořezný
> 6 900	závitořezný s jemným stoupáním

Obr. 6.31 *Dimenzování vnějšího průměru montážního komínku*



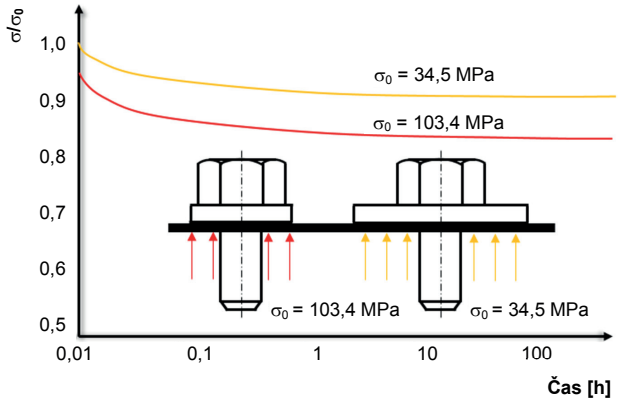
Obr. 6.32 *Geometrie plastových dílů za účelem kompenzace teplotní dilatace*

Při spojování dvou různých materiálů vyvstává často problém jejich teplotní roztažnosti. Při zahřátí spoje plast/kov se plast roztahuje o řád více než kov, což vede ke vzniku vnitřního napětí a deformací, viz obr. 6.32.

***Tab. 6.4** Dimenzování montážního komínku*

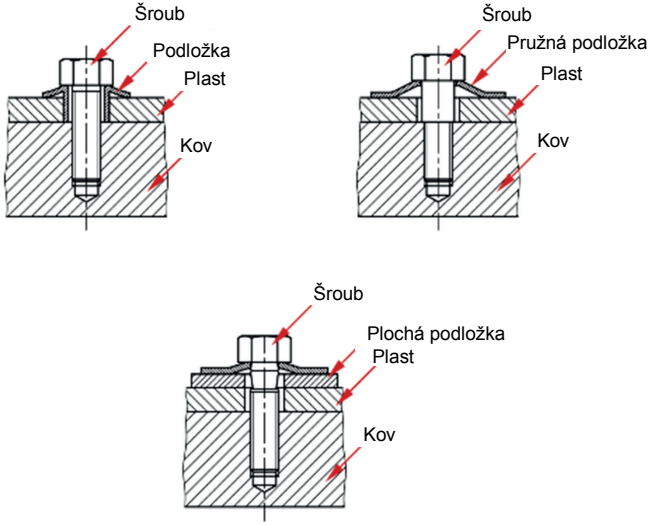
Polymer	Faktor otvoru (FO)	Faktor komínku (FK)	Faktor hloubky závitu (FH)
ABS	0,80	2,00	2,00
PC/ABS	0,80	2,00	2,00
ASA	0,78	2,00	2,00
SAN	0,77	2,00	1,90
PA 4.6	0,73	1,85	1,80
PA 4.6/GF 30	0,78	1,85	1,80
PA 6	0,75	1,85	1,70
PA 6/GF30	0,80	2,00	1,90
PA 6.6	0,75	1,85	1,70
PA 6.6/GF30	0,82	2,00	1,80
PBT	0,75	1,85	1,70
PBT/GF30	0,80	1,80	1,70
PC	0,85	2,50	2,20
PC/GF30	0,85	2,20	2,00
PE-HD	0,75	1,80	1,80
PE-LD	0,75	1,80	1,80
PET	0,75	1,85	1,70
PET/GF30	0,80	1,80	1,70
PMMA	0,85	2,00	2,00
POM	0,75	1,95	2,00
PP	0,70	2,00	2,00
PS	0,80	2,00	2,00

Ačkoliv mezi nejběžněji využívané kovové spojovací prvky určené pro spojování plastů nebo plastů s kovy jsou závitořezné a závitotvorné šrouby, můžeme se setkat i se spojem tvořeným kovovým šroubem a matkou. V tomto případě je důraz kladen na maximálně přípustné stlačení plastového dílu. Utahovací moment musí být kontrolován a nesmí být vyvozen příliš rychle. Čím větší je působící napětí, tím výraznější je jeho relaxace. Proto je nutné rozložit působící napětí na co největší kontaktní plochu, např. s využitím podložek, viz obr. 6.33.



Obr. 6.33 *Relaxace napětí u plastového dílu*

Pro kompenzaci poklesu síly předpětí spoje je možné využít pružné podložky, které jsou schopny do určité míry eliminovat důsledky relaxace napětí, viz obr. 6.34.



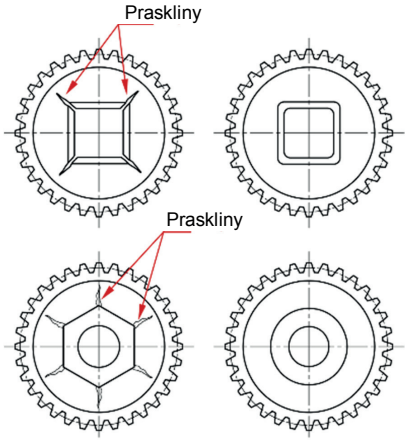
Obr. 6.34 *Pružné podložky pro minimalizaci poklesu síly předpětí spoje*

6.3 Tvarové vložky

Kovové *tvarové vložky* (inserty) jsou relativně komplikovaným prvkem plastových dílů. Tvarové vložky mají nejčastěji geometrii s vnitřním nebo vnějším závitem. Používají se především v případech časté montáže a demontáže spoje, v případech kdy je vyžadováno přesné vedení, nebo je nutné zajistit požadovaného předpětí spoje (bez krípu a relaxace napětí), nebo je potřeba zajistit elektricky vodivý kontakt apod. Tvarové vložky mohou být do plastového dílu integrovány několika způsoby. Mezi nejčastěji využívané způsoby patří zastřikování, zalisování za tepla nebo za studena, ultrazvukové zalisování atd. Důležitým faktorem, který ovlivňuje volbu metody vkládání tvarové vložky do dílu je objem výroby a flexibilita použití dané technologie pro různé typy výrobků. Typickými materiály tvarových vložek jsou mosaz, hliník, zinek nebo měď. Dostupné jsou i různé ocelové materiály s povrchem odolným proti vzniku koroze.

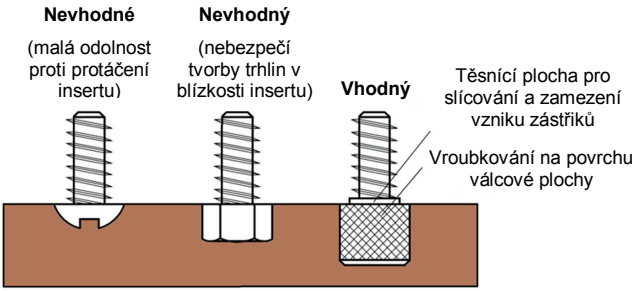
Zastřikování tvarových vložek ve výrobním nástroji je jednou z nejnáročnějších metod. Nejprve je navrhován zpravidla design dílu, a až následně jsou brány v úvahu pozice tvarových vložek. Konstrukce by měla být realizována ale opačně (volba tvaru a efektivního rozmístění tvarových vložek, kolem nichž je následně navržen zbytek dílu). Zakládání tvarových vložek do vstřikovací formy je poměrně problematické a pro zajištění maximální rychlosti výrobního cyklu vyžaduje automatizaci procesu. Samotné zakotvení tvarových vložek do výrobního nástroje se řeší v současnosti především s využitím tření (nasazování na trny apod.) a západek (odpružené kuličky) nebo využitím magnetických mechanismů. Samotná fixace vložek v plastovém dílu je zajištěna smrštěním polymeru okolo vložky. Výhodami zastřikování jsou časové a ekonomické úspory, neboť jsou eliminovány sekundární operace a není třeba dalších strojů (vyjma manipulátorů pro jejich zakládání do forem).

Z hlediska konstrukce je výhodné použití kruhových vložek, které nejsou výraznými koncentrátory napětí, viz obr. 6.35. Důležité je také zajistit dobré utěsnění kontaktní roviny okolo tvarové vložky, aby nedocházelo k tvorbě přetoků. Kovové vložky musí mít proto úzké výrobní tolerance nebo forma musí být v místě vložky speciálně upravena.



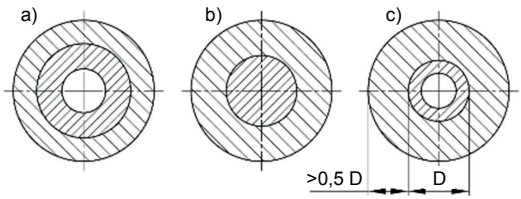
Obr. 6.35 *Optimalizace vnějšího tvaru tvarových vložek za účelem eliminace vzniku trhlin v okolí rohů*

Pro úspěšné přenášení napětí je nutné, aby kovové vložky byly pevně zakotveny v plastové matrici. Jejich povrch bývá pokryt vroubky případně zdrsněním, aby se zvětšila kontaktní plocha, viz obr. 6.36. Touto úpravou se rovněž snižuje nebezpečí protáčení vložek při aplikaci točivého momentu. Všechny další ostré výstupky působí jako koncentrátory napětí a měly by být odstraněny. Tvarová vložka by měla být dobře zapouzdřena plastem bez použití vysokých tlaků a vzniku trhlin. Velké vnitřní napětí v kombinaci se studeným spojem může vést k praskání plastu již při minimálním zatížení dílu. Vhodným řešením jsou pak pružné vložky.



Obr. 6.36 *Úprava vnějšího povrchu insertů pro zvýšení styčné plochy*

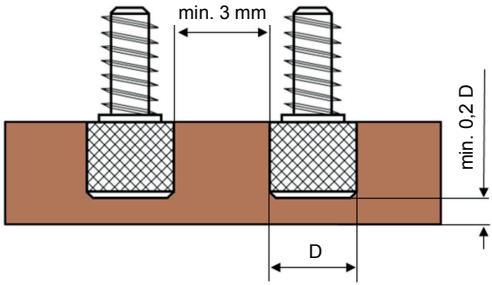
Základními parametry při konstrukci montážního výstupku je tvar kovového výstupku a materiál polymeru, který jej bude obklopovat (ideálně s malým smrštěním, ale zároveň s dostatečnou houževnatostí, aby nedocházelo k tvorbě mikrotrhlin). Pro aplikace s tvarovými vložkami jsou proto mnohem vhodnější semikrystalické plasty. Konstrukce montážního výstupku je velmi podobná montážnímu výstupku určenému pro šrouby, přičemž i zde je velmi důležitá tloušťka stěny plastu obklopujícího tvarovou vložku. Výsledná funkčnost je značně ovlivněna čistotou vložky před jejím založením a koeficientem teplotní roztažnosti. S rostoucím rozdílem teplotní roztažnosti mezi kovem a plastem se používá větší tloušťka materiálu okolo tvarové vložky, aby byl plast schopen lépe odolávat rostoucímu vnitřnímu napětí. Vlivem vyšší teplotní vodivosti kovové vložky zvyšují intenzitu chlazení plastu, s nímž jsou v kontaktu. Při obtékání vložky se zvyšuje viskozita taveniny plastu a roste i vnitřní napětí v dané oblasti. Objem plastu by proto měl být větší než je objem kovové vložky, viz obr. 6.37. Pro aplikace s větším teplotním zatěžováním jsou doporučovány spíše mosazné a hliníkové vložky než ocelové. Další typy tvarových vložek jsou uvedeny v tab. 6.5.



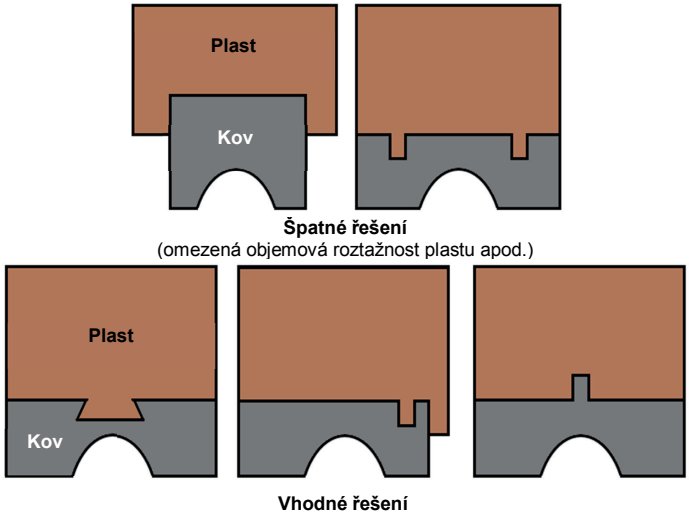
Obr. 6.37 *Průměry kovových zastříknutých vložek v plastu (kov je hrubě šrafován)*
a) chybně (tenká vrstva plastu snadno praská); b) málo vhodné (příliš velký objem kovu); c) vhodný poměr kovu a plastu

Obecná doporučení týkající se množství plastu kolem tvarové vložky jsou založena na pravidlu rovnosti tlouštěk stěn. Materiál obklopující vložku musí mít minimálně stejnou tloušťku stěny jako je tloušťka vložky. Další doporučení se týkají minimálního přesahu vložky do formy (alespoň 1,5 mm), což zajistí její dobré ukotvení v nástroji (ve všech fázích výrobního procesu) a umožní jeho efektivní slícování pro eliminaci přetoků. Chráněna je tímto i vnitřní část vložky před zanesením plastem (např. závit). Pro eliminaci příliš rychlého zatuhnutí a případného

nedotečení materiálu zakrývajícího vložku by tloušťka plastu pod insertem měla být alespoň 0,2násobek průměru tvarové vložky, viz obr. 6.38. Vzdálenost mezi inserty by měla vycházet z kombinace dříve uvedených pravidel (součtu tlouštěk stěn sousedících vložek), minimálně by ale měla být 3 mm. Tvarové vložky zastřikované ve výrobním nástroji jsou zpravidla předehřívány, pokud je jejich průměr větší než 6 mm, jsou předehřívány alespoň na teplotu odpovídající teplotě formy.

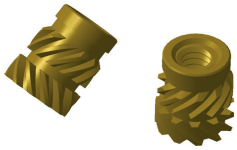
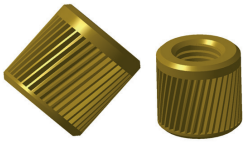
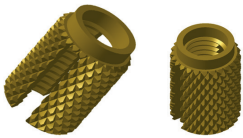
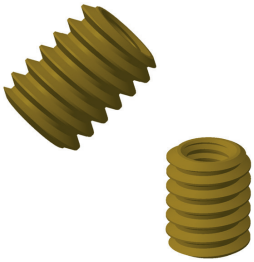


Obr. 6.38 *Minimální tloušťka stěny pod insertem a minimální vzdálenost mezi sousedícími inserty*



Obr. 6.39 *Porovnání vhodného a nevhodného napojení kovového insertu na plastový díl*

***Tab. 6.5** Typy tvarových vložek dle technologie jejich začlenění do plastového dílu*

Tvarové vložky pro ultrazvukové svařování	
	▪ vložka je implementována do vhodně poddimenzovaného otvoru (montážního prvku), ▪ vlivem tření o vysoké frekvenci dochází na rozhraní kontaktních ploch k natavení materiálu (libovolná úprava povrchu), ▪ samotný proces implementace probíhá do několika vteřin, manipulace je ale náročnější, ▪ vhodné jsou tuhé plasty (ABS, PC, PC, PA, POM), méně často se používají PP, PE.
Tvarové vložky pro lisování za studena	
	▪ vložka je implementována do vhodně poddimenzovaného otvoru (montážního prvku), ▪ síla působí plynule bez ohřevu okolního materiálu, ▪ kotevní výstupky jsou zpravidla ve směru působící síly, ▪ jsou málo vhodné pro křehké materiály (PC, PS, SAN), používají se pro ABS, PA, PA+GF, POM, PBT.
Expanzní tvarové vložky	
	▪ kotevní část je rozdělena na dva nebo více kotevních segmentů, ▪ k jejich implementaci je třeba nižší tlak, než pro vložky lisované mechanicky, ▪ vnější povrch segmentů je opatřen texturou, která minimalizuje pootočení tvarové vložky.
Samořezné tvarové vložky	
	▪ na vnějším povrchu je samořezný závit umožňující jejich zašroubování do základního materiálu.
Tvarové vložky z polymerních materiálů	
	▪ z materiálů PA, PC, SB nebo PP s vysokým stupněm plnění skelnými vlákny, ▪ geometricky jsou řešeny se samořezným závitem nebo pro ultrazvukové svařování, ▪ vyráběny jsou ve velikostech M3 až M8, ▪ výhodou je recyklovatelnost dílů po skončení jeho životnosti bez nutnosti vyjímat tvarovou vložku.

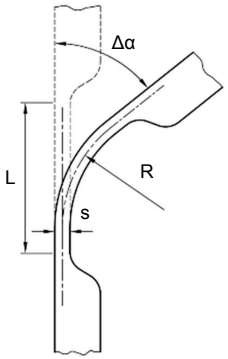
Pro obecné geometrie tvarových vložek je používáno pravidlo, které omezuje počet výstupků zabíhajících do plastu. Profil tvarových vložek by neměl bránit

smrštění materiálu, viz obr. 6.39. Toto pravidlo platí především pro větší vložky, kde je vzdálenost mezi výstupky až desítky milimetrů, což však zpravidla není případ tvarových vložek určených pro šroubové spoje.

U *ultrazvukem montovaných vložek* je mnohem menší vnitřní napětí (až třikrát). Montáž ultrazvukovým svařováním je velmi rychlá, tvarová vložka odolává velkým silám, než dojde k jejímu vytržení. Nevýhodou je úprava sonotrody dle tvaru jednotlivých vložek a velmi omezená možnost lisovat více vložek v jednom kroku. Ultrazvuková montáž je vhodná pro zavedení insertů do ABS, PC, PS a PVC, ale lze použít i pro semikrystalické plasty. Lisování za tepla je velmi podobné ultrazvukovému principu, je však pomalejší, ale nevyžaduje nákladné vybavení. Zastřikovány bývají velké a speciální vložky. Mezi další typy tvarových vložek patří vložky expanzní, pro lisování za studena, zašroubovávací a ultrazvukové (průměr vnitřního otvoru je o (0,4 ÷ 0,5) mm menší než je vnější průměr vložky, s úkosem 8°).

6.4 Kloubové spoje

Kloubové (nebo také filmové) *spoje* jsou nejjednodušším typem integrovaného nerozebíratelného spoje, viz obr. 6.40. Výsledné chování kloubového spoje je určeno třemi základními faktory (vlastnostmi zvoleného materiálu, geometrií spoje a technologickými podmínkami plnění).



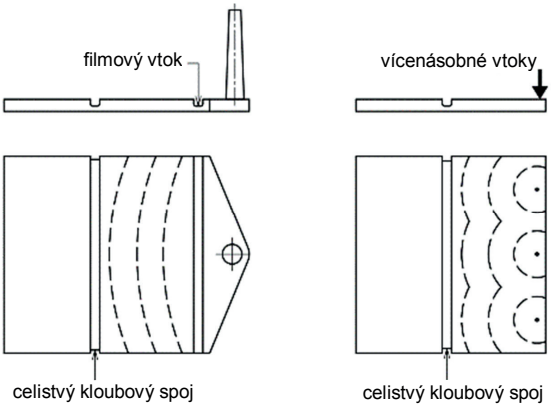
Obr. 6.40 *Schéma kloubového spoje*

Pro kloubové spoje jsou nejvýhodnější polymery s dlouhými lineárními makromolekulami bez bočních větví, čemuž nejvíce vyhovují semikrystalické polymery. Tyto materiály však mají velmi vysokou viskozitu, což je problematické z hlediska plnění dlouhých tenkých profilů. Polymery plněné částicovým nebo vláknitým plnivem nejsou pro tuto aplikaci vhodné kvůli relativně nízké maximální deformaci při porušení. Pro tuto geometrii jsou primárně využívány materiály s dobrou houževnatostí v suchém stavu (PE, PP, PA, POM, EVA). Aplikace PP má pozitivní vliv na životnost kloubového spoje, jehož deformace se projevuje zvýšenou houževnatostí, kdy je možné makromolekuly dodatečně orientovat a zvýšit tím jejich schopnost přenášet působící zatížení. Menší význam má toto tvarování na kloubové spoje z PA a PE. Naopak negativní dopady předtvarování na životnost kloubového spoje byly sledovány u POM a PBT. Pro spoje s požadovanou dlouhou dobou životností (více cyklů) je nejvhodnější PP (tloušťka 0,25 mm až 0,5 mm), méně často PE. Křehké materiály (plněné plasty, amorfní termoplasty) jsou více náchylné na vrubový efekt, pokud nejsou přechody v tloušťkách stěn v oblasti kloubového spoje dostatečně pozvolné (větší rádiusy apod.).

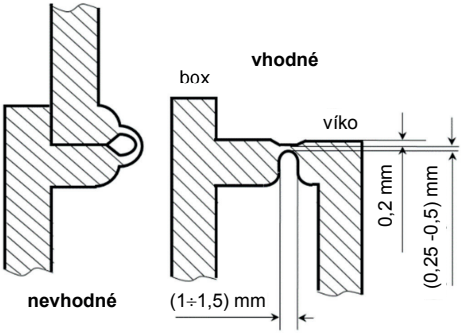
Technologie vstřikování klade na design kloubových spojů specifické požadavky. Hlavním požadavkem je rovnoměrné plnění geometrie v celém průřezu bez vzniku studených spojů. Podmínky plnění nesmějí zapříčinit ani delaminaci materiálu (rozvrstvení v důsledku pomalého plnění s nepravidelným čelem taveniny). K omezení těchto rizik přispívá vhodné rozmístění vtokových ústí nebo plnění profilu s využitím filmového vtoku, viz obr. 6.41. Pro optimální dimenzování a umístění vtokových ústí je vhodné použít numerických simulací, které jsou schopné predikovat pohyb čela taveniny.

Design spoje je unikátní v záměrné orientaci makromolekul ve ztenčeném profilu. V oblasti spoje by neměly být žádné ostré hrany a přechody (koncentrátory napětí). Pro funkci spoje není určující pevnost materiálu, ale schopnost deformace v krajním vlákně ohybu. Tvar a umístění kloubového spoje by neměly způsobovat zalomení kloubu, viz obr. 6.42. Nejdůležitějšími parametry jsou délka, tloušťka a šířka kloubového spoje. Obecné pravidlo definuje minimální poměr délky kloubového spoje k jeho tloušťce 3:1. U kratších spojů dochází k dělení taveniny a tvorbě studených spojů za kloubovým spojem. Této spodní hranice délky je možné využít pouze u houževnatých materiálů. V extrémních případech může mít spoj tvar vrubu (U-profil, viz obr. 6.43). Je však nutné dodržet požadavky na minimální rádiusy: (0,5 ÷ 1) mm.

Délka kloubového spoje se primárně odvíjí od požadovaného rozsahu ohybu (většinou 45° - 180°). Kloubový spoj s pracovním úhlem ohybu 180° musí být delší než je tomu pro menší pracovní úhly. Čím kratší je oblast kloubového spoje, tím přesněji je možné ji dimenzovat. Konstrukční doporučení pro délku kloubového spoje je 0,7 mm ÷ 1,5 mm. U delších kloubových spojů lze očekávat nižší relativní deformace.



Obr. 6.41 *Optimalizace způsobu plnění kloubového spoje*

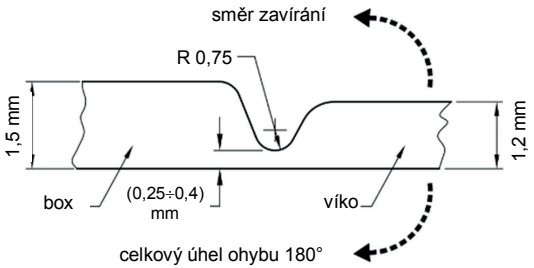


Obr. 6.42 *Nepříznivá geometrie kloubového spoje (zalomení) a optimalizované řešení*

Tloušťka kloubového spoje určuje především jeho tuhost a rovněž vymezuje pracovní úhel ohybu. Obecně by měla být co nejnižší, protože s rostoucí tloušťkou

kloubového spoje roste sklon spoje k samovolnému otevírání. Pokud je nutné přesně definovat místo deformace kloubového spoje, je možné lokálně mírně ztenčit profil z vnitřní strany spoje.

Pro kloubové spoje z houževnatých materiálů, které nejsou během svého životního cyklu zatěžovány žádným dalším vnějším namáháním, se doporučuje tloušťka (0,25 ÷ 0,4) mm +/- 0,02 mm. Pro spoje se zvýšenou funkční spolehlivostí se používají tloušťky (0,4 ÷ 0,5) mm.



Obr. 6.43 *U-profil kloubového spoje*

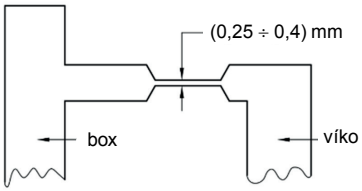
Dimenzování kloubových spojů s ohledem na množství cyklů, které by měly vydržet, nelze optimalizovat na základě krátkodobých mechanických zkoušek. Charakteristiky z těchto testů je možné použít jen pro pvotní odhad chování daného kontrukčního řešení, protože už při prvním zatížení kloubového spoje může docházet ke krípu. Tloušťka kloubového spoje (viz obr. 6.40) je popsána rovnicí (67) a poloměr ohybu rovnicí (69):

$$s = \frac{2 \cdot L \cdot \varepsilon}{\Delta\alpha} \ [mm] \tag{67}$$

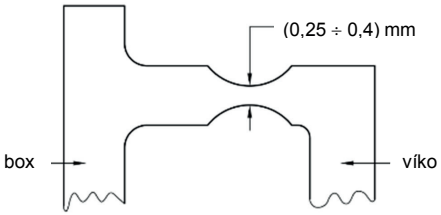
$$\Delta\alpha_{rad} = \frac{\pi}{180} \cdot \Delta\alpha° \tag{68}$$

$$R = \frac{L}{\Delta\alpha} \ [mm] \tag{69}$$

V praxi je možné se poměrně často setkat se špatným provedením klobového spoje. Jedna z možností je zachycena na obr. 6.44. Nejen že jsou zde ostré hrany a přechody, ale není ostře definována linie ohybu a spoj bude mít tendenci se kroutit, čímž se sníží jeho spolehlivost. Úmyslná změna osy ohybu však může přispět k samouzavíracímu efektu. Konstrukční řešení na obr. 6.45 je vhodnější, ale není použitelné pro dlouhé a široké kloubové spoje.



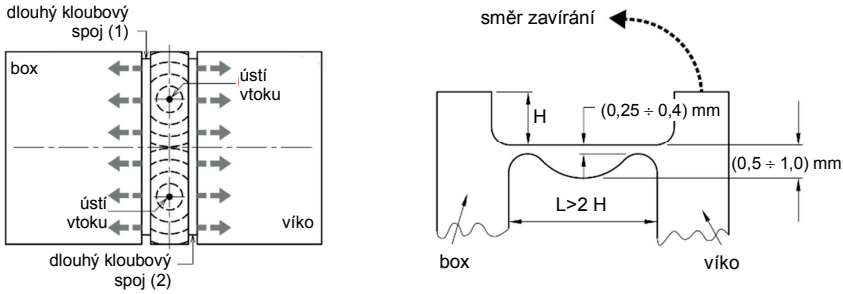
Obr. 6.44 *Nevhodné provedení kloubového spoje*



Obr. 6.45 *Vhodné konstrukční řešení kloubového spoje*

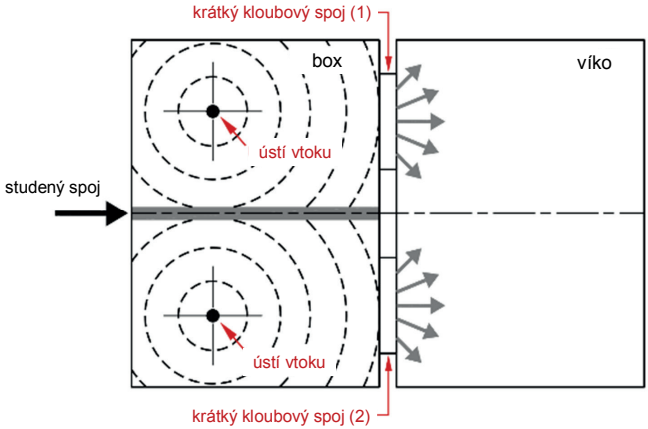
Optimální způsob plnění zajistí vhodnou orientaci makromolekul, čímž se zvýší životnost celého spoje. Vtoky by měly zajistit kompletní naplnění dutiny formy ještě dříve, než tavenina dosáhne oblast kloubového spoje, aby veškerý tok taveniny byl v daném okamžiku soustředěn na rychlé a rovnoměrné zaplnění ztenčené geometrie. U menších boxů se vtok umísťuje ve vzdálenosti 2/3 od kloubového spoje. U boxů s větší výškou se může umístění vtoku dostat až do jeho středu. Při plnění do víčka musí být vtok umístěn co nejdále od kloubového spoje. Rozsáhlé kontinuální kloubové spoje mají tendenci se samovolně otevírat. Místo použití dlouhého kloubového spoje je vhodné použít dvou oddělených kloubových spojů (viz obr. 6.46), které eliminují samootevírací tendence. Další výhodou oddělených kloubů

je funkčnost alespoň jednoho z nich pokud dojde k porušení ostatních. Toto řešení však může být příčinou tvorby studeného spoje za kloubovým spojem. Dále mohou být využity také speciální konstrukce, kde jsou na výrobku použity dva samostatné kloubové spoje spojené přechodovou částí, kde jsou umístěny vtoky, a která by měla být přibližně o 25 % silnější než samotný box a víko.



Obr. 6.46 *Geometrie využívající dvou oddělených kloubových spojů*

Více vtoků je použito především v případech, kdy je druhá část výrobku obtížně plněna přes ztenčení filmového spoje. Rozmístění vtoků však nesmí zapříčinit vznik studeného spoje v oblasti kloubu, viz obr. 6.47.



Obr. 6.47 *Vliv rozmístění vtoků na tvorbu studených spojů*

6.5 Lisované spoje

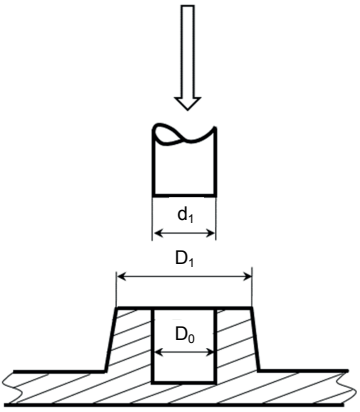
Lisované spoje jsou jednoduchý, levný a efektivní způsob spojování dvou dílů. Spoj je založený na silovém kontaktu plné nebo duté hřídele s pouzdrem. Kontakt mezi oběma díly musí být dostatečně velký, aby byl spoj schopen přenášet působící axiální síly i krouticí moment bez prokluzu. Působící síly jsou přenášeny prostřednictvím tření. Dalším důvodem poklesu kvality spoje mohou být relaxační jevy v plastovém dílu. Důležité informace jsou pro tento účel obsaženy v izochronních křivkách. Pro výpočet potřebné tuhosti dílu se používá relaxační modul, který je funkcí maximální deformace v průběhu požadované životnosti dílu. Typickým představitelem tohoto spojení je hřídel zalisovaná do otvoru s definovaným přesahem, viz obr. 6.48. Tato geometrie je nejčastěji používána při spojování plastu a kovů, ale je možné ji využívat i při spojování dvou plastových dílů. Jedná se relativně o jednoduchý design, u kterého je kritickým parametrem míra přesahu. Pokud je vůle v uložení příliš velká, nemusí být spoj schopen přenášet požadované zatížení, avšak při příliš velkém přesahu neúměrně narůstá síla potřebná pro vytvoření spoje a během montážní operace se do dílu zanáší velké vnitřní napětí. Na rozdíl od západek je část dílu, která tvoří lisovaný spoj, neustále zatížena, protože pevnost spoje je založena na elastické deformaci plastu. Konstantní působení síly však způsobuje u plastů kríp. Výsledkem je postupný pokles pevnosti spoje. Dalšími problémy jsou opakovatelná přesnost plastového dílu a různá teplotní roztažnost při kombinaci dvou odlišných materiálů. S rostoucí teplotou použití se zvyšuje také kríp. Jedním ze způsobů, kterým lze částečně eliminovat negativní dopady krípu je vroubkování kovové hřídele. Plastový materiál bude mít snahu zatéci do těchto drážek, čímž se zvýší kontaktní plocha a míra tření mezi oběma díly a tím i pevnost spoje. Z technologického hlediska je důležité také minimalizovat dodatečné smrštění, které bude výrazným způsobem ovlivňovat výsledné vlastnosti spoje (vnitřní napětí apod.).

Pro pevnostní výpočty je směrodatná tuhost pouzdra a hřídele. Obecně je tlak mezi hřídelí a pouzdrem definován rovnicí (70), kde (d_i) je vnitřní průměr hřídele, (d_0) vnější průměr hřídele, (D_i) vnitřní průměr pouzdra, (D_0) vnější průměr pouzdra, (E_h) modul materiálu pouzdra, (E_s) modul pružnosti materiálu hřídele, (i) přesah mezi hřídelí a pouzdrem hřídele (d_0-D_i), (υ_h) Poissonovo číslo pro materiál pouzdra a (υ_S) Poissonovo číslo pro materiál hřídele.

$$p = \frac{i}{d_o} \cdot \frac{i}{\frac{(A + v_s)}{E_s} + \frac{(B + v_h)}{E_h}} \; [Pa] \tag{70}$$

$$A = \frac{1 + (\frac{d_i}{d_0})^2}{1 - (\frac{d_i}{d_0})^2} \tag{71}$$

$$B = \frac{1 + (\frac{d_0}{D_0})^2}{1 - (\frac{d_0}{D_0})^2} \tag{72}$$



Obr. 6.48 *Schéma lisovaného spoje*

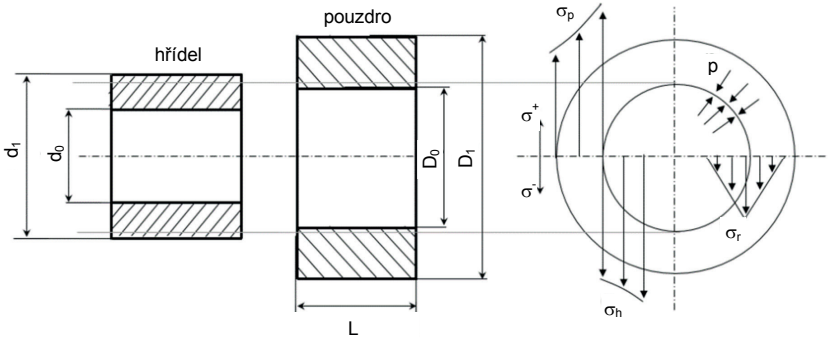
V praxi je tato rovnice uzpůsobena dle kombinace materiálů a nejběžnější jsou tři následující případy.

- ***Plastové pouzdro a kovová hřídel***

V porovnání s kovovou částí je tuhost plastu výrazně nižší, takže deformace hřídele je v porovnání s deformací pouzdra zanedbána, viz obr. 6.49. Tlak uvnitř spoje je dán rovnicí (73):

$$p = \frac{i}{D_1} \cdot \frac{E_h}{A + v_h} \; [Pa] \tag{73}$$

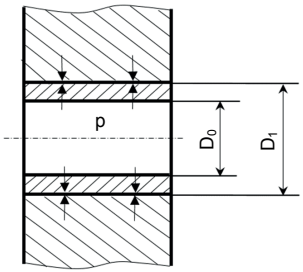
$$A = \frac{(\frac{D_2}{D_1})^2 + 1}{(\frac{D_2}{D_1})^2 - 1} \tag{74}$$



Obr. 6.49 *Varianta lisovaného spoje (Plastové pouzdro a kovová hřídel)*

Modifikací této varianty je použití dutých hřídelů, viz obr. 6.50.

- ***Kovové pouzdro a plastová hřídel***



Obr. 6.50 *Varianta lisovaného spoje (Kovové pouzdro a plastová hřídel)*

Opět je uvažováno pouze s deformací plastového dílu, přičemž tlak ve spoji vychází z rovnice (75):

$$p = \frac{i}{D_1} \cdot \frac{E_h}{B - v_h} \ [Pa] \tag{75}$$

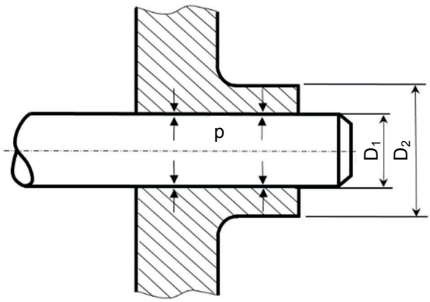
$$B = \frac{(\frac{D_1}{D_0})^2 + 1}{(\frac{D_1}{D_0})^2 - 1} \tag{76}$$

- ***Hřídel i pouzdro je ze stejně tuhého plastu***

Pokud oba materiály mají srovnatelný modul pružnosti, viz obr. 6.51, potom je tlak roven:

$$p = \frac{i}{D_1} \cdot \frac{1}{C} \ [Pa] \tag{77}$$

$$C = \frac{A + v}{E_h} + \frac{B - v}{E_s} \tag{78}$$



Obr. 6.51 *Varianta lisovaného spoje (hřídel i pouzdro je ze stejně tuhého materiálu)*

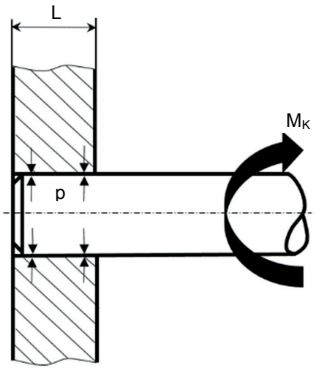
Kritické tečné napětí působí v pouzdře (σ_h) a má charakter namáhání dílu v tahu. Maximální radiální napětí (σ_r) je stejné jak pro hřídel tak pro pouzdro.

Maximální síla, kterou je spoj schopen přenášet v axiálním směru je dána rovnicí (79), kde (D_1) je vnější průměr hřídele, (L) délka spoje, (p) tlak ve spoji a (μ_0) koeficient tření:

$$F_{max} = \pi \cdot D_1 \cdot L \cdot p \cdot \mu_0 \ [N] \tag{79}$$

Maximální krouticí moment (viz obr. 6.52), který může daný spoj přenášet, je popsán rovnicí (80):

$$M_{Kmax} = \pi \cdot \frac{D_1^2}{2} \cdot L \cdot p \cdot \mu_o \ [Nm] \tag{80}$$



Obr. 6.52 *Krouticí moment lisovaného spoje*

Nejjednodušším postupem tvorby tohoto spoje je zahřátí náboje nebo podchlazení hřídele. Teplotní dilatace, viz kap. 5.8, vyvolá změnu průměru, což umožní následné zasunutí hřídele do pouzdra.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] ALLEN, K. W. *Joining of plastics*. Oxford: Pergamon Press, 1992. ISBN 978-008-0419-640.

[2] BELOFSKY, Harold. *Plastics: Product design and process engineering*. New York: Hanser, 1995. ISBN 3-446-18155-5.

[3] BELOFSKY, Harold. *Plastics: product design and process engineering*. Cincinnati: Hanser, 1995. ISBN 15-699-0142-2.

[4] BONENBERGER, Paul R. *The first snap-fit handbook: creating and managing attachments for plastics parts*. Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-595-1.

[5] CAMPO, E. Alfredo. *The complet part design handbook: For injection molding of thermoplastics*. Ohio: Hanser, 2006. ISBN 978-3-446-40309-3.

[6] ERHARD, Gunter. *Designing with plastics*. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-344-6225-909.

[7] FISCHER, Jerry M. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. Amsterdam: Elsevier/William Andrew, 2013. ISBN 14-557-2597-8.

[8] HARPER, Charles A. *Handbook of plastics technologies: the complete guide to properties and performance*. New York: McGraw-Hill, 2006. ISBN 978-007-1491-860.

[9] CHEREMISINOFF, Nicholas P. *Handbook of engineering polymeric materials*. New York: Marcel Dekker, 1997. ISBN 08-247-9799-X.

[10] JIN KUK, Kim, SABU, Thomas a Saha PROSENJIT. *Multicomponent polymeric materials*. Dordrecht: Springer, 2016. ISBN 978-940-1773-232.

[11] KUTZ, Myer. *Applied plastics engineering handbook: processing, materials, and applications*. Boston: Elsevier, 2016. ISBN 978-032-3390-408.

[12] LEVY, Sidney a J. Harry DUBOIS. *Plastics Product Design Engineering Handbook*. Boston: Springer, 1985. ISBN 978-146-1295-839.

[13] MACLEAN-BLEVINS, Mark. *Designing Successful Products with Plastics: Fundamentals of Plastic Part Design*. Norwich: William Andrew, 2017. ISBN 9780323445016.

[14] MILLER, Edward. *Plastics products design handbook*. New York: M. Dekker, 1983. ISBN 08-247-1886-0.

[15] NEIL L. Hancox a Rayner M. MAYER. *Design Data for Reinforced Plastics A guide for engineers and designers*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994. ISBN 978-940-1043-045.

[16] RAO, Natti S. a Günter SCHUMACHER. *Design formulas for plastics engineers*. Cincinnati: Hanser, 2004. ISBN 34-462-2674-5.

[17] REES, Herbert. *Understanding product design for injection molding*. Cincinnati: Hanser/Gardner Publications, 1996. ISBN 34-461-8815-0.

[18] ROSATO, Dominick V. a Donald V. ROSATO. *Plastics engineered product design*. New York: Elsevier Advanced Technology, 2003. ISBN 18-561-7416-6.

[19] ROSATO, Dominick V., ROSATO, Donald V. a Marlene G. ROSATO. *Plastics design Handbook*. Massachusetts: Kluwer academic publisher, 2001. ISBN 978-0-7923-7980-5.

[20] ROSATO, Donald V., MATTIA David P. a Dominick V. ROSATO. *Designing with Plastics and Composites: A Handbook*. Boston: Springer, 1991. ISBN 978-146-1597-230.

[21] ROSATO, V. Dominick, ROSATO, Donald V. a Marlene G. ROSATO. *Injection Molding Handbook*. Boston: Springer, 2000. ISBN 978-146-1370-772.

[22] TRES, Paul A. *Designing plastic parts for assembly*. Cincinnati: Hanser, 2014. ISBN 978-1-56990-555-5.

[23] TROUGHTON, Michael. *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. Norwich: William Andrew, 2008. ISBN 978-0-81-551581-4.

Technické materiály firem:

BASELL Polyolefins | BASF Corporation | BAYER AG | DSM Engineering Plastics - Royal DSM | DOW Chemical Company | DuPont | EASTMAN Chemical Company | ECONOLOGY Ltd. | GE Plastics | KEP Korea Engineering Plastics | LANXESS | LATI SpA. | MARPLEX Australia Pty. Ltd. | SANDVIK Coromant | SEMBLEX Corporation | SPIROL International Corporation | STANLEY Engineered Fastening | TICONA - CELANESE Corporation | TR Fastenings

Název	**Konstrukce plastových dílů**
Autoři	**Ing. Martin Seidl, Ph.D.**
Určeno pro	**studenty Fakulty strojní TU v Liberci a HS Zittau/Görlitz**
Vydavatel	**Technická univerzita v Liberci** **Studentská 1402/2, Liberec**
Schváleno	**Rektorátem TUL dne 15. 2. 2019, čj. RE 8/19**
Vyšlo	**v březnu 2019**
Počet stran	**158**
Vydání	**první**
Číslo publikace	**55-008-19**
Tiskárna	**Vysokoškolský podnik Liberec, s.r.o.** **Studentská 2, CZ-Liberec**

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7494-461-1