



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY PRO PLASTOVÉ OZUBENÉ PŘEVODY

CONSTRUCTION MATERIALS FOR PLASTIC GEARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Vystrčil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Křupka

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Tomáš Vystrčil**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Křupka**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukční materiály pro plastové ozubené převody

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve druhé polovině 20. století se spolu s rozvojem technologie výroby vstřikování plastů a výzkumu v oblasti kompozitních materiálů začala používat ozubená kola vyrobená z dosud netradičního materiálu – termoplastu. Termoplast vykazuje v mnoha ohledech oproti oceli výrazně odlišné hodnoty mechanických vlastností. Plastová ozubená kola jsou však oproti ocelovým ekvivalentům levnější na výrobu, mají nižší hmotnost a mohou pracovat i bez přítomnosti maziva.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zpracování přehledu současného stavu poznání v oblasti konstrukčních polymerních materiálů a technologií jejich výroby, které jsou používány při návrhu plastového ozubení.

Dílní cíle bakalářské práce:

- zpracovat přehled možných konstrukčních polymerních materiálů pro výrobu plastového ozubení provozovaného v mazaném a nemazaném režimu,
- porovnat mechanické, fyzikální a tepelné vlastnosti vybraných polymerních materiálů,
- zpracovat přehled současných technologií výroby plastového ozubení,
- porovnat vlastnosti polymerních materiálů z hlediska jejich předností a nedostatků.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

ROSATO, Dominick V. a Donald V. ROSATO. Plastics engineered product design. New York: Elsevier Advanced Technology, 2003. ISBN 1856174166.

PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-720-248-3.

HARPER, Charles A. Modern plastics handbook. New York: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0070267146.

KOLOUCH, Jan. Strojní součásti z plastů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.

HUGO, Jiří. Konstrukční plastické hmoty: jejich vlastnosti a využití ve strojírenství. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce poskytuje přehled současného stavu poznání v oblasti polymerních ozubených převodů se zaměřením na používané materiály a výrobní technologie. Obsahuje výčet polymerů, které se v těchto aplikacích používají a jejich bližší specifikaci. Pro tyto plasty jsou sestaveny tabulky vlastností, které umožňují jejich porovnání jak mezi sebou, tak v kontrastu s kovy. Na základě těchto srovnání jsou zhodnoceny výhody, nevýhody a oblasti použití polymerního ozubení. Z technologií pro zpracování plastů jsou vybrány ty, které se používají pro výrobu polymerních ozubených kol. K těm jsou uvedeny bližší podrobnosti. Práce poskytuje ucelený přehled poznání v dané oblasti.

KLÍČOVÁ SLOVA

konstrukční plasty, polymerní ozubení, výroba ozubení, ozubená kola

ABSTRACT

This thesis presents an overview of current knowledge of plastic gearing. It is focused on used materials and methods of processing. List of used plastic materials and their properties is presented. Thesis includes a tables of properties of these materials, which allows comparison. Benefits, deficiencies and typical applications of plastic gearing are discussed. Common technologies usable for production of gearing are mentioned. Their advantages, disadvantages and currency is discussed. Thesis gives a summary of this knowledge.

KEYWORDS

construction polymers, plastic gear, processing of gears, gears

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VYSTRČIL, Tomáš. *Konstrukční materiály pro plastové ozubené převody*. Brno, 2020, 70 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Křupka.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Křupkovi za cenné rady a připomínky, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Jiřího Křupky. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	9
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	10
2.1 Analýza problému.....	10
2.2 Cíl práce.....	10
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	11
3.1 Podstata plastů.....	11
3.1.1 Dělení polymerních materiálů.....	11
3.2 Struktura polymerů.....	12
3.2.1 Délka řetězců.....	12
3.2.2 Uspořádání řetězců.....	13
3.2.3 Krystalinita.....	14
3.3 Složení plastů.....	14
3.3.1 Aditiva.....	15
3.3.2 Míchání polymerů.....	17
3.4 Vlastnosti polymerních materiálů.....	17
3.4.1 Reakce polymerů na změnu teploty.....	18
3.4.2 Viskoelastické chování.....	19
3.4.3 Únavové namáhání.....	20
3.4.4 Změny rozměrů plastových součástí.....	21
3.4.5 Zkoušení polymerních materiálů.....	22
3.5 Vlastnosti polymerního ozubení.....	23
3.5.1 Přednosti polymerního ozubení.....	25
3.5.2 Nedostatky polymerního ozubení.....	26
3.6 Nároky na materiál ozubení.....	27
3.6.1 Provoz v nemazaném režimu.....	28
3.6.2 Provoz v mazaném režimu.....	28
3.7 Přehled polymerních materiálů pro výrobu ozubení.....	29
3.7.1 Polyamidy (PA).....	30
3.7.2 Acetal (POM).....	32
3.7.3 Polykarbonát (PC).....	33
3.7.4 Polyetheretherketon (PEEK).....	34
3.7.5 Polyestery (PET, PBT).....	35
3.7.6 Polyethyleny (PE).....	36

3.7.7 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS).....	38
3.7.8 Polyetherimid (PEI).....	39
3.7.9 Polyfenylsulfid (PPS).....	39
3.7.10 Polyurethan (PUR).....	40
3.7.11 Polyimid (PI).....	41
3.8 Porovnání vlastností polymerních materiálů.....	43
3.8.1 Porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů.....	43
3.8.2 Porovnání fyzikálních vlastností vybraných polymerů.....	44
3.8.3 Porovnání tepelných vlastností vybraných polymerů.....	44
3.8.4 Oblasti použití polymerního ozubení.....	45
3.9 Výroba polymerního ozubení.....	47
3.9.1 Obrábění.....	47
3.9.2 Odlévání.....	49
3.9.3 Vstřikování.....	50
3.9.4 Rapid prototyping.....	54
4 DISKUZE.....	57
5 ZÁVĚR.....	60
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	61
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	66
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	68
9 SEZNAM TABULEK.....	70

1 ÚVOD

Polymerní materiály – plasty jsou dnes takřka všudypřítomné. Své uplatnění našly snad ve všech oborech lidské činnosti, život bez nich si lze jen těžko představit. Přitom se ale jedná o velmi mladou skupinu materiálů – první polymerní materiály byly syntetizovány na počátku minulého století, součástí každodenního života se staly až v 50. letech. Rozšíření plastů umožnilo do průmyslu zavést zcela nové postupy, a v důsledku zlevnit, zefektivnit a automatizovat výrobu. Také rozvoj dalších zásadních oborů – elektrotechniky a elektroniky by byl bez těchto materiálů jen těžko představitelný. Rozšíření polymerů lze proto označit za iniciátor rozsáhlých změn nejen v průmyslu, ale také změn celospolečenských.

Příčiny zásadních rozdílů mezi plasty a jinými materiály je nutné hledat ve struktuře a vlastnostech plastů, které jsou diametrálně odlišné od ostatních skupin materiálů. To umožňuje nebo přímo vyžaduje nová konstrukční a technologická řešení, která by v případě použití jiných materiálů nebyla realizovatelná. Jedná se o jednoduchou a levnou masovou výrobu tvarově velmi složitých dílů využívajících další pozitiva polymerů (samomaznost, houževnatost, korozivzdornost, elektroizolační vlastnosti).

Návrh a výroba plastové součásti však vyžaduje značné znalosti a zkušenosti, jedná se o složitější a komplexnější problém než realizace součástí z kovů. Příčinou často velmi nízké jakosti plastových výrobků je právě nezvládnutí těchto procesů, díky čemuž jsou plastové výrobky navzdory svým jedinečným možnostem často asociovány s nízkou kvalitou a životností.

Od svého zavedení prodělaly polymerní materiály značný rozvoj – snaha o aplikaci plastů ve stále náročnějších podmínkách vyžadovala a vyžaduje vývoj nových a odolnějších plastů, nutné bylo také získat poznatky o konstrukčních a technologických možnostech. Díky úspěšnému zvládnutí těchto úkolů lze dnes plasty aplikovat ve většině odvětví průmyslu.

Příkladem aplikace, ve které se plasty často uplatňují a pro kterou mají ideální vlastnosti jsou ozubené převody. Plastové ozubení se používá v celé řadě výrobků, od produktů spotřebního průmyslu až po high-tech aplikace. Komplexní zpracování této problematiky ale v literatuře dosud chybí, proto se jí zabývá tato práce.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

V technické praxi se velmi často používají polymerní materiály. Jedná se o skupinu materiálů dynamicky se rozvíjející – stále vznikají nové a v nějakém ohledu lepší plasty. Proto lze předpokládat, že význam a rozšíření těchto materiálů nejen v průmyslu nadále poroste. Příkladem aplikace vhodné pro použití polymerních materiálů jsou ozubené převody.

2.2 Cíl práce

Cílem práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti polymerních materiálů, používaných v těchto aplikacích, se zaměřením na jejich vlastnosti, přednosti a nedostatky, a také na výrobní metody, použitelné pro výrobu těchto součástí. Práce by měla splnit následující cíle:

- zhodnotit výhody a nevýhody použití polymerního ozubení;
- zpracovat přehled polymerních materiálů v těchto aplikacích používaných;
- porovnat vlastnosti a uvést bližší specifikaci těchto materiálů;
- zpracovat přehled výrobních technologií, použitelných pro výrobu ozubení.

S ohledem na zcela odlišnou strukturu a vlastnosti bude v úvodu nutné podchytit hlavní jevy, která je nutné mít na paměti při navrhování a výrobě polymerních součástí. Se zjištěných vlastností bude množné zhodnotit klady a zápory použití těchto materiálů pro výrobu ozubení. Následně bude na základě studia odborné a firemní literatury zpracován přehled polymerních materiálů v těchto aplikacích používaných. Budou uvedeny základní charakteristiky zmíněných materiálů spolu s jejich klíčovými vlastnostmi. Ty budou porovnány jak mezi sebou, tak v kontrastu s kovy. S ohledem na velké množství potenciálních materiálů a zadání bude celá práce zaměřena na termoplasty.

V poslední části budou z technologií, používaných při zpracování plastických hmot vybrány ty, které se používají pro výrobu ozubených kol. K těm budou uvedeny bližší podrobnosti.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Podstata plastů

U polymerních materiálů se projevuje celá řada vlastností, které je zásadně odlišují od ostatních materiálů vyskytujících se v technické praxi, především kovů, které často nahrazují. Důležité jsou především mechanické charakteristiky, reakce na vnější zatížení a velká závislost těchto vlastností na historii zatěžování a teplotě. Teplota a nižší mechanická odolnost jsou hlavními faktory, limitujícími použitelnost polymerních materiálů coby materiálů konstrukčních.

Příčiny těchto jevů je nutné hledat ve fyzikální podstatě polymerních materiálů. Pochopení této podstaty je nezbytným předpokladem pro úspěšný návrh a výrobu libovolné součásti z plastické hmoty, ozubená kola nevyjímaje. Proto jsou tyto všeobecné poznatky shrnuty v první části práce.

3.1.1 Dělení polymerních materiálů

Polymerní materiály lze dělit do řady skupin (např. dle odolnosti na komoditní, inženýrské a high-tech; dle struktury na semikrystalické a amorfni; dle původu na přírodní a syntetické...), nejčastější dělení dle reakcí na působení teploty je následující [1]:

Termoplasty

Díky struktuře se u této skupiny nejvýrazněji projevují všechny dále zmíněná specifika polymerních materiálů. Hlavním problémem spojeným s jejich použitím je citlivost na změny teploty. Již při lehce zvýšené teplotě začínají měknout, posléze se taví, v tomto stavu dají lehce tvářet, a to i opakovaně. Nízké teploty vedou ke křehnutí. Mezi zástupce této skupiny patří většina polymerních materiálů zmíněných v této práci, a také většina polymerů známých z každodenního života – polyethylentereftalát (PET), polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC), polykarbonát (PC), polystyren (PS) a další [1,2].

Reaktoplasty

Vznikají zesítním pryskyřice, tento proces je nevratný. Proto po vytvrzení již není možné opětovné převedení do tekutého stavu, vlivem zahřívání dojde k teplotní degradaci. Proto jsou reaktoplasty jen obtížně recyklovatelné. Jejich mechanické vlastnosti jsou blíže vlastnostem kovů, případně keramiky. Zásadní předností je vyšší teplotní odolnost (i běžné reaktoplasty jsou použitelné až do teplot kolem 230 °C). Do této skupiny patří například epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice nebo bakelit [1,3,4].

Elastomery (kaučuky, termoplastické elastomery)

Zásadní vlastností je elastická (pružná, vratná) deformace přesahující 200 % [1]. Díky tomu se tyto materiály po vystavení zatížení zdeformují, po jeho odeznění se vrátí do původního tvaru. Vzhledem k této vlastnosti jsou materiály spadající do této skupiny nepoužitelné pro výrobu ozubených kol, používají se pro výrobu pružných součástí (silentbloky, těsnění, rukojeti a madla...) [2].

3.2 Struktura polymerů

Struktura polymerních materiálů se zásadně liší od struktury kovů – atomy nejsou uloženy v krystalických mřížkách, ale v propletených řetězcích. Zcela odlišná struktura je příčinou odlišného chování, velká variabilita struktury je příčinou velké variability vlastností. Proto je získání povědomí o struktuře polymerů nezbytné pro jejich praktickou aplikaci, a proto je zmíněna i v této práci.

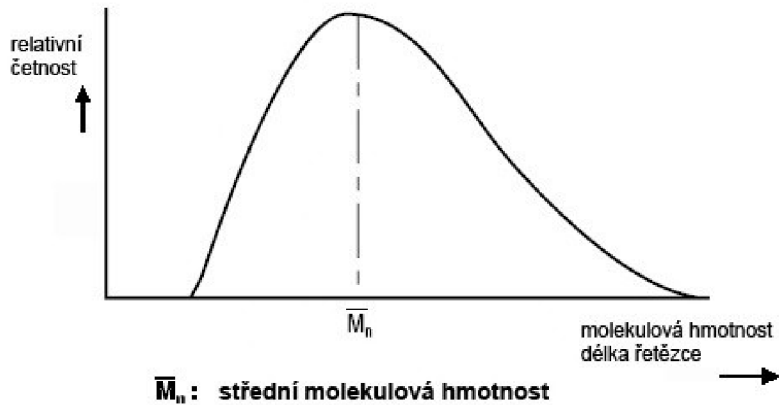
Nejnižší úrovní popisu struktury materiálu je popis na úrovni submolekulární. Popisuje základní opakující se jednotky řetězce. Atomy jsou vázány kovalentními vazbami, jejich druh určuje mechanickou pevnost polymeru a jeho stabilitu za zvýšené teploty, případně v korozním prostředí. Dále se dá stanovit, zda je polymer polární či nepolární, na základě čehož se dají predikovat vlastnosti (např. silně polární polymery mají výborné kluzné vlastnosti, ale dobře absorbují vodu) [3,5].

Vyšším stupněm popisu je pak popis na úrovni molekulární struktury, zde se popisuje uspořádání polymerních řetězců v materiálu.

3.2.1 Délka řetězců

Velikost či přesněji délka polymerních řetězců je zásadní pro chování materiálu. Ovlivňuje jeho zpracovatelnost a mechanické vlastnosti.

V technické praxi se pro stanovení délky polymerních řetězců používá popis pomocí molekulové hmotnosti. Vzhledem k nejednotné délce řetězců se zavádí distribuční křivka, viz obr. 3.2.1-1. Ta vyjadřuje zastoupení různých délek řetězců ve výsledném materiálu, na základě její znalosti se dá předpovídat chování materiálu. Pokud má materiál vysoký obsah nízkomolekulárního podílu, bude díky nízké viskozity taveniny dobře zpracovatelný, ale bude vykazovat nízké hodnoty nárazové práce. Pokud má vysoký obsah vysokomolekulárního podílu, bude vykazovat vyšší odolnost proti rázovému namáhání, ale bude mít vysokou viskozitu taveniny, a bude tudíž zpracovatelný jen obtížně. Úzká distribuční křivka předpovídá jednotné vlastnosti [1,3,6].



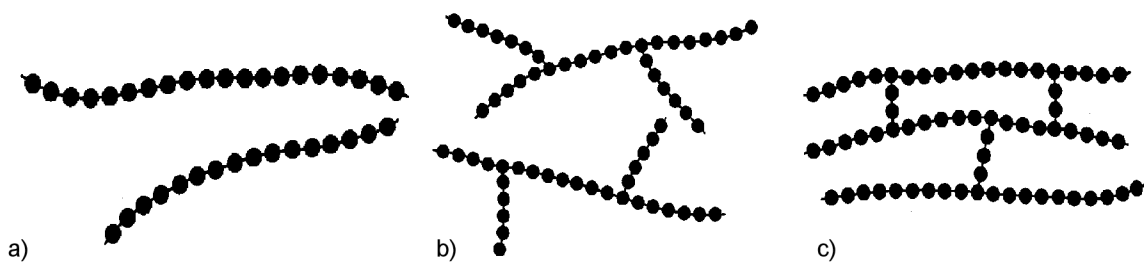
obr. 3.2.1-1 Distribuční křivka molekulové hmotnosti; [2], upraveno.

3.2.2 Uspořádání řetězců

Linearita řetězce

Většinu termoplastů lze považovat za lineární, jen některé jsou rozvětvené (nízkohustotní polyethylen – LDPE [3]). Materiál složený z lineárních řetězců vykazuje vyšší pevnost, modul pružnosti, hustotu a teplotní odolnost, lepší je i dosažitelný stupeň krystalinity a zpracovatelnost taveniny [2]. V některých termoplastech lze vyvolat i tvorbu zesíťované struktury, často pomocí působení záření (tzv. radiační síťování) – důsledkem je zlepšení mechanické a tepelné odolnosti, ale vzniklý materiál nelze tavit [7].

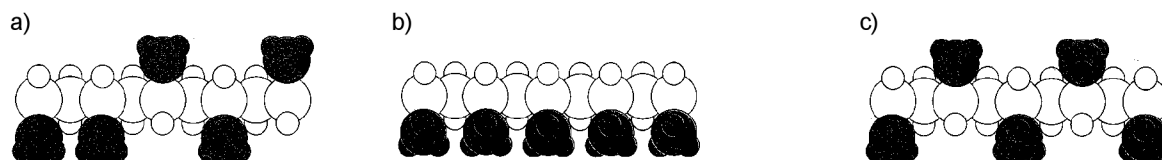
Reaktoplasty a elastomery jsou zesíťované, jejich struktura se může lišit počtem příčných vazeb. Jejich počet ovlivňuje teplotní odolnost materiálu a dá se ovlivnit tvrdidlem, použitým při výrobě [1,7].



obr. 3.2.2-1 Linearita řetězce; a) lineární; b) rozvětvený; c) zesíťovaný; [6], upraveno.

Konfigurace (takticita) řetězce

Určuje se u rozvětvených polymerů. Popisuje uložení bočních atomů kolem centrálního řetězce, lze ji změnit jen chemickým zásahem. Má značný vliv na krystalizační schopnosti polymeru a mechanickou odolnost. Rozlišují se tři možná uspořádání, viz obr. 3.2.2-2 [3].



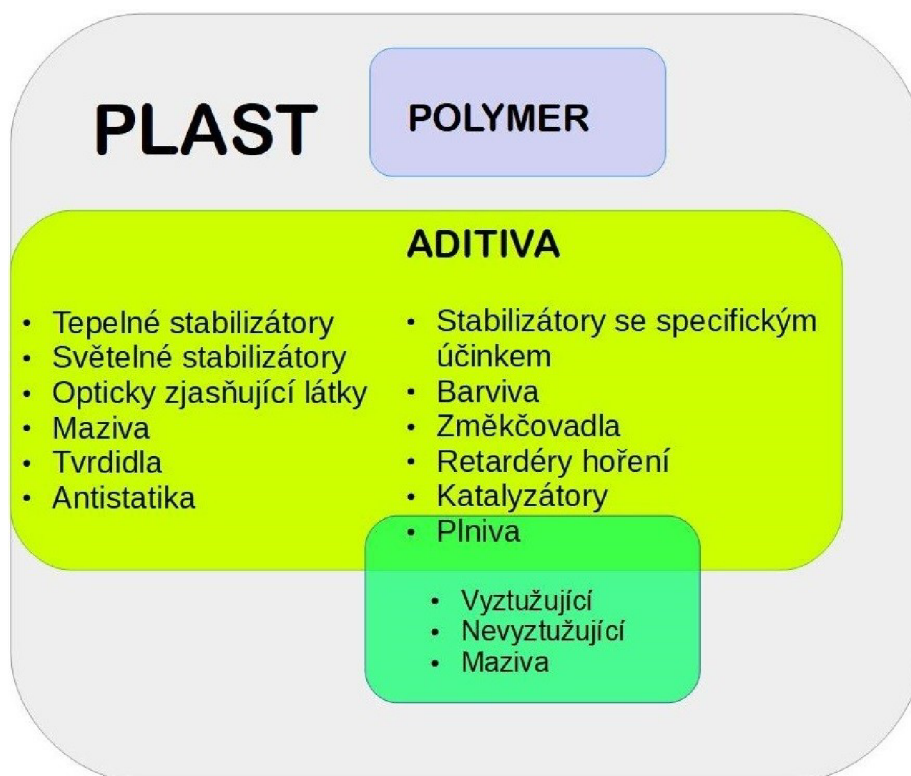
obr. 3.2.2-2 Konfigurace řetězce; a) ataktická; b) izotaktická; c) syndiotaktická; [6], upraveno.

3.2.3 Krystalinita

Polymerní materiály mají amorfní povahu, důležitá je schopnost termoplastů tvořit oblasti, kde jsou částice uspořádány v krystalické mřížce. Krystalizace nikdy neproběhne v celém objemu, vždy zůstanou amorfní oblasti. Proto se tento materiál označuje jako semikrystalický. Jeho mechanické vlastnosti se zásadně liší od stejného materiálu v amorfním stavu (vyšší pevnost, modul pružnosti, odolnost proti opotřebení, větší tvarová stálost, ale nižší tažnost a vrubová houževnatost, viz obr. 3.4.1-1). Hmotnostní podíl krystalické fáze udává krystalinita, pohybuje se mezi 40 % a 90 % [1]. U většiny polymerů se projevuje polymorfie – schopnost krystalizovat ve více krystalových buňkách, typický je i výskyt dvou odlišných základních krystalových buněk v jednom materiálu. Polymery krystalizují v mnohem složitějších elementárních buňkách než kovy. Krystaly mají nejčastěji tvar lamel (lamelární krystaly), případně polygonů (sférolity). V závislosti na podmínkách během tuhnutí z taveniny lze krystalické oblasti různě orientovat [3,6].

3.3 Složení plastů

Ve struktuře plastů lze rozlišit dvě základní složky – polymerní základ a aditiva, viz obr. 3.3-1. Složení plastu má zásadní vliv na jeho vlastnosti a zpracovatelnost. V závislosti na obsažených aditivech mohou různé plasty založené na témže polymeru vykazovat diametrálně odlišné chování. Plasty modifikované přidávkem různých aditiv se v technické praxi používají velmi často.



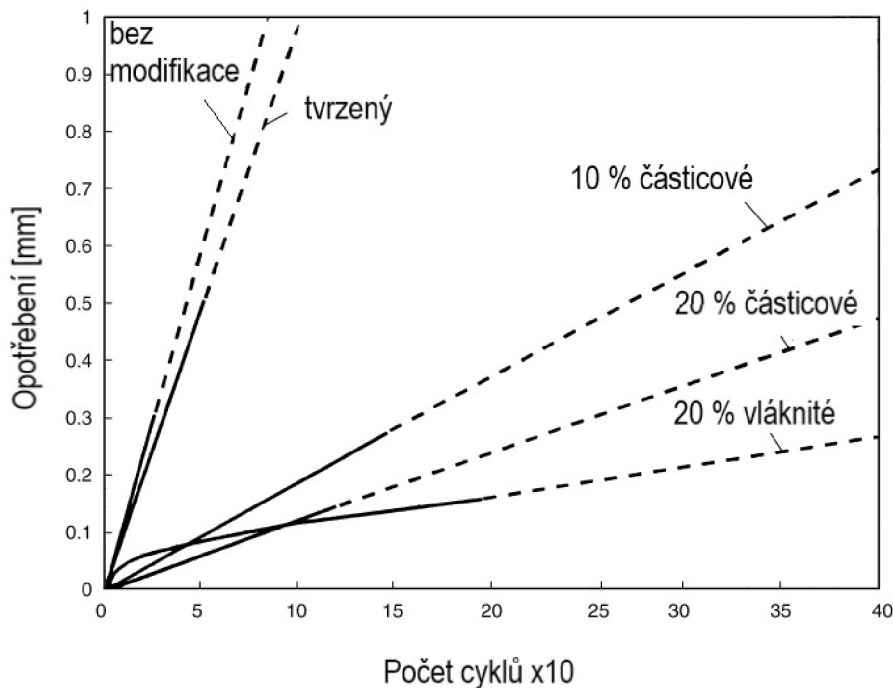
obr. 3.3-1 Složení plastů; [autor dle 1,2,7].

3.3.1 Aditiva

Aditiva se do plastů přidávají za účelem zlepšení jeho vlastností (mechanické odolnosti, odolnosti proti opotřebení, tepelné vodivosti, barvy, odolnosti proti oxidaci, zpracovatelnosti...), případně jen snížení ceny. Při přípravě plastů pro konstrukční aplikace mají zásadní význam plniva [3].

Nevyztužující plniva

Hlavním důvodem pro přidávání nevyztužujících plniv je snížení ceny výrobků, ale pomáhají zlepšit i zpracovatelnost (snižují velikost rozměrových změn během tuhnutí taveniny) [4]. Jedná se většinou o rozemletý anorganický materiál (uhličitan vápenatý, kaolin), případně skleněné kuličky. Stupeň plnění dosahuje až 60 %, omezen je snížením vrubové houževnatosti výsledného materiálu [5].



obr. 3.3.1-1 Vliv plniv na opotřebení povrchu zubů z PTFE; [4], upraveno.

Vyztužující plniva

Vyztužující plniva se do plastů přidávají za účelem zlepšení jejich mechanických vlastností. V případě ozubených kol se jedná především o snížení opotřebení kontaktních ploch na bocích zubů (viz obr. 3.3.1-1) a zvýšení tuhosti pro snížení deformace zubů a s tím spojené generace tepla. Výztuhy mají formu vláknité struktury, ta se může skládat z krátkých, náhodně uspořádaných vláken (vyztužené plasty), případně z dlouhých vláken, uspořádaných do tkané rohože (lamináty). Vláknina mohou být vyrobena z různých materiálů (skelná, uhlíková, přírodní...). Vždy je důležité zajistit dostatečnou adhezi mezi vláknem a polymerním materiálem [2,4].

Problémem spojeným s přidáváním vláknitých plniv je zvýšení anizotropičnosti materiálu – v důsledku různého množství a orientace vláken v matrici se mohou lišit vlastnosti v různých místech a směrech zatěžování [2,4,8].

Detailní informace k používaným vyztužujícím plnivům poskytuje tabulka 3.3.1-1. Jsou zde uvedeny typy vyztužujících plniv používaných při přípravě plastů pro výrobu ozubení, obvyklý stupeň plnění v hmotnostních procentech a kladné a záporné důsledky tohoto plnění. Údaje v této tabulce pochází z [1,4,8,9].

tab. 3.3.1-1 Vyztužující plniva, obvyklý hmotnostní obsah a kladné a záporné dopady použití.

Skelná vlákna	Uhlíková vlákna	Kevlarová vlákna	Grafenová vlákna	Přírodní vlákna
5 – 40 %	10 – 40 %	5 – 20 %	0,2 – 2,0 %	20 – 50 %
Mechanická odolnost	Teplotní a mechanická odolnost	Teplotní a mechanická odolnost	Mechanické vlastnosti	Malá ekologická zátěž
Teplotní odolnost	odolnost	odolnost	Nízké opotřebení	Odolnost srovnatelná s jinými výztuhami
Opotřebení	Nízké opotřebení	Nízké tření	Nízké tření	
Abráze formy a spoluzabírajícího kola	Opotřebení nástrojů Větší deformace během tuhnutí	Cena Náročná příprava	Náročná příprava Snížení vrubové houževnatosti	Nasákavost Degradace oxidací

3.3.2 Míchání polymerů

Polymerní základ plastu nemusí být složen jen z jednoho typu polymerních řetězců. V praxi se někdy míchá několik polymerů dohromady. Cílem tohoto míchání je zlepšit nějakou vlastnost plastické hmoty. Například:

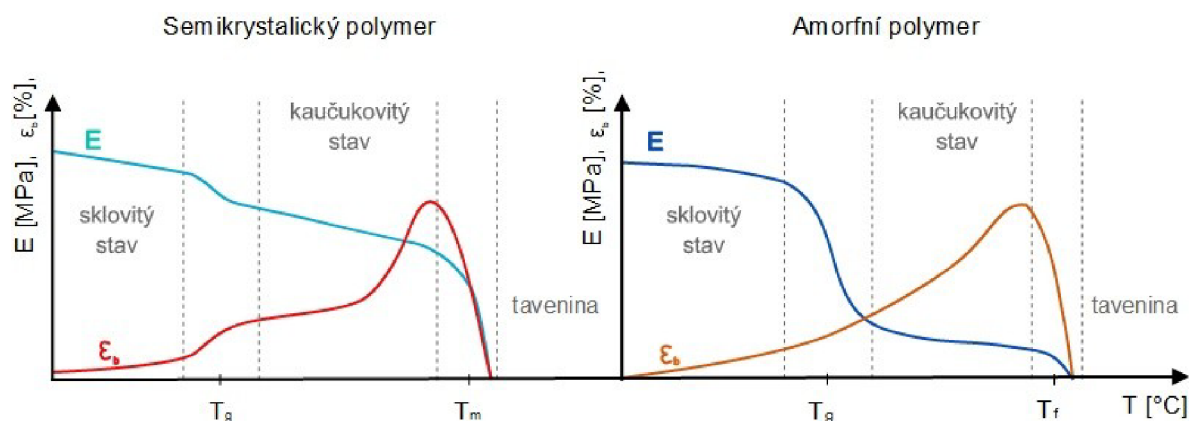
- pro zlepšení zpracovatelnosti materiálů s vysokou hustotou taveniny se tyto materiály míchají s jiným polymerem o nižší viskozitě [3];
- polyestery je možno smíchat s elastomery, vznikne pružný materiál, ten se dá použít pro výrobu kol vystavených rázovému zatížení – materiál má vysokou schopnost tlumení, zajistí tichý chod [5];
- pro zvýšení vrubové houževnatosti se do plastu přidávají polymery s vysokou vrubovou houževnatostí. Dalšími podmínkami je nižší modul pružnosti než má základní polymer, navíc by pokud možno nemělo dojít k výraznému zhoršení dalších vlastností. Příkladem takových polymerů jsou akrylonitrilbutadienstyren (ABS) a ethylvinylacetát (EVA) [4].

3.4 Vlastnosti polymerních materiálů

Vlastnosti polymerů se zásadně liší od vlastností kovů. Projevuje se řada jevů, které kovy nebo keramiky nevykazují. Příčinou těchto odlišností je zcela rozdílná struktura polymerních materiálů, jak již bylo popsáno. Díky velké variabilitě struktury se i vlastnosti různých, ale i téhož polymerního materiálu můžou zásadně lišit. Velký vliv mají plniva, použitá při výrobě, ale také provozní podmínky. Vlastnosti plastů, které ovlivňují návrh, výrobu a provoz polymerního ozubení shrnuje tato kapitola; z těchto vlastností vyplývají klady a zápory použití polymerního ozubení, ty jsou rozebrány dále.

3.4.1 Reakce polymerů na změnu teploty

Citlivost na změny teploty lze prohlásit za hlavní jev, omezující použitelnost polymerů ve strojírenství. Většina polymerů reaguje na změny teploty výrazně dřív a dramatičtěji než kovy. Maximální teploty, kterým jsou termoplasty schopny odolávat, většinou leží pod hranicí 200 °C (viz tabulky vlastností dále), jen několik high-tech plastů odolá teplotám mírně vyšším. I to jsou ale teploty, při kterých se mechanické vlastnosti většiny kovů téměř nemění. Citlivost plastu na změny teploty lze snížit některými aditivami, případně zvýšením krystalinity.



obr. 3.4.1-1 Grafy závislosti Youngova modulu E a poměrného prodloužení ϵ_s na teplotě; [autor dle 2].

Reakce polymerů na změny teploty je charakteristická existencí tzv. tranzitních teplot (teplota skelného přechodu T_g , viskózního toku T_f a tání T_m), při kterých se chování materiálu skokově mění. V materiálových listech se uvádí jedna konkrétní hodnota, i když ve skutečnosti se jedná o nějakou oblast – to je důsledek nejednotné délky polymerních řetězců, a spolu se změnami modulu pružnosti a poměrného prodloužení je patrné z obr. 3.4.1-1. Zde je také možné vysledovat rozdíl mezi chováním amorfního a semikrystalického polymeru. Obecně plasty se zvyšující se teplotou měknou – snižuje se modul pružnosti a stoupá poměrné prodloužení [1,2,7].

Amorfní termoplast je při nízkých teplotách ve sklovitém stavu – je tvrdý a křehký, v této oblasti se dá použít jako konstrukční. Při překročení teploty skelného přechodu se části řetězců mohou začít pohybovat, v důsledku klesne modul pružnosti a zvýší se podíl elastické části deformace, proto se tato oblast nazývá kaučukovitá. V tomto stavu se materiál dá omezeně použít na aplikace bez mechanického namáhání. Po dalším ohřátí dojde k překročení teploty viskózního toku a uvolnění řetězců, materiál přejde do taveniny. Při těchto teplotách jsou plasty zpracovávány [2,7].

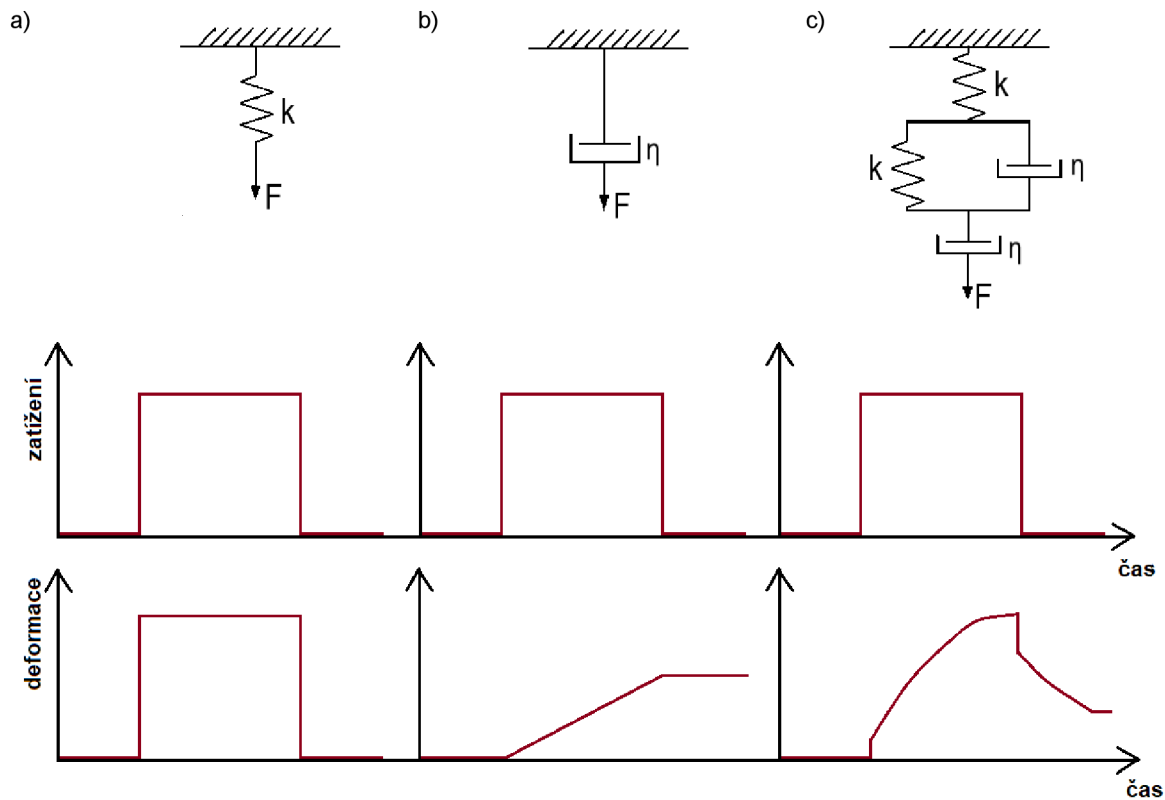
V chování semikrystalického termoplastu se kombinuje reakce amorfních a krystalických oblastí. Proto při překročení teploty skelného přechodu dojde jen k mírné změně vlastností – krystalické oblasti zůstávají beze změny, a rozpustí se až při překročení teploty tání. Díky tomu lze semikrystalické polymery provozovat při vyšších teplotách [2,7].

V případě polymerního ozubení se kombinuje vliv tepla z okolí a tepla vznikajícího v důsledku provozu – třením povrchů zubů a disipací energie v materiálu. Odolnost materiálu proti zvýšeným teplotám se dá zlepšit přidáním plniv, ale i provozním režimem. Proto se převody přenášející vyšší výkony provozují v mazaném režimu – mazivo zlepší odvod tepla a v důsledku snížení tření zmenší jeho generaci, blíže viz kapitola 3.6. Pozitivní vliv má také kombinace kovu a plastu. Buďto se polymerní ozubení páruje s kovovým [10], případně je možné z kovu vyrobit část ozubeného kola [11] – kov má vyšší schopnost kumulace a odvodu tepla než polymery [1,2,7].

3.4.2 Viskoelastické chování

Viskoelastické chování popisuje reakci polymerního materiálu na vnější zatížení. Ta se skládá ze tří částí – plastické, elastické a zpožděně elastické. První dvě se projeví ihned po zatížení, zpožděně plastická se rozvíjí v čase. Důsledkem je deformace dílu, jejíž velikost roste s dobou zatěžování a teplotou – tzv. creep („tečení materiálu“). Dalším důsledkem je schopnost elastického zotavení – po odeznění zatížení plastový díl vykazuje snahu vrátit se do původního tvaru. Se zpožděně plastickou deformací je spojena i relaxace napětí – síla nutná pro udržení konstantní deformace se s časem snižuje. Proto je problematické u plastových součástí realizovat silové styky [5]. V případě polymerního ozubení se tyto jevy často výrazně neprojevují, zatížení zubu má cyklický charakter a většinou není vystaveno trvalému zatížení [7]. Značný význam má ale únavové chování plastů, viz dále [2,7].

Pro popis a predikci chování plastů pod zatížením se používají reologické modely – skládají se z pružin, které simulují pružnost (tuhost k , určuje odolnost vůči deformaci) a tlumičů, simulujících viskozni tečení (viskozita η , určuje odpor vůči tečení). Reologické modely a reakce na zatížení pro ideálně tuhé, ideálně viskózní a viskoelastické těleso jsou na obr. 3.4.2-1 [6].

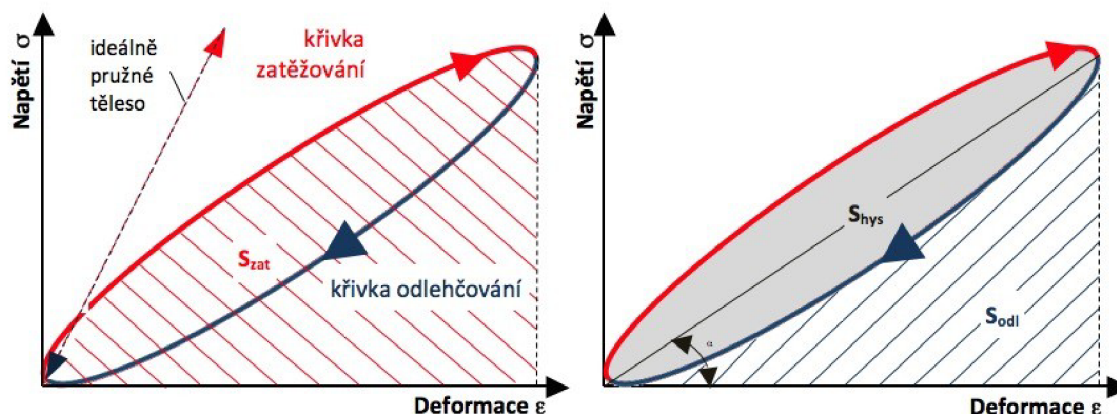


obr. 3.4.2-1 Modely a reakce na zatížení; a) tuhé; b) viskózní; c) viskoelastické těleso; [autor dle 6].

3.4.3 Únavové namáhání

Schopnost predikovat únavové chování je pro polymerní ozubení zásadní – každý zub je během provozu vystaven cyklickému namáhání, a tudíž ohrožen únavovým lomem. Únavová životnost se stanovuje stejně jako u oceli, výsledná Wöhlerova křivka ale nevykazuje oblast trvalé únavové životnosti. Proto se u plastů podobně jako u hliníkových slitin stanovuje časová mez únavy [7].

Důležitou vlastností polymerního ozubení je schopnost tlumení. Ta se projevuje tak, že při zatížení a následném odlehčení se dodaná a uvolněná energie liší, jejich rozdíl je disipován v podobě tepla. Toto teplo následně vede k zahřívání výrobku. Tlumení je jedním z projevů viskoelastického chování, konkrétně faktu, že deformace se zpožďuje za zatížením. Graficky tento jev zachycují hysterezní smyčky v grafu napětí-deformace, viz obr. 3.4.3-1. V tomto grafu horní křivka představuje dráhu zatěžování, plocha pod ní práci dodanou tělesu během deformace, dolní křivka dráhu odlehčování, plocha pod ní práci vykonanou tělesem při vracení do původního tvaru a plocha mezi těmito křivkami práci přeměněnou na teplo [2].



obr. 3.4.3-1 Hysterezní smyčky (plocha smyčky vyjadřuje energii přeměněnou na teplo); [2].

3.4.4 Změny rozměrů plastových součástí

Další vlastností, která komplikuje aplikaci polymerů coby konstrukčních materiálů jsou podstatné změny rozměrů, které vykazují. Jejich příčiny a možnosti jejich eliminace jsou popsány dále.

Prvním jevem, který vede ke změně rozměrů, ale i změnám mechanických vlastností, je hygroskopičnost polymerů. Je projevem navlhavosti materiálu. Proto plasty které vykazují navlhavost (polární povahy, například nylony (PA)) nemohou být provozovány ve vlhkém prostředí [2]. K rozměrovým a kvalitativním změnám může vést i nevhodná kombinace plasty a maziva či chemikálií, viz kapitola 3.6.2.

Dalšími jevy jsou smrštění a dosmrštění. Dojde k nim během, potažmo po tuhnutí materiálu z taveniny, při obrábění se proto neprojevují. Jejich velikost se dá zmenšit použitím plněného materiálu. V tomto ohledu je lepší plnivo nevyztužující, protože vznikne izotropní materiál, jehož smrštění je ve všech místech stejné. Při použití vláknitého plniva se smrštění v závislosti na množství a orientaci vláken může lišit. Velikost těchto změn je možné redukovat také vhodnou změnou tvaru, případně vhodně umístěnými odlehčovacími otvory [5,7].

Posledním jevem, který se projevuje změnami rozměrů je teplotní dilatace v souvislosti s nárůstem teploty během provozu. I její velikost se dá omezit použitím plniv. Z důvodu podstatných rozměrových změn je vždy nutné navrhovat polymerní ozubení s dostatečnou boční i hlavovou vůlí [5].

3.4.5 Zkoušení polymerních materiálů

Pro aplikaci jakéhokoliv materiálu je nezbytné určit jeho mechanické vlastnosti. To platí i pro materiály na bázi polymerů, pro reflektování specifických vlastností ale bylo nutné zavést speciální zkoušky. S ohledem na velkou závislost chování na okolním prostředí je nutné provádět zkoušky za předpokládaných provozních podmínek.

Tahová zkouška

Stejně jako u kovů tak i u plastů často slouží ke zjišťování mechanických vlastností zkouška prostým tahem. Výhodou této zkoušky je především její snadnost, nízké náklady a rychlost. Plasty se ale během zkoušky chovají jinak než kovy. Výstupem tahové zkoušky jsou tahové diagramy. Jejich průběh je komplikovanější než u kovů, deformace je závislá nejen na velikosti zatížení, ale i na rychlosti zatěžování a teplotě. Jeden materiál v závislosti na těchto faktorech může vykazovat diametrálně odlišné výsledky [2,5,7].

Creepová zkouška

Jedná se o specifickou zkoušku plastů, vypovídající o sklonu materiálu k plastické deformaci („tečení“). Zatímco zkouška prostým tahem dá představu o chování materiálu v krátkém časovém úseku, creepová zkouška umožňuje stanovit chování v delším časovém horizontu, ideálně v celé předpokládané životnosti výrobku. Z toho plyne hlavní komplikace creepové zkoušky – pro získání věrohodných výsledků je třeba ji nechat běžet po dlouhou dobu, často trvá měsíce či roky. I přesto je její provedení žádoucí, pro řadu aplikací důležitější než znalost výstupu tahové zkoušky. Jedná se především o díly vystavené trvalému zatížení, například ozubení vystavené statickému zatížení. Průběhy napětí a deformace se totiž s časem výrazně mění. Výstupem creepové zkoušky je creepová křivka a isochronní křivky [2,7].

Dnes již lze predikovat časově závislé chování i na základě znalosti jednodušejí měřitelných závislostí, výsledky těchto výpočtů jsou jen přibližné a od experimentálně stanovených průběhů se mohou značně lišit [7].

Měření tvrdosti

Tvrdot určuje odpor materiálu proti vniku cizího tělesa (indentoru). Pro zohlednění specifických vlastností plastů (snadné plastické deformace, viskoelastického chování) bylo nutné modifikovat zkoušky původně určené pro kovy. Při měření tvrdosti plastů se odečítá velikost vtisku v materiálu, vzniklého při působení předepsané síly na předepsaný indentor po určenou dobu. Dle konkrétních podmínek se rozlišuje několik stupnic (Shore A, Shore D, Rockwell R, Rockwell L, Rockwell M a další).

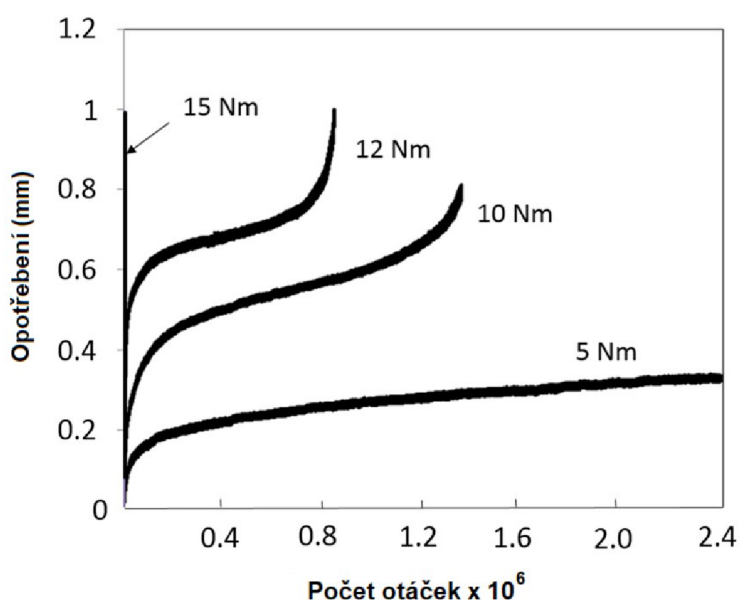
Hodnoty v této práci byly povětšinou stanoveny dle Rockwella R, pouze v tabulce 3.5-1 byly použity hodnoty ve stupnici dle Brinella (umožňují přibližné srovnání tvrdostí kovů a plastů) [2,4].

Speciální zkoušky polymerního ozubení

Pro výzkum polymerního ozubení jsou důležité speciální zkoušky; nejdůležitější je běhová zkouška. Během této zkoušky se sleduje chování konkrétního převodového stupně pod různými zatíženími při různých obrátkách. Dá se tak sledovat trvanlivost ozubených kol vyrobených z různých materiálů v různých provozních podmínkách. Komplikací je obtížná katalogizace výsledků. Příklad výstupu běhové zkoušky ozubeného soukolí vyrobeného z nylonu (PA6) technologií 3D tisku prezentuje obr. 3.4.5-1 [12].

Dalším příkladem zkoušky polymerního ozubení je zkouška na válci. Cílem této zkoušky je stanovit koeficient tření dané dvojice materiálů na základě pozorování kontaktu dvojice válců. Na sadě vzorků reprezentujících průběh křivosti profilu zubu lze sledovat změny koeficientu tření v průběhu trvání záběru [13].

Pro stanovení dosažených geometrických tolerancí je nutné změřit přesné rozměry ozubeného kola, to se provádí standardním vybavením pro inspekci ozubení z kovů [14].



obr. 3.4.5-1 Výsledky běhových zkoušek; [12], upraveno.

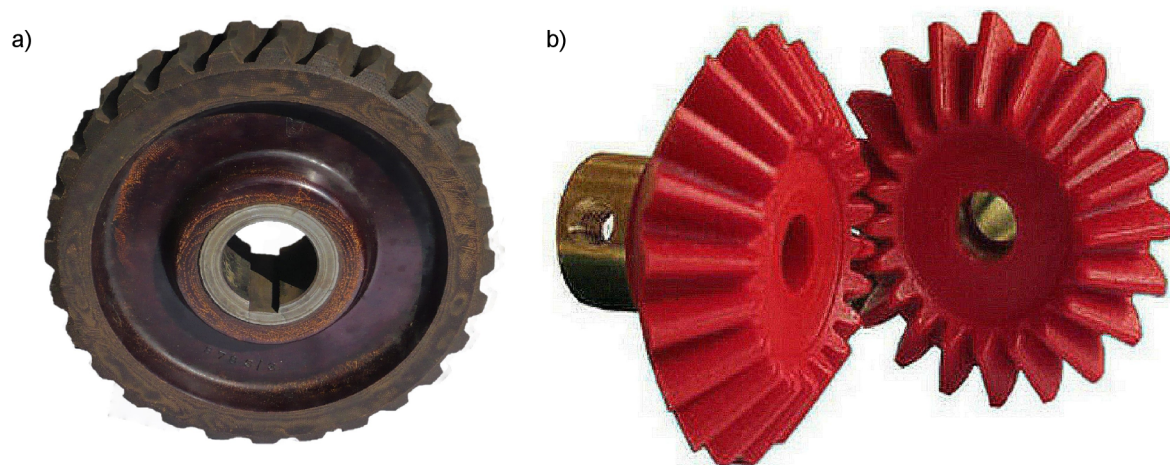
3.5 Vlastnosti polymerního ozubení

Pro výrobu ozubení je použitelná řada materiálů. Jedná se o kovy (ocel, mosaz, bronz...), nebo materiály polymerní. Z asi 35 000 [7] dnes existujících plastů jich má dostatečnou odolnost pro tyto aplikace jen malá část. Jejich přehled je v kapitole 3.7, porovnání mechanických, fyzikálních a tepelných vlastností v kapitole 3.8. Příklady aplikace polymerního ozubení jsou zřejmé z doprovodných obrázků. Tyto jsou pouze ilustrační, pokud není výslovně uveden materiál, nepodařilo se ho dohledat.

tab. 3.5-1 Porovnání základních vlastností některých materiálů používaných pro výrobu ozubení.

	Hustota	Mez kluzu	Youngův modul	Tažnost	Tvrдост	Max. provozní teplota	Zdroj
	g/cm ³	MPa	MPa	%	HB	°C	-
Ocel 11 600 (E335)	7,90	400	207 000	13	169	400	[15]
Cínový bronz 42 3123 (CuSn12)	8,60	170	110 000	6,4	97	170	[15]
High-tech plast (PEEK)	1,32	100	4 000	50	230	250	tab. 3.7.4-1
Konstrukční plast (PA 6)	1,14	76	3 200	55	100	88	tab. 3.7.1-1
Komoditní plast (ABS)	1,06	69	2 500	45	85	90	tab. 3.7.7-1

Oproti kovům mají polymerní materiály značně odlišné vlastnosti, viz tabulka výše. Zde je možné vysledovat, že plasty mají nižší hustotu, polymerní díly mají proto podstatně nižší hmotnost. Výrazně nižší mez kluzu a Youngův modul pružnosti spolu s vyšší tažností charakterizují pružnost a nižší mechanickou odolnost materiálů. Tvrдост povrchu může být vyšší i nižší, záleží na konkrétní dvojici porovnávaných materiálů. Maximální provozní teplota je výrazně nižší, jen několik plastů nejvyšší kvality může konkurovat mosazím a bronzům. Maximální přípustné teploty pro ocelová soukolí polymery nedosahují.



obr. 3.5-1 Různá provedení kovového náboje; [a) autor; b) 16].

3.5.1 Přednosti polymerního ozubení

Na základě interpretace tabulky 3.5-1 provedené výše a znalosti klíčových vlastností plastů uvedených v předchozích kapitolách lze vyslovit přednosti polymerního ozubení. Těmi jsou:

- nižší hmotnost,
- schopnost tlumení rázů a vibrací,
- nižší hlučnost (literatura [17] udává 2 až 5 dB),
- korozivzdornost,
- možnost pracovat bez maziva (viz kapitola 3.6),
- dobré kluzné vlastnosti a odolnost proti otěru,
- široký výběr výrobních technologií,
- tvarová a konstrukční variabilita,
- nižší výrobní náklady (50 – 90 % ceny kovového ozubení [17]).

Polymerní ozubení se používá v aplikacích kde je využito jeho přínosů, a naopak se jen minimálně projeví jeho nevýhody. Schopnost tlumení, korozivzdornost a možnost provozu bez přítomnosti maziva umožňuje provozovat polymerní ozubení v podmínkách, ve kterých kovové ozubení provozovat nelze.

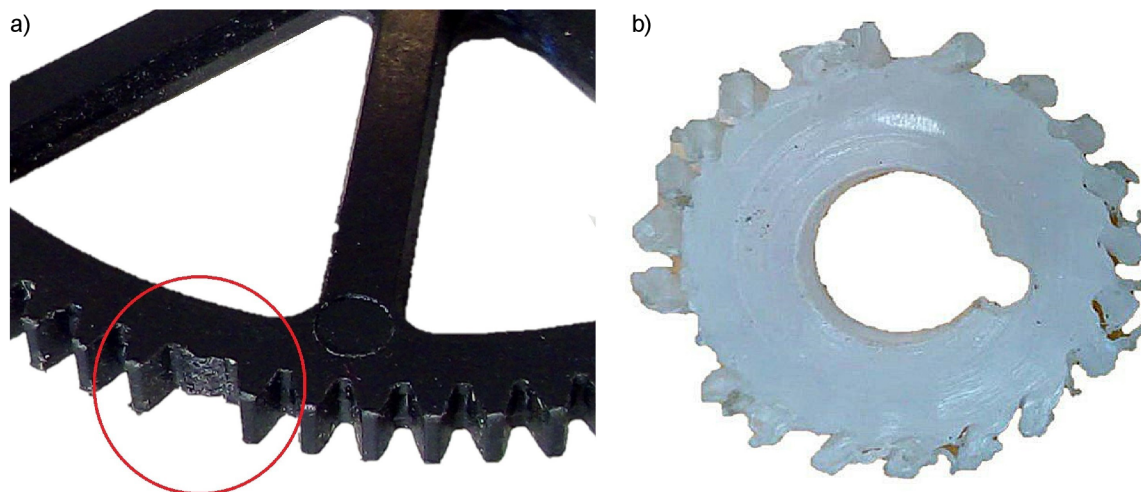
Často se využívá tvarové a konstrukční variability. Díky odlišným technologiím zpracování (hlavně vstřikování a 3D tisku) lze z plastů snadno vyrábět tvarově složité díly, případně kombinovat kovové a plastové části – viz. obr. 3.5-1. To často umožní zjednodušit a automatizovat výrobu, a to i složitých tvarů ozubení (globoidní šneková kola, zvonová a kuželová soukolí, ozubené hřebeny různých tvarů, šneky...). Ideálně lze vytvořit tzv. vícefunkční součást – tvarově značně složitý díl, který integruje několik funkčních ploch [5]. Zatímco při konvenčních metodách obrábění by ho bylo nutné vyrábět v několika výrobních operacích, případně rozložit na několik částí, zpracování plastů lisostříkem umožňuje snadnou a levnou výrobu.

3.5.2 Nedostatky polymerního ozubení

Z chování polymerů a porovnání jejich mechanických vlastností s kovy vyplývají i nevýhody použití polymerního ozubení. Tyto nedostatky jsou způsobeny podstatou polymerních materiálů, vhodnými změnami (zvýšením krystalinity, přidáním plniv, konstrukcí...) se dá pouze mírně snížit jejich vliv. Mezi nevýhody polymerního ozubení patří:

- nižší mechanická odolnost,
- nižší teplotní odolnost,
- nižší přesnost v důsledku rozměrových změn,
- složité výpočtové modely.

Z důvodu nižší teplotní a mechanické odolnosti jsou oblasti, kde je nahrazení ocelových kol dosud nemyslitelné. Jedná se o ozubení vystavená velkému mechanickému či tepelnému namáhání, pro která ani odolnost high-tech plastů není dostatečná. Jde například o součásti zařízení hutních provozů nebo převodovky silničních a kolejových vozidel. Následky provozování polymerního soukolí v nepříznivých podmínkách jsou na obrázku 3.5.2-1, rozměrové změny byly diskutovány výše, výpočtové modely nejsou tématem práce.



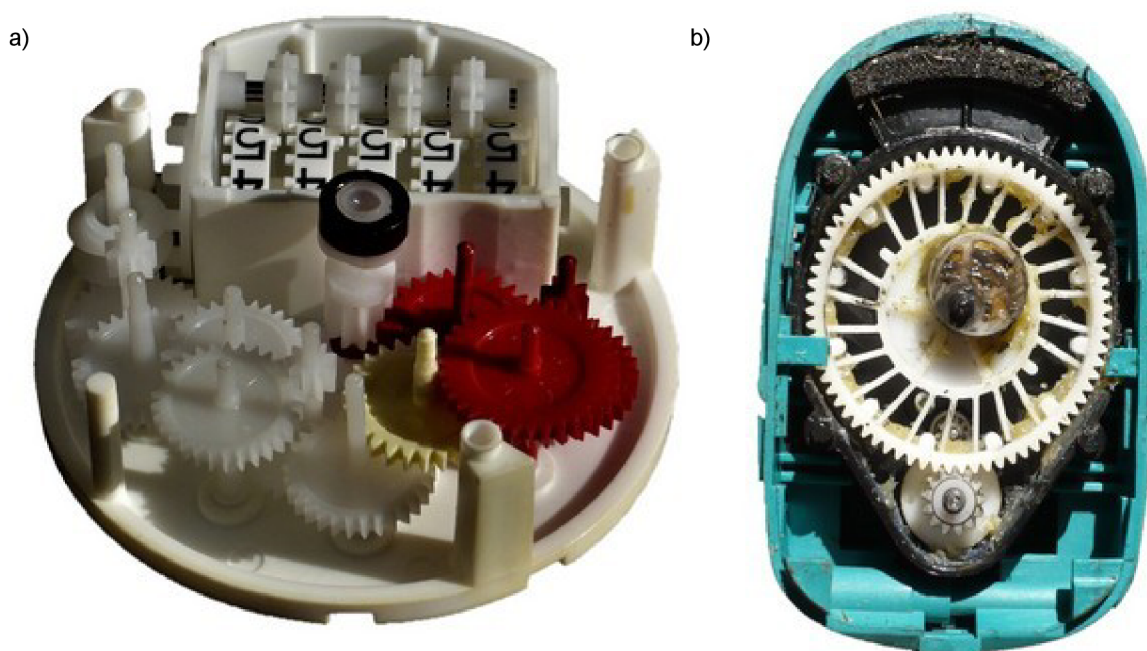
obr. 3.5.2-1 a) následky mechanického [autor]; b) následky tepelného [18] přetížení ozubení.

3.6 Nároky na materiál ozubení

Výběr polymerního materiálu pro výrobu ozubení je komplexní problém. Musí se vzít v úvahu všechny aspekty, které ho ovlivňují. To jsou provozní podmínky, výrobní série a způsob výroby, rozměry a konstrukční řešení, náklady na výrobu a provoz, očekávaná spolehlivost a mnoho dalšího. Tyto požadavky jsou provázány, je nutné je vzájemně přizpůsobovat. Proto nelze najít jeden „nejlepší“ materiál, volba je vždy založena na kompromisu [4].

Uvažovaný materiál musí splňovat řadu často protichůdných požadavků, jako je dobrá únavová životnost, vrubová a rázová houževnatost, nízký koeficient tření, otěruvzdornost, tlumící schopnosti, zpracovatelnost a odolnost proti chemikáliím. Důležitým parametrem je i cena. Přidáním plniv je možno změnit vlastnosti tak, že požadavky splní i materiál, který byl čistý nepoužitelný. I s ohledem na ekonomiku je třeba zvážit, zda je lepší použít horší (a většinou levnější) materiál, nebo kvalitnější (a většinou dražší) [19]. Přehled a porovnání dostatečně odolných materiálů je v dalších kapitolách.

Kromě aspektů uvedených v jiných částech práce je důležité, v jakých podmínkách bude soukolí pracovat. Existují dva provozní režimy – mazaný a suchý, viz obr. níže.



obr. 3.6-1 Ozubení provozované; a) v nemazaném režimu – vodoměr; b) v mazaném režimu – nůžky na živý plot; [autor].

3.6.1 Provoz v nemazaném režimu

Jednou ze zásadních výhod plastového ozubení je možnost ho provozovat bez přítomnosti maziva, v tzv. suchém, nemazaném režimu. Této možnosti se využívá v řadě aplikací, kde není přípustná kontaminace okolí mazivem nebo naopak (čisté nebo prašné prostředí). Výhodná je i bezúdržbovost takto provozovaného převodu.

První oblastí použití těchto převodů jsou převody kinematické – vzhledem k malému zatížení je ozubení jen minimálně namáháno. Díky minimálnímu namáhání jsou nízké i nároky na materiál. Většinou se jedná o nylony (PA) nebo acetal (POM), v některých aplikacích se tyto materiály i kombinují – jedno kolo je vyrobeno z nylonu, druhé z acetalu. Tato kombinace poskytuje optimální kluzné vlastnosti [20]. Takovéto převody se vyskytují v kancelářské, laboratorní a měřicí technice, hračkách, RC modelech...

Druhou oblastí pak jsou převody silové. Vzhledem k absenci maziva dochází k přímému kontaktu povrchů zubů, převod je chlazen pouze vzduchem. Koeficient tření na sucho je vždy větší než pod mazivem, [20] to vše klade na materiál vysoké nároky, proto je nutné použít materiál s vyšší odolností proti otěru a zvýšeným teplotám. I tak nelze na sucho přenášet příliš vysoké výkony. Na ozubení přenášejícím větší zatížení a pracujícím bez maziva byly pozorovány vzniky mikrosvarů [21]. Tyto převody se používají například v zařízeních pro chemický, potravinářský, farmaceutický a textilní průmysl či v pomocných systémech motorových vozidel, případně u stavební a zemědělské mechanizace. Literatura [5,21] však doporučuje i na sucho provozované soukolí namazat alespoň při záběhu.

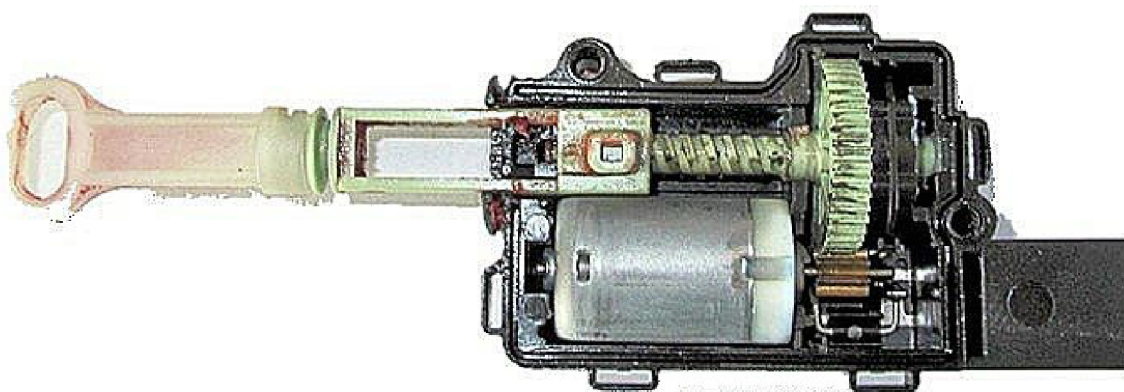
V těchto aplikacích se většinou používají inženýrské, případně high-tech plasty vyznačující se dobrou odolností vůči těmto nepříznivým podmínkám. Nevhodné je použití plastu plněného skelným vláknem. Suché tření způsobuje vytrhávání vláken z matrice a následný vysoký otěr [5,13].

3.6.2 Provoz v mazaném režimu

Převodový stupeň provozovaný v mazaném režimu je charakteristický přítomností maziva. To brání přímému kontaktu boků zubů a zajišťuje chlazení (literatura [4] uvádí, že olej má až desetinásobně lepší chladicí schopnost než vzduch). Díky tomu lze plastovým soukolím u kterého je zajištěno mazání přenášet podstatně vyšší zatížení. Výzkum [10] zjistil zvýšení životnosti soukolí o 66 % až 200 % v závislosti na provozním zatížení (s větším zatížením vliv maziva roste). Soukolí může být mazáno řadou způsobů. Nejjednodušším způsobem je mazání interním mazivem. Toto mazivo je do materiálu přidáno při výrobě. Jedná se o materiály s dobrými kluznými vlastnostmi, například teflon, grafit, silikon nebo sulfid molybdeničitý (MoS_2) [4].

Výhodami tohoto způsobu mazání je nulová kontaminace okolí a bezúdržbovost, nevýhodou nízký odvod tepla. Proto se používá u méně namáhaných soukolí. Pro více namáhané polymerní převody se používají obvyklé způsoby mazání – od občasného potření olejem či mazacím tukem až po sofistikované oběhové mazání. Výhodou těchto způsobů je lepší odvod tepla z materiálu [22].

V mazaném režimu lze provozovat většinu technických plastů. Vždy je nutné ověřit kompatibilitu plastu a maziva – některé kombinace plastů s nevhodným mazivem vedou k jejich degradaci. Dle literatury [21] se to týká například ABS plastu, polyethylenů (PE) nebo polykarbonátu (PC). Při výběru vhodného maziva je třeba kompatibilitu ověřit za provozních podmínek, tj. především zvýšených teplot [21].



obr. 3.6.2-1 Mechanismus elektrického zámku dveří (Peugeot 1007); [23].

3.7 Přehled polymerních materiálů pro výrobu ozubení

Tato kapitola obsahuje výčet polymerních materiálů používaných pro výrobu ozubení a jejich bližší specifikaci. Součástí jsou také tabulky, uvádějící základní vlastnosti plastů.

Hodnoty v těchto tabulkách byly získány porovnáním dat z údajů výrobců, distributorů a databází materiálových listů [24 – 30]. Hodnoty jsou platné pro neplněné plasty, přidáním plniv lze vlastnosti výrazně měnit. Uvedené hodnoty je třeba brát pouze jako orientační – údaje pro stejný materiál se v různých zdrojích liší a téměř vždy jsou poskytovány bez záruky. Zjištěné hodnoty výrazně závisí na přesném složení a zkušebních podmínkách, ty ale výrobci ve svých podkladech téměř neuvádí.

Uváděné koeficienty tření jsou platné pro suché tření plastu vůči oceli, hodnoty zjištěné na konkrétní dvojici plastových ozubení budou odlišné. Přesto tyto hodnoty dávají základní představu o kluzných vlastnostech plastů.

3.7.1 Polyamidy (PA)

Jedná se o konstrukční plasty semikrystalické struktury, neplněné mají mléčně bílou barvu. Jsou vůbec nejstarší skupinu termoplastů používaných pro výrobu ozubení. Díky tomu jsou bohaté zkušenosti s jejich chováním v různých nejen průmyslových aplikacích a i dnes jsou to velmi často používané materiály [20].

Jejich výhodami jsou nízká cena, dobrý poměr pevnosti a houževnatosti, dostatečná odolnost proti opotřebení a tlumící schopnosti. V některých aplikacích se uplatní i jejich vlastnosti elektroizolační.

Nevýhody spočívají v nízké odolnosti proti kyselinám a zásadám, nízké odolnosti proti creepu, nízké rozměrové stabilitě, která zpříčiňuje deformace výrobků a omezuje jejich maximální rozměry, a odolnost proti zvýšeným teplotám, která je nižší než u většiny jiných konstrukčních plastů. Pokud pracují v přítomnosti chemikálií (včetně maziva), je nutné zabránit zahřívání – při teplotách nad 65°C se snižuje jejich chemická odolnost [21]. Zpracovávají se hlavně vstřikováním, ale lze je obrábět a extrudovat, PA6 i odlévat. Vlastnosti těchto materiálů jsou v tabulce níže.

tab. 3.7.1-1 Vlastnosti polyamidů.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PA6	1,14	2,80	76	3200	5
PA66	1,14	2,60	85	3200	5
PA11	1,04	0,90	45	1800	20
PA12	1,02	0,10	53	1800	15
PPA	1,13	2,80	69	3000	70

	Tvrdost	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PA6	100	0,40	50	- 40	88
PA66	100	0,35	50	- 30	95
PA11	107	0,36	40	- 50	85
PA12	103	0,32	40	- 60	100
PPA	124	0,35	120	- 30	160

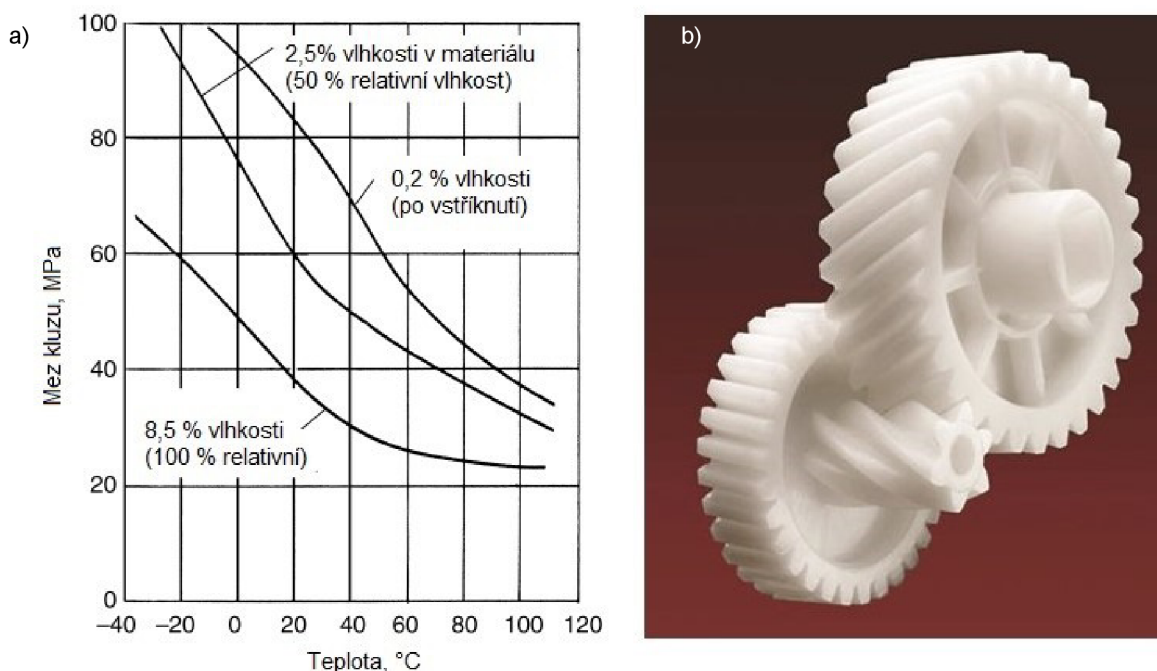
Typy polyamidů

Nejrozšířenější jsou polyamidy **PA6** (silon) a **PA66** (nylon). Jejich hlavní vlastností, která nesmí být opomenuta, je vysoká hygroskopičnost. Ta vede ke změnám mechanických vlastností (snížení pevnosti, zvýšení houževnatosti – viz obr. 3.7.1-1) a rozměrů. Omezující je také nízká vrubová houževnatost. Tyto materiály se proto často používají pro realizaci málo namáhaných převodů, které pracují bez přítomnosti maziva (mechanismy měřících zařízení a hraček, hodinové strojky, pomocné systémy v dopravních prostředcích a domácích spotřebičích...), případně málo namáhaná soukolí v mazaném režimu.

Polyamidy **PA11** a **PA12** vykazují nižší tvrdost, ale vyšší pružnost a houževnatost. Neprojevuje se u nich snížení houževnatosti za mrazu, navlhavost je jen minimální. Jsou použitelné pro nižší zatížení než PA6 a 66 [5].

Pro náročnější aplikace se používají plněné polyamidy [29]. Pro vyšší zatížení se používá plnění skelnými a uhlíkovými vlákny (plnění skelnými vlákny možno aplikovat jen na mazaná soukolí), pro zlepšení kluzných vlastností interní mazání příměsí MoS₂ nebo PTFE (sníží vrubovou houževnatost, proto je tato úprava vhodná pro málo zatížené rychloběžné převody).

Polyftalamid (PPA) má vyšší chemickou odolnost, odolnost proti creepu a únavovému namáhání. Lze provozovat až do teploty 160 °C. Vlastnosti se dají modifikovat plněním. Omezením je jeho navlhavost. Použití má podobné jako jiné polyamidy [2,4,5,24,26].



obr. 3.7.1-1 a) Závislost meze kluzu na vlhkosti pro PA6; [4], upraveno.
b) Soukolí sloužící k nastavení sedadla v autě; [19].

3.7.2 Acetal (POM)

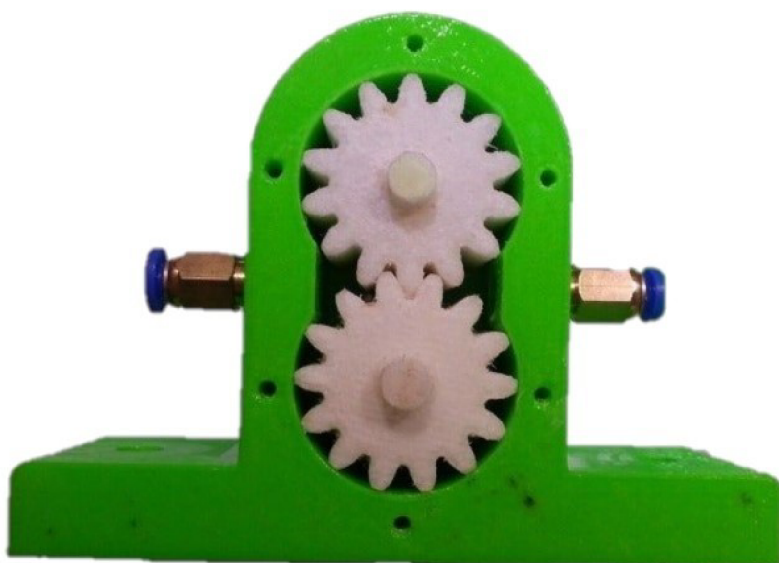
Jedná se o konstrukční semikrystalický polymer, neplněný má mléčně bílou barvu. Acetal se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, zejména odolností proti praskání pod napětím, vysokou tvrdostí a odolností proti chemikáliím. Hlavní devizou je jeho minimální nasákavost, a s tím spojená vysoká rozměrová stálost. Proto se používá pro výrobu dílů s požadavkem na vysokou přesnost (ozubení, vačky, výstelky kluzných ložisek, kluzná vedení...), případně dílů pracujících pod vodou. Je vhodný pro styk s potravinami, používá se pro výrobu součástí zařízení potravinářského průmyslu, farmacie, úpraven pitné vody a vodovodních řadů. Ozubení z acetalu má vysokou přesnost, lze jej provozovat jak v přítomnosti maziva, tak vlhkosti. Vlastnosti acetalu udává tabulka níže.

tab. 3.7.2-1 Vlastnosti acetalu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
POM	1,39	0	70	2800	10

	Tvrdost	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
POM	101	0,33	- 60	- 40	100

V některých aplikacích nestačí odolnost proti abrazivnímu opotřebení, ta se zvyšuje integrováním maziva (většinou PTFE). To ale vede ke snížení pevnostních charakteristik, proto se používá i kombinace teflonu a skelných vláken. Pro aplikace kde jsou pevnostní charakteristiky důležitější než odolnost proti opotřebení se používá plnění pouze skelnými vlákny [29]. Acetal se dá vstříkovat a extrudovat, dá se zpracovávat i FDM rapid prototypingem. Výborně se obrábí, to zároveň podpoří rozměrovou přesnost výrobků [2,4,8,24,26,31]



obr. 3.7.2-1 Zubové čerpadlo z POM vyrobené FDM rapid prototypingem; [32].

3.7.3 Polykarbonát (PC)

Jedná se o konstrukční amorfni termoplast. Vyznačuje se nízkou navlhavostí, dobrou tvarovou stálostí, přijatelnými mechanickými vlastnostmi a dobrou odolností proti vysokým i nízkým teplotám, viz tabulka vlastností. Neplněný má vynikající světelnou propustnost, čehož se využívá ve většině jeho aplikací (střechy pergol a bazénů, laboratorní pomůcky, kryty osvětlovacích těles a kontrol, ochranné brýle a štíty, nosná vrstva kompaktních disků...).

tab. 3.7.3-1 Vlastnosti polykarbonátu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PC	1,20	0,20	65	2300	10
	Tvrdość	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PC	101	0,33	150	- 40	100

Pro použití v průmyslových aplikacích je vhodné jeho mechanickou pevnost zvýšit přidáním vláknitého plniva a třecí vlastnosti přidavkem teflonu [29]. Tím materiál ztratí svoji průhlednost, ale získá vlastnosti které ho činí použitelným pro mechanicky namáhané aplikace, mimo jiné i méně namáhaná ozubená kola. Ozubení s tohoto materiálu nelze provozovat v mazaném režimu, proto se hodí jen na méně namáhané kinematické převody.

Většina výrobků z polykarbonátu se vyrábí vytlačováním, ozubení obráběním nebo vstříkovaním, materiál se dá zpracovávat i FDM rapid prototypingem [4,14,24,31].

3.7.4 Polyetheretherketon (PEEK)

Je to high-tech semikrystalický polymer, jeden z nejodolnějších polymerních materiálů běžně používaných ve strojírenství. Vyznačuje se vysokou pevností, odolností proti opotřebení, únavovému namáhání i creepu, chemickou odolností (vyjma acetonu), tvrdostí a rozměrovou stálostí, viz tabulka vlastností. Tyto vlastnosti si uchovává jak za vysokých, tak i nízkých teplot, proto se využívá i v tepelně namáhaných aplikacích. Je samozhášivý, zdravotně nezávadný a schválený pro styk s potravinami. Odolává většině záření, UV způsobí změnu barvy. Mimořádné vlastnosti tohoto materiálu jsou vykoupeny vyšší cenou.

tab. 3.7.4-1 Vlastnosti polyetheretherketonu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PEEK	1,32	0,20	95	4000	80

	Tvrdost	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PEEK	123	0,30	145	- 50	250

Používá se pro výrobu namáhaných strojních dílů – například ložisek, kluzných vedení, ozubených kol, sedel ventilů aj. a to i v automobilním, leteckém, jaderném či kosmickém průmyslu. Požívá se i ve zdravotnictví, například pro výrobu kloubních náhrad. Díky odolnosti vůči parám a chemikáliím i za zvýšené teploty se z něj dají vyrábět díly pro chemický průmysl a energetiku. Ozubení lze provozovat v mazaném i nemazaném režimu a vystavit značnému zatížení.

Pro zlepšení mechanických vlastností se dá plnit, používá se plnění skelnými i uhlíkovými vlákny. Kluzné vlastnosti se dají zlepšit přidáním PTFE [29]. Pro výrobu extrémně namáhaných součástí (výstelky kluzných ložisek, ozubená kola) se používá kombinace grafitu, teflonu a uhlíkových vláken. Tento materiál má jedinečnou kombinaci pevnosti, houževnatosti, nízkého tření a vysokou odolnost proti opotřebení. Plnění keramickými vlákny se používá pro elektroizolační aplikace.

Navzdory vysoké odolnosti je dobře obrobitelný. Bez větších obtíží se dá i vstříkovat. Vyžaduje však dostatečný průřez kanálů vtokové soustavy, vzhledem k teplotě taveniny, která je vyšší než u jiných plastů se výrazněji projeví smrštění [2,14,19,33,34].



obr. 3.7.4-1 Převodovka s šikmými zuby, vložené kolo z PEEK; [34].

3.7.5 Polyestery (PET, PBT)

Jedná se o komoditní polymery, mohou mít amorfní i semikrystalickou strukturu. Amorfní polyestery jsou známé jako materiály vhodné pro výrobu průhledných obalů (PET lahve), v průmyslové praxi se používají semikrystalické varianty. Ty vynikají nízkou navlhavostí, dobrou rozměrovou stabilitou a dobrými kluznými vlastnostmi při vysoké odolnosti proti opotřebení. Dobře odolávají tukům, olejům, pohonným hmotám, chloru a čistícím prostředkům. Omezující je hydrolyza (rozklad materiálu) ve vodě při teplotách nad 60 °C. Tento jev snižuje teplotní odolnost polyesterů, která není ani v suchém prostředí vysoká, viz tabulka níže.

tab. 3.7.5-1 Vlastnosti polyesterů.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PET	1,38	0,22	80	3000	5
PBT	1,30	0,25	55	2600	75

	Tvrdość	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PET	111	0,25	75	- 20	110
PBT	117	0,19	75	- 30	70

Pro své dobré elektroizolační vlastnosti, snadné zpracování a nízkou cenu jsou polyestery často používány jako materiál pro výrobu částí elektrických instalací, osvětlovacích těles a skříní nejrůznějších zařízení. Jsou vhodné na výrobu dílů s požadavkem na velkou přesnost při malém tepelném namáhání, například kinematické ozubené převody, kluzná vedení a ložiska, kliky a páky a řada dalších. Pro svoji odolnost proti mazivům a palivům se PBT často používá pro různé díly motorových vozidel, a to jak v motorovém prostoru, tak v interiéru.

Dají se velmi lehce vstříkovat, velkou výhodou je malé smrštění. Vstříkované výrobky mají velmi hladký povrch. Je možné je i obrábět. Jejich vlastnosti se často vylepšují přidáváním skelných vláken [29]. Někdy se míchají s elastomery, vznikne tak materiál s vysokou schopností tlumit rázy [22]. Ten se používá pro výrobu ozubení vystaveného rázovému namáhání. Z důvodu nízké teplotní odolnosti se někdy kombinují s kovovým protikolem, to zlepšuje tepelné poměry převodu [2,4,19,27].

3.7.6 Polyethyleny (PE)

Existuje několik typů polyethylenu, které se liší hustotou (LDPE – low density, HDPE – high density, UHMWPE – ultra high molecular weight...), a v důsledku i vlastnostmi. Řadí se mezi komoditní plasty. Jedná se o vůbec nejpoužívanější plast (literatura [9]) udává 29 % světové produkce).

Všechny typy jsou lehčí než voda. Většina polyethylenů je používána pro aplikace bez mechanického namáhání (obalový materiál, jímky, kryty...), pro náročnější průmyslové aplikace, mezi které patří i ozubení jsou použitelné HDPE a UHMWPE.

Tyto vynikají dobrou odolností proti opotřebení, minimální absorpcí vlhkosti, elektroizolačními vlastnostmi a zdravotní nezávadností. Konkrétní hodnoty uvádí tabulka níže. Jsou schopny odolávat mnohem nižším teplotám než většina plastů, mají vysokou schopnost odolávat praskání pod napětím. Velkou devizou je jejich velmi příznivá cena (přibližně 1/3 ceny nylonu [9]). Přítomnost maziv vyvolává bobtnání, proto jsou provozovány pouze v suchém režimu.

tab. 3.7.6-1 Vlastnosti polyethylenů.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
HDPE	0,95	0,10	26	1200	33
UHMWPE	0,93	0,00	17	790	200

	Tvrdość	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
HDPE	60	0,27	- 120	- 100	90
UHMWPE	60	0,11	- 120	- 200	80

Polyethyleny se používají pro výrobu mechanicky méně namáhaných ozubených kol, kluzných vedení, výstelek ložisek, součástí zařízení pro potravinářský a farmaceutický průmysl. Z důvodu reakce s mazivou je lze provozovat pouze v suchém režimu. Zpracovávají se většinou vstřikováním, ale lze je i obrábět [2,7,28].

Zajímavou možností je použití polyethyleny vyrobeného z obnovitelných zdrojů (cukrové třtiny). V případě jeho vyztužení pomocí přírodních vláken (drť ze dřeva břízy žluté) má velmi dobré mechanické charakteristiky (ozubený převod s tohoto materiálu vykazuje životnost srovnatelnou s nylonem vyztuženým skelným vláknem). Použití tohoto biomateriálu místo běžného polyethyleny přinese snížení emisí CO₂ o 2,5 tuny na tunu materiálu. Převodové stupně z tohoto materiálu jsou již v provozu i u renomovaných firem (Nestle, Danone, Toyota), a bezesporu představují zajímavou alternativu k materiálům běžně používaným [9].

3.7.7 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

Jedná se o amorfni komoditni termoplast, řadí se mezi styrenové plasty – tato skupina obsahuje řadu materiálů na bázi polystyrenu, vlastnosti ostatních zástupců (hlavně křehkost) ale vylučují jejich použití coby konstrukčních plastů. Většinou se používají pro výrobu dílů, které nejsou mechanicky namáhány (obalové a izolační materiály, kryty nejrůznějších zařízení a kancelářské techniky, jednorázové nádoby, potrubí...). Jen ABS plast má dostatečnou odolnost pro strojírenské použití, používá se pro výrobu široké palety minimálně namáhaných strojních součástí. Poměrem jednotlivých složek se dají značně měnit vlastnosti. Při vhodném poměru získá materiál dostatečnou odolnost i pro výrobu málo namáhaných ozubených převodů, vlastnosti tohoto materiálu uvádí tabulka níže.

tab. 3.7.7-1 Vlastnosti ABS plastu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
ABS	1,06	0,00	45	2500	14

	Tvrdost	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
ABS	107	0,55	100	- 20	90

Aplikační možnosti tohoto materiálu jsou omezeny především nízkou mechanickou a chemickou odolností, problémem je také nízká rozměrová stabilita. Proto z něj lze vyrábět ozubení přenášející jen minimální zatížení, provozované v nemazaném režimu. Motivací pro použití ABS plastu je hlavně jeho příznivá cena. Populární aplikací tohoto materiálu je stavebnice LEGO.

ABS plast se dá vstříkovat a obrábět, často se zpracovává i FDM rapid prototypingem [2,20,30,31].

3.7.8 Polyetherimid (PEI)

Jedná se o high-tech amorfní termoplast, neplněný je průsvitný jantarové barvy. Mechanickými vlastnostmi předčí většinu běžně používaných konstrukčních plastů, tyto vlastnosti si navíc uchovává i při vysokých teplotách; je samozhášivý. Dobře odolává hydrolyze a chemikáliím, vysoká je i jeho rozměrová stálost. Již tak velmi dobrá mechanická odolnost se dá dále zvyšovat plněním [29]. Výhodná je také jeho dobrá zpracovatelnost (vstřikování, obrábění FDM rapid prototyping).

tab. 3.7.8-1 Vlastnosti polyetherimidu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm³	%	MPa	MPa	kJ / m²
PEI	1,27	0,20	95	3100	80

	Tvrdoost	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PEI	121	0,42	215	- 30	180

Vzhledem k mimořádným vlastnostem, které jsou bohužel vykoupeny vysokou cenou se PEI používá na extrémně namáhané díly ve všeobecném strojírenství, elektrotechnice, automobilním průmyslu, ale i letecké či kosmické technice a medicíně. Vyrábí se z něj například velmi namáhaná ozubená kola provozovaná v mazaném i nemazaném režimu, klece valivých a výstelky kluzných ložisek, příruby a šroubení nebo obruby brýlí [14,27,29].

3.7.9 Polyfenylensulfid (PPS)

Jedná se o high-tech průsvitný semikrystalický termoplast jantarové barvy. Tento materiál vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti ze všech zmíněných polymerních materiálů, uchovává si je i za vysokých teplot, viz tabulka vlastností níže. Dobře odolává také většině chemikálií.

Má velmi dobrou rozměrovou stabilitu a excelentní tekutost taveniny, díky čemuž se dá naplnit velkým množstvím vyztužujících plniv, případně jiných přísad (obecně zahušťují taveninu a komplikují zpracování). Takto získá jedinečnou odolnost proti velké škále namáhání i velmi vysokým teplotám. Je přirozeně samozhášivý. Příznivá je také jeho cena (je podstatně levnější než např. PEEK).

tab. 3.7.9-1 Vlastnosti polyfenylsulfidu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PPS	1,35	0,20	33	4200	16

	Tvrdość	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PPS	115	0,30	90	- 30	200

Používá se pro výrobu dílů vystavených velkému namáhání (části chirurgických nástrojů, oběžná kola čerpadel, kompresory, ventily a kohouty, ale i náběhové hrany křidel). Rozšířen je také v automobilním průmyslu (součásti palivového a brzdového systému). Hodí se pro výrobu velmi namáhaných ozubených kol s požadavkem na vysokou rozměrovou stálost a teplotní odolnost. Tyto soukolí lze provozovat jak pod mazivem, tak na sucho. Příkladem může být mechanismus elektrické parkovací brzdy osobních automobilů [2,4,20,25,26].

3.7.10 Polyurethan (PUR)

Existuje ve formě termoplastu, reaktoplastu i elastomeru. Jeho mechanické charakteristiky se v závislosti na přesném složení značně liší, od tvrdých typů až po pružné, podle toho se liší také jeho použití. Rozšířené jsou také polyurethanové tmely a lepidla.

Měkký a pružný PUR se používá pro výrobu tlumících prvků, silentbloků, těsnění, ucpávek. Velmi rozšířeny jsou také polyurethanové pěny (molitan). Tvrdý nepěněný polyurethan se hodí i pro výrobky s nárokem na rozměrovou stálost, například ozubená kola. I tvrdý PUR má ale dobré tlumící vlastnosti, proto se používá pro realizaci převodových stupňů vystavených rázovému namáhání, případně s požadavkem na velmi tichý chod. Všechny polyurethany mají dobrou odolnost proti opotřebení, dobře odolávají ropným produktům. Mechanické vlastnosti se i u polyurethanu dají zlepšit plněním, případně přímícháním maziva [30].

tab. 3.7.10-1 Vlastnosti polyurethanu (tvrdý typ použitelný na výrobu ozubení).

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PUR	1,26	0,89	40	1300	6

	Tvrdość	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PUR	65	0,27	- 35	- 20	8

Na struktuře a vlastnostech konkrétního typu PUR závisí možnosti jeho zpracování. Reaktoplasty se zpracovávají gravitačním odléváním, při vhodných podmínkách jsou nadouvány vznikajícím CO₂ a vznikne pěnový materiál. Tvrdé typy se dají vstříkovat, další možností je výroba polotovaru gravitačním odléváním, který je následně dokončen obráběním. Obrábění je možné aplikovat jen na velmi tvrdé typy, u měkkých by snadná deformace zapříčinila nízkou přesnost [2,5,24,26].

3.7.11 Polyimid (PI)

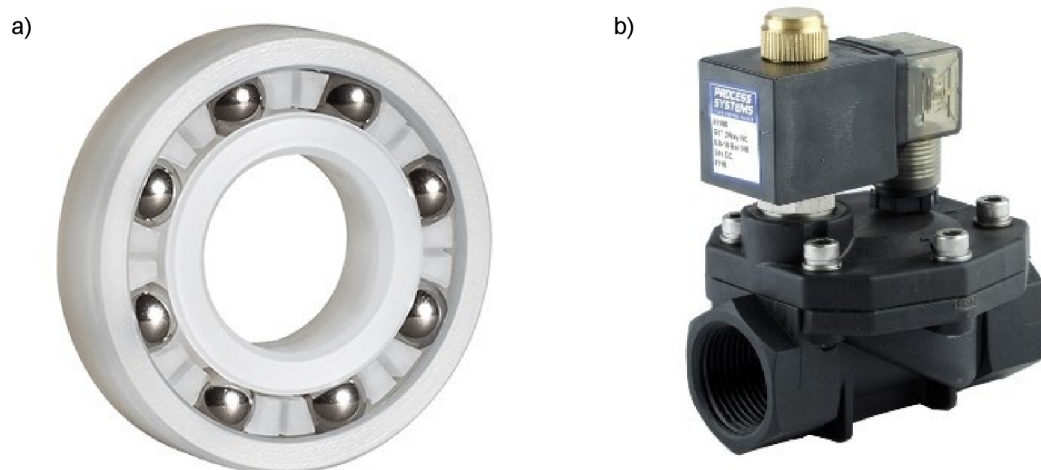
Je dostupný jako termoplast i reaktoplast typické žlutooranžové barvy, řadí se mezi high-tech plasty. Hlavní výhodou je jeho schopnost odolávat velmi vysokým i nízkým teplotám (- 270 až + 300 °C, to jest nejširší rozsah přípustných teplot ze všech zmíněných polymerních materiálů). Proto se hodí pro aplikace s extrémním tepelným namáháním. Díky dobrým kluzným vlastnostem je schopen i v krajně nepříznivých podmínkách fungovat bez přítomnosti maziva, mazivům však odolává.

tab. 3.7.11-1 Vlastnosti polyimidu.

	Hustota	Navlhavost	Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
	g/cm ³	%	MPa	MPa	kJ / m ²
PI	1,30	0,60	95	3110	80

	Tvrdost	Koeficient tření	Teplota skelného přechodu	Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota
	HRC R	-	°C	°C	°C
PI	126	0,20	250	- 270	300

Jeho mechanické charakteristiky se opět dají vylepšit plnivem, používá se směs skelných vláken a maziv (směs PTFE, MoS₂ a grafitu) [29]. Díky vysoké teplotní odolnosti a špatné vodivosti je možné tento materiál použít jako tepelnou izolaci v extrémních podmínkách. Má ideální kombinaci tepelné a mechanické odolnosti při dobrých elektroizolačních schopnostech, proto se velmi často používá pro různé aplikace v elektrotechnice, nejčastěji ve formě izolační pásky (Kapton tape). Ozubení z tohoto materiálu lze provozovat za zvýšených teplot a zatížení, a to jak v mazaném tak nemazaném režimu. Pro strojirenské aplikace se většinou zpracovává obráběním, termoplast lze i vstříkovat [4,5,27].



obr. 3.7.11-1 Další možné aplikace plastů ve strojirenství; a) valivé ložisko [35]; b) elektromagnetický ventil [36].

3.8 Porovnání vlastností polymerních materiálů

V této kapitole jsou porovnány mechanické, fyzikální a tepelné vlastnosti vybraných materiálů z kapitoly předchozí. Jsou vybráni typičtí zástupci komoditních, konstrukčních a high-tech plastů (materiály řazené do stejné skupiny mají podobnou odolnost i oblasti použití). Na základě tohoto srovnání jsou následně stanoveny typické vlastnosti a oblasti použití materiálů těchto skupin.

3.8.1 Porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů

Z mechanických vlastností, které lze stanovit u polymerního materiálu byly vybrány ty, které dají představu o mechanické odolnosti soukolí z daného materiálu. Jsou to mez kluzu, modul pružnosti a vrubová houževnatost.

tab. 3.8.1-1 Porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů.

		Mez kluzu	Youngův modul	Vrubová houževnatost
		MPa	MPa	kJ / m ²
Komoditní plasty	PBT	55	2 600	75
	HDPE	26	1 200	33
Konstrukční plasty	PA6	76	3 200	5
	POM	70	2 800	10
High – tech plasty	PEEK	95	4 000	80
	PI	95	3 110	80

V tabulce výše lze vysledovat, že nejnižší mez kluzu a modul pružnosti mají komoditní plasty, následované plasty konstrukčními. Naopak vrubovou houževnatost vykazují komoditní plasty překvapivě vysokou, nízká mez kluzu ale brání většímu využití této vlastnosti. V případě nylonů je nízká vrubová houževnatost omezující – při rázovém namáhání mají sklon k praskání.

High-tech plasty vykazují vždy nejvyšší hodnoty, což indikuje nejvyšší mechanickou odolnost a v důsledku i nejvyšší zatížitelnost ozubení z těchto materiálů.

3.8.2 Porovnání fyzikálních vlastností vybraných polymerů

Z fyzikálních vlastností materiálu byla vybrána navlhavost (dokumentuje změny materiálů v přítomnosti vlhkosti), tvrdost a koeficient tření (stanovován vůči oceli bez maziva). Tyto vlastnosti jsou určující pro jevy na styku zubů.

tab. 3.8.2-1 Porovnání fyzikálních vlastností vybraných polymerů.

		Navlhavost	Tvrdost	Koeficient tření
		%	HRC R	-
Komoditní plasty	PBT	0,25	117	0,19
	HDPE	0,10	60	0,27
Konstrukční plasty	PA6	2,8	100	0,40
	POM	0,0	101	0,33
High-tech plasty	PEEK	0,2	123	0,30
	PI	0,6	126	0,20

Navlhavost je podmíněna polaritou materiálu (viz kapitola o podstatě plastů), nesouvisí přímo se zde respektovaným dělením. Za pozornost stojí zásadní rozdíl mezi dvěma materiály, které v ostatních parametrech vykazují podobné hodnoty – PA6 a POM. Silon vykazuje velmi vysokou míru navlhavosti, a proto jej nelze provozovat ve vlhkém prostředí, zatímco acetal jako jeden z mála polymerů hygroskopičnost nevykazuje vůbec, což z něj činí ideální materiál pro mechanicky namáhané díly provozované ve vlhkém prostředí. Tvrdost uvedených materiálů se různí, nejvyšší opět vykazují high-tech polymery. Koeficient tření vykazují nejvyšší paradoxně nejčastěji používané materiály – konstrukční plasty. Na tento parametr mají ale velmi výrazný vliv provozní podmínky a materiály konkrétního převodového stupně.

3.8.3 Porovnání tepelných vlastností vybraných polymerů

Jak již bylo uvedeno, hlavním omezením aplikace polymerních materiálů je provozní teplota, proto je nezbytné zmínit maximální a minimální přípustné hodnoty. Dále jsou uvedeny teploty skelného přechodu materiálů.

tab. 3.8.3-1 Porovnání tepelných vlastností vybraných polymerů.

		Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota	Teplota skelného přechodu
		°C	°C	°C
Komoditní plasty	PBT	- 30	70	75
	HDPE	- 100	90	- 120
Konstrukční plasty	PA6	- 40	88	50
	POM	- 40	100	- 60
High-tech plasty	PEEK	- 50	250	145
	PI	- 270	300	250

Závislost většiny mechanických charakteristik na teplotě se pro praktické aplikace komprimuje do dvou údajů – maximální a minimální přípustné provozní teploty. V této práci jsou uváděny dlouhodobě přípustné teploty, v materiálových listech se uvádí i maximální teplota přípustná pouze krátkodobě.

Teplotní odolnost opět vzrůstá od komoditních plastů po high-tech. Překvapivá je vysoká odolnost polyethylenů coby komoditních plastů proti nízkým teplotám (pro zde uvedený HDPE - 100 °C, pro UHMWPE mimořádných - 200 °C).

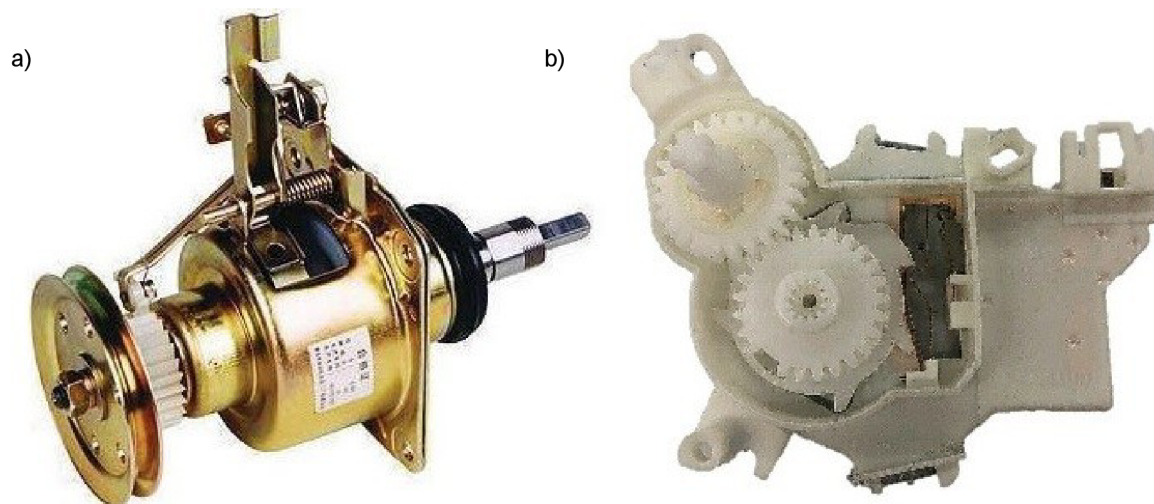
Dále lze vysledovat velké rozdíly mezi maximální provozní teplotou a teplotou skelného přechodu. Ty jsou způsobeny především stupněm krystalinity daného materiálu, jak bylo rozebráno v kapitole o mechanických vlastnostech polymerů.

3.8.4 Oblasti použití polymerního ozubení

Díky velké variabilitě vlastností se polymerní ozubení používá v celé řadě různých výrobků. Od aplikací podružných, kde se polymerní materiály (mnohdy zcela nevhodně) používají pro svou příznivou cenu, jako jsou hračky a jiné spotřební zboží, až po prestižní aplikace, kde je požadována 100% spolehlivost (lékařství, automobilní průmysl, letecká a kosmická technika...). Konstrukci těchto dílů je věnována adekvátní pozornost, díky čemuž jsou provozovány v optimálních podmínkách, což umožňuje plně využít jedinečný potenciál zvoleného materiálu. Konkrétní příklady aplikace polymerního ozubení jsou patrné z doprovodných ilustrací.

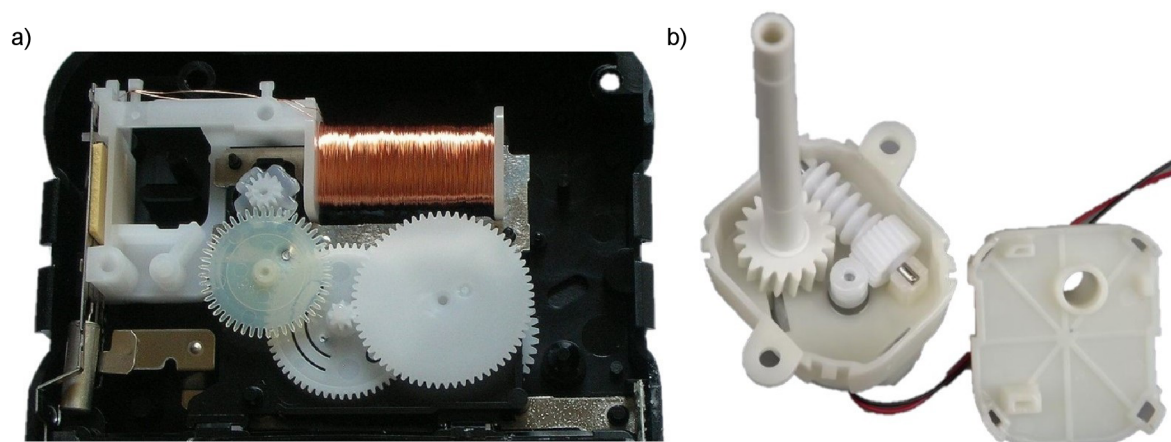
Na základě poznatků z minulých kapitol lze stanovit oblasti použití jednotlivých skupin materiálů.

Komoditní plasty (ABS, PE, PET, PBT...) nemají příliš vysokou mechanickou odolnost. Proto se používají pro málo namáhaná ozubení (hračky, kinematické převody ve výrobcích spotřebního průmyslu...). Motivací pro jejich použití je jejich nízká cena, rovněž se snadno zpracovávají. Polyethyleny jsou vhodné pro málo namáhané aplikace s velmi nízkou provozní teplotou, protože odolnost proti extrémně nízkým teplotám mají lepší než konstrukční a většina high-tech plastů.



obr. 3.8.4-1 Polymerní ozubení v domácích spotřebičích; a) myčka [37]; b) pračka [38].

Konstrukční plasty (PC, PA, POM...) disponují příznivou kombinací mechanické odolnosti při přijatelné ceně, proto se používají pro výrobu ozubení v řadě aplikací, a to jak kinematických, tak silových. Nylon a acetal jsou vůbec nejdéle a nejčastěji používanými materiály. Zásadní omezující vlastností nylonů jakožto nejčastěji používaných polymerních materiálů je jejich vysoká navlhavost a nízké hodnoty nárazové práce. Proto nemohou být provozovány ve vlhkém prostředí, ani vystaveny rázovému namáhání.



obr. 3.8.4-2 Kinematické převody; a) hodinový stroj [39]; b) šneková převodovka [40].

High-tech plasty (PEEK, PPS, PI...) jsou relativně novou a stále se rozvíjející skupinu polymerních materiálů, které mají vysokou mechanickou i teplotní odolnost. Jejich nevýhodou je vyšší cena, proto se používají v aplikacích, kde méně odolné plasty ani po naplnění neobstojí. Jedná se o důležité systémy v motorových vozidlech, součásti letecké a kosmické techniky, ale i součásti přístrojů pro lékařství a farmacii.



obr. 3.8.4-3 Mechanismus elektrické parkovací brzdy BMW E65; [22].

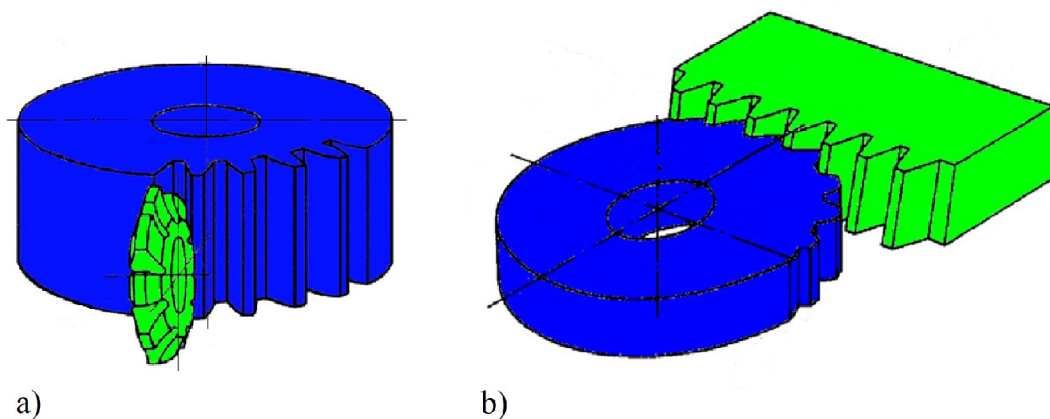
3.9 Výroba polymerního ozubení

Polymerní materiály se dají zpracovávat řadou různých technologií (obrábění, vstřikování, vyfukování, vytlačování, lisování, odlévání, válcování, 3D tisk...[1]). Široké spektrum různých technologií umožňuje výběr optimálního postupu pro výrobu daného produktu a je jednou z podstatných výhod aplikace polymerů v průmyslové praxi. Pro výrobu ozubení jsou ale vhodné jen některé, ty jsou popsány a zhodnoceny dále.

3.9.1 Obrábění

Proces obrábění probíhá téměř stejně jako obrábění kol z kovů, používají se i stejné nástroje. Vhodný rezný proces se volí s ohledem na tvar a velikost ozubení, nejčastěji se používá frézování (dělicím způsobem i odvalovací), případně obrážení – viz obr. 3.9.1-1. Obrábění ozubených kol z plastů je možné realizovat jak na standardních, tak CNC strojích.

Během obrábění je nutné minimalizovat zahřívání materiálu. To by vedlo ke změně rozměrů obrobku, jeho měknutí až natavení, v extrémním případě teplotní degradaci. To vše má zásadní negativní vliv na dosaženou přesnost a kvalitu povrchu. Pro eliminaci těchto vlivů je nutné obrábění provádět pomocí ostrého nástroje, malými řeznými výkony [4].



obr. 3.9.1-1 Obrábění ozubených kol; a) frézování dělicím způsobem; b) obrážení; [42], upraveno.

Obráběním lze zpracovávat téměř všechny polymerní materiály, výjimku tvoří materiály vyztužené skelným vláknem. U těch dochází k odkrytí vláken, jejich vydrolování a značnému opotřebení nástroje i spoluzabírajícího kola. Z těchto důvodů lze materiály vyztužené skelným vláknem pouze vstříkovat [5].

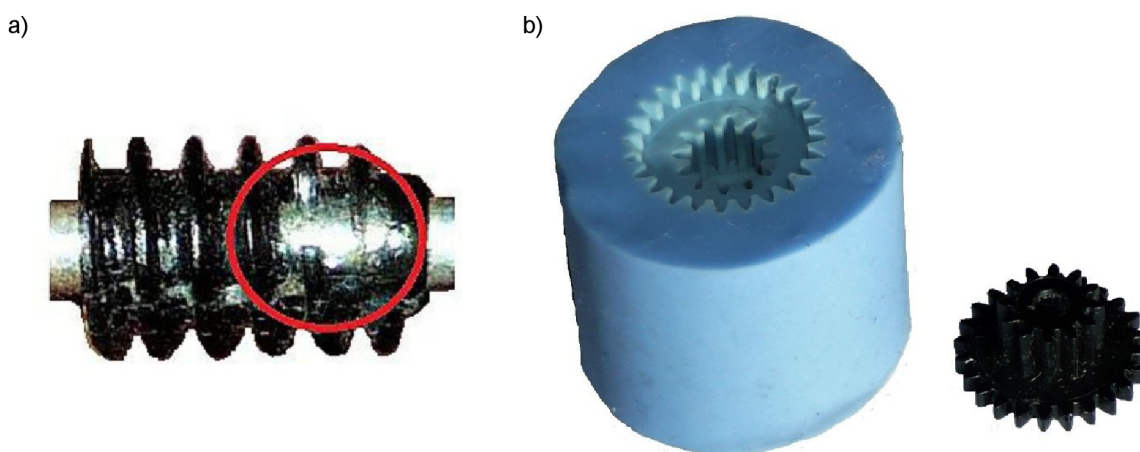
Polotovary pro obrábění mohou být různých tvarů, obvykle se jedná o válec či trubku. Problémem je možný rozdíl ve vlastnostech mezi jádrem polotovaru a jeho povrchem, což je způsobeno rozdílnou rychlostí tuhnutí po jeho výrobě. Obráběním se navíc mohou odkrýt případné nehomogenity a dutiny v materiálu [4]. Pro výrobu ozubených kol velkých rozměrů se někdy kombinuje obrábění a odlévání – technologií odlévání je vyroben předlitek, jeho funkční plochy jsou následně obrobeny [19].

Z výše uvedeného vyplývá vhodnost a omezení této technologie. Je vhodná pro výrobu kusovou, případně výrobu v malých sériích (pro velkosériovou výrobu je ekonomicky vhodnější vstříkování). Vhodná je pro výrobu dílů, u kterých by se jen obtížně eliminoval vliv smršťování, které se při obrábění neprojevuje. Jedná se o ozubení velkých rozměrů, případně díly s velkými rozdíly v tloušťce jednotlivých částí. Tvarově jednoduché součásti lze vyrobit na běžných obráběcích strojích, výrobu ozubení s komplikovanou geometrií lze realizovat pouze na speciálních jednoúčelových a drahých obráběcích strojích. Proto je v těchto případech vhodnější zvolit jinou technologii.

Obráběním se dosahuje maximálně 9. až 10. stupně přesnosti dle AGMA 2000-A88 [22] (7. až 8. stupeň dle ISO 1328) [43], to jest nejvyšší přesnosti ze všech zmíněných technologií.

3.9.2 Odlévání

Tato technologie je založena na vyplnění dutiny formy tekutým materiálem. Tím je často reaktoplast – do formy je nalita pryskyřice, ve formě pak dojde k jejímu vytvrzení (působením záření, tepla, reakcí s tvrdidlem...), ale lze takto zpracovávat i některé termoplasty, viz dále. Pro aplikaci této technologie je nutné vyrobit tzv. „nultý kus“, který je následně zaformován. Po vytvrzení formovací hmoty je nultý kus vyjmut, do vzniklé dutiny je nalit materiál finálního výrobku, viz obr. 3.9.2-1. Odlévání se dělí na gravitační (materiál je do formy vtlačován jen působením gravitace), rotační a odstředivé (materiál je do formy vtlačován působením odstředivé síly) [1].



obr. 3.9.2-1 Odlévání ozubených kol; a) vadný odlitek šneku; b) ozubené kolo a jeho forma; [autor].

S odléváním je spojeno několik problémů – většina je zapříčiněna minimální silou, která tlačí materiál do formy. Proto je obtížné zajistit dokonalé zatečení bez tvorby bublinek a nedolitých částí, viz obr. výše. Další nevýhodou jsou dlouhé pracovní cykly.

Dosahovaná přesnost je nižší než u jiných technologií. Literatura [43] udává pouze 4. až 5. stupeň dle AGMA 2000-A88 (12. stupeň dle ISO 1328).

Značným omezením této technologie je úzký výběr zpracovatelných materiálů, jedná se často o reaktoplasty (PUR, epoxidové, polyesterové pryskyřice), ale je použitelná i pro některé termoplasty (nylony (PA6, APA)). Hlavní podmínkou je dostatečná tekutost taveniny [1,5,19].

Naproti tomu mezi výhody patří minimální vnitřní pnutí v odlitcích, nízká cena a minimální nároky na technologické vybavení [1]. Proto je ekonomicky přijatelné vyrábět touto technologií i jednotky výrobků, a například gravitační odlévání reaktoplastů lze úspěšně realizovat s minimálním vybavením.

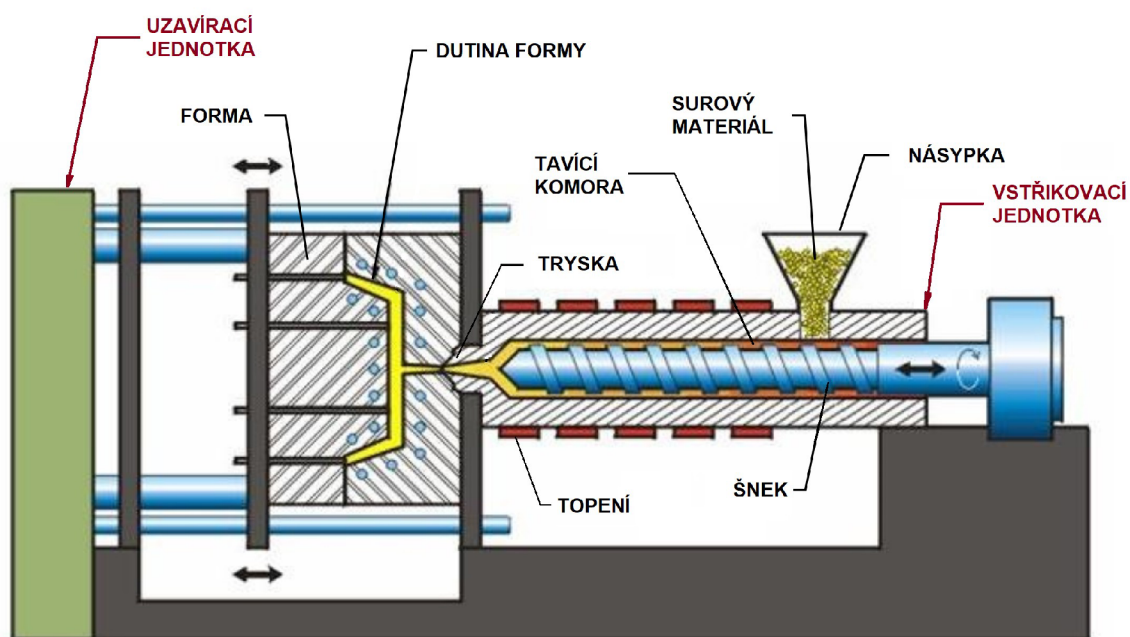
Odlévání je vhodné pro kusovou výrobu ozubení s nižšími nároky na přesnost. Výsledný odlitek může být hotový díl, nebo předlitek určený k dalšímu opracování konvenčními technologiemi. Tento postup se volí například při tvorbě rozměrných výrobků z polyamidů [19]. Velmi jednoduše se dá touto technologií vytvářet kopie existujících součástí bez nutnosti tvorby výkresové dokumentace či výrobního postupu, čehož se využívá při opravách a restaurování existujících nejen strojních zařízení.

3.9.3 Vstřikování

Jedná se o nejrozšířenější technologii používanou pro zpracování polymerních materiálů. Pro výrobu ozubených kol se ve světě používá od 50. let minulého století [4]. Návrh výrobku produkovaného technologií lisostříku je komplexní a značně složitý proces, při správném nastavení všech parametrů ale umožňuje rychlou a kvalitní produkci při nákladech na zlomku ceny jiných technologií (literatura [20] uvádí 50 % až 90 % úsporu).

Vstřikovací lisy

Stroj určený pro vstřikování plastů se nazývá vstřikovací lis. Skládá se ze dvou základních částí – vstřikovací a uzavírací jednotky. Schematický náčrt je na obrázku níže.



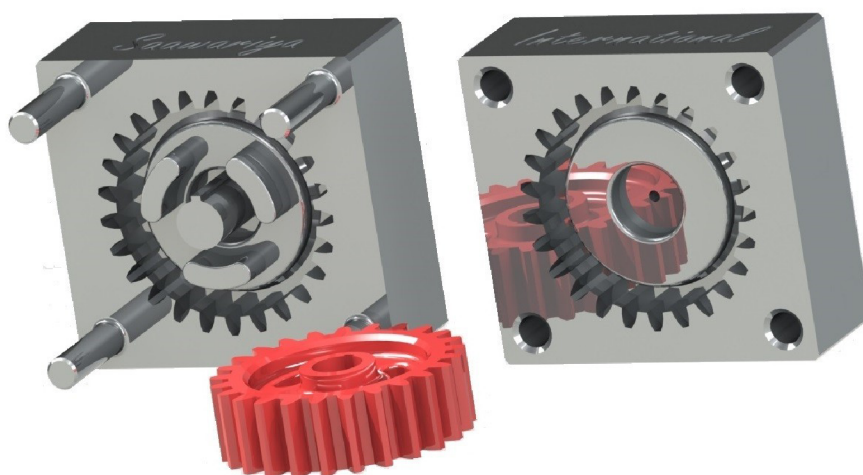
obr. 3.9.3-1 Vstřikovací lis; [44], upraveno.

Na vstupu vstřikovací jednotky je násypka – do té se se sype surový materiál ve formě pelet, často je také vybavena vysoušecím zařízením. Dále materiál padá do tavicí komory, zde je taven (jednak díky tření, jednak vnějším elektroodporovým vytápěním). V tavicí komoře je šnek, ten se točí a posouvá tak taveninu komorou. Ta se hromadí v prostoru před šnekem. Když je jí zde dost, rotace šneku se zastaví a tavenina je jeho posunutím vytlačena vysokou rychlostí pod vysokým tlakem (70 – 205 MPa) do trysky. Tryska ústí do uzavírací jednotky, konkrétně do formy. V té je dutina tvarem odpovídající požadovanému produktu. Po vyplnění dutiny taveninou materiál tuhne, je však stále pod tlakem, aby se eliminoval vliv smršťování. Vstřikovací jednotka zatím připravuje materiál pro další cyklus. Po ztuhnutí je forma otevřena a hotový díl vyhozen ven. Nepostradatelnou částí jsou další pomocné mechanismy, které zavírají a otvírají formu, vyhazují finální výrobek, drží formu uzavřenou během vstřikování atd [1,4].

Formy

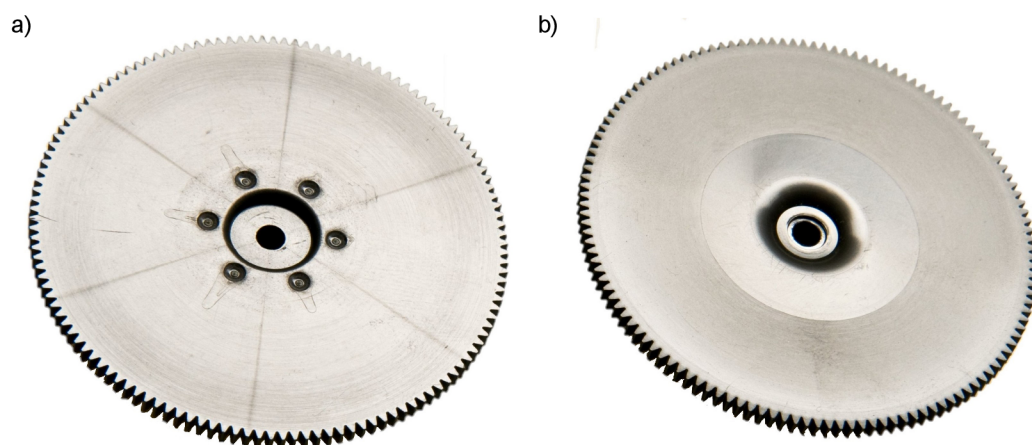
Velmi důležitým předpokladem pro úspěšnou výrobu pomocí této technologie je správné navržení a výroba formy. Forma pro výrobu ozubeného kola je na obr. 3.9.3-2. Ta je vystavena velkému tepelnému i mechanickému zatížení, proto se vyrábí nejčastěji z konstrukčních ocelí, a to konvenčním obráběním, případně elektroerozivně [45].

Skládá ze dvou a více částí – jedna je pevně spojena s tryskou vstřikovací jednotky, ostatní jsou pohyblivé – musí se otevírat při vyjímání výrobku. Síla, která drží části formy pohromadě („uzavírací síla“) je důležitým parametrem celého stroje – určuje maximální sílu, kterou může vyvinout tavenina na formu, a tím i maximální velikost výrobku [4]. Jedna forma může obsahovat několik dutin, a tak v jednom výrobním cyklu vyprodukovat několik výrobků.



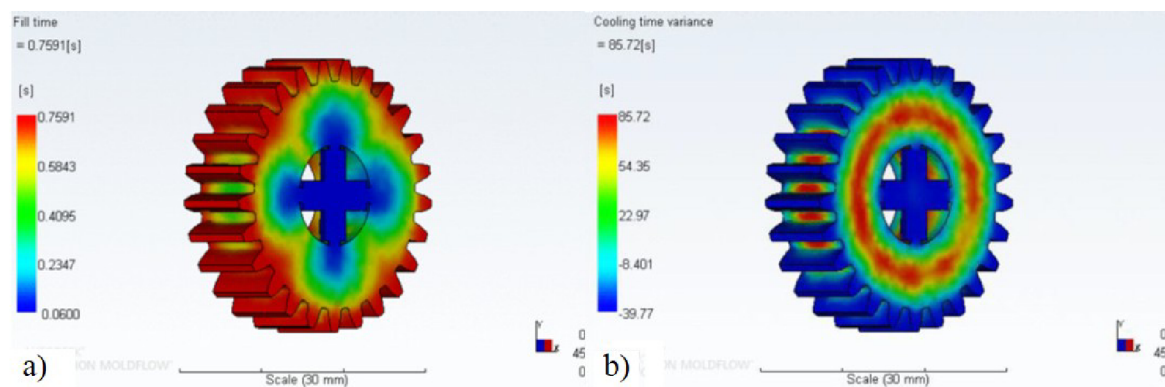
obr. 3.9.3-2 Forma pro vstřikování plastů [46].

Důležitou součástí formy jsou vtokové a výfukové kanály. Ty slouží k rozvodu taveniny z trysky vstřikovacího lisu do kavit formy, respektive k odvodu vzduchu před postupujícím proudem taveniny, čímž řídí její tok a zabezpečují správné plnění formy. Vhodná konstrukce může zásadně snížit tlak nutný na vyplnění dutiny formy, umístění vtoků navíc určuje postup zaplňování formy, a tím i průběh tzv. weld lines (linie, na kterých se potkají čela toků roztavené taveniny z jednotlivých vstupů, často zde jsou výrazně zhoršené mechanické vlastnosti, viz obr. 3.9.3-3 [47]). Špatná konstrukce vtokové soustavy vede k neúplnému zaplnění dutiny, případně k „přeplňování“ nějaké části formy. V těchto místech pak je velké reziduální napětí a výrazně zhoršená mechanická pevnost. Správné navržení formy je zásadním předpokladem pro bezproblémovou výrobu [48].



obr. 3.9.3-3 Ozubené kolo; a) bez; b) s eliminovaným vlivem weld lines; [47].

Postup plnění formy lze predikovat pomocí vhodného software (např. Autodesk Simulation Moldflow Advisor – viz obr. 3.9.3-4 [48]). Velkým přínosem softwarové podpory je také schopnost predikovat velikost smršťení výrobku. To umožňuje upravit tvar formy (zvětšením rozměrů dutiny), tím eliminovat vliv tohoto jevu a zvýšit přesnost [7].



obr. 3.9.3-4 Simulace vstřikování; a) doba pro zaplnění formy; b) doba tuhnutí; [49].

Hlavní výhodou vstřikování je maximální efektivita – lze v krátkém čase vyrábět velké množství dílů. Další devizou je velká univerzálnost – na vstřikovacím lisu lze měnit řada parametrů (teploty, tlaky a taktování jednotlivých fází) a také měnit formy. To umožňuje na téže stroji produkovat různé výrobky z různých materiálů.

Produkty lisostříku mohou být jak hotové, tak procházet dalšími výrobními úkony. Vyznačují dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a reprodukovatelností mechanických vlastností. Lze jednoduše vyrábět i velmi složité tvary, což přináší jedinečnou volnost při řešení konkrétního konstrukčního problému. Toho se hojně využívá při produkci složitých tvarů ozubení, lisostříkem navíc vznikne tvrdší a hladší povrch s lepšími kluznými vlastnostmi v porovnání s obráběním [7]. U této technologie je minimalizován odpad.

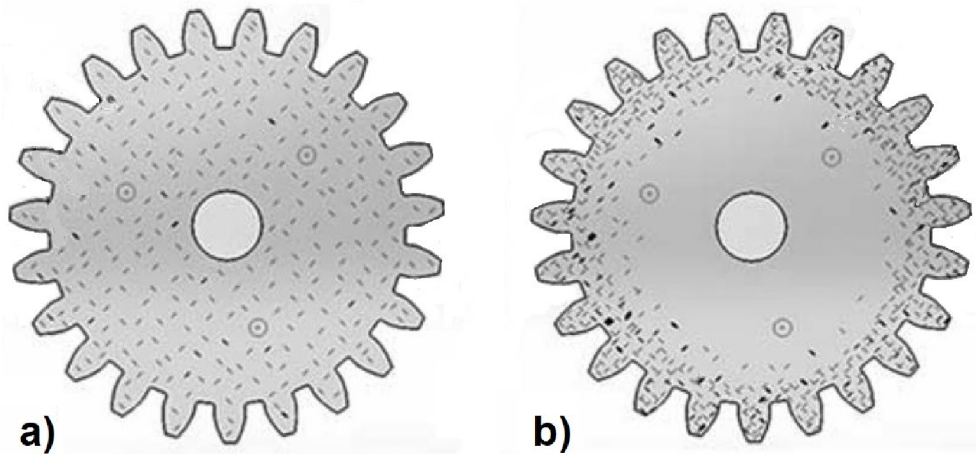
Přesnost ozubení produkovaného lisostříkem je závislá na řadě faktorů (správné nastavení stroje, dobré konstrukční řešení formy, kvalita a složení zpracovávaného materiálu...). Většinou se pohybuje mezi 6. a 7. stupněm přesnosti dle AGMA 2000-A88 (10. až 11. stupeň dle ISO 1328) Optimalizací procesu je možné dosáhnout 8. až 9. stupně dle AGMA 2000-A88 (8. až 9. stupeň dle ISO 1328) [43].

Většina nevýhod je spojena se značnými finančními náklady na zavedení této technologie. Ceny vstřikovacích lisů se pohybují v řádech milionů, také výroba formy je nákladná [44] – je to velmi složitý a časově náročný proces. Proto má tato technologie opodstatnění jen u hromadné výroby. Velké množství obtíží (v minulosti až 90 % [4]) je spojeno s obsahem vlhkosti v surovém materiálu. Ta zapříčiní zhoršení mechanických vlastností a zvětšení rozměrových změn. Proto je velmi důležité zajistit řádné vysušení materiálu před vstřikováním [33]).

Zpracovávat takto lze většinu termoplastů, ale i některé reaktoplasty, případně elastomery. Z důvodu vysoké viskozity je obtížné zpracovávat vysokomolekulární materiály a materiály s vysokým obsahem vláknité složky [1,4].

FGM (functionally graded material) vstřikování

Jedná se o modifikovanou metodu lisostříku. Je založená na myšlence, že vyztužující plnivo v materiálu plní svou funkci jen v ozubení, nikoliv ve zbytku ozubeného kola. Proto je ve formě pro lisostřík doplněn rotující trn, který vytvoří v tavenině odstředivou sílu, která vynese těžká vyztužující vlákna do obvodové části formy. Díky tomu klesne jejich spotřeba, a stane se tak ekonomicky přijatelné použít velmi kvalitní výztuhy, které dají materiálu mimořádnou odolnost, ale mají značnou cenu (whiskery, grafenová vlákna...) [7]. Rozdíl mezi strukturou získanou standardním lisostříkem a tímto vylepšením je patrný na obr. 3.9.3-5 [49].

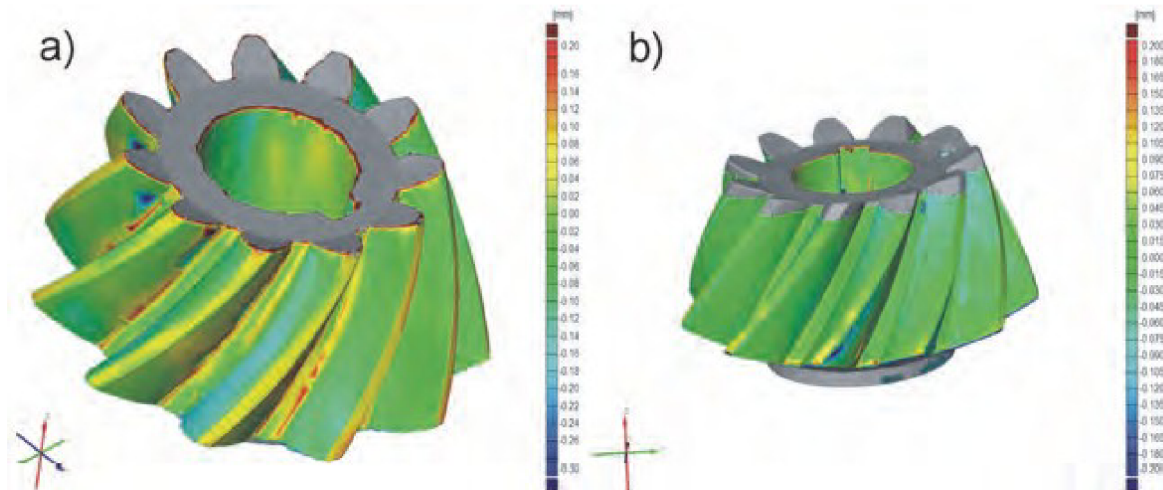


obr. 3.9.3-5 Struktura; a) standardního vstřikování; b) FGM vstřikování; [49], upraveno.

3.9.4 Rapid prototyping

V poslední době stoupá význam technologií rapid prototypingu (RP). Společným znakem této skupiny technologií je výroba součástí nanášením materiálu, oproti jeho odebírání při klasickém obrábění. Dalším společným znakem je pomyslné rozdělení výrobku na jednotlivé vrstvy, ve kterých je vyráběn („tisknut“). Používaným materiálem je často právě materiál polymerní. Použitelnost těchto technologií pro výrobu ozubení je značně omezená. Lze jimi zpracovávat jen několik polymerních materiálů a výroba trvá značně dlouho. Výhodou pak je snadné vytvoření téměř jakéhokoliv tvaru přímo z virtuálního 3D modelu. Proto se tyto technologie nepoužívají pro sériovou výrobu, jsou vhodné spíše pro výrobu a výzkum funkčních prototypů (například sledování kontaktů zubů na průhledném modelu vyrobeném stereolitografií, viz obr. 3.9.4-2), případně výrobu kusovou. Zajímavou možností je použití produktu vhodné technologie rapid prototypingu (s dobrou přesností ale špatnými mechanickými charakteristikami, např. SLA) pro následnou reprodukci pomocí odlévání. Použití těchto technologií ve strojírenství bude i přes jejich limity v budoucnu bezesporu narůstat [50,51].

Dosahovaná přesnost je výrazně závislá na konkrétní technologii (viz obr. 3.9.4-1), ale i použitém materiálu, úrovni softwarové podpory a typu, stavu a nastavení použité tiskárny [50]. Tiskárny na „hobby“ úrovni zpravidla nedosahují dostatečných kvalit, omezeně použitelné jsou produkty průmyslových (a velmi drahých) tiskáren [34]. Přesnost FDM technologie je jen 4. až 5. stupeň dle AGMA 2000-A88 (12. stupeň dle ISO 1328) [12], což je přesnost na úrovni odlévání a výrazně zaostávající za vstřikováním a obráběním. Jiné RP technologie dosahují přesností mírně vyšších [50], viz obr. 3.9.4-1.



obr. 3.9.4-1 Dosahované přesnosti; a) FDM; b) SLA; [50].

Jedná se o novou, dynamicky se vyvíjející oblast. Mezi RP se řadí mnoho různých technologií, použitelnost pro výrobu ozubení je však omezená. Výčet a stručný popis některých technologií použitelných pro tyto účely je uveden dále.

Selective laser sintering (SLS)

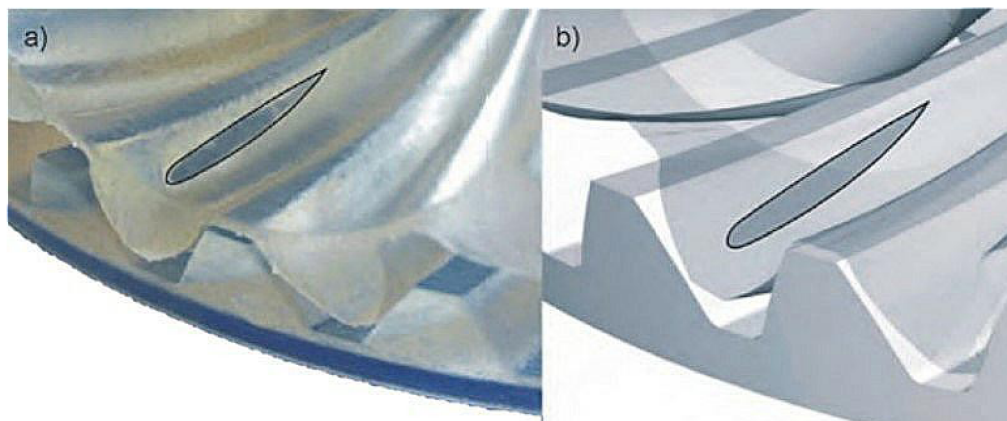
Model vzniká v nádobě naplněné práškovým materiálem. Ten je po jednotlivých vrstvách spékán působením laseru. Po spečení jedné vrstvy je model o tuto tloušťku ponořen do nádoby. Následně je nanášena další vrstva prášku, ze které je opět spečen požadovaný tvar vrstvy následující. Technologií se dají zpracovávat kovy, keramiky i polymery (nylon). Výrobek má pórovitou strukturu, díky čemuž může být následně impregnován jinou látkou (například mazivem). Zpracovávané materiály mají dostatečnou odolnost, také přesnost této technologie je přijatelná. Omezení tkví hlavně v pořizovacích nákladech SLS tiskáren [50].

Stereolitography (SLA)

Základní princip této technologie je shodný se SLS, jen materiál nemá podobu prášku, ale podobu UV aktivní pryskyřice, vytvrzována je pomocí UV laseru. Hlavní omezení tkví v úzkém výběru materiálů a jejich nevhodných mechanických vlastnostech. Nevýhodou je také nutnost manuálních úprav výrobku (očistění od zbylé pryskyřice, dotvrzení pod UV lampou). Výrobky mají vysokou přesnost a dobrou kvalitu povrchu; jsou průhledné. Toho se využívá pro účely výzkumu, viz obr. 3.9.4-2 [50].

Fused deposition modeling

Technologie je založena na nanášení roztaveného materiálu pomocí tiskové hlavy. Hlavní výhodou je poměrně široká škála vhodných materiálů (ABS, PET, PA...), ale i cenová dostupnost a značné rozšíření. Při dobře nastavených parametrech tisku mají výrobky dobré mechanické vlastnosti (stejně nebo i lepší než produkt z téhož materiálu vyrobený jinou technologií [12]). Limitem je ne příliš vysoká přesnost a kvalita povrchu [50,51].



obr. 3.9.4-2 Sledování kontaktní plochy; a) SLA model; b) CAD model; [51], upraveno.

4 DISKUZE

Hlavním cílem rešerše bylo zpracování současného stavu poznání v oblasti ozubených převodů z plastů. Práce byla zaměřena na používané materiály a výrobní metody.

Pro správný návrh a výrobu plastové součásti je nutné mít povědomí o podstatě polymerních materiálů, proto se této problematice věnovala první část textu. Polymery jsou materiály amorfni povahy, které mohou za vhodných podmínek vytvořit krystalické oblasti. Takovéto (semikrystalické) materiály mají vyšší mechanickou a teplotní odolnost, proto většina plastů používaných pro konstrukční aplikace vykazuje krystalinitu. Vlastnosti materiálu se dají modifikovat vhodnou úpravou složení, proto se do plastů přidávají různá plniva; pro zvýšení mechanické a teplotní odolnosti vyztužující plniva vláknité povahy. Plněné plasty se v technické praxi používají velmi často, mají lepší odolnost a zpracovatelnost než čistý polymer.

Důležité je také povědomí o specifických jevech, které komplikují výrobu a provozu plastového ozubení. Jedná se o reakce na změny teploty charakteristické existencí tzv. tranzitních teplot, viskoelastické chování a změny rozměrů plastových výrobků. Tyto jevy lze částečně potlačit vhodnou změnou složení a konstrukce, ale zcela eliminovat je nelze.

Prvním z cílů práce bylo posouzení výhod a nevýhod polymerního ozubení. Pro jejich stanovení bylo vhodné realizovat výše shrnuté vyšetření chování polymerů, a provést srovnání základních vlastností kovů a plastů, používaných v těchto aplikacích. Z tohoto vyplynuly **výhody** (nižší hmotnost, schopnost tlumení rázů a vibrací, nižší hlučnost, koroziivzdornost, možnost pracovat bez maziva, dobré kluzné vlastnosti, odolnost proti otěru, širší výběr výrobních technologií, tvarová a konstrukční variabilita, nižší výrobní náklady) a **nevýhody** (nižší mechanická a teplotní odolnost, nižší přesnost, složité výpočtové modely) **polymerního ozubení**.

Dalším z cílů bylo zpracování **přehledu polymerních materiálů**, které se používají pro výrobu těchto součástí. Pro každý materiál byla vypracována jeho základní charakteristika a tabulka fyzikálních, mechanických a tepelných vlastností.

Vybrané vlastnosti některých zástupců komoditních, konstrukčních a high – tech plastů. Byly vzájemně **porovnány** Na základě tohoto porovnání bylo stanoveno, že **komoditní plasty** (polyestery, polyethyleny...) mají nejnižší odolnost, používají se pro minimálně namáhaná soukolí z důvodu nízké ceny a dobré zpracovatelnosti. **Konstrukční plasty** (polyamidy, acetáty...) disponují kombinací přijatelné odolnosti při přijatelné ceně. Používají se pro výrobu ozubení v řadě aplikací. Je to nejdéle a nejčastěji používaná skupina plastů. **High-tech plasty** (PEEK, PPS...) disponují vysokou mechanickou i tepelnou odolností, ty jsou vykoupeny jejich vyšší cenou. Proto se z těchto materiálů vyrábí velmi namáhaná soukolí pro prestižní aplikace. Pro ilustraci konstrukčních a aplikačních možností byla práce doplněna obrázky polymerních ozubených převodů.

Posledním cílem bylo zpracování **přehledu výrobních technologií**, používaných pro výrobu ozubení. Zpracovatelské možnosti jsou jednou z hlavních deviz aplikace plastů ve strojírenství. Velká část plastových výrobků jakož i ozubení je produkována lisostřikem. Tato technologie je vhodná pro hromadnou výrobu, protože minimalizuje výrobní náklady. Dalším způsobem výroby ozubení je obrábění. To se používá pro kusovou výrobu ozubení jednoduchých tvarů, ze všech zmíněných technologií dosahuje nejvyšší přesnosti. Odlévání dosahuje naopak jen nízkých přesností, pro výrobu ozubení se příliš nepoužívá. Taktéž použitelnost technologií rapid prototypingu je značně omezená, především přesností výtisků a odolností zpracovávaných materiálů

Výhody, nevýhody, dosahovanou přesnost a předpoklady použití daných technologií shrnuje tabulka níže.

tab. 4-1 Výhody, nevýhody, dosahovaná přesnost a příklady použití výrobních technologií.

Obrábění	Odlévání	Vstřikování	Rapid prototyping
Vysoká přesnost	Nevzniká vnitřní pnutí	Tvarová rozmanitost	Tvarová rozmanitost
Nevzniká vnitřní pnutí	Nízké náklady	Konstrukční variabilita	Tisk přímo z 3D počítačového modelu
Široký výběr materiálů	Nízká náročnost	Univerzálnost	
	Tvarová rozmanitost	Výrobní náklady	
Omezená tvarová rozmanitost	Časová náročnost	Pořizovací náklady	Úzký výběr materiálů
Časová náročnost	Problémy se zatékáním	Náročné seřízení technologie	Časová náročnost
	Nutnost výroby formy		
	Úzký výběr materiálů		
7. až 8. stupeň dle ISO	12. stupeň dle ISO	8. až 11. stupeň dle ISO	12. stupeň dle ISO a lepší
Kusová výroba	Kusová výroba	Velkosériová výroba	Výroba funkčních prototypů, vzorků pro výzkum
Ozubení velkých rozměrů a jednoduchých tvarů	Výroba kopií existujících součástí	libovolné součásti z téměř libovolného plastu	Výroba nultých kusů pro odlévání
Aplikace s vysokými nároky na přesnost			

Plnění zadání práce komplikovalo obtížné stanovování vlastností polymerních materiálů. Jejich měření je komplikovanější než v případě kovů. Výrazně se projevuje vliv viskoelastického chování, tj. závislosti napětí a deformace na čase pod zátěží, a také velká závislost na teplotě. Zásadní je znalost přesného složení zkoumaného materiálu. Ani podmínky zkoušek, ani přesné složení výrobců v materiálových listech povětšinou neuvádí, proto se udávané vlastnosti mezi různými zdroji někdy i výrazně liší. Ač se jedná o problém, který komplikuje orientaci v problematice a je na něj v knihách, člancích a internetových diskuzích často upozorňováno, jednotný katalog alespoň základních vlastností polymerních materiálů dosud neexistuje.

Hodnoty uvedené v této práci vznikly aproximací mnoha materiálových listů téhož materiálu, je proto nutné je brát pouze jako orientační. Údaje jsou platné pro neplněné plasty, přidáváním plniv lze jejich vlastnosti výrazně měnit. Podchycení všech modifikací materiálů překračuje rozsah práce. I přes toto zjednodušení údaje dávají představu o vlastnostech plastů obecně, umožňují i porovnání různých polymerních materiálů.

5 ZÁVĚR

Práce se zabývala problematikou použití polymerních materiálů pro výrobu ozubených převodů. Na úvod byly shrnuty základní poznatky o struktuře a vlastnostech polymerů, jejichž znalost je nutným předpokladem pro orientaci v problematice. Následně bylo provedeno srovnání vybraných polymerních a kovových materiálů a na jeho základě vysloveny přednosti a nedostatky plastového ozubení.

V současnosti existuje obrovské množství různých plastů, dalším z cílů proto bylo vybrat ty, které se používají pro výrobu ozubení. K těmto materiálům byly vypracovány bližší specifikace. Pro porovnání vlastností bylo vybráno několik plastů s výrazně odlišnými vlastnostmi, na základě tohoto porovnání byly stanoveny typické aplikace polymerního ozubení.

Poslední částí textu je přehled technologií, používaných pro výrobu polymerního ozubení. Byl vypracován bližší popis těchto technologií, stanoveny jejich přednosti, nedostatky a dosahovaná přesnost.

Práce splnila cíle kladené v zadání, téma polymerního ozubení ale rozhodně není vyčerpáno. Zásadní je znalost konstrukčních zásad a výpočtových modelů, které nejsou předmětem zadání.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2. Dostupné také z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm
- [2] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. www.publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] DAVIS, Joseph R. *Gear materials, properties, and manufacture*. Novelty: ASM international, 2005. ISBN 0-87170-815-9. Dostupné také z:
<https://vdocuments.mx/gear-materials-properties-and-manufacture-5874eb35b075d.html>
- [5] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [6] PACAL, Bohumil. *POLYMERY – struktura a vlastnosti*. Výukový materiál ÚMVI VUT. [online]. 2014 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>
- [7] ROSATO, Dominick V. a Donald V. ROSATO. *Plastics engineered product design*. New York: Elsevier Advanced Technology, 2003. ISBN 1856174166.
- [8] RAMANJANEYULU, S. et al. *Design and Development of Graphene reinforced Acetal copolymer plastic gears and its performance evaluation*. Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 8, 2017, s. 8678-8687. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317315134>
- [9] BRAVO, Alencar et al. *Gear fatigue life and thermomechanical behavior of novel green and bio-composite materials VS high-performance thermoplastics*. Polymer Testing, Volume 66, 2018, s. 403-414. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941816308686>
- [10] SARITA, Bharti a Selvaraj SENTHILVELAN. *Effects of lubricant on the surface durability of an injection molded polyamide 66 spur gear paired with a steel gear*. Tribology International, Volume 137, 2019, s. 193-211. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X19301136>

- [11] KIM, Choong Hyun. *Durability improvement method for plastic spur gears*. Tribology International, Volume 39, Issue 11, 2006, s. 1454-1461. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X06000326>
- [12] ZHANG, Ye et al. *A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears*. Tribology International, Volume 141, 2020. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X19304724>
- [13] MILER, Daniel et al. *Prediction of friction coefficient in dry-lubricated polyoxymethylene spur gear pairs*. Mechanism and Machine Theory, Volume 138, 2019, s. 205-222. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X18321761>
- [14] FAGAN, Jim a Ed WILLIAMS. *Gear design: Multipoint Properties and Key to Selecting Thermoplastic Material*. Gear technology, November/December 2019, s. 42-49. Dostupné také z: <https://www.geartechnology.com/issues/1106x/geoplastics.pdf>
- [15] Materials properties database. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <https://www.makeitfrom.com/>
- [16] Xiamen future shop fixture. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <http://www.visionshopfixture.com/en/product/Plastic-Gears-Plastic-Bevel-Gears.html%20>
- [17] ELMQUIST, Joseph. *Deciding When to Go to Plastic*. Gear technology, July 2014, s. 46-47. Dostupné také z: <https://www.geartechnology.com/issues/0714x/when-to-go-plastic.pdf>
- [18] AKANT, Singh a Vashishtha SIDDHARTHA. *A novel technique for in-situ manufacturing of functionally graded materials based polymer composite spur gears*. Polymer Composites, 2007. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/321728529_A_novel_technique_for_in-situ_manufacturing_of_functionally_graded_materials_based_polymer_composite_spur_gears
- [19] STEIDL, Josef. *Perspektivy plastových ozubených převodů*. MMSpektrum, červenec 2014, s. 22. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-plastovych-ozubenych-prevodu.html>
- [20] ULRICH, Andy. *Exploiting the Potential of Plastic Gears*. Gear solutions. [online]. 2012-12-06 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://gearsolutions.com/features/exploiting-the-potential-of-plastic-gears/>

- [21] ADAMS, Clifford E. *Lubricants and Lubrication of Plastics Gears*. Gear technology, Sept/Oct. 1993, s. 42-44. Dostupné také z:
<https://www.geartechnology.com/issues/0993x/adams.pdf>
- [22] WALTER, Rudy. *Engineering Principles for Plastic Gears*. Gearsolutions, [online]. 2004-10-01 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z
<https://gearsolutions.com/features/engineering-principles-for-plastic-gears/>
- [23] In-door actuator. Peugeot 1007. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z
<http://jimbutterworth.co.uk/5dooractuator.htm>
- [24] Katalog výrobce TEN ART, spol. s r.o. [online]. [cit. 2019-10-15]. Dostupné z
<https://tenartplasty.cz/ke-stazeni/>
- [25] Katalog výrobce EMCO INDUSTRIAL PLASTICS, INC. [online]. [cit. 2019-10-28]. Dostupné z <https://www.emcoplastics.com/materials/>
- [26] Katalog výrobce TechPlasty s.r.o. [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z
<https://www.techplasty.cz/technicke-plasty>
- [27] Katalog výrobce ensingerplastics group. [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z
<https://www.ensingerplastics.com/>
- [28] Katalog výrobce DMH Dichtungs- und Maschinenhandel GmbH. [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z <https://www.dmh.at/en/>
- [29] The CAMPUS plastics information system. Databáze materiálových listů. [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z <https://www.campusplastics.com/>
- [30] MatWeb material property data. Databáze materiálových listů. [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z <http://www.matweb.com/>
- [31] SINGH, Prashant Kumar et al. *An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears*. Tribology International, Volume 118, 2018, s. 264-272. Dostupné také z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X1730467X>
- [32] Pinterest [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z
<https://cz.pinterest.com/pin/817403401099912873/>

- [33] SHERMAN, Lilli Manolis. *Five Factors to Consider When Molding PEEK*. Plastic Industry. [online]. 2019-05-32 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z <https://www.ptonline.com/articles/five-factors-to-consider-when-molding-peek>
- [34] PETCH, Michael. *REVIEW: THE 3DGENCE INDUSTRY F340, A POWERFUL PEEK 3D PRINTING WORKHORSE*. 3D Printing Industry. [online]. 2018-08-01 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z <https://3dprintingindustry.com/news/review-the-3dgence-industry-f340-a-powerful-peek-3d-printing-workhorse-137311/>
- [35] Plastic radial ball bearing. KMS Bearings, Inc. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <https://www.kmsbearings.com/standard-bearings/plastic-radial-ball-bearings.html>
- [36] Nylon General Purpose Normally Closed Differential Solenoid Valve. Process Systems. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <https://www.valvesonline.com.au/nylon-general-purpose-normally-closed-differential>
- [37] ebay.com. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <https://www.ebay.com/itm/BOSCH-DISHWASHER-DIVERTER-MOTOR-PART-00615820-/254140187552;>
- [38] Quora.com. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <https://www.quora.com/Is-the-gearbox-same-for-semi-automatic-and-fully-automatic-washing-machine>
- [39] HEADRICK, Mark. *Quartz technology*. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://www.abbeyclock.com/quartz.html>
- [40] Multidisciplinary Engineering. [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z <http://edge.rit.edu/edge/P17346/public/Detailed%20Design>
- [41] BMW E65, E66, E67 & E68 Electronic parking brake actuator motor gear – 39 teeth. [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z <http://www.hongmei.com.tw/shop/bmw/bmw-e65-electronic-parking-brake-actuator-motor-gear-02/>
- [42] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 2. část*. Brno: VUT FSI, Ústav strojírenské technologie, 2004.
- [43] General Electric Company. *A guide to plastic Gearing*. GE Plastics. [online]. 2006. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z http://files.engineering.com/download.aspx?folder=2d909bef-8c74-4690-a047-287a175b0639&file=GE_plastic_Gears.pdf
- [44] Stránky výrobce RNA Automation LTD. [online]. [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.rnaautomation.com/>

- [45] ÖZTÜRK, Erdal et al. *DESIGN AND MANUFACTURING OF PLASTIC INJECTION MOLD TO PRODUCE HIGH DENSITY POLYETHYLENE INJECTION MOLDED SPUR GEAR*. [online]. 04/2019 [cit. 2019-12-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/332109919_DESIGN_AND_MANUFACTURING_OF_PLASTIC_INJECTION_MOLD_TO_PRODUCE_HIGH_DENSITY_P OLYETHYLENE_INJECTION_MOLDED_SPUR_GEAR
- [46] Grabcad community. *Injection mold gear*. [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z <https://grabcad.com/library/injection-mold-gear-1>
- [47] GLEASON CORPORATION. *New Technology for Stronger Plastic Gears*. Gear technology, August. 2012, s. 14-16. Dostupné také z: https://www.geartechnology.com/articles/0812/New_Technology_for_Stronger_Plastic_Gears/
- [48] WAFIUDDIN, Md Ghazali et al. *Gate Location and Injection Analysis of a Spur Gear*. MATEC Web of Conferences, 2018. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/328740477_Gate_Location_and_Injection_Analysis_of_a_Spur_Gear
- [49] AKANT, Singh a SIDDHARTA, Vashishtha. *A novel technique for in-situ manufacturing of functionally graded materials based polymer composite spur gears*. Polymer Composites, 2017. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/321728529_A_novel_technique_for_in-situ_manufacturing_of_functionally_graded_materials_based_polymer_composite_spur_gears
- [50] GRZEGORZ, Budzik. *The Use of the Rapid Prototyping Method for the Manufacture and Examination of Gear Wheels*. [online]. 9/2011 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/221916909_The_Use_of_the_Rapid_Prototyping_Method_for_the_Manufacture_and_Examination_of_Gear_Wheels
- [51] JADHAV, Vaibhav a WANKHADE Santosh. *Design & Manufacturing of Spur Gear Using Fused deposition Modeling*. International Research Journal of Engineering and Technology, Volume: 04 Issue: 12 December 2017. Dostupné také z: <https://www.irjet.net/archives/V4/i12/IRJET-V4I12225.pdf>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

PA	polyamid
PA6	silon
PA66	nylon
APA	alkalický polyamid
PPA	polyftalimid
POM	polyoxymethylen, acetal
POM-H	acetal – humopolymer
POM-C	acetal – kopolymer
PC	polykarbonát
PEEK	polyetheretherketon
PET	polyethyltereftalát
PBT	polybutyltereftalát
PE	polyethylen
LDPE	nízkohustotní polyethylen
HDPE	vysokohustotní polyethylen
UHMWPE	polyethylen s maximální molekulární hmotností
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PS	polystyren
PEI	polyetherimid
PPS	polyfenylsulfid
PUR	polyurethan
PI	polyimid
PVC	polyvinylchlorid
EP	epoxidové pryskyřice

UP	polyesterové pryskyřice
PTFE	polytetrafluorethylen (teflon)
EVA	ethylenvinylacetát
RC	radio control
MoS ₂	sulfid molybdeničitý
CO ₂	oxid uhličitý
UV	ultraviolet (ultrafialové)
CNC	computer numerical control (počítačem řízený)
FGM	functionally graded materials
RP	rapid prototyping
FDM	fused deposition modeling
SLA	selective laser sintering
SLS	stereolithography (stereolitografie)
3D	třídimenzionální
AGMA	American Gear Manufacturers Association
ISO	International Organisation for Standardization
T_g	teplota skelného přechodu
T_f	teplota viskózního toku
T_m	teplota tání
E	Youngův modul pružnosti
ε_β	poměrné prodloužení
ε	deformace
σ	napětí
k	tuhost
η	viskozita
F	síla

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 3.2.1-1 Distribuční křivka molekulové hmotnosti; [2], upraveno.....	13
obr. 3.2.2-1 Linearita řetězce; a) lineární; b) rozvětvený; c) zesíťovaný; [6], upraveno.....	13
obr. 3.2.2-2 Konfigurace řetězce; a) ataktická; b) izotaktická; c) syndiotaktická; [6], upraveno.....	14
obr. 3.3-1 Složení plastů; [autor dle 1,2,7].....	15
obr. 3.3.1-1 Vliv plniv na opotřebení povrchu zubů z PTFE; [4], upraveno.....	16
obr. 3.4.1-1 Grafy závislosti Youngova modulu E a poměrného prodloužení ε_b na teplotě; [autor dle 2].....	18
obr. 3.4.2-1 Modely a reakce na zatížení; a) tuhé; b) viskózní; c) viskoelastické těleso; [autor dle 6].....	20
obr. 3.4.3-1 Hysterezní smyčky (plocha smyčky vyjadřuje energii přeměněnou na teplo); [2].....	21
obr. 3.4.5-1 Výsledky běhových zkoušek; [12], upraveno.....	23
obr. 3.5-1 Různá provedení kovového náboje; [a) autor; b) 16].....	24
obr. 3.5.2-1 a) následky mechanického [autor]; b) následky tepelného [18] přetížení ozubení.....	26
obr. 3.6-1 Ozubení provozované; a) v nemazaném režimu – vodoměr; b) v mazaném režimu – nůžky na živý plot; [autor].....	27
obr. 3.6.2-1 Mechanismus elektrického zámku dveří (Peugeot 1007); [23].....	29
obr. 3.7.1-1 a) Závislost meze kluzu na vlhkosti pro PA6; [4], upraveno. b) Soukolí sloužící k nastavení sedadla v autě; [19].....	31
obr. 3.7.2-1 Zubové čerpadlo z POM vyrobené FDM rapid prototypingem; [32].....	33
obr. 3.7.4-1 Převodovka s šikmými zuby, vložené kolo z PEEK; [34].....	35
obr. 3.7.11-1 Další možné aplikace plastů ve strojírenství; a) valivé ložisko [35]; b) elektromagnetický ventil [36].....	42
obr. 3.8.4-1 Polymerní ozubení v domácích spotřebičích; a) myčka [37]; b) pračka [38].....	46
obr. 3.8.4-2 Kinematické převody; a) hodinový stroj [39]; b) šneková převodovka [40].....	46
obr. 3.8.4-3 Mechanismus elektrické parkovací brzdy BMW E65; [22].....	47
obr. 3.9.1-1 Obrábění ozubených kol; a) frézování dělicím způsobem; b) obrážení; [42], upraveno.....	48

obr. 3.9.2-1 Odlévání ozubených kol; a) vadný odlitek šneku; b) ozubené kolo a jeho forma; [autor].....	49
obr. 3.9.3-1 Vstříkovací lis; [44], upraveno.....	50
obr. 3.9.3-2 Forma pro vstříkování plastů [46].....	51
obr. 3.9.3-3 Ozubené kolo; a) bez; b) s eliminovaným vlivem weld lines; [47].....	52
obr. 3.9.4-1 Dosahované přesnosti; a) FDM; b) SLA; [50].....	55
obr. 3.9.4-2 Sledování kontaktní plochy; a) SLA model; b) CAD model; [51], upraveno..	56

9 SEZNAM TABULEK

tab. 3.3.1-1 Vyztužující plniva, obvyklý hmotnostní obsah a kladné a záporné dopady použití.....	17
tab. 3.5-1 Porovnání základních vlastností některých materiálů používaných pro výrobu ozubení.....	24
tab. 3.7.1-1 Vlastnosti polyamidů.....	30
tab. 3.7.2-1 Vlastnosti acetalu.....	32
tab. 3.7.3-1 Vlastnosti polykarbonátu.....	33
tab. 3.7.4-1 Vlastnosti polyetheretherketonu.....	34
tab. 3.7.5-1 Vlastnosti polyesterů.....	36
tab. 3.7.6-1 Vlastnosti polyethylenů.....	37
tab. 3.7.7-1 Vlastnosti ABS plastu.....	38
tab. 3.7.8-1 Vlastnosti polyetherimidu.....	39
tab. 3.7.9-1 Vlastnosti polyfenylsulfidu.....	40
tab. 3.7.10-1 Vlastnosti polyurethanu (tvrdý typ použitelný na výrobu ozubení).....	41
tab. 3.7.11-1 Vlastnosti polyimidu.....	42
tab. 3.8.1-1 Porovnání mechanických vlastností vybraných polymerů.....	43
tab. 3.8.2-1 Porovnání fyzikálních vlastností vybraných polymerů.....	44
tab. 3.8.3-1 Porovnání tepelných vlastností vybraných materiálů.....	45
tab. 4-1 Výhody, nevýhody, dosahovaná přesnost a příklady použití výrobních technologií.	58