

Výzkum vlivu procesních podmínek na vlastnosti polymerních výrobků při vstřikování

Bc. Jan Laník

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Laník**
Osobní číslo: **T13651**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum vlivu procesních podmínek na vlastnosti
polymerních výrobků při vstřikování**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerži na téma vstřikování a vstřikovací formy
2. Popište základní druhy mechanických zkoušek materiálů
3. Provedte výrobu zkušebních těles a experimentální zkoušky
4. Statisticky vyhodnoťte naměřená data

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle zadání vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Čop

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: LANÍK JAN

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11. 5. 2015



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

²¹ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vyhodnocováním mechanických vlastností polymerních materiálů, vyrobených vstřikováním za různých procesních podmínek.

Teoretická část práce obsahuje základní rozdělení a popis polymerních materiálů, problematiku tváření a vstřikování plastů, vstřikovacích strojů, použitých materiálů vstřikovacích forem a základní druhy mechanických zkoušek.

Praktická část obsahuje popis výroby a mechanických zkoušek vyrobených polymerních vzorků. V závěru práce je vyhodnocen vliv procesních parametrů, a to zejména materiál vstřikovací formy či použití teploty vstřikovacích forem při vstřikování.

Klíčová slova: Vstřikování, materiál vstřikovací formy, polymer, mechanické zkoušky

ABSTRACT

This master thesis deals with the evaluation of mechanical properties of polymeric materials produced by injection molding using different process settings.

The theoretical section consists of basic classification and description of polymeric materials, as well as an overview of plastics forming and injection molding technologies, injection molding machines, materials used for injection molds, and the basic kinds of mechanical tests.

The practical section describes the production and mechanical testing of injection molded polymer samples. The final part of the thesis evaluates the effect of different process parameters, including the injection mold material and mold cooling during the injection molding process.

Keywords: Injection molding, injection mold material, polymer, mechanical testing

Poděkování patří především vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Čopovi, za odborné vedení při práci, pomoc a podporu, trpělivost a lidský přístup. Za pomoc, aplikované zkušenosti a čas strávený při vstřikování vzorků děkuji panu Ing. Františkovi Vavříkovi, technickému pracovníkovi školy. Za finanční a psychickou podporu při magisterském studiu patří poděkování také mé přítelkyni a oběma rodičům.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	12
1.1 HISTORIE A PRODUKCE PLASTŮ	12
1.2 ZÁKLADNÍ STRUKTURA POLYMERŮ	14
1.3 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	14
1.3.1 Dělení podle druhu chemické reakce	15
1.3.2 Dělení podle tvaru molekul	16
1.3.3 Dělení podle chování za zvýšené teploty	17
1.3.4 Ostatní rozdělení polymerů	18
1.4 ZPRACOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	19
1.4.1 Druhy tváření polymerů	19
1.5 VLASTNOSTI VYBRANÝCH POLYMERŮ	22
1.5.1 Polyetylen (PE)	22
1.5.2 Polypropylen (PP)	23
1.5.3 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)	25
2 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ	27
2.1 SUŠENÍ TERMOPLASTŮ	28
2.2 PROCES VSTŘIKOVÁNÍ	28
2.2.1 Vstřikovací cyklus	29
2.3 VSTŘIKOVACÍ STROJ	30
2.3.1 Vstřikovací jednotka	31
2.3.2 Uzavírací jednotka	33
2.3.3 Řídící a regulační jednotka	34
3 VSTŘIKOVACÍ FORMY	35
3.1 TVAROVÁ DUTINA	35
3.2 TEMPERAČNÍ SYSTÉM	36
3.3 VTOKOVÝ SYSTÉM	37
3.4 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM	37
3.4.1 Oceli	37
3.4.2 Slitiny mědi	43
3.4.3 Slitiny hliníku	44
4 MECHANICKÉ ZKOUŠENÍ POLYMERŮ	45
4.1 ROZDĚLENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	45
4.2 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM	46
4.2.1 Normalizovaný zkušební vzorek pro zkoušku tahem	49
4.3 DYNAMICKÁ ZKOUŠKA RÁZOVÉ A VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	50
4.3.1 Normalizovaný zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti	51
II PRAKTICKÁ ČÁST	53
5 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	54

5.1	VLASTNOSTI VSTŘIKOVANÝCH MATERIÁLŮ	54
5.1.1	Nízkohustotní polyetylen (LDPE).....	54
5.1.2	Polypropylen (PP)	55
5.1.3	Akrylonitril - butadien - styren (ABS)	55
5.2	SUŠENÍ VSTŘIKOVANÝCH POLYMERŮ	56
5.3	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	57
5.4	VSTŘIKOVACÍ FORMY A JEJICH VLASTNOSTI.....	58
5.4.1	Ocelová forma	59
5.4.2	Forma ze slitiny mědi	60
5.4.3	Forma ze slitiny hliníku	61
5.5	PROCESNÍ PODMÍNKY VSTŘIKOVÁNÍ.....	63
6	VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	65
7	STATICÁ ZKOUŠKA TAHEM.....	66
7.1	LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ	66
7.2	MATERIÁL LDPE	68
7.3	MATERIÁL PP.....	71
7.4	MATERIÁL ABS	74
8	ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	77
8.1	LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ	77
8.1.1	Úprava vzorků opatřením vrubu	77
8.2	MATERIÁL LDPE	79
8.3	MATERIÁL PP.....	81
8.4	MATERIÁL ABS	83
	ZÁVĚR	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK.....	95
	SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

V posledních dvaceti letech se ubírá vývoj modernějších technických materiálů kupředu především v oblasti plastů. Největším důvodem úspěchu a rozvoje je jejich hmotnost oproti ostatním materiálům, případně složitější tvar a design, který lze u polymerů pomocí CAD/CAM softwaru výborně vymodelovat a úspěšně vyrobit. Nejčastější technologií pro výrobu plastů je vstřikování plastů na vstřikovacích strojích.

Nezbytným prvkem pro výrobu vstřikovaných plastových výrobků je nářadí neboli vstřikovací forma. Hlavní součástí formy jsou tvarové desky, kde jejich dutina má tvar negativu budoucího plastového výrobku zvětšeného o hodnotu smrštění. Jakost a povrch dutiny formy je nejdůležitější z hlediska tvaru a kvality povrchu výrobku. Pro vyrobení kvalitního polymerního výrobku, jsou také důležité procesní parametry stroje při samotném vstřikování a především samotné tuhnutí výrobku. Tuhnutí neboli proces chlazení, při kterém výrobek fixuje výsledný tvar, je závislý na odvodu tepla z použitých materiálů tvarových desek formy. Běžně používaným materiálem pro výrobu forem je nástrojová ocel. Mezi méně běžné materiály tvarových desek se řadí slitiny mědi a hliníku, které vynikají několikanásobně vyšší tepelnou vodivostí nežli oceli, liší se však výrazně i jejich pevnostní charakteristiky a pořizovací cena. Druhým důležitým prvkem pro rychlý odvod tepla vstřikovaného dílu je možnost aplikace vyrovnávání teplotního pole uvnitř formy pomocí temperačního systému vstřikovacích desek.

Tato diplomová práce je zaměřená na vyhodnocení změny mechanických vlastností vstřikovaných vzorků při záměně pouze určitých procesních podmínek při vstřikování termoplastů. Odlišnost procesních podmínek je určena aplikovaným materiálem vstřikovací formy (ocel, měď, hliník) a možnostmi použití temperace forem.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymerní materiály, často nazývané jako plasty či plastické hmoty, jsou velice významné a rozšířené materiály po celém světě a jejich aplikace je téměř ve všech odvětvích lidských činností. Polymery mají v dnešním světě nezastupitelnou roli a staly se pro lidstvo samozřejmostí. Moderní život si lze jen těžko představit bez používání plastů. [1, 2, 11]

1.1 Historie a produkce plastů

Světová produkce se od roku 1950, kdy se ve světě vyrobilo 1,5 mil. tun plastů, výrazně zvýšila. V roce 2013 světová úroveň dosáhla 299 mil. tun, z toho v 57 mil. tun v Evropě (Obr. 1). [1, 2, 3]



Obr. 1 Produkce polymerů (2002 - 2013) [3]

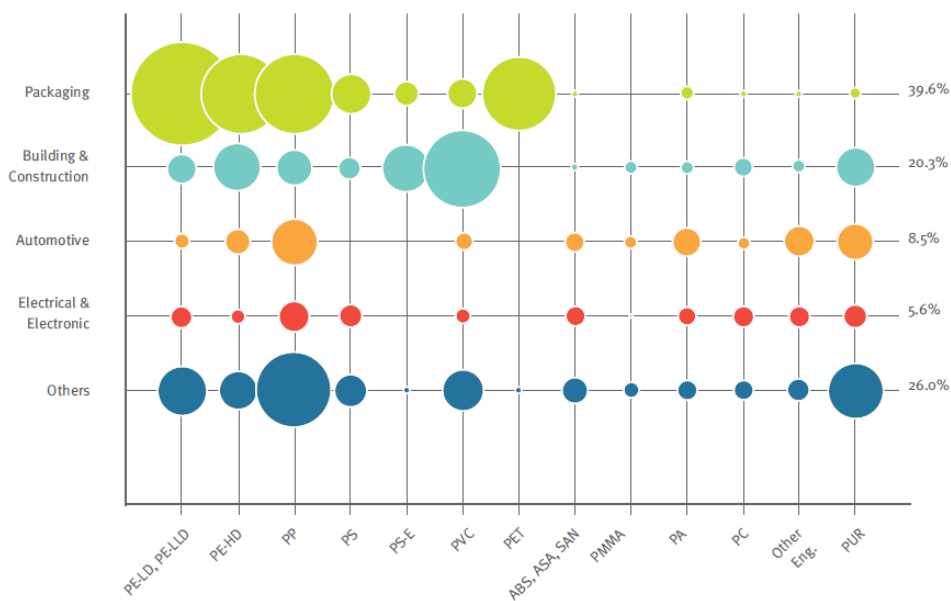
Z celkového objemu výroby plastů v různých státech, které jsou průmyslově vyspělé, spotřebujeme pro obalovou techniku 21 až 33 %, pro stavebnictví 13 až 26 %, pro strojírenství včetně dopravy 10 až 21 %, elektroniku a elektrotechniku 5 až 15%, nábytkářství 2 až 7%, zemědělství 2 až 5 %. Z hlediska aplikací plastů na životnost se jedná z cca 60% o krátkodobé, především pro obaly a potraviny, z 40% o dlouhodobé aplikace. [1, 2]

Polymery umožňují použití vysoce produktivních technologií a dosahují tak okolo 90 až 95 % využití materiálu, což je ve srovnání s ostatními technickými materiály vysoký stupeň využití. U kovů je to pouze 60 až 80 %. Náklady na zpracování polymerů, díky jed-

noduchým možnostem tváření plastů, tvoří 15 až 40 % nákladů při zpracování kovů. Kromě snadné zpracovatelnosti vynikají polymery nízkou měrnou hmotností a příznivým poměrem mezi cenou a užitnými vlastnostmi. [1, 7]

„Plastikářský průmysl je proto jedním z nejefektivnějších odvětví národního hospodářství nejen rentabilitou a dosahovanými zisky, ale i tím, že použití jeho výrobků v ostatních odvětvích hospodářské činnosti zabezpečuje snížení společenských nákladů a růst produktivity práce. Výroba plastů je ve srovnání s výrobou kovů a keramických materiálů velmi zajímavá spotřebou energií.“ [1, s. 477]

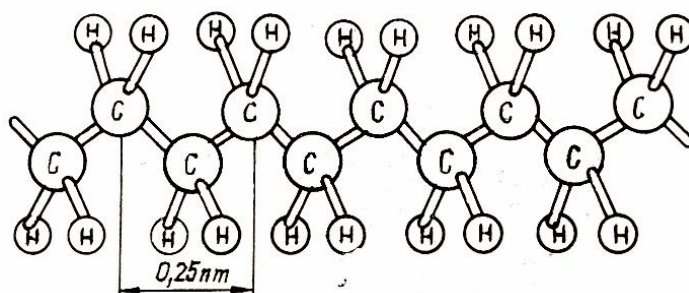
Z hlediska druhu plastu tvoří zhruba 85 % termoplasty z pohledu celosvětové výroby. Rozdělení celkové spotřeby materiálu ve světě podle aplikace a druhu polymeru můžeme vidět na Obr. 2. [1, 3]



Obr. 2 Celosvětová spotřeba vybraných polymerů 2013 [3]

1.2 Základní struktura polymerů

Polymer je chemická látka (může být přírodní nebo syntetická), která je tvořena jako makromolekulární sloučenina. Tuto polymerní makromolekulu tvoří základní monomerní jednotka, která je připravována převážně z ropy a v řetězci se neustále opakuje. Jednotlivé molekuly se skládají ze stovek až miliónů atomů, spojených chemickými vazbami. Tyto atomy nejčastěji obsahují prvky uhlíku, vodíku a kyslíku, často také chlóru, dusíku aj. Polymer je tedy tvořen následným řazením monomerů (Obr. 3). Způsob, jakým výsledná makromolekula polymeru vznikne, může být různý. [4, 6, 8, 26]



Obr. 3 Úsek makromolekuly Polyetyleny [6]

Polymerní látky mají neobvykle velikou šíři vlastností, díky svým velikým makromolekulám a stavby vlastní struktury. V normálním stavu, jakožto výrobku, jsou polymery tuhá tělesa. V určitém stádiu zpracování, většinou za zvýšení teploty a tlaku, se polymery dostávají do prakticky kapalného stavu, ve kterém je možné médium určit tvar (pomocí formy) podle předpokládaného využití. [4, 6]

1.3 Rozdělení polymerů

Vzhledem k rozmanitým vlastnostem polymerů není doposud vypracováno systematické rozdělení, a proto se většinou uvádí dělení podle určitého kritéria. [8]

1.3.1 Dělení podle druhu chemické reakce

Rozdělení podle druhu chemické reakce, kterou (syntetické) polymery vznikají:

- Polymeráty
- Polykondenzáty
- Polyadukty

Zmíněné tři chemické reakce, popřípadě i jejich kombinace, umožňují vyrábět nej-různější syntetické polymerní materiály. Jejich vlastnosti je možno do určité míry předem stanovit nebo záměrně měnit díky ovládnání výše uvedených reakcí. [4, 6]

○ **Polymerace**

Polymerací vznikají dlouhé makromolekuly polymeru jako dlouhá řetězová chemická reakce velkého počtu molekul monomeru. Při této reakci nevznikají žádné vedlejší produkty a chemické složení celého polymeru je totožné s chemickým složením základního monomeru. Tato chemická reakce se dále dělí na polymeraci radikálovou, iontovou a koordinační. [4, 11]

○ **Polykondenzace**

Polykondenzace je reakce, kde reagují molekuly jedné (nebo více) výchozích nízkomolekulárních látek a vytvářejí tak makromolekulární produkt. Při této reakci zároveň vzniká další jednoduchá sloučenina, jako vedlejší produkt (např. voda). Druh struktury polykondenzačních produktů je určen podle počtu funkčních skupin. Makromolekula existuje buď lineární (dvě funkční skupiny) nebo prostorová (tři funkční skupiny). Hlavní rozdíl v porovnání s polymerací je, že chemické složení celého polykondenzátu není totožné s chemickým složením výchozí nízkomolekulární látky, ze které vzniká. [4, 11, 25]

○ Polyadice

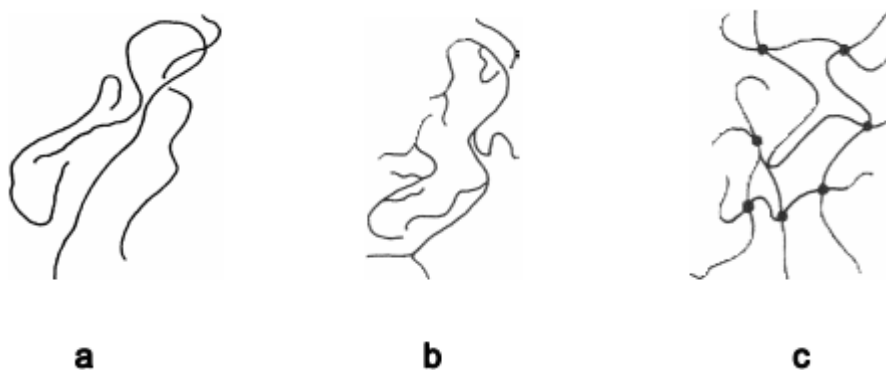
Polyadicí vzniká makromolekulární produkt adiční reakcí výchozích látek, které mají vhodné funkční skupiny. U tohoto druhu přípravy nevzniká vedlejší produkt. V porovnání s ostatními typy přípravy polymerů má konečný produkt stejné chemické složení jako výchozí produkty, avšak struktura výchozích látek se ve výsledku změní. [4, 6, 25]

1.3.2 Dělení podle tvaru molekul

Dělení podle makromolekulárních řetězců (tvaru molekul) dělíme polymery na tři základní typy:

- Lineární
- Rozvětvené
- Zesítěné

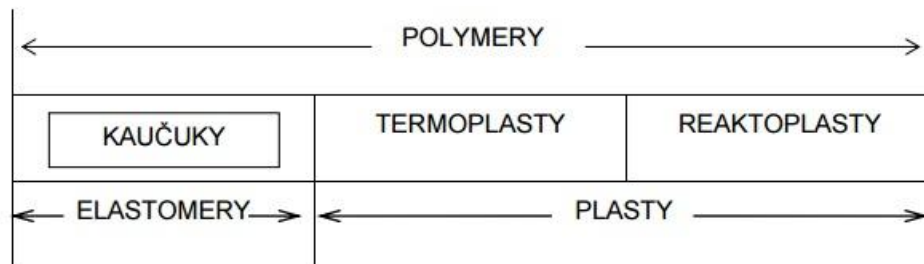
Tvary makromolekul jsou dány funkčními schopnostmi monomerů a ty rozhodují o možném vniku lineárních nebo zesítovaných makromolekul. Případná teplota a tlak při reakcích mají vliv na vnik lineárního nebo rozvětveného polymeru. Základní tři typy makromolekul jsou vyobrazeny na Obr. 4. Lineární jsou tvořeny pouze přímým řetězcem z monomerních molekul. Rozvětvený polymer má hlavní řetězec s bočními větvemi. Zesítovaný má několik lineárních nebo rozvětvených makromolekul, které jsou mezi sebou spojeny vazbami. [4, 25]



Obr. 4 Tvary makromolekul - lineární (a), rozvětvený (b), zesítovaný (c) [4]

1.3.3 Dělení podle chování za zvýšené teploty

Nejpoužívanější je rozdělení polymerů podle chování při zahřátí neboli za zvýšené teploty (Obr. 5). Polymery se tedy dělí na dvě základní skupiny. První zastupují pružné elastomery, což jsou kaučuky, druhou skupinu představují většinou tvrdé, často i křehké, plasty. Plasty dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [4, 11, 25]



Obr. 5 Rozdělení polymerů dle chování při zahřátí [4]

○ Elastomery

Jak již napovídá název, jedná se o vysoce elastický materiál (polymer), který je při zatížení malou silou (za běžných podmínek) značně deformovaný bez známek porušení. Tyto deformace jsou převážně vratné. Podmnožinou elastomerů je kaučuk, ze kterého se vyrábí pryž, neboli nespisovně guma. [4, 10, 25]

○ Reaktoplasty

Makromolekuly reaktoplastů mají svou síť hustě a souvisle propojenou. Se zvyšující se teplotou se reaktoplasty vytvrzují chemickou reakcí a po zchládnutí tak nevratně přecházejí do netavitelného a nerozpustného stavu. Opětovným zvýšením teploty se nemohou roztavit, často také zvyšují svoji tvrdost a tuhost. Za dostatečně vysokých teplot začínají reaktoplasty degradovat, ba dokonce mohou začít hořet. [6, 10, 25]

○ Termoplasty

Termoplasty jsou nejpoužívanější plasty vůbec. Jejich molekuly jsou k sobě vázány pouze fyzickými vazbami. Za normálních teplot mají tuhé skupenství, při zvýšení teploty (tlaku) postupně měknou, stávají se viskózní taveninou a můžeme je tvářet a tvarovat. Pro vytvrzení je stačí zchladit na běžnou teplotu a tím se stávají opět tuhými a fixují svůj tvar.

Celý proces změny teploty termoplastu a změna vlastního stavu je vždy pozvolná a i jejich vlastnosti se mění vratně. Tím, oproti kovům, termoplasty umožňují téměř všechny zpracovatelské technologie. Jejich největší výhodou je tedy opětovná tavitelnost oproti reaktoplastům. [6, 7, 10, 25]

1.3.4 Ostatní rozdělení polymerů

Dělení podle výchozích surovin, rozlišujeme dva základní typy:

- Polymery vznikající zušlechtěním z přírodních makromolekulárních látek
- Polymery, vyráběné synteticky z jednoduchých nízkomolekulárních sloučenin

Dělení podle uspořádání nadmolekulární struktury:

- Amorfní
- Semikrystalické
- Krystalické

Dělení podle chování v elektrickém poli:

- Polární
- Nepochární

Dělení podle chemické příslušnosti:

- Fenoplasty
- Aminoplasty
- Polyamidy
- Akryláty
- Silikony atd. [7, 8, 10]

1.4 Zpracování polymerních materiálů

Celkové zpracování polymerních materiálů rozlišujeme na dva způsoby. První základní technologie je tvářeni polymerů (v plastickém stavu), druhá se nazývá tvarování polymerů.

Při tvarování je materiál v tuhém (případně kaučukovitém) stavu a je zpracováván jako ostatní technické materiály. Je možné použít zvýšenou teplotu, ale při tvarovacích technologiích nedochází k velkému přemístování částic. Tvarová úprava probíhá pouze na výchozích (dříve vyrobených) polotovarech, jako například mechanické obrábění, tvarování desek, ohýbání trubek, spékání plastů apod.

Tváření polymerů spočívá v přemístování částic hmoty v kapalném, resp. plastickém stavu do konečného tvaru. Např. výlisky, polotovary, desky, trubky, tyče, folie aj. Tvářecí technologie probíhá za zvýšené teploty či tlaku nebo jejich kombinací. Získaný tvar se zafixuje ochlazením, zesíťováním nebo vysušením. Při přechodu z plastického do tuhého stavu se objem výrobku zmenšuje, tomuto jevu říkáme smrštění. Hodnota smrštění většinou není větší než 0,5 %. [1, 5, 6, 10]

1.4.1 Druhy tvářeni polymerů

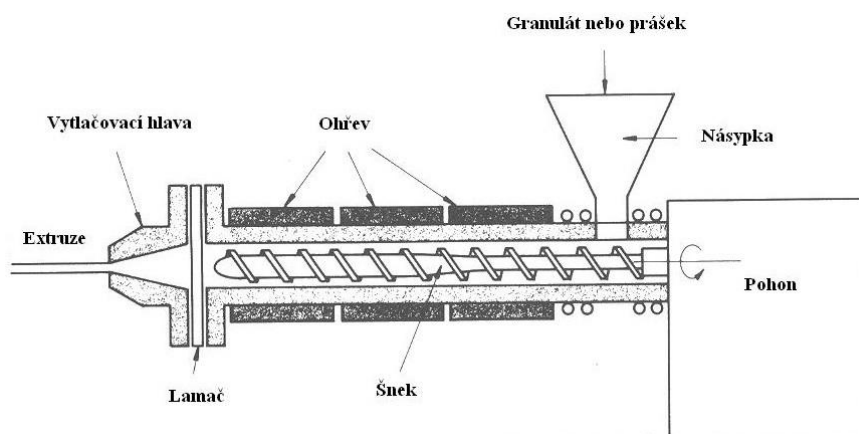
Metody tvářeni je možné rozdělit na:

- Zpracovávání za nízkých tlaků (zpracování kapalných systémů – roztoků nebo disperzí, zpracovávání monomerů, oligomerů):
 - Lití dutých těles, bloků, folií
 - Vrstvení, natírání
 - Zalévání, impregnace
 - Máčení

- Zpracovávání za vysokých teplot a tlaků (v plastickém stavu):
 - Vytlačování
 - Válcování
 - Lisování
 - Vstřikování [1, 8]

- **Vytlačování**

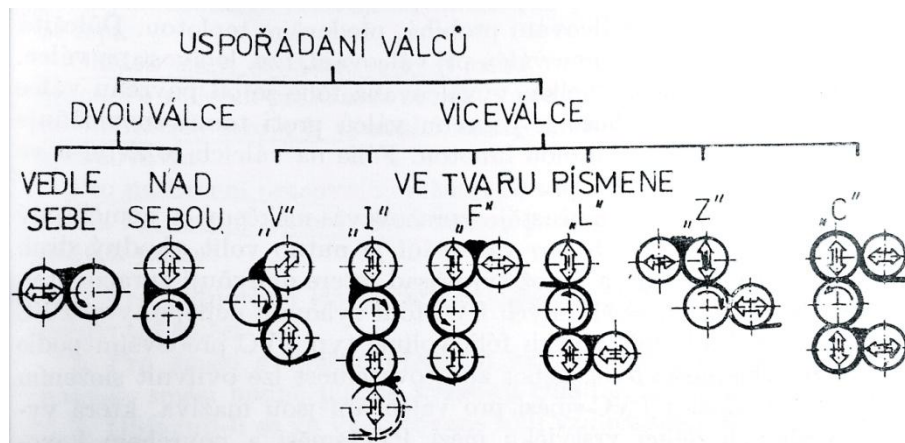
Vytlačování je tvářecí technologie, při které je plast nebo kaučuková směs vytlačována přes profilovací zařízení do volného prostoru. Jedná se o nepřetržitou (kontinuální) technologii a provádí se většinou na šnekových vytlačovacích strojích (Obr. 6). Vytlačováním vyrábíme konečné tvary nebo polotovary nekonečné délky. Hlavní částí vytlačovacího stroje je šnek (v pracovním válci), kde se materiál plastikuje teplem a tlakem. Válec je z vnější strany často vyhříván topnými pásy. Při výstupu ze stroje plastická hmota prochází profilovacím zařízením (vytlačovací hlava), které kontinuálně tvaruje daný profil. Po výstupu ze stroje materiál ztuhne ochlazením. Vytlačováním je možné vyrábět polotovary profilů, trubek, desek a folií. [1, 10, 14]



Obr. 6 Vytlačovací stroj šnekový [10]

- **Válcování**

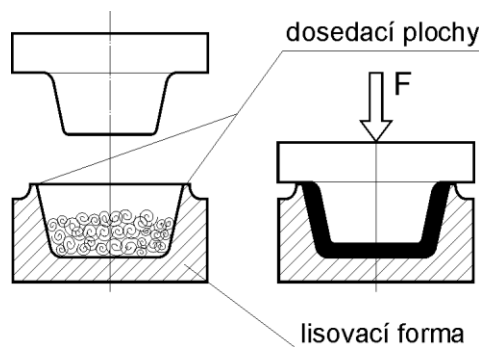
Válcování je tváření polymeru ve šterbině mezi otáčejícími se válci. Jedná se o kontinuální proces a je nejproduktivnější technologií na výrobu fólií. Válcování se provádí na válcovacích strojích. Základem je dvouválec, tvořený dvěma přesnými válci, které se otáčejí proti sobě v určitém poměru obvodových rychlostí (tzv. skluz). V mezeře mezi válci (tzv. skus) se předpřipravená tavenina materiálu postupně formuje do fólie nebo desky za působení tlaku válců. Je možné za sebe zařadit více válců. Válcovací stroje se pak od sebe liší konstrukcí a typem uspořádání, které se označuje podle velkých písmen abecedy (Obr. 7). Nejčastěji se používá uspořádání L nebo F. [5, 10, 14]



Obr. 7 Uspořádání válců ve válcovacích strojích [5]

- **Lisování**

Lisování (Obr. 8) je cyklická technologie tváření polymerů, kde pod tlakem lisu přesunujeme částice polotovaru ve vyhřívané formě. Tento způsob tváření se používá nejčastěji pro kaučukové materiály. Základními technologickými parametry je lisovací tlak, teplota formy a doba vytvrzování. Vstupním polotovarem lisovaného výrobku v dutině formy je přesný objem materiálu jako tableta, prášek nebo viskózní tavenina. [1, 10, 14]

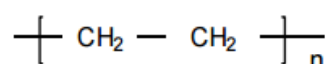


Obr. 8 Lisování [14]

1.5 Vlastnosti vybraných polymerů

1.5.1 Polyetylen (PE)

Polyetylen patří do největší skupiny vyráběných syntetických polymerů, polyolefinů. Základní monomer (Obr. 9) je etylén a jedná se o semikrystalický termoplast.



Obr. 9 Monomer PE [4]

Na základě druhu polymerace, dělíme polyetylen na více typů, tím tvoří PE širokou paletu produktů s různými vlastnostmi. Rozdělujeme je především podle lišící se hustoty a různé charakteristiky řetězce. S mírou hustoty se zároveň mění i linearita polyetylenů. Rozlišujeme tedy lineární PE a rozvětvený typ PE. Lineární je označován jako druh s vysokou hustotou a rozvětvený naopak s nižší hustotou. Hlavní jsou dva typy, a to LDPE a HDPE, doplněny dalšími jako MDPE, LLDPE, ULDPE, atd., jak napovídá tabulka třídění podle hustoty (Tab. 1), odtud vychází i konkrétní názvy. [1, 4, 15]

Tab. 1 Třídění PE podle hustoty [1]

Typ	Zkratka	Hustota (g/cm ³)
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE (Ultra-Low Density)	0,888–0,915
PE s nízkou hustotou	LDPE (Low Density)	0,910–0,955
Lineární PE s nízkou hustotou	LLDPE (Linear Low Density)	0,918–0,955
PE se střední hustotou	MDPE (Medium Density)	0,925–0,940
PE s vysokou hustotou	HDPE (High Density)	0,941–0,954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE (High Molecular Weight HDPE)	0,944–0,954 MH = 200 000–500 000
PE s ultravysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE (Ultra-High Molecular Weight HDPE)	0,955–0,957 MH = 3 000 000–6 000 000

○ **Polyetylen s nízkou hustotou (LDPE)**

- Teplota tavení $T_m = 106 - 112^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v tahu $E = 150-500 \text{ MPa}$
- Hustota $\rho = 0,912 - 0,95 \text{ g/cm}^3$

Jedná se rozvětvený polyetylen s nízkou hustotou, vyrábí se radikálovou vysokotlakou polymerací a za vysokých teplot. LDPE se používá na zátky, víka nádob, kryty, ucpávky, ochrana kabelů (černá barva) a je možné jej ozařovat pro zvýšení mechanické, tepelné a chemické odolnosti (Gamma-beta záření). [1, 4, 15]

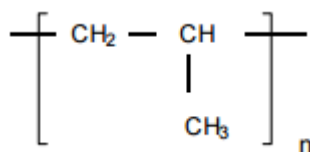
○ **Polyetylen s vysokou hustotou (HDPE)**

- Teplota tavení $T_m = 130 - 133^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v tahu $E = 600 - 1400 \text{ MPa}$
- Hustota $\rho = 0,941 - 0,967 \text{ g/cm}^3$

Jedná se o lineární polyetylen s vysokou hustotou, vyrábí se nízkotlakou polymerací. Proces polymerace podle různých technologických podmínek se dělí na roztokový, suspenzní a v plynné fázi. HDPE se používá na obaly, kontejnery, přepravky, popelnice, vodovodní trubky, kanistry, zásobníky apod. [1, 4, 15]

1.5.2 Polypropylen (PP)

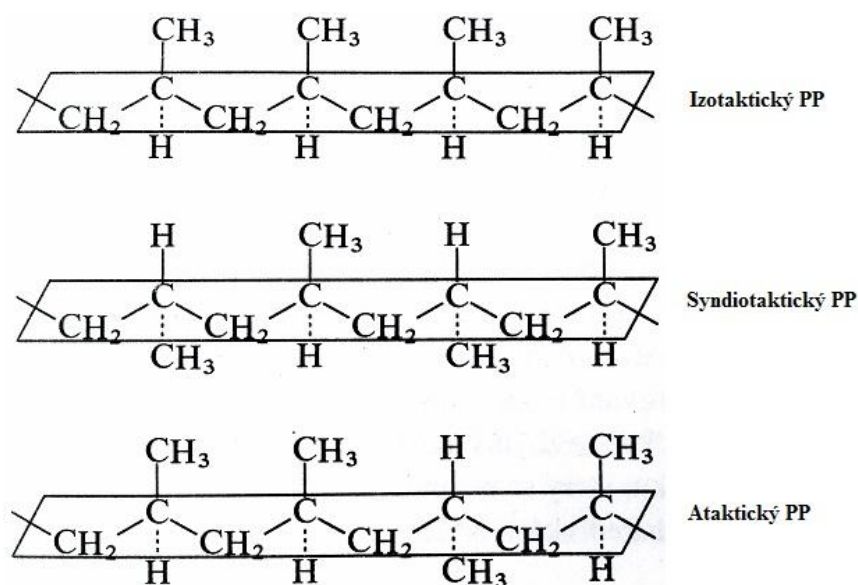
Polypropylen patří (stejně jako PE) do skupiny polyolefinů a jedná se o semikrystalický termoplast. Základní monomer polymerního řetězce se nazývá propylen (Obr. 10).



Obr. 10 Monomer PP[4]

Rozlišujeme základní tři druhy PP, podle rozložení metylových skupin CH_3 (Obr. 11):

- **Izotaktický PP** - dobře krystalizuje; všechny metylové skupiny jsou podél uhlíkového řetězce (do spirály)
- **Syndiotaktický PP** - menší krystalický podíl; metylové skupiny se střídají pravidelně na obou stranách řetězce
- **Ataktický PP** – amorfní; neuspořádané metylové skupiny



Obr. 11 Rozdělení druhů PP podle metylových skupin CH_3 [1]

Vlastnosti Polypropylenu:

- | | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| ▪ Teplota tavení | $T_m = 160 - 176^\circ\text{C}$ |
| ▪ Modul pružnosti v tahu | $E = 1100 - 1600 \text{ MPa}$ |
| ▪ Hustota (izotaktický) | $\rho = 0,905 - 0,912 \text{ g/cm}^3$ |
| ▪ Hustota (ataktický) | $\rho = 0,85 - 0,87 \text{ g/cm}^3$ |

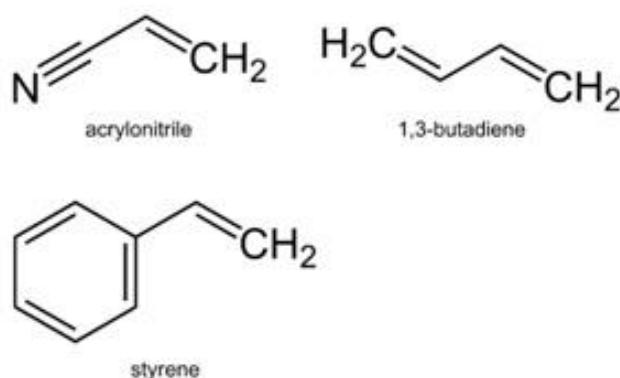
Ve srovnání s PE má PP menší chemickou odolnost, je tužší, pevnější, má lepší lesk a vyšší tvrdost na povrchu výlisků. Dále vyniká výbornými elektroizolačními vlastnostmi. Nevýhodou může být menší odolnost proti povětrnostnímu stárnutí (hlavně UV záření). Dobře odolává vroucí vodě. Tepelná použitelnost je 100°C dlouhodobě a až 135°C v krátkodobém použití. PP je možné používat na výrobky v hodně široké oblasti použití,

kde klademe důraz na mechanickou pevnost, tuhost a dobré elektroinstalační vlastnosti. Vyniká odolností ve sterilizačních teplotách a zdravotní nezávadností.

Vyrábíme buď polotovary jako jsou profily, trubky, desky, folie, nebo hotové díly jako jsou části strojů, přístrojů, sanitární techniky a jiných dílů v automobilovém nebo spotřebním průmyslu. PP se tedy používá na přístrojové desky automobilů, ventilátory, nárazníky, součásti vysavačů, kuchyňských přístrojů, mixéry, hračky, kufry, díly injekčních stříkaček, kanalizační trubky s chemikáliemi, obaly potravin, varné sáčky aj. [1, 15, 26]

1.5.3 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Akrylonitril-butadien-styren polymer, který představuje kombinaci stejnojmenných monomerů (Obr. 12). ABS spadá do skupiny akrylových či styrenových polymerů a jedná se o amorfní termoplast. [15, 16]



Obr. 12 Monomery ABS [16]

Poměry jednotlivých monomerů jsou:

- Styren 40 až 60 %
- Akrylonitril 15 až 35 %
- Butadien 5 až 30 %

Vlastnosti ABS:

- Teplota skelného přechodu $T_g = \text{cca } 110 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Modul pružnosti v tahu $E = 1800 - 2500 \text{ MPa}$
- Hustota $\rho = 1,02 - 1,08 \text{ g/cm}^3$

Základní podmínkou pro vznik ABS je oddělená příprava elastomerního podílu (butadien), poté jsou tyto malé částice polybutadienového kaučuku mechanicky vmíseny do plastického styren-akrylonitrilového kopolymeru. [1, 15, 16]

ABS je kvalitní konstrukční termoplast s dobrými mechanickými vlastnostmi, výborným povrchovým leskem a tvrdostí (atraktivní vzhled), s malou povětrností a světelnou odolností, proto je nevhodný pro venkovní použití. Používá se většinou do teploty 80°C , případně s modifikacemi až do 105°C . Zmíněný polymer lze dobře povrchově upravovat, svařovat a lepit. Stále více používaným galvanickým pokovením lze dosáhnout vzhledu srovnatelnému s kovy.

Často se tedy používá na díly motorových vozidel, domácích spotřebičů, zavazadla, optické a kancelářské přístroje, telekomunikační a elektroakustické přístroje, nábytek nebo potrubí. Např. přístrojové desky nebo pokovené přední masky aut, telefony, televizory, mixéry, vysavače, pračky, ledničky, skořepiny křesel, čluny, obytné přívěsy aj. [15, 16, 26]

2 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ

Vstřikování plastů je nejrozšířenější technologií pro zpracování plastů vůbec. Vstřikovací stroje mají dnes vysokou technickou úroveň. Vyrábíme tak precizní díly v desetinách gramů nebo i mnoha kilogramů. Tento způsob tváření nám umožňuje vyrobit i velmi složité výrobky, které mají velikou tvarovou i rozměrovou přesnost. Jedná se o proces diskontinuální, kde se provádí neustále se opakující činnost – cyklický proces. Proto je možné vyrábět díly v obrovských sériích. Můžeme tak vyrábět buď plastové polotovary, které se poté kompletují do celků (společně s plastovými i neplastovými díly) nebo přímo samostatné hotové výrobky (Obr. 13). Při vstřikování je možné najednou vyrobit (na jeden výstřik) jeden až mnoho dílů naráz. Tento počet nazýváme násobnost formy.



Obr. 13 Vstřikovaný výrobek [34]

Výhodou vstřikování je krátký čas cyklu, úzké tolerance rozměrů, velmi dobrá povrchová úprava a konstrukční flexibilita (vyměnitelnost). Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a používání velkých strojů v porovnání s malými výrobky. Čas i cena za konstrukci a výrobu forem je úměrná složitosti (tvaru) daného výrobku, příp. její násobnost. Technologie vstřikování je tedy silně finančně nevýhodná pro kusovou výrobu a používá se především ve velkosériové výrobě. [5, 10, 13, 26]

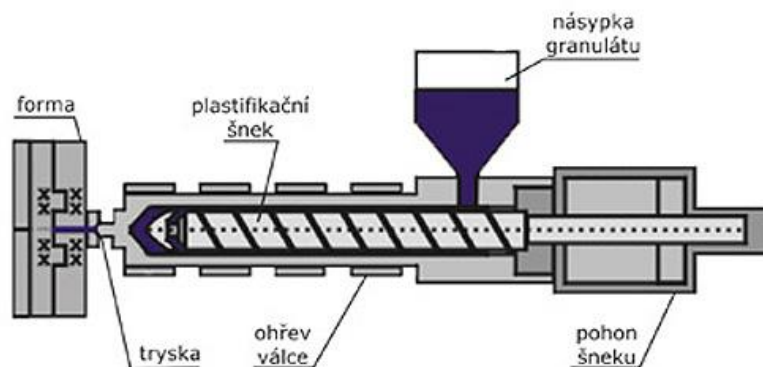
2.1 Sušení termoplastů

Před samotným vstřikováním bývá materiál upravován podle technologického postupu daného budoucího výrobku. Příprava plastů před vstřikování většinou spočívá v sušení granulátu nebo mísení s rozdrčeným odpadem, barvení atd. Aplikace přípravy upravují polymery (termoplasty) tak, aby jeho proces vstřikování proběhl bez potíží.

Téměř všechny termoplastické materiály na sebe vážou vlhkost z atmosférického vzduchu. Následkem může být horší jakost výrobku a kvalita povrchu, případně nesnadné vyhazování výrobků z formy, a to i při zpracování poměrně nízkými teplotami. Pro odstranění přebytečné vlhkosti z granulátů se materiály vysušují v komorových pecích či sušárnách s cirkulujícím teplým vzduchem. Teploty sušení se volí podle teplot doporučených, dle jednotlivého druhu plastu. Vysušený materiál je třeba hned zpracovat (do 30 minut). [23]

2.2 Proces vstřikování

Vstřikování je tedy tváření polymerních hmot, především termoplastů. Při vstřikování (Obr. 14) materiál přichází do násypky většinou ve formě granulátu. Dále se připraví (roztaví) v tavicí komoře vstřikovací jednotky stroje a pod tlakem je daná dávka taveniny zpracovávaného materiálu vstříknutá přes trysku do dutiny uzavřené formy, kde výrobek ztuhne. Tato stabilizace tvaru může probíhat buď v chladné, nebo vytemperované formě na určitou teplotu. Po zhládnutí dílu na určitou teplotu se forma otevře a hotový výrobek se vyhazuje z formy buď mechanicky, vzduchem nebo jiným způsobem. [10, 12, 22, 28]

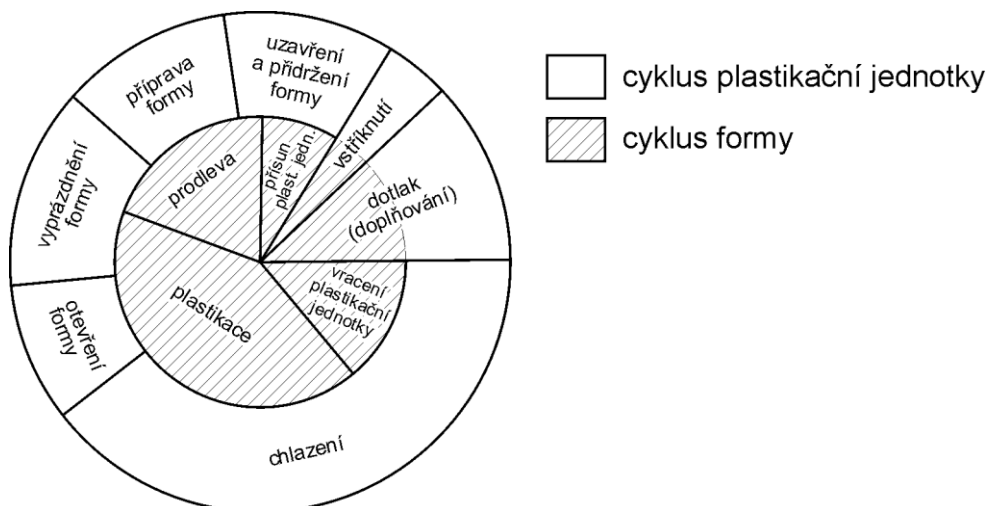


Obr. 14 Proces vstřikování [22]

Při použití reaktoplastů a kaučukových směsí je pro ztuhnutí do výsledného tvaru nutné zesíťování materiálu za zvýšené teploty. Celý proces, který se neustále opakuje, se nazývá vstřikovací cyklus a realizuje ho vstřikovací stroj. Vstřikovací proces v současné době je většinou plně automatický, tím se dosahuje vysoké produktivity práce. Celá technologie je však vhodná pro hromadnou a velkosériovou výrobu, protože pořizovací cena celého zařízení a vstřikovací forem dosahuje vysokých částek. [10, 13, 22]

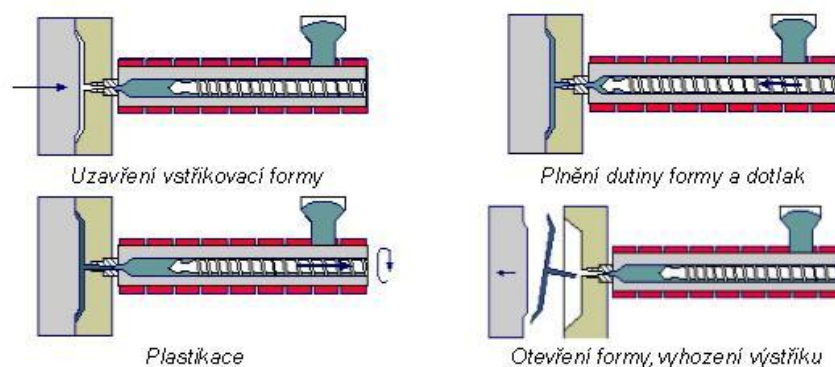
2.2.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikování je cyklický proces. Je charakterizován přesně specifikovanými úkony nebo termodynamickými ději za časový úsek a nazývá se vstřikovací cyklus. Jednotlivé části vstřikovacího cyklu s časovou návazností jsou znázorněny na Obr. 15. Skládá se z cyklu formy a cyklu plastikační jednotky. Definovaný start cyklu začíná uzavřením formy s přisunutím plastikační jednotky. Před tímto okamžikem je forma prázdná a otevřená. Následuje plnění formy s dotlakem, dále nastává chlazení s odjezdem plastikační jednotky a začátkem plastikace další dávky, poté otevření a vyprázdnění formy, nakonec příprava formy, kdy má plastikační jednotka časovou prodlevu. Od tohoto okamžiku se celý cyklus opakuje. [10, 14, 23, 28]



Obr. 15 Vstřikovací cyklus [14]

Z pohledu na plastikační jednotku koná šnek dva pohyby. Otáčivý a axiální (osový). Při plnění formy se posunuje pouze osově vpřed, tím vyvozuje tlak a vtlačí tak materiál přes trysku do dutiny formy, případně doplňuje taveninu ve fázi dotlaku. Při otáčivém pohybu šneku se materiál plastikuje, mísí a postupuje vpřed. Šnek zároveň koná axiální pohyb vzad a natavený materiál se tedy shromažďuje před čelem šneku. Celý proces zobrazuje Obr. 16. Plastikační jednotka může a nemusí ve vstřikovacím procesu měnit svou polohu (odjíždět a přijíždět k formě). To je dáno technologickými podmínkami a možnostmi stroje. [10, 13, 22]



Obr. 16 Vstřikovací cyklus plastikační jednotky [10]

Množství naplastikované hmoty musí zabezpečit dokonalé naplnění tvarové části formy i vtokového systému. Změna objemu chládnoucího dílu je třeba kompenzovat dalším množstvím taveniny ve fázi dotlaku. Příprava formy značí čas nutný pro doprovázející činnosti před vstřikováním, například vytemperování formy, vložení jader, aj. [12, 23]

2.3 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj se skládá z několika dílčích částí:

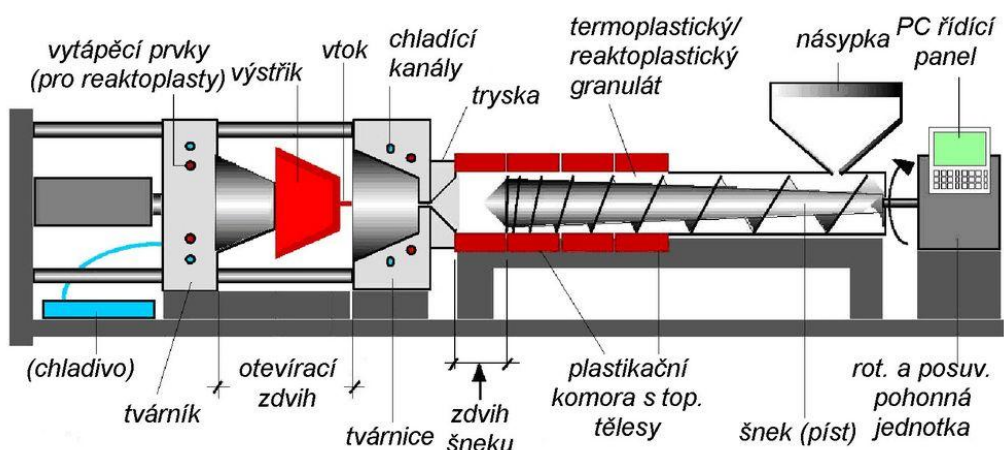
- Vstřikovací jednotka - vyvozuje tlak taveniny a zajišťuje její dopravu do formy
- Uzavírací jednotka - zajišťuje uzavření formy s vnitřním přetlakem
- Řídicí a regulační jednotka - programovací část ovládá správný chod stroje

Další doplňující části stroje, nutné k celému procesu jsou:

- Forma - zajišťuje tvar výrobku
- Vstřikovací tryska - zajišťuje definované vtékání taveniny do formy

Jednotliví výrobci strojů jsou případně schopni dovybavit stroje různým příslušenstvím k plynulému plně automatickému procesu, částmi jako jsou: temperační zařízení, manipulátory, dávkovací a mísící zařízení, dopravníky výrobků, sušárny apod. [10, 12, 14]

Vstřikovací stroje rozdělujeme podle typu plastikace materiálu ve vstřikovací jednotce. Nejběžnější jsou šnekové vstřikovací stroje (Obr. 17), pro malá tělesa mohou být použity pístové vstřikovací stroje. [12]



Obr. 17 Schéma vstřikovacího stroje [10]

2.3.1 Vstřikovací jednotka

Jedna z nejdůležitějších částí stroje je vstřikovací jednotka, která zajišťuje dva hlavní úkoly. Prvním je přeměna granulátu polymerního materiálu na taveninu, která má určitou viskozitu a je homogenní. Druhý úkol je dopravit materiál pod vyvozeným velkým tlakem do prostoru dutiny formy. Takový pracovní postup, kde se materiál mění do plastického stavu, především za pomoci tepla, se nazývá plastikace. Vstřikovací komora neboli tavící komora je místo kde se materiál plastikuje, homogenizuje a připravuje pro samotné vstři-

kování a má tvar vytápěného tlakového válce. Zmíněná část stroje, určená pro plastikaci materiálu se také může nazývat plastikační jednotka. Ukázka vstříkovací jednotky je zobrazena na Obr. 18.

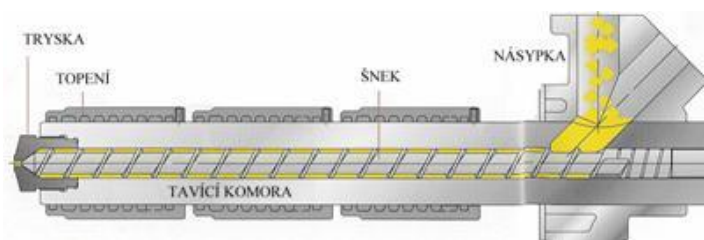


Obr. 18 Vstříkovací jednotka firmy ARBURG [35]

Rozlišujeme tedy dva typy vstříkovacích jednotek, od toho také typy strojů:

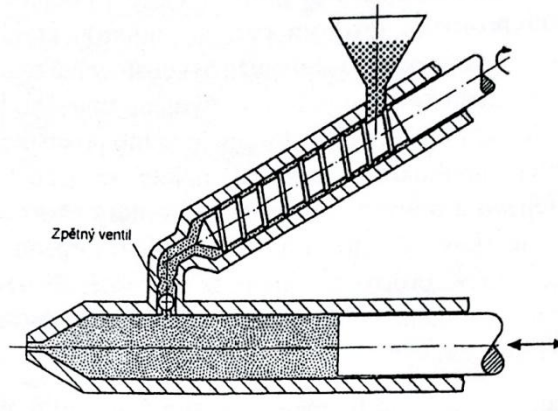
- Pístová
- Šneková

Šnekový vytlačovací stroj pracuje analogicky jako vytlačovací stroj, ale cyklicky. Když šnek plastikuje materiál, posunuje se osově dozadu a v prostoru před šnekem se hromadí tavenina, která se pak posuvným pohybem vtlačí do dutiny formy. Pístová plastikační jednotka stlačuje granulát pístem, materiál protlačí tavným pásmem a následuje vstřík do formy, rychlost je omezena tepelnými vlastnostmi použitého materiálu. Velkou předností pístových vstříkovacích strojů jsou menší náklady na výrobu, díky jednoduché konstrukci. Šneková plastikační jednotka (Obr. 19) má lepší kvalitu taveniny a vyšší plastikační výkon. [10, 12, 23]



Obr. 19 Šneková plastikace [10]

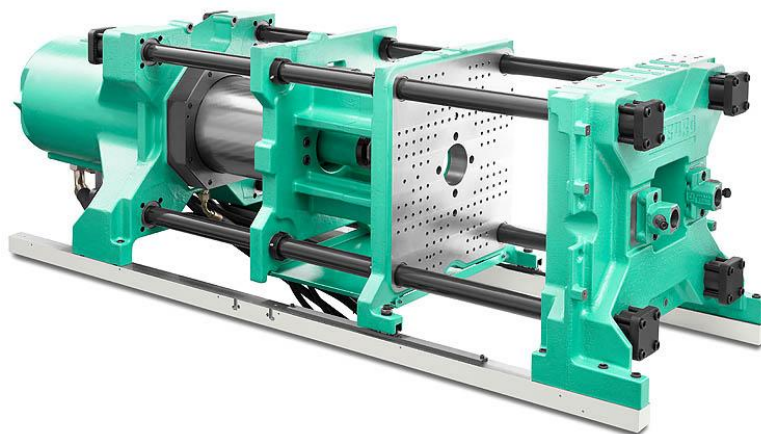
V minulosti se však ukázala ještě možnost zdokonalení pístového stroje, a to kombinací tavící komory se šnekem, kde se materiál plastikuje (předplastikace), a pístové komory, kde se hmota zásobuje a následně vstřikuje pístem do formy (Obr. 20). [12]



Obr. 20 Šneková předplastikace pístového stroje [12]

2.3.2 Uzavírací jednotka

Správnou činnost vstřikovací formy obstarává uzavírací jednotka (Obr. 21). Musí zajišťovat bezpečné, ale i dostatečně rychlé mechanické zavření nebo otevření formy. Uzavírací jednotka má také většinou na starost mechanický pohon vyhazovačů pro vyjmutí výrobku z dutiny. Typ uzavírací jednotky se dělí podle druhu pohonu. [10, 13, 23]



Obr. 21 Uzavírací jednotka firmy ARBURG [35]

Rozdělení uzavíracích jednotek:

- Mechanická
- Hydraulická
- Kombinace mechanické a hydraulické
- Elektrická (moderní způsob)

Na druhu pohonu je závislá i potřebná uzavírací síla. Velikost stroje je udávána podle uzavírací síly. Uzavírací síla se vztahuje na velikost plochy průřezu výstřiku v dělicí rovině. Síla je tedy určena tlakem. Uzavírací síla musí být dostatečně veliká, aby zabránila otevření pravé a levé části formy při vstřikovacím procesu a je několikanásobně vyšší než síla potřebná k uzavření formy (přisouvací síla). Vstřikovací forma má dvě strany, jednu pevnou a druhou pohyblivou, která se přisouvá k první. S ohledem na formu musí uzavírací jednotka zajistit pevné a těsné spojení a přesnou polohu. [10, 12, 13, 23]

2.3.3 Řídící a regulační jednotka

Řídící a regulační jednotka (Obr. 22) zajišťuje především chod stroje, který bývá většinou automatický nebo poloautomatický. Tato programovací část má vlastní ovládací skříň, běžně vybavenou počítačem. Řídící jednotka přesně dodržuje všechny předem nastavené technologické parametry vstřikovacího procesu a to zaručuje minimální kolísání vlastností výrobků vyrobených v různých vstřikovacích cyklech. Příklady dodržovaných parametrů stroje je časové rozdělení vstřikovacího cyklu, teplota natavené polymerní hmoty, vstřikovací tlak, dotlak a rychlost, teplota formy aj. [12, 23]



Obr. 22 Řídící jednotka firmy ARBURG [35]

3 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací formy jsou důležité a poměrně složité zařízení. Hlavní úkol je dát budoucímu výrobku požadovaný tvar a ten zafixovat dostatečným odvedením tepla z výrobku neboli ochlazením. Formy umožňují výrobu velice přesných, ale i složitých plastových výrobků, ale musí však vydržet vysoké tlaky, snadnější vyjímání výstřiků a automatický provoz. Samotná výroba forem je náročná, včetně konstrukce a ekonomických nákladů. [10, 13]

Vstřikovací forma obsahuje:

- Díly, vymezující tvar dutiny formy
- Temperační systém (chladicí systém)
- Vtokový systém
- Vyhazovací systém
- Upínací a vodící části

Mezi základní požadavky vstřikovacích forem patří: maximální pevnost a tuhost celků i jednotlivých částí pro zachycení tlaků, velmi vysoká kvalita a přesnost nejen ploch dutiny, vhodná konstrukce vtokového, temperačního a vyhazovacího systému nebo odvzdušnění, dlouhá životnost zaručená konstrukcí, výrobou a materiálem. [12]

3.1 Tvarová dutina

Pro hlavní funkci formy je nejdůležitější tvarová dutina. Její tvar přesně odpovídá konkrétnímu výrobku, akorát je procentuálně zvětšena o hodnotu smrštění polymeru při chládnutí. Tato hodnota je závislá na typu vstřikovaného materiálu.

Formy můžeme rozčlenit do skupin podle:

- Násobnosti formy (jednonásobné nebo vícenásobné)
- Konstrukčního řešení (dvoudeskové, třideskové, čelist'ové, vytáčecí, etážové aj.)
- Konstrukce vstřikovacího stroje (vstřik do dělicí roviny nebo kolmo na rovinu)

Neméně důležitým úkolem forem je odebírat teplo zpracovávanému polymeru. Je důležité, aby se odebírání tepla blížilo ideálu ochlazování, tzn. ve všech místech stejnou rychlostí (homogenní teplotní pole). To platí pro obě části tvarových forem navzájem. Důsledkem odlišné rychlosti odvádění tepla je nerovnoměrné tuhnutí částí budoucího výrobku, špatné proudění taveniny nebo vnik vnitřních pnutí s následným vnikem trhlin. [10, 12, 23]

3.2 Temperační systém

Pomocí chladicího (temperačního) média, které protéká soustavou chladících (temperačních) kanálků, se udržuje výše teploty formy. Celý systém chlazení se nazývá temperační systém. Teplota formy je vždy vyšší než teplota příslušného vstříkovaného polymeru. Jako temperační médium se používá voda (do 90°C), olej nebo roztok glycerinu ve vodě. Systém je většinou rozdělen na hlavní dvě části, a to okruh pevné a pohyblivé části formy. Jednotlivé okruhy potom mohou mít další podokruhy, jejich trajektorie jsou závislé na tvaru výrobku (dutiny formy). Příklady teplot forem pro často používané termoplasty jsou zobrazeny následující Tab. 2. [10, 12]

Tab. 2 Požadované teploty formy pro různé plasty [12]

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]
ABS	190-250	50-85
PA 6	230-290	40-120
PC	280-320	85-120
HDPE	180-270	20-60
LDPE	180-270	20-60
PMMA	200-250	50-80
POM	180-220	50-120
PP	170-280	20-100
PS	180-260	55-80
PVC tvrdé	190-220	30-60
SAN	200-260	50-85
PSU	340-400*	120-160
PAEK	380-430*	160-220
LCP	310-360*	65-95

* zpracovatelné jen na moderních vstříkovacích strojích

3.3 Vtokový systém

Vtokový systém je tvořen vtokovými kanály a spojuje dutinu tavicí komory s dutinou formy. Ovlivňuje produktivitu výroby, jakost výrobku. Skládá se z ústí vtoku a různě složitého kanálového systému. Při průtoku taveninou tyto kanály snižují její teplotu, a zvyšují hydraulické ztráty. Proto je nutné, aby kanály byly co nejkratší, měly co největší průřez, optimální tvar a je třeba zvýšit tlak při vstřikování. Přitom musí zajistit plné naplnění formy, snadné odtržení výrobku a bezproblémové vyhození z formy. Vtokový systém je konstruován jako horký nebo studený v různých tvarových řešeních. [10, 12]

3.4 Používané materiály vstřikovacích forem

Volba materiálu vstřikovací formy je závislá na použité technologii, velikosti a složitosti výrobku či série, odolnosti proti opotřebení, tepelné odolnosti, typu tvářeného plastu, typu a velikosti zatížení a také ceně. Při splnění požadavků se hlavně používají formy z oceli. Ze slitin neželezných kovů, především mědi a hliníku, se vyrábí spíše prototypové desky, určené k malému počtu vstřikovacích sérií. Ostatní druhy materiálů jsou také velmi důležité pro použití některých dílů forem a jejich speciální použití. Například izolační nebo tepelně nevodivé (izolační) materiály. [10, 12, 24]

3.4.1 Oceli

Ocel je brána jako nejvýznamnější druh používaného materiálu při zpracování forem. Celá vstřikovací forma se skládá z několika dílčích částí a ty se vyrábí z různých typů oceli.

Mezi významné technologické požadavky na vlastnosti patří:

- Vyhovující pevnost (v tahu i tlaku)
- Dostatečná kalitelnost a prokalitelnost
- Zvýšená otěruvzdornost
- Dobrá obrobiteľnosť a tváriteľnosť za studena
- Dobrá leštiteľnosť a obrusiteľnosť
- Stálost rozměrů
- Odolnosti proti korozi a chemická odolnost

Používané druhy ocelí:

- Oceli konstrukční (v přírodním i zušlechtěném stavu)
- Oceli k snadnému tváření a opracování, pro zušlechtování a cementování
- Uhlíkové oceli k zušlechtování
- Nástrojové oceli legované
- Oceli k nitridování
- Antikorozi oceli
- Oceli martenziticky tvrditelné

Pevnost materiálu

Pevnost, odolnost v tlaku a částečně i otěruvzdornost je dána obsahem uhlíku nebo také vlastnostmi a tvrdostí struktury po kalení a popouštění. Nejdůležitější hodnotou mechanické pevnosti je mez pevnosti a mez kluzu, doplněná pevností v ohybu (křehké materiály) a tažností. [12, 24]

Otěruvzdornost

Odolnost proti otěru (společně s pevností v tahu) se zvyšuje s tvrdostí materiálu. Tato vlastnost snižuje změny tvaru při namáhání tlakem nebo otěrem. Otěruvzdornost se zlepšuje pomocí většího množství karbidů legujících prvků Mo, Cr, W a V. Nepříznivě však tyto prvky působí na tvářitelnost, obrusitelnost a houževnatost. [12, 24]

Obrobitelnost

Přesnost rozměrů s dobrou jakostí povrchu a hospodárným obrobením jsou vlastnosti, které jsou charakterizovány obrobitelností. Lepší obrobitelností vynikají měkčí a houževnatější (např. žíhané) materiály, naopak s rostoucím obsahem uhlíku (příp. legujících prvků) se obrobitelnost snižuje, díky vyšší pevnosti. [12, 24]

Tvářitelnost

Tvářitelnost je výrazně závislá na pevnosti (tvrdosti), charakteru struktury materiálu a hraje důležitou roli ve výrobě dutin tvárnic vtačováním. Pro tuto technologii tváření jsou výhodnější nízkouhlíkové oceli s menším obsahem legujících prvků. Tvářitelnost tedy úzce souvisí s obrobiteľností. [12, 24]

Leštiteľnosť

Leštiteľnosť je dôležitá vlastnosť ve výrobě forem a jejich tvarových částí. Jakostní povrch dutiny má přímý a významný vliv na kvalitní vstříkovaný výrobek. Povrchový lesk je posuzován v závislosti na drsnosti povrchu. Kvalitního lesku je možné dosáhnout pouze s nižší drsností povrchu než 0,05 Ra. Negativní vliv na leštiteľnosť má vyšší podíl karbidů, jejich rovnoměrnost rozdělení v materiálu nebo horší čistota oceli. Dobře leštiteľné jsou oceli zušlechťené s nižším obsahem uhlíku a větším obsahem niklu. S oblibou se uplatňují kvalitní oceli, elektrostruskově přetavené. [12, 24]

Kaliteľnosť

Kaliteľnosť je vlastnosť oceli, která zaručuje možnost vytvrdit materiál zakalením. Tato schopnost nejvíce ovlivňuje obsah uhlíku ve struktuře a rychlost ochlazování. Eutektoidní oceli, jako oceli s vyšším obsahem uhlíku, budou mít podstatně vyšší tvrdost než nízkouhlíkové oceli (např. cementační). [12, 24]

Prokaliteľnosť

Prokaliteľnosť je brána v úvahu u rozměrnějších součástí a určuje zakalení materiálu do hloubky. Téměř všechny legující prvky stabilizují austenit v oblasti perlitické reakce, kalením umožňují zakalit či prokalit materiál do větší tloušťky i při pozvolném ochlazení z austenitizačních teplot v teplé lázni nebo na vzduchu. Největší účinnost mají legující prvky Cr, Ni a Mo, nebo také W a Mn. Např. oceli Cr-Ni nebo Cr-Ni-Mo jsou představitelé ocelí s vysokou prokaliteľností. [12, 24]

Deformace a stálost rozměrů

Chemické složení oceli a způsob ochlazování určují výslednou stálost rozměrů součásti a její deformace při kalení. Největší vliv na deformace mají oceli vysokouhlíkové a oceli s karbidotvornými prvky Cr, W, Mo a V. Vyšší deformace rostou s podílem tvrdého martenzitu ve struktuře. Naopak deformace klesají s vyšší koncentrací zbytkového austenitu nebo prvků Ni a Mn. [12, 24]

Korozivzdornost

Korozivzdornost oceli je přímo ovlivněna především obsahem chromu, ocel však musí minimálně obsahovat 12 % Cr v tuhém roztoku. Lepší odolávání proti korozi, případně chemickým účinkům vykazuje ocel s rovnoměrným (dokonalým) rozpuštěním chromu a také nízkým obsahem uhlíku ve struktuře. [12, 24]

Pro výrobu forem se převážně používají oceli nástrojové, konstrukční a mohou být legované. Z nástrojových ocelí se vyrábí nejdůležitější funkční a namáhané díly, např. tvárníky a tvárnice, případně i další pomocné díly. V jiných případech je možné použít méně ušlechtilé oceli konstrukční. Tento druh ocelí se preferuje častěji z důvodu nižší ceny a lepší dostupnosti a výběru polotovarů. Přehled ocelových materiálů, jednotlivých dílů forem s tepelným zpracováním zobrazuje Tab. 3. [12, 24]

Tab. 3 Materiály dílů forem s tepelným zpracováním [24]

Název dílu	Materiál	Tvrdość [HRc]	Zuřlechtění [MPa]	Poznámka
Základní kotevní a upínací deska	11 373			
	11 375			
	11 500			
	11 523			
	11 600			
Běžné opěrné desky a vložky	12 061	58-50		Cem. kal. z vložky
	12 050	54-50		Kaleno
	12 060			
Desky tvárnice pro vložkování	11 500			Normal. žíhání pro odstranění vnitř. pnutí
	11 600			
Vodící stírací desky	11 500			
	11 600			
	12 060			
Stírače	12 060		850-700	Zuřlechtěno
Vodící liřty	11 600			
	12 050			
Pruž. vodící liřty, palce	14 220	62-60		Funční plochy cem. do hl. 0,5 mm
Upínací hlavice	12 060		850-700	Zuřlechtěno
	12 061			
	12 050		800-650	
Závěsná pouzdra (hlavice) a závěsné stopky	12 060		850-700	Zuřlechtěno
	12 061			
Stopky a středící čepy	11 500			
	11 600			
Klíny, pera, přenářecí čepy	11 600			
Pružiny řroubové	12 090			Kal. pero popouřtěno
	12 093	48-43	1620-1400	
Velmi namáhané	14 260	48-45	1620-1480	
Pružiny listové	12 090	48-43	1620	Kal. pero popouřtěno
	13 180	47 min	1600 min	
Pružiny talířové	12 090	46-45	1520-1480	Kal. 2x popouřtěno
	15 260			
Součástky s velmi tvrdou cem. vrstvou	14 220	63-60		Cem. kal. popouřtěno
	14 221			
Drobné součásti	11 107		650-470	hodnoty v příř. stavu
	11 110		620-450	
Vodící sloupky	14 220	63-61		Cem. do hl. 0,8-1 mm
	12 010	62-60		Cem. do hl. 0,6 mm

Tab. 4 Materiály dílů forem s tepelným zpracováním (pokračování Tab. 3) [24]

Název dílu	Materiál	Tvrdość [HRc]	Zuřlechtění [MPa]	Poznámka
Vodící pouzdra	14 220	63-61		Cem. do hl. 0,8-1 mm
	14 120			Cem. do hl. 0,6-0,8 mm
	12 010	62-60		Cem. do hl. 0,6-0,8 mm
Kotevní pouzdra	14 120	62-58		
Tvárnice	14 220	57-55		
	14 221			
Tvárníky	19 486	57-55		
	19 487			
	19 436			
Vyhazovače, zpětné kolíky	19 421	57-55		
	19 422			
Vyhazovací čepy	14 220	57-55		
Středící kruhy	11 500			
Náústky	11 107			
Vstřík. trysky	19 436	57-55		
Dorazy	19 422	60-58		
Čelisti pohyblivé	19 192	63-60		
Pohybové klíny	19 221	62-58		
	19 436			
Opěrné čelisti	19 312	60-56		
Čelisti pevné	19 192	63-61		
	19 221			
	19 436			
Průtlačníky	19 221	63-60		
	19 423	62-60		
	19 436			
	19 437			
Průtlačníky	19 800	63-60		Standartní ocel na pro- tlačování 194-36 snese tlak 2700 MPa
	19 810			
	19 824			
Průtlačnice	19 191	63-60		
Zděře, nadáže	13 180	49-45		Vykováno
	14 160			
	14 260			
	19 452			
	19 642			
	19 650			
Trny	19 436	62-58		
	19 421			
	19 191			
	19 423			
	19 312			
Pomocné části a svařované konstrukce	11 375			
	11 353			
	11 373			
	11 423			
	11 523			

3.4.2 Slitiny mědi

Mimo oceli se při výrobě forem začínají více prosazovat slitiny mědi s některými výhodnými vlastnostmi, jako jsou:

- Výborná tepelná vodivost
- Dobrá chemická odolnost
- Dobré kluzné vlastnosti

Díky zmíněným vlastnostem je možno dosáhnout zkrácení vstřikovacího cyklu, vyšší jakosti vstřikovaného dílu, lepších kluzných vlastností a hladších ploch. Nejdůležitější vlastností mědi je asi 4 - krát vyšší tepelná vodivost oproti ocelím, proto je možné zkracovat chladicí čas u vstřikovacího cyklu asi o 20 až 50 %. Běžně chladicí čas u ocelí tvoří 70 % cyklu, s touto úsporou je ve výsledku možné snížit i cenu vstřikovaného dílu. Lepší technologické časy zlepšují přesnost geometrie tvaru, kvalitnější povrch a tím celkovou jakost struktury povrchu. Další výhodou může být nízký koeficient tření využitý pro snadnější odformování výrobků. Nevýhodou měděných slitin je horší opracovatelnost při použití technologie elektroerozivního obrábění, naopak použití mechanického třískového obrábění je lepší.

Čistá měď se používá méně často, ve výrobě má využití spíše na elektrody pro elektroerozivní obrábění. Prakticky se používají slitiny mědi, kde je možné, díky změně chemického složení, některé vlastnosti potlačit, jiné zvýraznit. Některé příklady použití tuzemských slitin mědi jsou uvedeny v Tab. 5. Tepelná vodivost (λ) čisté mědi se pohybuje okolo 395 W/mK. [9, 12, 24]

Tab. 5 Příklady použití tuzemských slitin mědi [24]

Užití	ČSN	Složení	Poznámka
Díly vtoku	42 3004	Cu99	malá pevnost, podřadné použití
	43 3213	Cu63Zn	střední pevnost
	-	CuCoBe10	vysoká pevnost (beryl, bronz)
Součásti chlazení	45 3004	Cu99	chladicí kanály, trubky, čepy
	46 3213	Cu63Zn	zhoršená chladitelnost
Izolace	-	Ti70Fe	vysoká pevnost a tepelný odpor

3.4.3 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku nemají tak vysokou pevnost a odolnost proti opotřebení jako oceli, avšak vstřikovací formy z těchto materiálů mají své speciální použití. Mezi významné vlastnosti patří velká tepelná vodivost, korozivzdornost, nízká váha. Tak jako u slitin mědi, dochází k významné úspoře času oproti vstřikování do ocelových forem. Chladicí čas je možné zkrátit více než 4 - krát a tím celý vstřikovací cyklus, při použití hliníkových forem, ušetří zhruba 10 - 40 % času. Tepelná vodivost (λ) čistého hliníku se pohybuje okolo 229 W/mK.

Příklad použití může být forma pro strukturní pěny. Zde je žádaný silný chladicí účinek, dobrá chemická odolnost proti korozi i jiným činidlům při poměrně nízkých vstřikovacích tlacích. Při vstřikování plastů s nadouvadlem jsou tlaky až 10 - krát nižší oproti běžnému vstřikování, proto není nutná vysoká pevnost materiálu. [9, 12, 24, 27]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠENÍ POLYMERŮ

Mechanické zkoušení polymerů je založeno na experimentálním laboratorním zkoušení vzorků v tuhém stavu neboli zatěžování vzorků vnějšími silami a hledání odezvy materiálu. Účinek síly se vztahuje na jednotku plochy tělesa, vyjádřenou jako napětí. Odezvou je změna tvaru vztažená na jednotku délky, vyjádřena jako deformace. [5, 7]

4.1 Rozdělení mechanických zkoušek

Pro hodnocení mechanických vlastností polymerů je možné zkoušky rozdělit podle různých hledisek:

- Dle velikosti deformace:
 - Lineární
 - Nelineární
 - Destruktivní

- Dle napěťové a deformační geometrie:
 - Jednoosé
 - Tahové
 - Tlakové
 - Ohybové
 - Smykové
 - Víceosé
 - Atd.

- Dle časového průběhu:
 - Statické zkoušky
 - Dynamické zkoušky

V technické praxi však dělíme zkoušky většinou na tři základní druhy. Statické zkoušky, kde je materiál namáhán silami pozvolna se měnícími za poměrně krátký časový úsek, většinou až do úplného porušení tělesa. Dynamické zkoušky, kde je materiál namáhán ve velmi krátkém čase rychle se měnícím zatížením. Síla je většinou rázová nebo se zatěžuje na materiál periodicky. Únavové zkoušky, brány jako dlouhodobé, kde je materiál zatěžován cyklicky, a to staticky nebo dynamicky. [5, 7, 17]

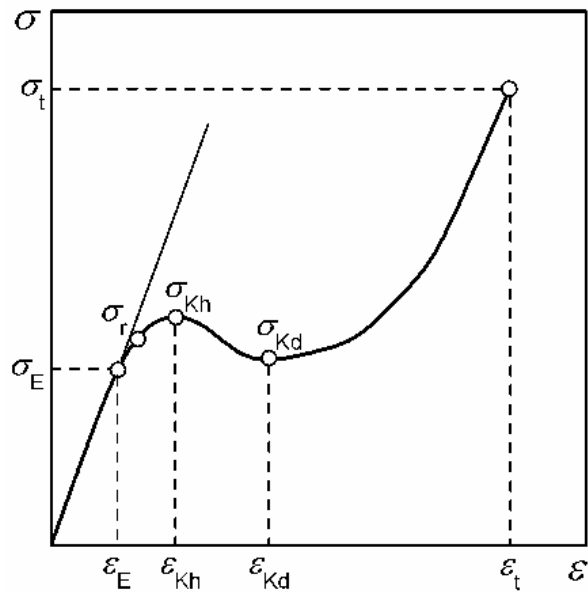
4.2 Statická zkouška tahem

Většina zjištění o mechanickém pevnostním chování vychází z namáhání jednoosým tahem. Statická zkouška tahem je jednou ze zásadních zkoušek a dává nám informace o deformačním chování lineárním a nelineárním nebo informace o pevnosti (lomovém chování). Zkoušku provádíme na trhacím stroji s vhodným zatížením. [5, 17]

V průběhu tahové zkoušky se neustále měří síla nutná k deformaci a samotná deformace dílce. Napětí se počítá podle působící síly F na průřez tělesa (1):

$$\sigma = \frac{F}{S} \left[\frac{N}{m^2} = Pa \right] \quad (1)$$

Tyto postupně se měnící veličiny dohromady dávají výsledek ve formě tahové křivky zkoušeného materiálu, která ukazuje celý průběh zkoušky neboli závislost napětí na deformaci. Tahová křivka polymerů je podobná tahové křivce kovových materiálů a je zde několik bodů, které vypovídají o chování zkoušeného materiálu (Obr. 23). [5, 17, 19]



Obr. 23 Tahová křivka [19]

V první části křivky je oblast malých deformací. V této oblasti jsou všechny deformace pružné neboli vratné. Elastické chování popisuje Hookův zákon. Definujeme jej přímkou úměrou mezi napětím a deformací, konstantou této úměry je Youngův modul, modul pružnosti E (2). Obecně platí, že čím je vyšší hodnota modulu, tím má materiál větší tuhost.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [Pa] \quad (2)$$

Konec oblasti, kde ještě platí lineární elastická charakteristika, se označuje bod úměrnosti. Tento bod je vyjádřen smluvním napětím (3):

$$\sigma_E = \frac{F_E}{A_0} [Pa] \quad (3)$$

Při rostoucím zatížení přestává být křivka lineární, je zde počátek plastických deformací společně s elastickou deformací. Místo, dokud je ještě deformace vratná, se nazývá mez pružnosti (4):

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_0} [Pa] \quad (4)$$

Při postupném zvyšování zatěžující síly, se zvětšuje napětí a nevratná (plastická) deformace až do části křivky (bodu), který se nazývá mez kluzu (5). Za tímto místem může dojít k poklesu napětí. Maximum a minimum této části jsou označovány jako horní (6) a dolní mez kluzu (7).

Jednotlivé body meze kluzu označujeme smluvním napětím:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0} [Pa] \quad (5)$$

$$\sigma_{Kh} = \frac{F_{Kh}}{A_0} [Pa] \quad (6)$$

$$\sigma_{Kd} = \frac{F_{Kd}}{A_0} [Pa] \quad (7)$$

Po dalším nárůstu zatížení se napětí dostane do svého maximálního bodu, označeném jako mez pevnosti v tahu. Zde dochází k porušení soudržnosti nebo k přetržení tělesa. Pokud k destrukci vzorku dochází již za meze pružnosti, jedná se o křehký lom s relativně malými deformacemi. Pokud je materiál doprovázen velkou deformací, s možným případným poklesem napětí, dochází k taženému lomu. Mez pevnosti (8) je definovaná jako (maximální) napětí potřebné k přetržení tělesa vztažené na původní průřez plochy tělesa. K výpočtu je používána maximální síla F_{max} .

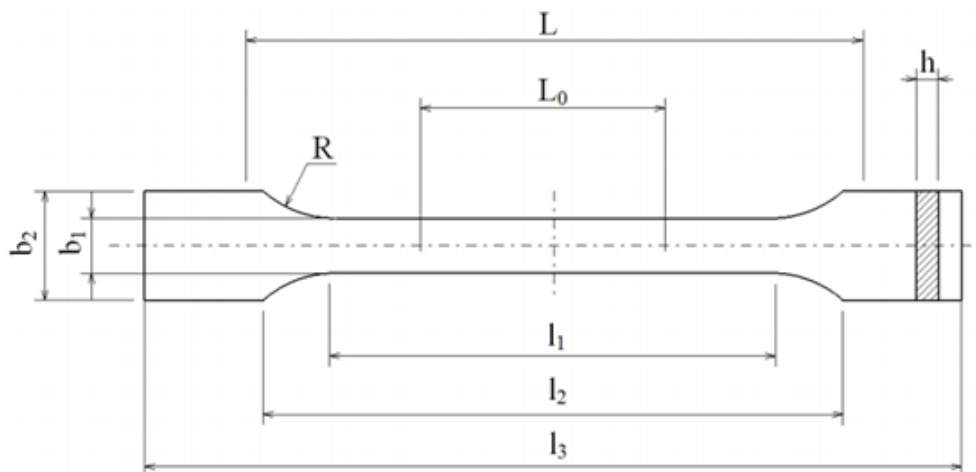
$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A_0} [Pa] \quad (8)$$

Doplňující je délková změna, kde se mění původní délka l_0 , je definovaná jak poměrné prodloužení (9):

$$\varepsilon_L = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100[\%] \quad (9)$$

4.2.1 Normalizovaný zkušební vzorek pro zkoušku tahem

Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku má rozměry oboustranné lopatky určené platnou normou. Rozlišujeme dvě rozměrové varianty, určené technologií výroby zkušebních těles. Pro vstříkovaná zkušební tělíska se používá typ 1A, pro mechanicky obráběná typ 1B. Rozměry zkušebního vzorku jsou znázorněny na Obr. 24 (Tab. 6). [18]



Obr. 24 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [18]

Tab. 6 Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [17]

	Typ zkušebního tělesa	1A [mm]	1B [mm]
l_3	Celková délka	170	≥ 150
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
R	Poloměr	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Šířka zúžené části	$10,0 \pm 0,2$	
h	Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Počáteční měřená délka (preferovaná)	$75 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
	Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality nebo když je předepsána)	$50 \pm 0,5$	
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 ± 1	115 ± 1

„Všechny plochy zkušebního tělesa musí být bez viditelných trhlin, škrábanců či jiných vad. Z tvářených zkušebních těles musí být odstraněny všechny přetoky, jestliže existují, přičemž je třeba dbát na to, aby nedošlo k poškození tvářeného povrchu.“ [18, s. 7]

4.3 Dynamická zkouška rázové a vrubové houževnatosti

Základem zkoušky rázové a vrubové houževnatosti je namáhání tělesa rázovou silou, tedy zatížením koncentrovaným do velmi krátkého času. Největší rozdíl oproti statickému namáhání (např. v ohybu) pozorujeme u typu deformace. U statického namáhání dochází k porušení tělesa až při největších zatíženích nebo vůbec, kdežto s rostoucí rychlostí zatěžující síly se materiály stávají křehčími a k deformacím či porušení tělesa dochází při minimální změně tvaru (průhybu). Lom, který se při nižší rychlosti namáhání může jevit jako tažný, se mění na křehký. Rázové zkoušky je možné rozdělit podle typu namáhání, a to na zkoušky rázové v tahu, tlaku, ohybu a krutu. Nejpoužívanější a nejvíce důležitá je ohybová zkouška, kde kyvadlem stroje přerážíme zkušební těleso. Kinetická energie kladiva deformuje vzorek pružně, poté plasticky do okamžiku jeho porušení. [7, 17, 21]

Typy zkoušek pro rázovou nebo vrubovou houževnatost (dynamické rázové zkoušky v ohybu) se provádějí jednou ze tří metod:

- **Charpy** – zkušební vzorek je umístěn na dvou podporách, přeráží se otáčivým kladivem uprostřed (tříbodový ohyb)
- **Izod** – zkušební vzorek je na jednom konci pevně vetknutý, přeráží se na druhém konci
- **Dynstat** – zkoušení vzorků malých rozměrů, často z hotových výrobků

Rázovou houževnatost pomocí metody Charpy zjišťujeme pomocí kinetické energie (10) kyvadlového rázového kladiva, nutné k přeražení zkušební vzorku, vztažené na původní plochu (příčného řezu).

$$A_{cU} = \frac{W}{b \cdot h} [kJ \cdot m^2] \quad (10)$$

W deformační energie spotřebovaná k přeražení zkušební vzorku

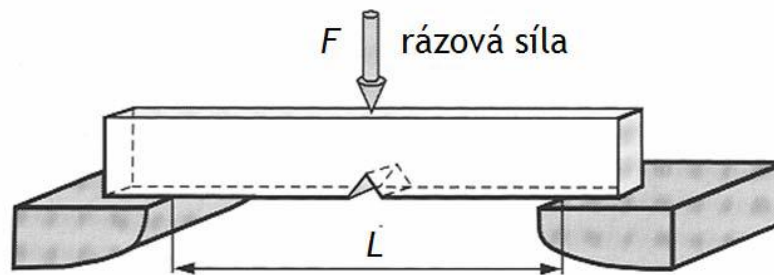
b šířka zkušební tělesa

h výška zkušební tělesa

Vrubová houževnatost (Obr. 25) je obdobná rázové houževnatosti s tím rozdílem, že zkušební vzorek je zeslabený vrubem. Hodnotu deformační energie (11), potřebné k přeražení tělesa tedy vztahujeme na průřez plochy po odečtení vrubu.

$$A_m = \frac{W}{b \cdot h_k} [\text{kJ} \cdot \text{m}^2] \quad (11)$$

h_k výška zkušebního tělesa



Obr. 25 Vrubová houževnatost metodou Charpy [21]

Hlavním důvodem opatření zkušebního tělesa vrubem je, aby očekávaný lom probíhal co nejvíce středem tělesa a kolmo k jeho podélné ose. Při provádění zkoušky je vzorek položen na podpěry tak, aby vrub byl orientován na opačnou stranu, než dosedá kladivo při nárazu. Vrubová houževnatost je násobně nižší než rázová. Zkoušku provádíme na měřících zařízeních Charpy. Norma dovoluje provádět zkoušku na vzorcích s vrubem na obou stranách (dvojjubem). [17, 21]

4.3.1 Normalizovaný zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti

Zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti vyrábíme lisováním, vstříkováním nebo mechanickým obráběním a má tvar trámečku neboli hranolu o třech rozměrech. Délka l , šířka b , tloušťka h jsou definovány jako $h < b < l$. Doplňující hodnota je vzdálenost rozpěr L , což zobrazuje Tab. 7. [20]

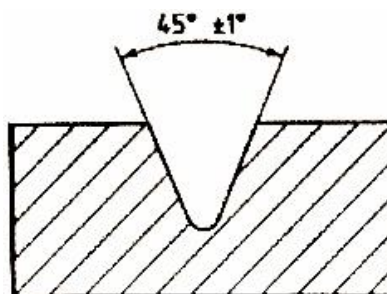
Tab. 7 Rozměry zkušebního tělesa metodou Charpy [20]

Délka l [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Rozpětí L [mm]
80 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	$62^{+0,5}_{-0,0}$

„Zkušební tělesa nesmí být zkroucená, musí mít vzájemně kolmé rovnoběžné dvojice povrchů. Povrchy a hrany nesmí obsahovat vrypy, nerovnosti, propadliny a přetoky. U zkušebních těles je nutné kontrolovat splnění výše uvedených požadavků vizuální kontrolou rovnosti a kolmosti hran, rovnosti povrchů a měřením mikrometrem.“ [20, s. 11]

Opatření vrubu

Vruby na zkušebních tělesech se zhotovují obráběním. Je možné použít i tělesa s vruby, vytvořené tvářením, ty však nemají srovnatelné výsledky zkoušek se vzorky s obrobenými vruby. Vrub (Obr. 26) musí mít daný tvar a hloubku a svírá pravý úhel s hlavními osami zkušebního tělesa. Menší vruby se vytváří u menších těles, u vrstevnatých materiálů mají vruby velikost až $1/3$ tloušťky. [21]



Obr. 26 Opatření vrubu [21]

Podle normy existují tři druhy vrubů a rozdělují se podle velkých písmen abecedy: typ A, typ B a typ C. Všechny však mají úhel 45° , mění se však tečný rádius kořene vrubu (Tab. 8). [20]

Tab. 8 Typy a rozměry vrubů [20]

Typ vrubu	Úhel vrubu [°]	Poloměr kořene vrubu [mm]	Šířka pod vrubem [mm]
A	45 ± 1	$0,25 \pm 0,05$	$8 \pm 0,2$
B	45 ± 1	$1 \pm 0,05$	$8 \pm 0,2$
C	45 ± 1	$0,1 \pm 0,02$	$8 \pm 0,2$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

5.1 Vlastnosti vstřikovaných materiálů

5.1.1 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)

První z použitých vstřikovaných materiálů je polyetylen s nízkou hustotou. Přesný název je **DOW LDPE 780E**, Low Density Polyethylene Resin. Vybrané vlastnosti zobrazuje Tab. 9.

Tab. 9 Vlastnosti materiálu DOW LDPE 780E [30]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Metoda měření
Index toku taveniny	20	g/10min	ISO 1133
- Teplota ITT	190	°C	ISO 1133
- Zatížení ITT	16	kg	ISO 1133
Hustota	0,923	g/cm ³	ASTM D792
Modul pružnosti v tahu	164	Mpa	ISO 527-2
Napětí na mezi kluzu	8,20	MPa	ISO 527-2
Deformace na mezi kluzu	-	%	-
Napětí při přetržení	10,5	MPa	ISO 527-2
Deformace při přetržení	50	%	ISO 527-2
Ohybový modul	-	MPa	-
Teplota deformace	93	°C	ASTM D1525

5.1.2 Polypropylen (PP)

Dalším testovaným materiálem je polypropylen. Přesný název je **TATREN IM 45 74**, Polypropylene. Jeho vybrané vlastnosti jsou popsány v Tab. 10.

Tab. 10 Vlastnosti materiálu TATREN IM 45 74 [31]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Metoda měření
Index toku taveniny	45	g/10min	ISO 1133
- Teplota ITT	230	°C	ISO 1133
- Zatížení ITT	2,16	kg	ISO 1133
Hustota	-	g/cm ³	-
Modul pružnosti v tahu	1650	Mpa	ISO 527-1/-2
Napětí na mezi kluzu	26	MPa	ISO 527-1/-2
Deformace na mezi kluzu	5	%	ISO 527-1/-2
Napětí při přetržení	-	MPa	-
Deformace při přetržení	-	%	-
Ohybový modul	1500	MPa	ISO 178
Teplota deformace (0,45MPa)	105	°C	ISO 75-1/-2

5.1.3 Akrylonitril - butadien - styren (ABS)

Třetím zkoumaným materiálem je akrylonitril-butadien-styren. Přesný název je **STAREX ABS HG-0760, High Gloss**. Vybrané vlastnosti tohoto amorfního termoplastu lze vidět v Tab. 11,

Tab. 11 Vlastnosti materiálu STAREX ABS HG-0760 [32]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Metoda měření
Index toku taveniny	2,6	g/10min	ASTM D1238
- Teplota ITT	200	°C	ASTM D1238
- Zatížení ITT	5	kg	ASTM D1238
Hustota	1,04	g/cm ³	ASTM D792
Modul pružnosti v tahu	-	Mpa	-
Napětí na mezi kluzu	-	MPa	-
Deformace na mezi kluzu	-	%	-
Napětí při přetržení	44	MPa	ASTM D638
Deformace při přetržení	-	%	-
Ohybový modul	2300	MPa	ASTM D790
Teplota deformace (1,8MPa)	86	°C	ASTM D648

5.2 Sušení vstřikovaných polymerů

Před samotným vstřikováním byla ze všech vstřikovaných polymerních granulátů odebrána přebytečná vlhkost pomocí zařízení **Arburg Thermolift 100-2** (Obr. 27), které je určeno k sušení a případné dopravě granulátu. Sušárna dokáže pojmout objem maximálně 100 litrů a pracuje do maximální sušící teploty 160°C.

Čas a teplota sušení (Tab. 12) byly zvoleny podle doporučené tabulky výrobce Arburg.



Obr. 27 Sušící zařízení ARBURG

Tab. 12 Parametry sušení dle polymeru

Polymerní materiál	Sušící teplota [°C]	Čas sušení [h]
LDPE	90	2
PP	90	1,5
ABS	80	2,5

5.3 Vstřikovací stroj

Pro výrobu všech zkušebních těles byl použit vstřikovací stroj **Arburg Allrounder 470 H 1000-400** (Obr. 28), který je k dispozici na půdě UVI. Zmíněný vstřikovací stroj je určen pro výrobu vstřikovaných dílů z termoplastů. Jeho maximální uzavírací síla je 1000kN (Tab. 13).

Tab. 13 Parametry vstřikovacího stroje Arburg [29]

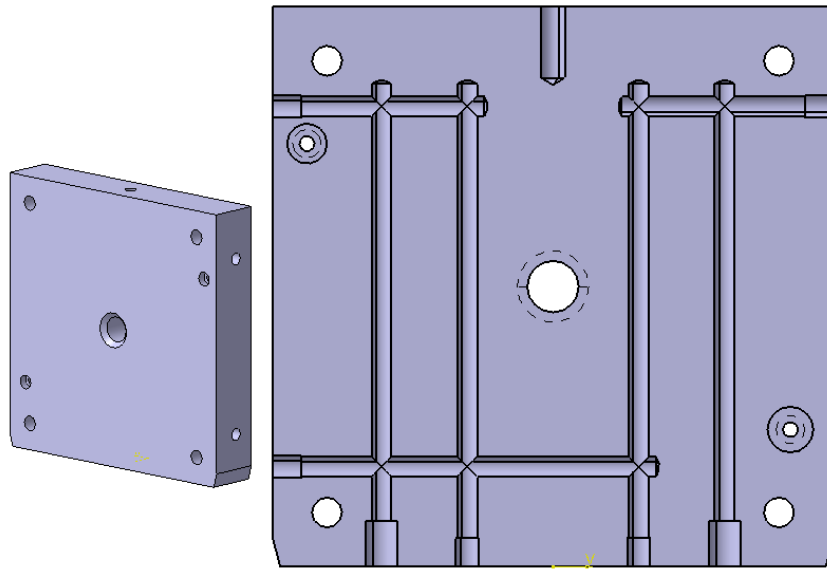
Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	max.	1000 kN
Vzdálenost mezi vodícími sloupy		470x470 mm
Výška formy		250-500 mm
Zdvih vyhazovače	max.	175 mm
Vyhazovací síla	max.	40 kN
Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku		40 mm
Poměr šneku		20 L/D
Zdvih šneku	max.	160 mm
Objem dávky	max.	201 cm ³
Vstřikovací tlak	max.	2000 bar
Vstřikovací dotlak	max.	2000 bar
Objemová vstřikovací rychlost	max.	642 cm ³ /s
Krouticí moment šneku	max.	550 Nm
Přítlačná síla trysky	max.	60 kN



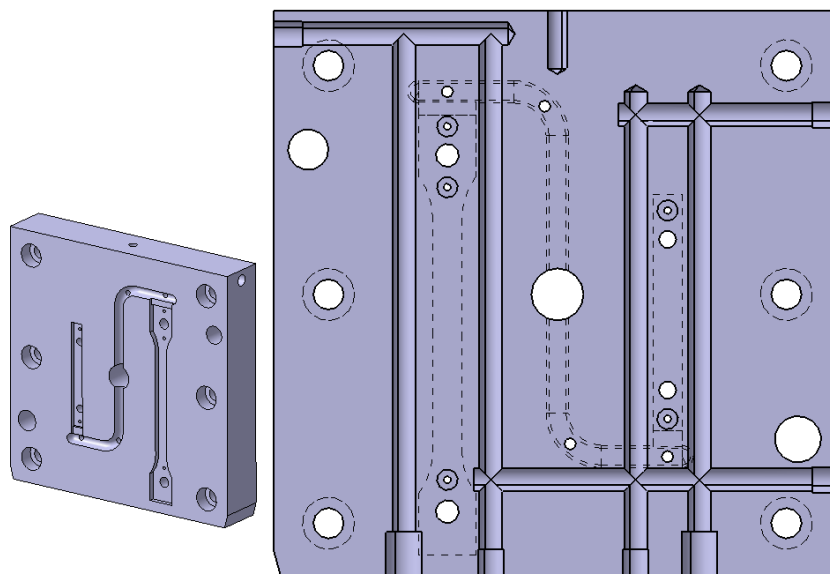
Obr. 28 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 470 H 1000-400

5.4 Vstřikovací formy a jejich vlastnosti

Tvarové desky vstřikovacích forem, použité ve výzkumu, jsou majetkem UVI a byly již vyrobeny v minulých letech. Jedná se o ocelovou formu, měděnou formu a hliníkovou formu. Tvar a rozměry dutiny formy byly vyrobeny podle zásad konstrukce vstřikovacích forem a budoucí plastový výrobek má přesný rozměr zkušební tělesa pro statickou zkoušku tahem a zkoušku rázové houževnatosti. Nově byly do desek z nekovových materiálů vyvrtány temperační kanálky, sloužící k vytemperování formy na požadovanou teplotu při procesu vstřikování. Následující obrázky (Obr. 29 a Obr. 30) zobrazují počítačové modely levé a pravé tvarové desky, vytvořené pro výrobu temperačních kanálků vstřikovací formy. Rozměry tvarových desek i temperačního systému jsou totožné pro všechny použité materiály forem.



Obr. 29 Model pravé tvarové desky vstřikovací formy



Obr. 30 Model levé tvarové desky vstřikovaci formy

5.4.1 Ocelová forma

Materiál ocelové formy, použitý při vstřikování, nese název Ocel ČSN 19 552. Alternativní značení zmíněné oceli zobrazuje Tab. 14.

Tab. 14 Značení oceli 19 522

Značení oceli		
ČSN	W.Nr.	EN ISO 4957
19 552	1.2343	X38CrMoV5.1

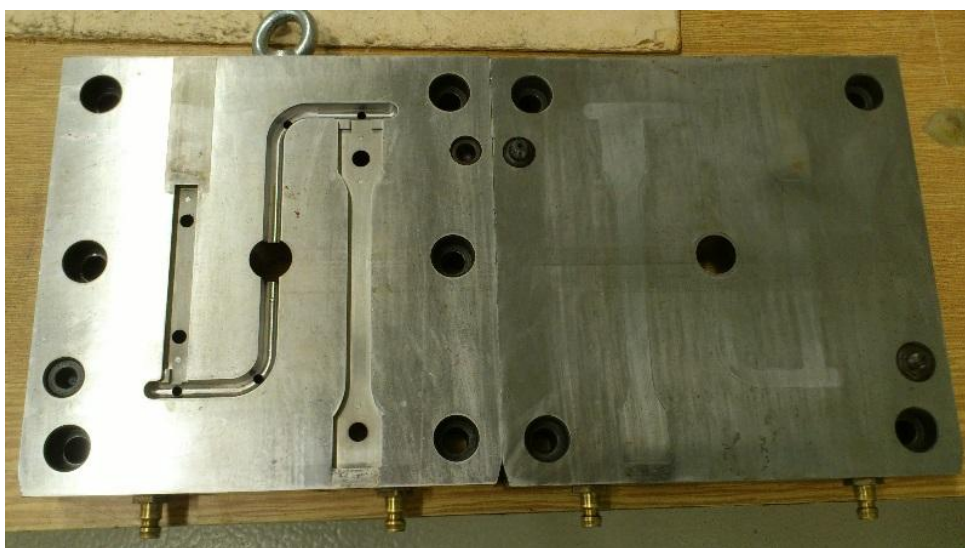
Jedná se o nástrojovou legovanou ocel s vysokou houževnatostí a výbornou prokaltitelností, určenou pro práci za tepla, kde má velmi dobré pevnostní vlastnosti. Má malou citlivost na prudké změny teploty – umožňuje chlazení vodou. Je dobře lešitelná, vhodná k nitridaci. Tepelná vodivost této oceli je 23 W/mK. Obsah chemických legujících prvků je vidět v Tab. 15.

Tab. 15 Legující prvky v oceli 19 522[30]

Chemická analýza oceli 19 522						
Legující prvek	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
Obsah [%]	0,36-0,42	0,30-0,50	0,90-1,20	4,80-5,50	1,10-1,40	0,25-0,50

Používá se především na nástroje pro stříhání a tváření (lisování) za tepla. Např. kovací a lisovací zápustky, tvarové části forem, nitridované vyhazovače, šneky pro zpracování polymerů, lisovací formy pro tlakové lití (hliník, zinek, hořčík), nástroje pro stříhání za tepla atd.

Levá a pravá tvarová deska formy z oceli jsou vidět na Obr. 31. Ve spodní části obou tvarových desek se nachází vstupní a výstupní ventil pro chladící kapalinu.



Obr. 31 Tvarové desky ocelové formy

5.4.2 Forma ze slitiny mědi

Vstřikovací forma ze slitiny mědi nese označení materiálu 42 3001. Alternativní možnosti označení stejné slitiny zobrazuje Tab. 16.

Tab. 16 Značení slitiny mědi 42 3001

Značení mědi		
ČSN	ozn. ČSN	W.Nr.
42 3001	Cu 99,9E	2.0060

Jedná se prakticky o čistou měď, kde její obsah ve slitině je minimálně 99,9%, zbytek jsou přísady (O₂, Pb, Ag). Má vysokou elektrickou vodivost, proto je často nazývána jako elektrovodná měď, vhodná také pro svařování a pájení. Výrazná je také vysoká tepelná vodivost a výborná korozivzdornost.

Používá se především pro elektrotechnické účely, jako elektrovodivý materiál. Významné využití nalezne zmíněná slitina mědi také jako elektroda elektroerozivního obrábění. Tepelná vodivost čisté mědi je okolo 390W/mK, ve srovnání s ocelovými materiály je to asi 10krát víc. Vyšší je potom i cena slitin mědi. Levou a pravou část tvarových desek vstřikovací formy zobrazuje Obr. 32.



Obr. 32 Tvarové desky měděné formy

5.4.3 Forma ze slitiny hliníku

Materiál vstřikovací formy ze slitiny hliníku má označení Dural 7075. Další možnosti značení zmíněné slitiny vyobrazuje Tab. 17.

Tab. 17 Značení slitiny hliníku 7075

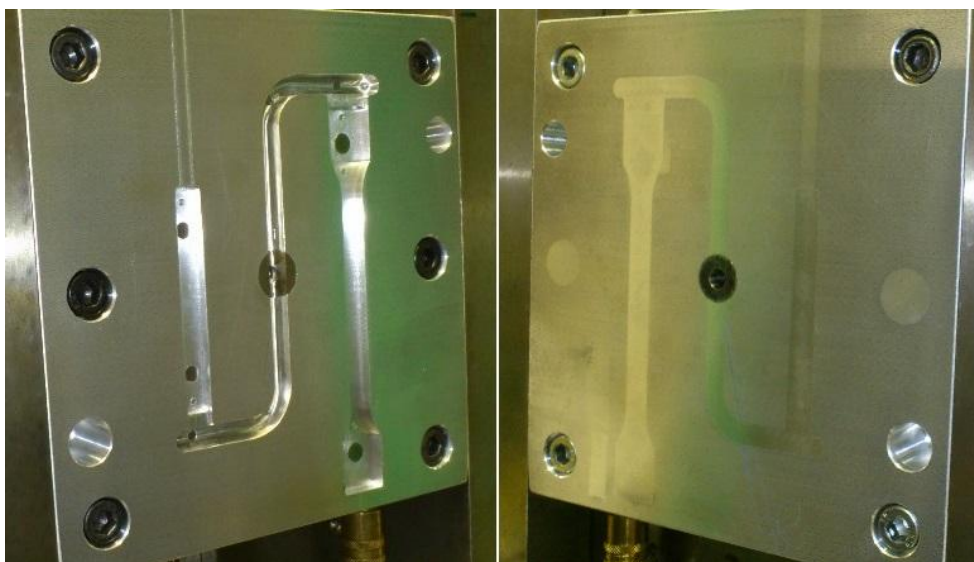
Značení hliníku			
Euro norma	W.Nr.	DIN	EN
(AW) 7075	3.4365	AlZnMgCu1,5	AlZn5,5MgCu

Jedná se o slitinu hliníku, která se často nazývá jako letecký dural, kde hlavní přísadou je zinek. Dural se nazývají slitiny, obsahující měď. Zmíněná slitina vyniká výbornou leštitelností, je nesvařitelná, zcela netvárná, náchylná ke korozi. V porovnání s ostatními slitinami hliníku dosahuje velmi dobré pevnosti v tahu (460-540MPa). Tepelná vodivost duralu je 130-160 W/mK. V porovnání s ocelí je výrazná její pořizovací cena, která je zhruba poloviční. Chemické složení duralu je vidět v Tab. 18.

Tab. 18 Legující prvky ve slitině hliníku 7075

Chemická analýza Duralu 7075							
Legující prvek	Zn	Mg	Fe	Si	Mn	Cr	Ti
Obsah [%]	5,1-6,1	2,1-2,0	0,50	0,40	0,30	0,18-0,28	0,20

Používá se především pro přesnou výrobu tvarově složitých součástí (forem), k výrobě strojů, nástrojů nebo např. nárazníky automobilů. Levá a pravá tvarová deska vstřikovací formy ze slitiny hliníku je zobrazena na Obr. 33.



Obr. 33 Tvarové desky hliníkové formy

5.5 Procesní podmínky vstřikování

Vstřikované výrobky byly vyrobeny do konkrétního materiálu forem (ocel, dural, měď) vždy za stejných procesních parametrů bez temperace a následně do vytemperované formy. Následující tabulka (Tab. 19) zobrazuje hodnoty procesních podmínek, nastavených podle typu vstřikovaného materiálu a jeho doporučeného nastavení výrobcí polymerů. Parametry vstřikovacího stroje se tedy mění pouze s ohledem na použitý polymerní materiál.

Tab. 19 Procesní parametry vstřikovacího stroje

Parametr	jedn.	LDPE	PP	ABS
Uzavírací síla	[kN]	950	950	950
Vstřikovací tlak	[bar]	880	880	880
Vstřikovací rychlost	[mm/s]	60	60	60
Dráha dávkování	[mm]	25	25	25
Doba chlazení	[s]	20	20	60
Dráha přepnutí	[mm]	16	16	16
Velikost dotlaku	[bar]	650	650	650
Čas dotlaku	[s]	10	10	10
Dekomprese pro dávkování	[mm]	6	6	6
Délka cyklu	[s]	37	37	77
Teplota pod násypkou	[°C]	40	40	40
Teplota válce - zóna 2	[°C]	120	140	190
Teplota válce - zóna 3	[°C]	130	150	200
Teplota válce - zóna 4	[°C]	135	160	210
Teplota válce - zóna 5	[°C]	140	170	210
Teplota válce - zóna 6	[°C]	145	180	220
Teplota - tryska	[°C]	150	190	230

Temperaci forem zajišťuje externí temperační zařízení (Obr. 34), které vyhřívá médium na stanovenou teplotu. Zajišťuje především cirkulaci kapaliny v temperačním systému přes chladicí kanály tvarových desek vstřikovacích forem. Jako temperační médium je používán olej - BP TRANCAL N.



Obr. 34 Temperační zařízení

Teplota temperačního média byla vždy nastavena podle doporučených temperačních teplot vstřikovaných polymerů (Tab. 20).

Tab. 20 Parametry vytemperování formy

Polymer	Teplota [°C]	Temperační médium
LDPE	30	olej
PP	40	olej
ABS	60	olej

Z každé varianty změn procesních podmínek (materiál formy, použití temperace) po ustálení a mnohonásobného odzkoušení celého vstřikovacího cyklu bylo vystříknuto minimálně 30 vzorků zkušebních těles. Po vyhotovení vstřikovaných dílů byl následně odstříhnut vtokový systém pomocí střížného nástroje.

6 VYHODNOCOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Hlavní hodnoty spočtených výsledků byly vypočteny podle vztahu pro odhad aritmetického průměru (12)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

\bar{x} odhad aritmetického průměru

x_i jednotlivé hodnoty měřených veličin (i-tá hodnota)

n počet hodnot (počet měření)

Vztah pro výpočet výběrové směrodatné odchylky (13):

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

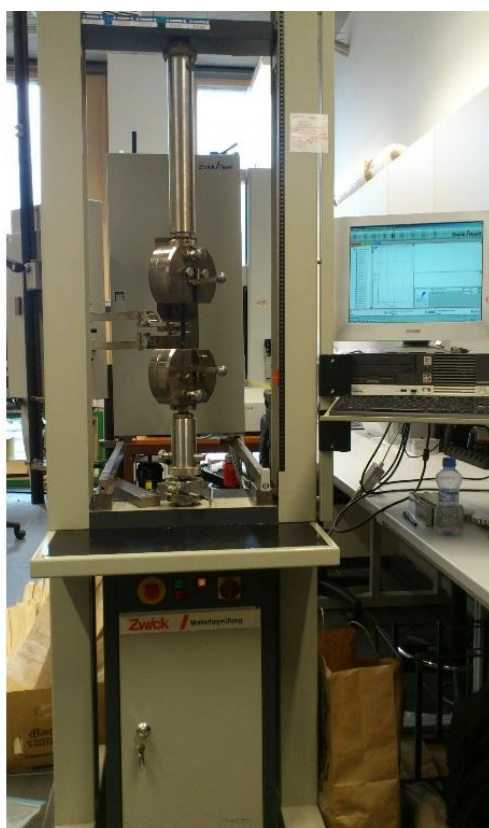
Vztah pro výpočet standardní nejistoty typu A (14):

$$\overline{u_A} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

7 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

7.1 Laboratorní zařízení

Zkoušení vzorků na tah bylo provedeno na universálním stroji ZWICK 1456. Zkušební stroj (Obr. 35) je určen pro mechanické zkoušky polymerních, pryžových a kompozitních materiálů na polymerní bázi. Je schopen provádět statické i dynamické (nizkokyclové) zkoušky namáhané na tah, tlak, ohyb a smyk. Při použití externí komory je možné zkoušky provádět v širokém nastavení teplotního pole od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tab. 21).



Obr. 35 Zkušební stroj ZWICK 1456

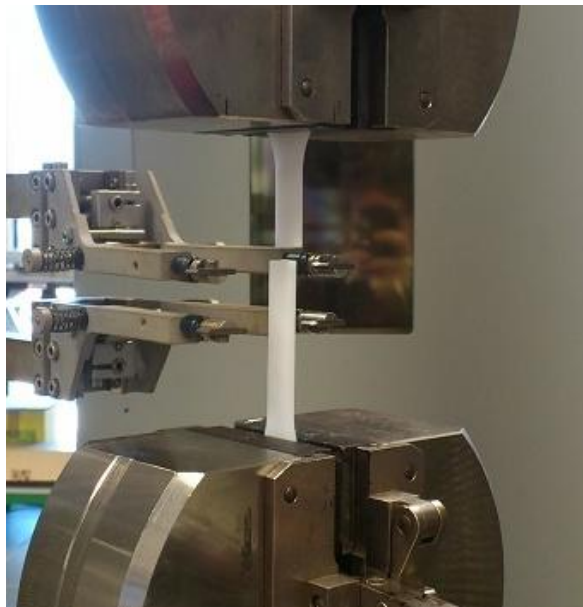
Tab. 21 Parametry zkušebního zařízení

Zwick 1456	
Max. posuv příčnicku	800mm/min
Teplotní rozsah zkoušek	$-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+290\text{ }^{\circ}\text{C}$
Snímače síly	25kN a 2,5kN

Postup úkonů při zkoušce tahem:

- Naměření výšky a tloušťky vzorku a zadání hodnot do počítače
- Upnutí tělesa do čelistí stroje
- Vynulování zatěžující síly
- Zahájení tahové zkoušky (softwarově)
- Ukončení zkoušky (automaticky)
- Odebrání destruovaného vzorku
- Nájezd čelistí do výchozí polohy

Zkouška tahem byla prováděna podle normy ČSN 527-1. Od každé varianty zkušebních těles bylo testováno vždy 30 vzorků. Každá zkouška byla provedena až do úplného roztržení tělesa na dvě části (Obr. 36).



Obr. 36 Ukončení tahové zkoušky (PP)

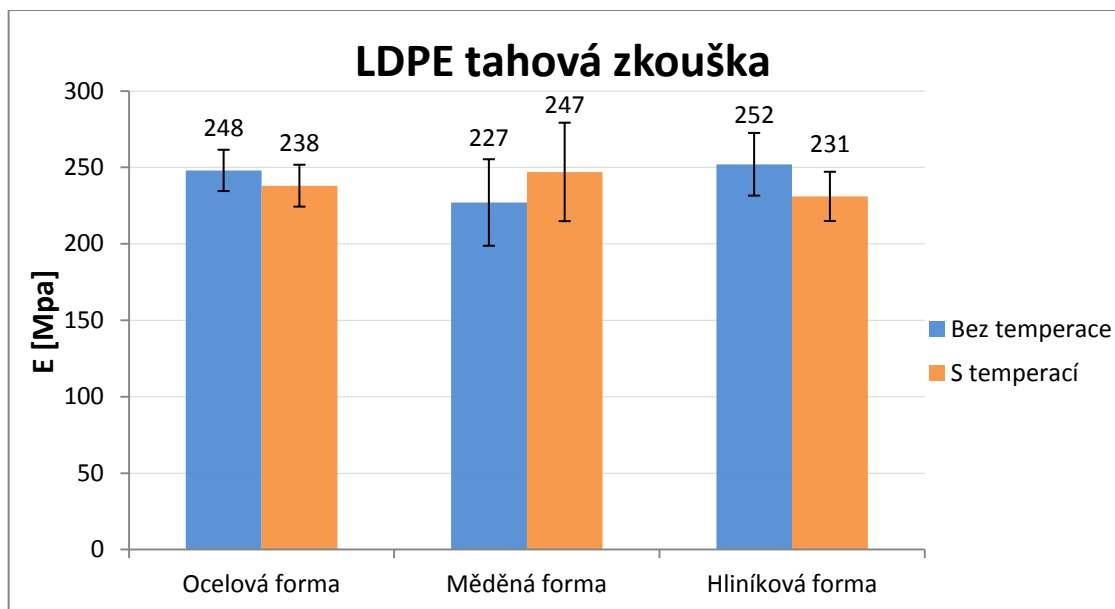
Při zkoušce byly vyhodnocovány následující parametry:

E [Mpa]	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
R_m [Mpa]	Napětí na mezi pevnosti
ε_m [%]	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti

7.2 Materiál LDPE

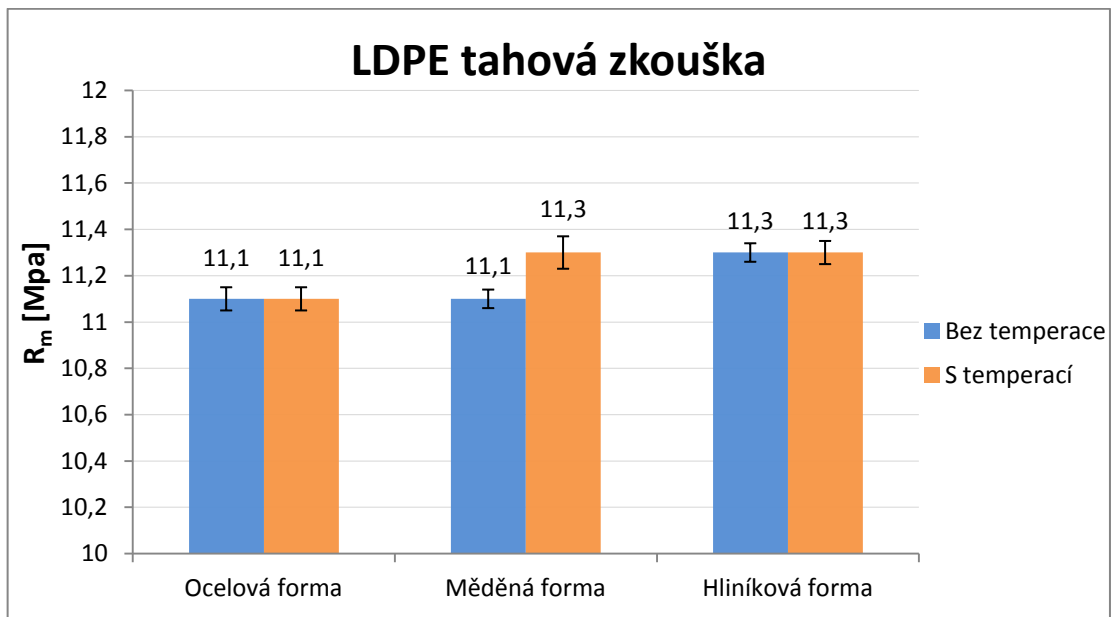
Tab. 22 Výsledky měření zkoušky tahem (materiál LDPE)

LDPE	dle materiálu formy:					
	Ocel		Meď		Hliník	
Použití temperace	ne	ano	ne	ano	ne	ano
E [Mpa]	248 ± 27	238 ± 27	227 ± 57	247 ± 64	252 ± 41	231 ± 32
ua	5,0	5,1	10,5	11,9	7,6	6,0
Rm [Mpa]	11,1 ± 0,1	11,1 ± 0,1	11,1 ± 0,1	11,3 ± 0,1	11,3 ± 0,1	11,3 ± 0,1
ua	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
εm [%]	74,6 ± 14,8	67,9 ± 14,7	79,4 ± 10,8	79,6 ± 11,1	65,6 ± 12,0	73,9 ± 11,5
ua	2,74	2,73	2,00	2,07	2,22	2,14



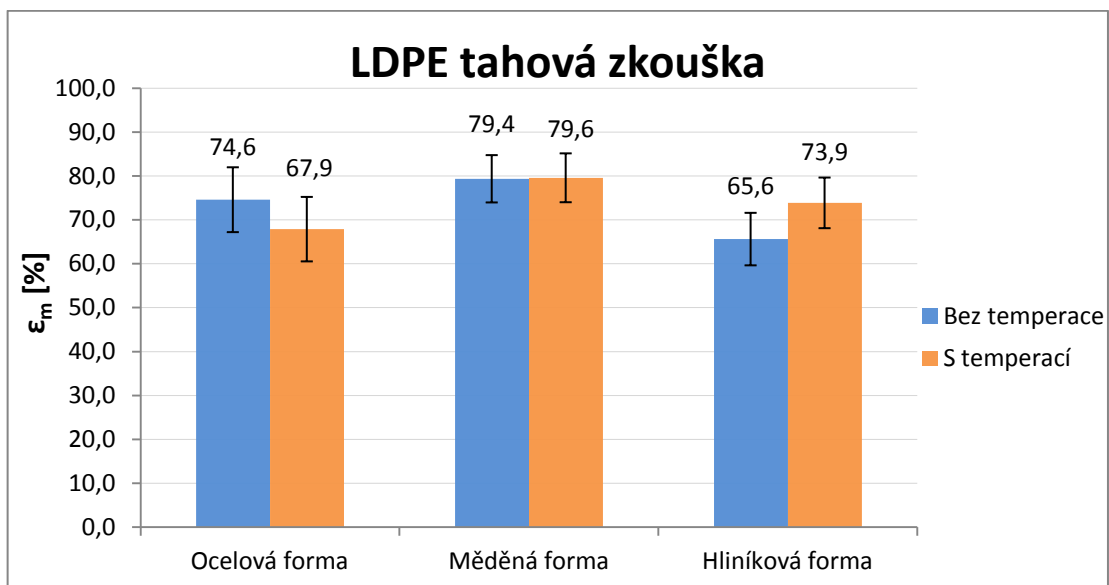
Obr. 37 Vyhodnocení E zkoušky tahem materiálu LDPE

Nejvyšší hodnota modulu pružnosti polyethylenu byla zjištěna za použití hliníkové formy bez temperance (252 MPa). Nejnižší hodnotu modulu bylo naměřeno při vstřikování do měděné formy bez použití temperance (227 MPa). Na Obr. 37 je vidět, že dochází pouze k minimálním celkovým rozdílům Youngova modulu (do 20MPa), a to jak z pohledu záměny materiálu formy, tak z pohledu použití temperance při vstřikování. Z těchto výsledků vyplývá, že použití temperačního média má pouze malý vliv na výsledný modul pružnosti v tahu materiálu LDPE.



Obr. 38 Vyhodnocení R_m zkoušky tahem materiálu LDPE

Materiál LDPE vykazoval nejvyšších hodnot napětí na mezi pevnosti při vstřikování především do hliníkové formy (11,3 MPa). Nejnížší hodnoty napětí na mezi kluzu jsou viditelné při použití ocelové formy (11,1 MPa). Obr. 38 zobrazuje největší rozdíl hodnot při vstřikování bez temperace a s temperací do měděné formy. Tak jako u modulu pružnosti se v případě pevnosti materiálu jedná o velice úzký rozptyl hodnot, tzn. že materiál formy či použití temperace nemají výrazný vliv na pevnost materiálu LDPE.



Obr. 39 Vyhodnocení ϵ_m zkoušky tahem materiálu LDPE

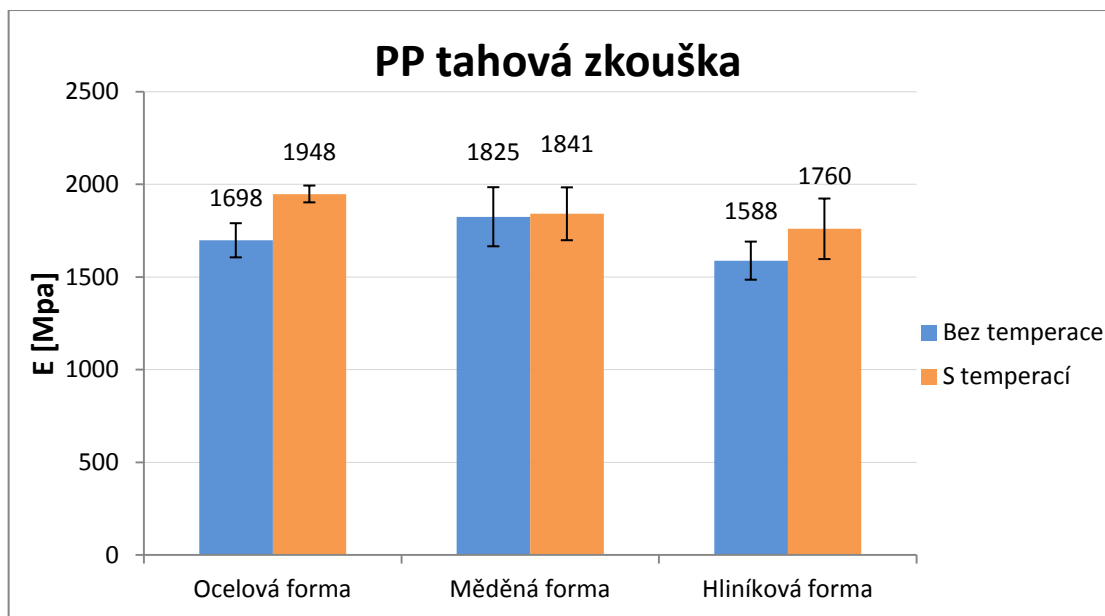
Nejvyšší veličiny poměrného prodloužení na mezi pevnosti materiálu LDPE byly zjištěny u měděné formy, a to bez temperace (79,4 %) a za použití temperance (79,6 %). Nejnižší hodnotu poměrného prodloužení vykazoval polyetylen při vstřikování do nevytemperované hliníkové formy (65,6 %). Z obr. 39 je vidět, že použití temperace zvyšuje veličinu relativního prodloužení u hliníkové formy, snižuje hodnotu u ocelové formy a u měděné formy vykazuje pouze nepatrnou změnu.

Ze získaného měření materiálu LDPE vyplývá, že při vstřikování do měděné formy je LDPE houževnatější než při vstřikování do oceli, díky svému většímu protažení na mezi pevnosti při naměřeném napětí. Naopak LDPE vstřikovaný do hliníku vykazuje vyšší pevnost, při menším protažení, nežli ocel. Rozptyl hodnot zkoušených vzorků je však velice malý i při pružném namáhání, proto tyto změny procesních parametrů mají minimální vliv tuhost a pevnost vstřikovaného polyetylenu.

7.3 Materiál PP

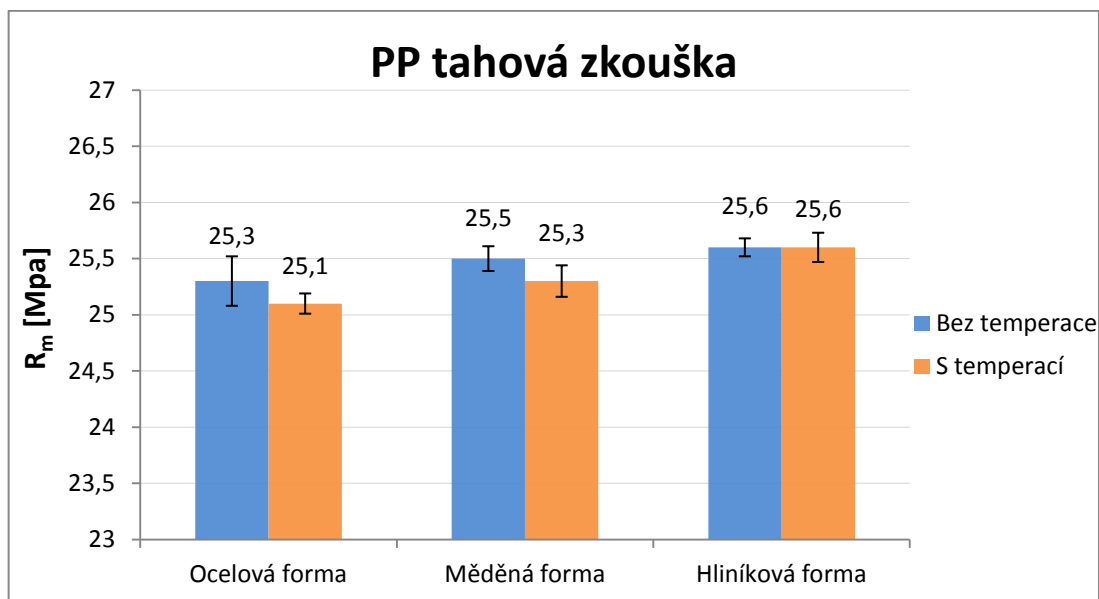
Tab. 23 Výsledky měření zkoušky tahem (materiál PP)

PP	dle materiálu formy:					
	Ocel		Meď		Hliník	
Použitá temperace	ne	ano	ne	ano	ne	ano
E [Mpa]	1698 ± 184	1948 ± 91	1825 ± 319	1841 ± 285	1588 ± 206	1760 ± 327
ua	34,3	16,9	59,2	53,0	38,2	60,7
Rm [Mpa]	25,3 ± 0,4	25,1 ± 0,2	25,5 ± 0,2	25,3 ± 0,3	25,6 ± 0,2	25,6 ± 0,3
ua	0,08	0,03	0,04	0,05	0,03	0,05
εm [%]	2,7 ± 0,1	2,6 ± 0,1	2,8 ± 0,1	2,8 ± 0,1	2,8 ± 0,1	2,7 ± 0,1
ua	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02



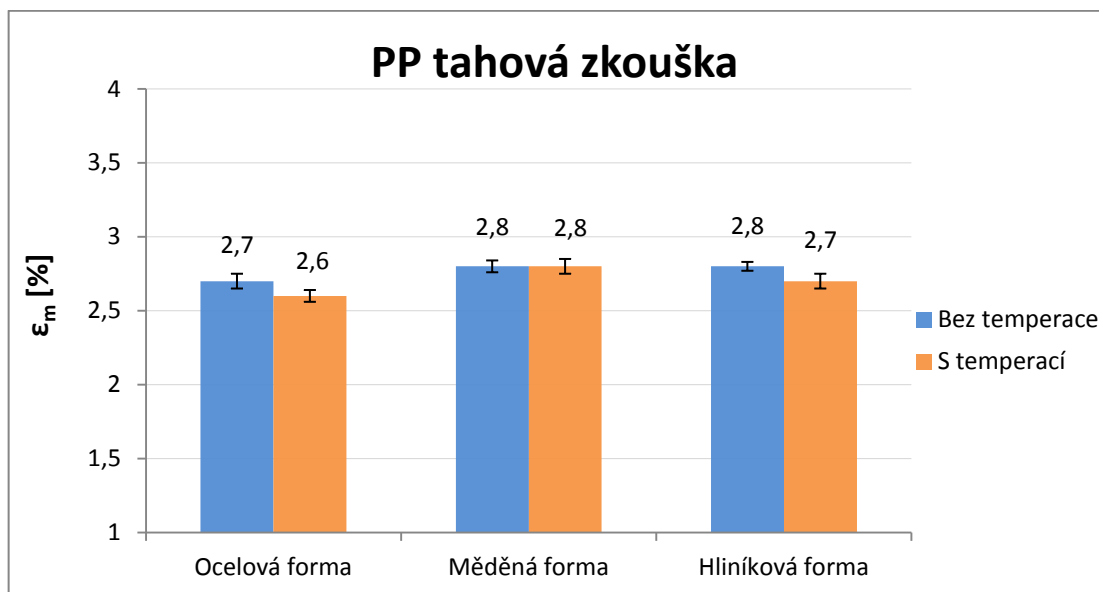
Obr. 40 Vyhodnocení E zkoušky tahem materiálu PP

Nejvyšší hodnota modulu pružnosti polypropylenu byla zjištěna při vstřikování do ocelové formy s použitím temperace (1948 MPa), naopak nejnižší hodnotu vykazoval PP při použití hliníkové formy bez temperace (1588 MPa). Hliníková forma má zároveň nejnižší veličiny modulu pružnosti v porovnání s ostatními materiály forem. Z Obr. 40 také vyplývá, že netemperovaná forma snižuje Youngův modul polypropylenu u všech zvolených materiálů forem, nejvíce však u oceli (až 250 MPa). Při použití temperace, tak vyrobené vzorky při stejném napětí vykazují menší pružnou deformaci nežli výrobky vyrobené bez temperace. Aplikovaná temperace má pouze minimální vliv u měděné formy.



Obr. 41 Vyhodnocení R_m zkoušky tahem materiálu PP

Nejvyšších hodnot napětí na mezi pevnosti polypropylenu bylo zjištěno při použití hliníkové formy (25,6 MPa). Hliníková forma zároveň nenese téměř žádný vliv při použití temperačního zařízení. Nejmenší hodnotu napětí na mezi pevnosti vykazuje vytemperovaná ocelová forma (25,1 MPa). Všechny naměřené hodnoty, jak ukazuje Obr. 41, jsou v poměrně malém rozptylu cca 0,5 MPa. Částečný vliv na napětí na mezi pevnosti ukazuje použití vytemperované formy. Při použití temperace u vstřikovaných těles z PP klesá napětí, a to především u ocelové a měděné formy. K tomuto jevu mohlo dojít z důvodu vyšší sekundární krystalizace vyrobených zkušebních těles, která mohla být vyšší u netemperovaných vstřikovacích forem a následně zvýšila i hodnotu meze pevnosti materiálu PP. U hliníkové formy je tento vliv skoro zanedbatelný.



Obr. 42 Vyhodnocení ε_m zkoušky tahem materiálu PP

Nejvyšších hodnot poměrného prodloužení vykazuje polypropylen u měděné formy, případně u hliníkové formy bez temperace (2,8 %). Nejnižší hodnoty poměrného prodloužení dosáhne PP při vstřikování do ocelové formy bez temperace (2,6 %). Mezi všemi naměřenými veličinami relativního prodloužení PP nejsou významné rozdíly, jak ukazuje Obr. 42.

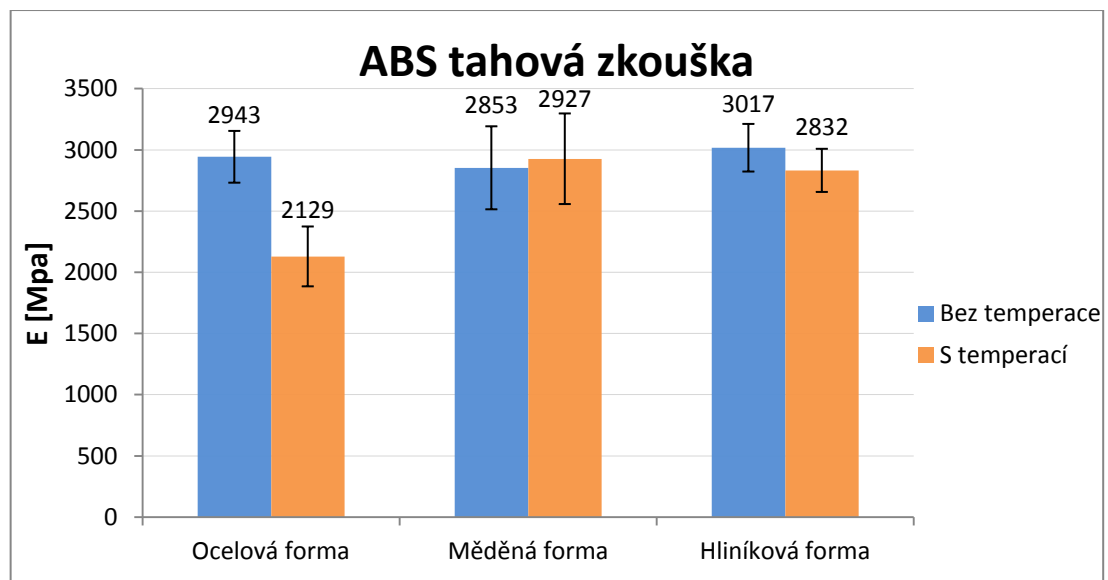
Z výsledků měření při zkoušce tahem vyplývá, že použitá temperace zvyšuje tuhost v oblasti pružného namáhání vstřikovaného polypropylenu, a to především při použití ocelových forem. Důvodem může být lepší odvod tepla z tvarových desek vstřikovací formy.

Dále lze říci, že mechanické vlastnosti (pevnost) mohou být při použití hliníkové formy, jejichž cena je několikanásobně nižší než cena ocelové či měděné formy, srovnatelné či dokonce lepší než u ocelové či měděné formy. PP tak dosahuje vyšší odolnosti proti zatížení, při menší deformaci.

7.4 Materiál ABS

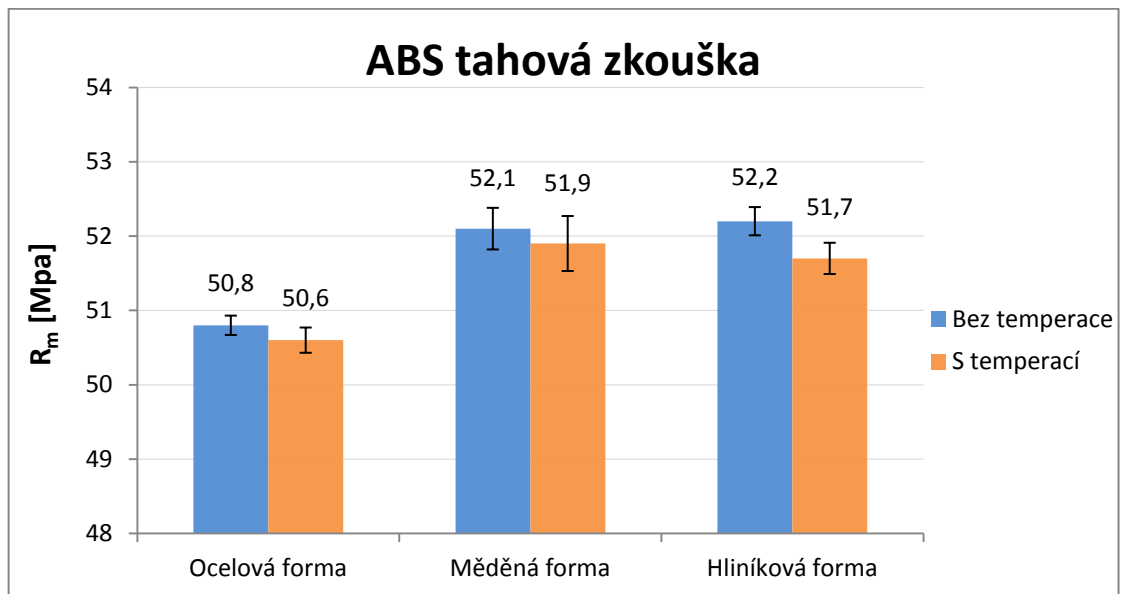
Tab. 24 Výsledky měření zkoušky tahem (materiál ABS)

ABS	dle materiálu formy:					
	Ocel		Meď		Hliník	
Použitá temperace	ne	ano	ne	ano	ne	ano
E [Mpa]	2943 ± 423	2129 ± 489	2853 ± 678	2927 ± 740	3017 ± 389	2832 ± 352
ua	78,5	90,8	125,9	137,5	72,3	65,5
Rm [Mpa]	50,8 ± 0,3	50,6 ± 0,3	52,1 ± 0,6	51,9 ± 0,7	52,2 ± 0,4	51,7 ± 0,4
ua	0,05	0,06	0,10	0,14	0,07	0,08
εm [%]	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,8 ± 0,1
ua	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01



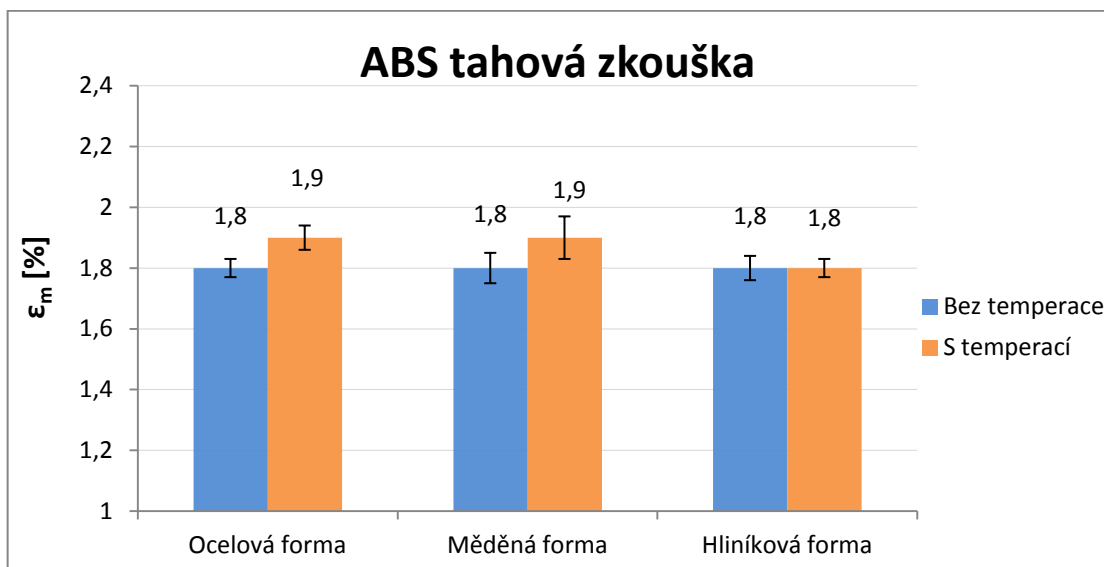
Obr. 43 Vyhodnocení E zkoušky tahem materiálu ABS

Nejvyšší hodnoty Youngova modulu dosáhne akrylonitril-butadien-styren při vstřikování do hliníkové formy bez použití temperace (3017 MPa). Nejnižšího modulu pružnosti bylo zjištěno u vstřikování do vytemperované ocelové formy. (2129 MPa). Obr. 43 ukazuje velký rozdíl hodnot modulů při použití ocelové formy, kde absence temperace výrazně zvedne hodnotu o více než 800 MPa. Při použití hliníkové formy při vstřikování veličina modulu klesá s použitím temperace o méně než 200 MPa. V měděné formě se tato úprava teplotního pole tvarových desek projevila pouze nepatrně.



Obr. 44 Vyhodnocení R_m zkoušky tahem materiálu ABS

Největších hodnot napětí na mezi pevnosti při vstřikování ABS bylo naměřeno do nevytemperovaných forem ze slitin mědi (52,1 MPa) a hliníku (52,2MPa). Nejnižší veličinu napětí na mezi pevnosti ABS vykazoval u ocelové formy, a to s použitím temperace (50,6 MPa). Podle Obr. 44 je vidět, že při použití forem ze slitin mědi a hliníku je možné dosáhnout vyšších napětí na mezi pevnosti než u ocelí. Při použití vyhřívání forem temperací u vstřikovaného ABS klesá napětí na mezi pevnosti u všech typů materiálů forem. Měření ukázalo, že vstřikovaný ABS do hliníkové nebo měděné formy vykazuje podobné výsledky napětí na mezi pevnosti, a to i při aplikaci temperace forem.



Obr. 45 Vyhodnocení ϵ_m zkoušky tahem materiálu ABS

Největších hodnot poměrného prodloužení u vstřikování vykazuje ABS u ocelové a měděné vytemperované formy (1,9 %). Nejnižších hodnot relativního prodloužení se ukázalo u měření vstřikovaných vzorků bez použití temperace (1,8 %). Z Obr. 45 tedy vyplývá, že materiál formy nemá vliv na poměrné prodloužení při vstřikování ABS. Při použití temperace forem je možné zaregistrovat nepatrné zvýšení hodnot relativního prodloužení (cca 0,1 %).

Výzkum mechanických vlastností při vstřikování ABS ukazuje, že použitím ocelové formy je možné dosáhnout nižších celkových pevností než u forem z nekovových materiálů, při relativně stejných deformacích. Aplikace temperačního systému nemá výrazný vliv na nejvyšší pevnost materiálu ABS.

Dále se ukázalo, že v oblasti vratných deformací se při použití vytemperované ocelové formy výrazně zvyšuje elasticita neboli pružnost materiálu ABS, oproti absenci temperačního systému.

8 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

8.1 Laboratorní zařízení

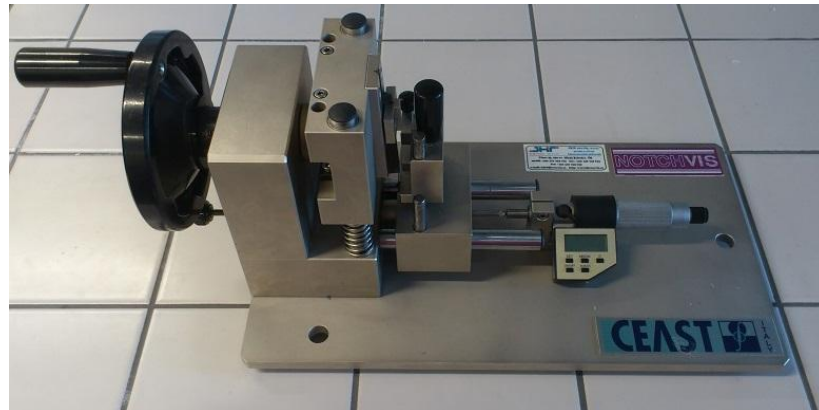
Zkouška rázové ohybové houževnatosti neboli zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na zařízení označené CEAST Resil Impactor Junior (Obr. 46). Destruktivní zkouška byla vykonávána metodou Charpy. Tento stroj však dokáže provést zkoušku i metodou Izod. Destruktivní testy je možné vykonávat s energií kladiva v rozmezí hodnot 1- 25 J. Nastavení potřebných hodnot se provádí pomocí počítače s příslušným softwarem CEAST.



Obr. 46 Zkušební stroj CEAST

8.1.1 Úprava vzorků opatřením vrubu

Všechny vzorky, určené ke zkouškám na Charpyho kladivu, byly opatřeny příslušným V vrubem (Obr. 48) podle normy ČSN EN ISO 179-1. Normalizovaný vrub by zhotoven na příslušném mechanickém zařízení CEAST (Obr. 47) do hloubky 2mm.



Obr. 47 Zařízení na výrobu vrubů



Obr. 48 Vzorek s vrubem

Postup úkonů při zkoušce rázové houževnatosti:

- Výroba vrubu (vždy 3 vzorky současně)
- Umístění vzorku do správné polohy
- Zahájení zkoušky (softwarově)
- Uvolnění kladiva a provedení rázu
- Ukončení zkoušky (automaticky)
- Navrácení kladiva do výchozí polohy
- Odebrání destruovaných částí vzorku

Při zkoušce byly vyhodnocovány následující parametry:

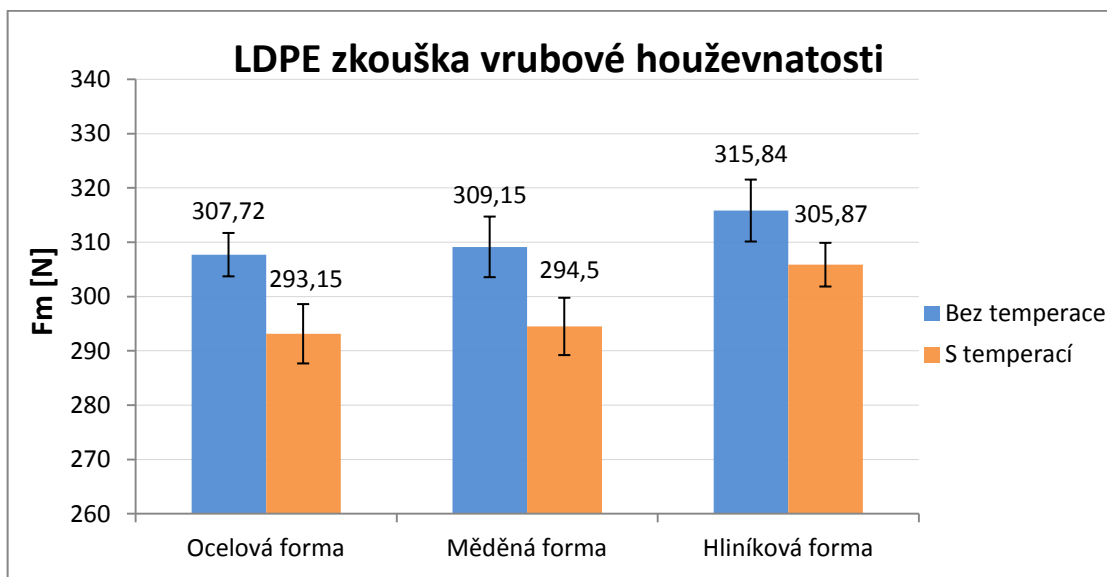
F_m [N] Maximální síla rázu kladiva

A_m [kJ/m²] Vrubová houževnatost

8.2 Materiál LDPE

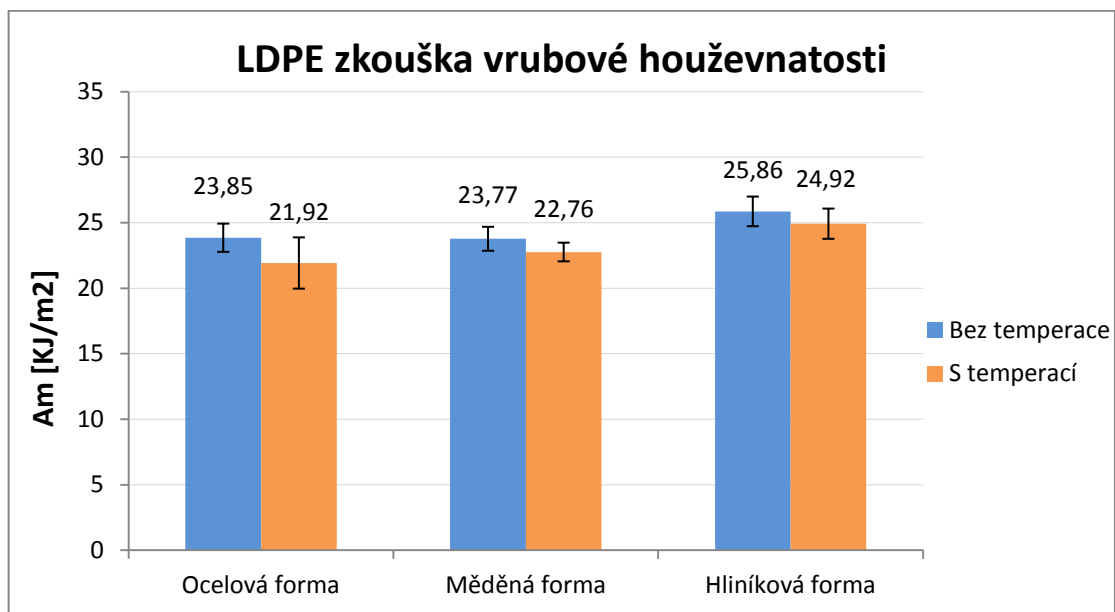
Tab. 25 Výsledky měření vrubové houževnatosti (materiál LDPE)

LDPE	dle materiálu formy:					
	Ocel		Meď		Hliník	
Použitá teplota	ne	ano	ne	ano	ne	ano
F_m [N]	307,72 ± 7,99	293,15 ± 10,93	309,15 ± 11,16	294,50 ± 10,56	315,84 ± 11,40	305,87 ± 8,05
ua	1,48	2,03	2,07	1,96	2,12	1,49
Am [KJ/m²]	23,85 ± 2,16	21,92 ± 3,91	23,77 ± 1,83	22,76 ± 1,43	25,86 ± 2,26	24,92 ± 2,31
ua	0,40	0,73	0,34	0,27	0,42	0,43



Obr. 49 Vyhodnocení F_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu LDPE

Nejvyšší hodnoty síly, potřebné pro přeražení zkušebního tělesa na Charpyho kladivu, dosahuje polyetylen při vstřikování do hliníkové formy bez teploty (315,84 N). Naopak nejmenší síla, potřebná pro destrukci tělesa z LDPE, byla naměřena při vstřikování do vytemperované ocelové formy (293,15 N). Na Obr. 49 Je vidět, že při použití materiálů hliník či měď dosahuje polymerní materiál LDPE vyšších hodnot síly potřebné pro přeražení tělesa. Z měření dále vyplývá, že při zapojení temperačního okruhu do tvarových desek při vstřikování LDPE se maximální síla rázu kladiva u všech materiálů vstřikovací formy zmenší.



Obr. 50 Vyhodnocení A_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu LDPE

Při vstřikování vykazuje LDPE nejvyšší hodnotu vrubové houževnatosti (25,86) do hliníkové formy bez použití temperace. Nejmenší hodnoty A_m dosáhne polyetylen při vstřikování do vytemperované formy (21,92 kJ/m²). Výzkum ukázal (Obr. 50), že nejvyšších hodnot vrubové houževnatosti je možné dosáhnout vstřikováním do hliníkové formy. Ocelová a měděná forma dosahují poměrně podobných výsledků, však menších než forma hliníková. Bylo zjištěno, že použití temperace při vstřikování snižuje veličinu vrubové houževnatosti u všech použitých forem.

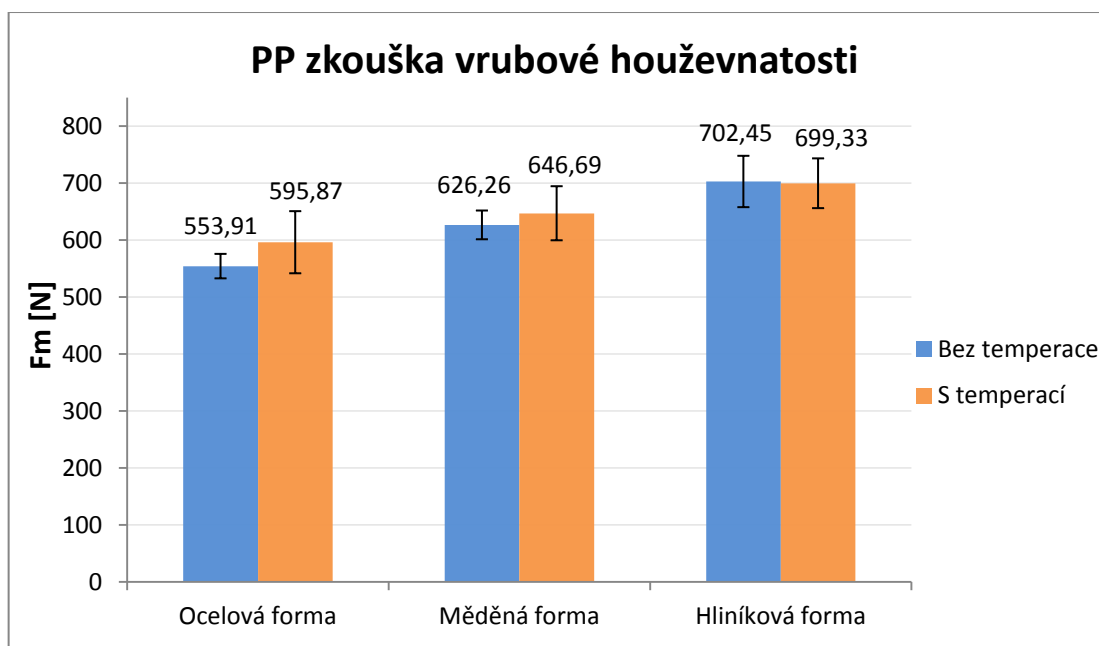
Z měření na Charpyho kladivu vyplývá, že materiál LDPE, vyrobený v hliníkových či měděných formách, je celkově odolnější proti rázovým silám, nežli materiál vstřikovaný do formy ocelové. Použité slitiny materiálů forem zvyšují tedy rázovou houževnatost i odolnost proti celkovému dynamickému namáhání. Z měření dále vyplývá, že při zapojení temperačního okruhu do tvarových desek při vstřikování LDPE se maximální hodnoty síly rázu kladiva zmenší, a to u všech druhů materiálů vstřikovacích forem. Temperační systém tedy negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti polyetylenu v oblasti rázového namáhání.

Lze tedy říci, že nekovové materiály mohou nahradit materiál ocelový při zachování stejné či ještě vyšší odolnosti proti dynamickému namáhání. Nejlépe však hliníková forma, kde opět velkou výhodou je pořizovací cena.

8.3 Materiál PP

Tab. 26 Výsledky měření vrubové houževnatosti (materiál PP)

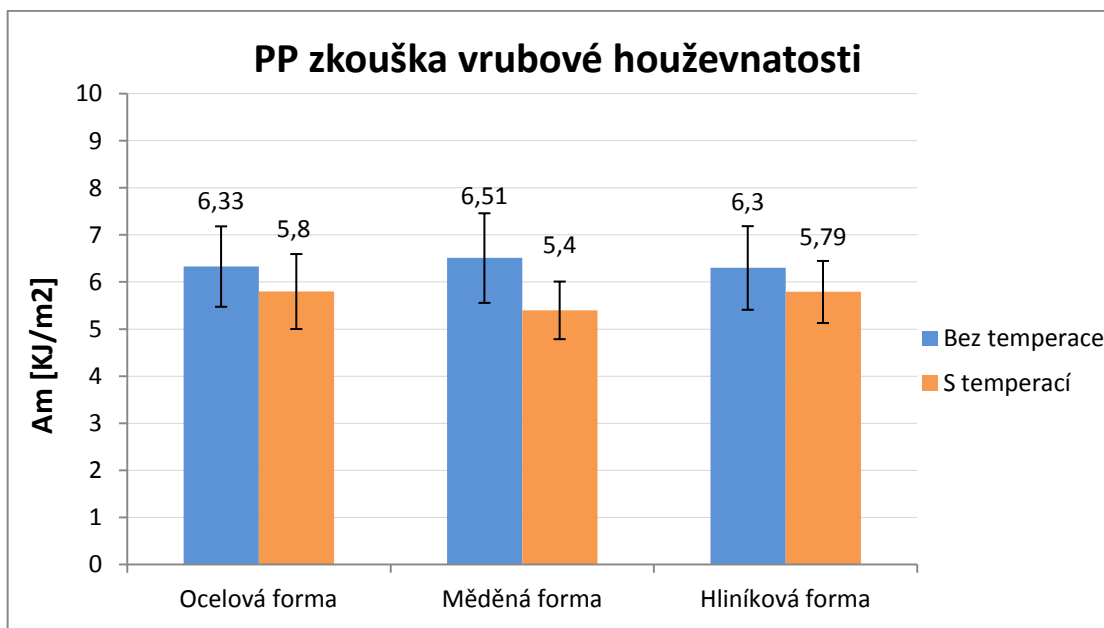
PP	dle materiálu formy:					
	Ocel		Med'		Hliník	
Použitá temperace	ne	ano	ne	ano	ne	Ano
F_m [N]	553,91 ± 42,93	595,87 ± 108,98	626,26 ± 50,48	646,69 ± 94,85	702,45 ± 90,12	699,33 ± 87,30
ua	7,97	20,24	9,37	17,61	16,73	16,21
Am [KJ/m²]	6,33 ± 1,71	5,80 ± 1,59	6,51 ± 1,90	5,40 ± 1,22	6,30 ± 1,78	5,79 ± 1,32
ua	0,32	0,30	0,35	0,23	0,33	0,24



Obr. 51 Vyhodnocení F_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu PP

Nejvyšších hodnot maximální síly na charpyho kladivu dosahuje polypropylen při vstřikování do hliníkové formy, konkrétně bez použití temperace (702,45 N). Nejnižší hodnota při měření byla zjištěna při použití ocelové formy bez temperace (553,91 N).

Z Obr. 51 vyplívá, že změna materiálu formy má vliv na maximální sílu při zkoušce vrubové houževnatosti, rozptyl hodnot je okolo 150N. Vliv teploty při vstřikování byl prokázán nejvíce u použití ocelové formy, kde LDPE zvyšuje odolnost proti síle kladiva. Důvodem je pravděpodobně ve zlepšení odvodu tepla ze vstřikovaného vzorku. Při použití neocelových materiálů vstřikovacích forem vliv teplotního systému není výrazný.



Obr. 52 Vyhodnocení A_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu PP

Nejvyšší hodnota veličiny vrubové houževnatosti při vstřikování polypropylenu byla zjištěna při vstřikování do měděné formy bez teploty ($6,51 \text{ kJ/m}^2$). Nejnižší hodnota této veličiny byla naměřena při použití vytemperované formy stejné (měděné) formy ($5,4 \text{ kJ/m}^2$). Obr. 52 zobrazuje poměrně malý rozptyl naměřených hodnot při vstřikování do různých materiálů forem. Výzkum dále ukazuje, že při použití vytemperovaných desek vstřikovacích forem veličina vrubové houževnatosti klesá, a to bez ohledu na materiál vstřikovací formy.

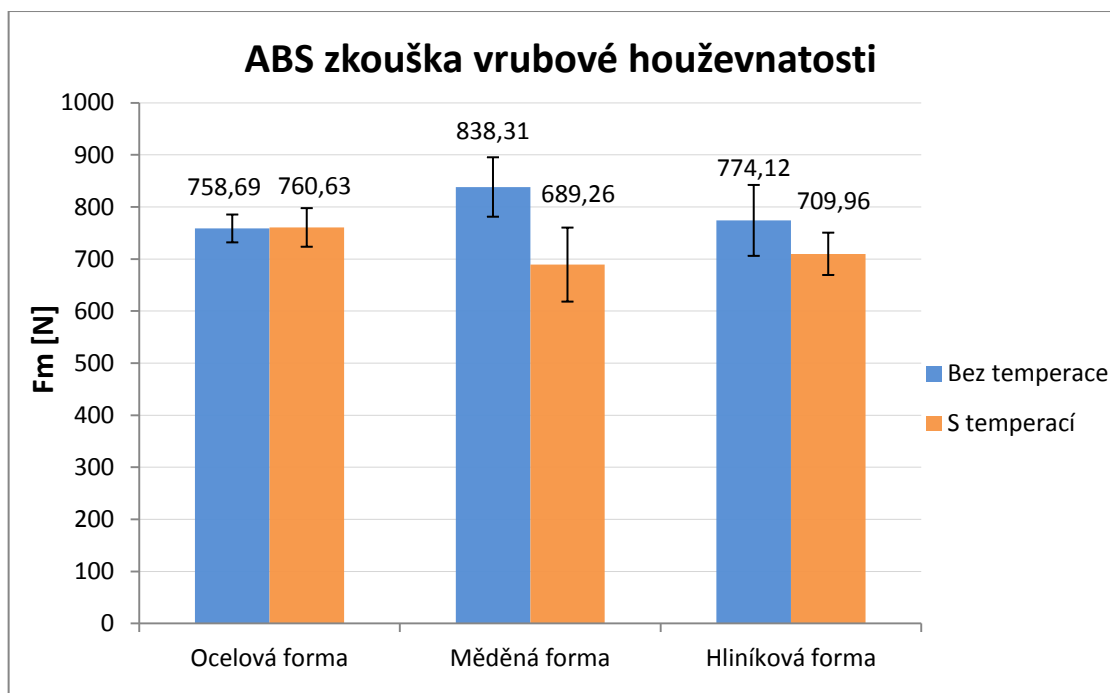
Výzkum ukazuje, že změna materiálu vstřikovací formy nemá významný vliv na nutnou práci k přeražení tělesa z PP. Největší sílu, potřebnou k přeražení, však vyžadují vzorky, které jsou vstřikované do vstřikovacích forem z nekovových materiálů. Potřebná síla pro přeražení tělesa je nejvyšší při vstřikování do formy ze slitiny hliníku. Hliníkový materiál je proto vhodnější alternativou běžně používaných ocelí, díky i nízké pořizovací

ceně. Aktivní temperanční systém forem v tomto případě zvyšuje potřebou sílu k přeražení, zároveň však snižuje rázovou houževnatost.

8.4 Materiál ABS

Tab. 27 Výsledky měření vrubové houževnatosti (materiál ABS)

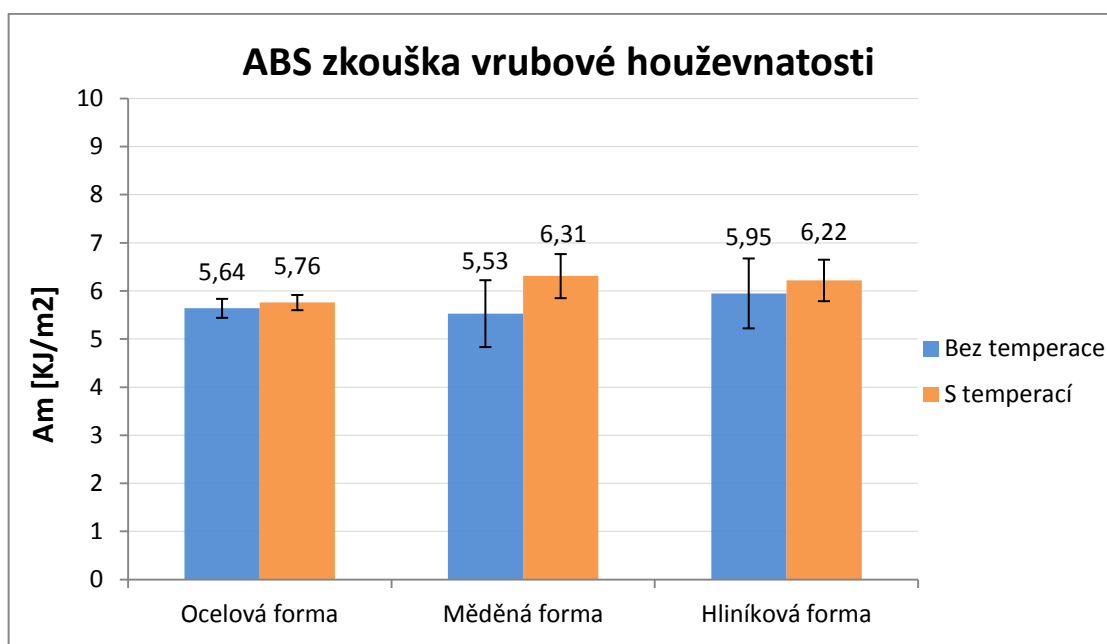
ABS	dle materiálu formy:					
	Ocel		Med'		Hliník	
Použitá temperace	ne	ano	ne	ano	ne	ano
F_m [N]	758,69 ± 53,43	760,63 ± 74,20	838,31 ± 114,13	689,26 ± 142,13	774,12 ± 136,23	709,96 ± 81,31
ua	9,92	13,78	21,19	26,39	25,30	15,10
A_m [KJ/m²]	5,64 ± 0,39	5,76 ± 0,32	5,53 ± 1,39	6,31 ± 0,92	5,95 ± 1,45	6,22 ± 0,86
ua	0,07	0,06	0,26	0,17	0,27	0,16



Obr. 53 Vyhodnocení F_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu ABS

Nejvyšší naměřená hodnota maximální síly byla zjištěna při vstřikování ABS do nevytemperované formy z mědi (838,31 N). Nejnížší hodnoty maximální síly dosahuje Akrylonitril-butadien-styren při vstřikování do vytemperované měděné formy (689,26 N). Jak

ukazuje Obr. 53, nejnižší veličinu maximální síly je možno vidět u použití ocelové formy bez temperace. Na ocelovou formu v tomto ohledu nemá významný vliv předem vyhřátá forma. Naopak tomu je při použití forem ze slitin mědi a hliníku, kde byl zjištěn pokles maximální potřebné síly s použitím temperančního systému.



Obr. 54 Vyhodnocení A_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu ABS

Nejvyšší hodnoty vrubové houževnatosti dosáhne ABS při vstřikování do vytemperované měděné formy ($6,31 \text{ kJ/m}^2$). Nejnižší hodnota veličiny byla zjištěna u stejné (měděné) formy bez použití temperace ($5,53 \text{ kJ/m}^2$). Obr. 54 ukazuje, že při vstřikování bez temperančního systému jsou hodnoty ocelové a měděné formy podobné, hliníková forma vykazuje vrubovou houževnatost lehce vyšší. Dále bylo zjištěno, že při aplikaci temperace při vstřikování vrubová houževnatost ABS roste u všech použitých materiálů forem, nejvíce však u měděné formy. U oceli je tento jev minimální.

Při měření materiálu ABS na Charpyho kladivu bylo zjištěno, že použitím měděné formy při vstřikování je potřebná rázová síla vyšší v porovnání s ocelovou formou. Celková odolnost materiálu proti rázovým silám je však podobná. Použitím hliníkové formy při vstřikování se (oproti oceli) nepatrně zvyšuje vrubová houževnatost i potřebná síla. Hliní-

ková forma tedy vykazuje spíše lepší vliv proti rázovému namáhání ABS. Výzkum dále ukázal, že při použití temperačního systému při vstřikování ABS do nekovových forem se potřebná síla k přeražení snižuje a vrbová houževnatost zvyšuje. Použití temperace v ocelové formě má pouze malý vliv na rázové namáhání součástí z ABS.

ZÁVĚR

V této závěrečné práci byl zkoumán vliv procesních podmínek při vstřikování na výsledné mechanické vlastnosti polymerních výrobků. Vstřikování polymerních vzorků probíhalo do ocelové vstřikovací formy a do forem ze slitin mědi a hliníku. Další změnou parametrů při vstřikování vybraných druhů termoplastů bylo použití temperančního systému.

Mechanické vlastnosti byly vyhodnocovány u vstřikovaných polymerů, a to nízkohustotný polyetylen DOW LDPE 780E, polypropylen TATREN IM 45 74 a akrylonitril-nutadien-styren ABS HG – 0760. Při výrobě vzorků byla použita vstřikovací forma z oceli 19 522, slitiny mědi - ČSN 423001 a ze slitiny hliníku - Dural EN AW 7075.

Z vyhodnocení tahové zkoušky byla zkoumána elasticita (modul pružnosti), pevnost a relativní prodloužení na mezi pevnosti. Při vstřikování LDPE bylo zjištěno, že při použití měděné formy (v porovnání s ocelovou) se materiál vykazuje lehce houževnatější, díky svému mírnému protažení při stejné pevnosti. Naopak při aplikaci hliníkové formy vykázal polyetylen s vyšší pevnost. Zkoumané vstřikovací podmínky mají zanedbatelný vliv na vlastnosti LDPE, protože výsledky všech hodnot měření byli velice podobné.

Z výsledků měření PP vyplívá, že použitím temperance forem při vstřikování je možné dosáhnout vyšších tuhostí, a to především při použití ocelových forem. Důvodem je pravděpodobně zvýšení odvodu tepla z formy. Vliv použití formy ze slitiny hliníku při vstřikování ukazuje srovnatelnou, nebo i lepší pevnost polypropylenu. Tento fakt nese i výhodu, že duralový materiál je levnější nežli ocel.

Při vstřikování do forem z nekovových materiálů projevil ABS zvýšenou pevnost než u použití ocelové formy. Aplikace temperančního systému forem neprojevila výrazný vliv na pevnost. Měření dále ukázalo, že v oblasti vratných deformací se nejvíce projevila hodnota elasticity ABS u ocelových forem, kde termoplast vykázal zvýšení pružnosti s aplikací temperačního systému forem.

Z výsledků měření zkoušky vrubové houževnatosti nízkohustotního polyetyleny vyplívá, že používáním nekovových materiálů forem při vstřikování, oproti ocelovým, se zvyšuje celková odolnost proti rázovým silám, a je nutné vyvinout větší síly pro destrukci vzorků. Tento vliv se projevil nejvíce u duralové formy. Zkoumání vzorků LDPE na Charpyho kladivu dále ukázalo, že používání temperance forem negativně ovlivňuje odolnost proti dynamickému namáhání, a to ve všech případech použití materiálů forem.

Z vyhodnocení polypropylenu rázovou zkouškou vyšlo najevo, že změna materiálu formy při vstřikování nemá významný vliv na rázovou houževnatost. Větší sílu, potřebnou k přeražení, vyžadují vzorky, vyrobené ve formách ze slitin mědi a především ze slitin hliníku. Použitím temperančního systému forem, při vstřikování ABS, se zvyšuje potřeba síly k přeražení vzorku a snižuje vrubová houževnatost.

Při měření materiálu ABS na Charpyho kladivu bylo zjištěno, že vstřikováním do hliníkové formy, oproti ocelové, se obecně odolnost proti rázovým silám zlepšuje. Při vstřikování do formy ze slitiny mědi, v porovnání s ocelí, je potřeba vyšší síly k destrukci vzorku, vrubová houževnatost je však srovnatelná. Aplikovaný temperanční systém v tomto případě ukázal nepatrné zvýšení odolnosti proti rázovým silám. Maximální síla kladiva je však menší.

Celkový výzkum změny mechanických vlastností byl brán především z pohledu porovnání materiálu vstřikovacích forem z oceli k ostatním nekovovým materiálům. Dále byl pozorován pozitivní či negativní vliv temperance tvarových desek při vstřikování. Z těchto hledisek nekovové materiály forem vykazovaly většinou srovnatelný, ba dokonce lepší vliv na mechanické vlastnosti vstřikovaných vzorků, především forma ze slitiny hliníku. Pozitivní zjištění je, že pořizovací cena duralu je nižší, než u ostatních materiálů. Proto materiál z hliníku v mnoha případech může být lepší alternativou ocelové formy. Aplikace temperančního systému tvarových desek forem se projevila výrazně jen v konkrétních případech, často pozitivně, občas i negativně.

Důležitým poznatkem laboratorního měření byla velká podobnost většiny výsledků a celkové vlivy sledovaných procesních podmínek se projevily pouze minimálně, především u zkoumaných polymerů LDPE a PP. Je možné tvrdit, že při výrobě vzorků z jiných termoplastů by mohly výsledky vykazovat úplně jiných zjištění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MLEZIVA, J. a J. ŠŇUPÁREK. *Polymery. Výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. vyd., Brno: Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [2] VÖRÖS, F. *Aktuální údaje o plastech a využití plastových odpadů* [online]. 2014 [cit. 2014-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11996-aktualni-udaje-o-plastech-a-vyuziti-plastovych-odpadu>>.
- [3] PLASTICS EUROPE. *Plastics – the facts 2014/2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data* [online]. 2015 [2015-03-04]. Dostupné z WWW: <http://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/final_plastics_the_facts_2014_19122>.
- [4] DUCHÁČEK, V. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2006. 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [5] KRÁLOVÁ, A. a L. KLIMÁNEK. *Zpracování polymerů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986. 272 s.
- [6] DOLEŽAL, V. *Plastické hmoty*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1977. 392 s.
- [7] LAPČÍK, L'. a M. RAAB. *Nauka o materiálech II*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2004. 132 s.
- [8] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J. a V. MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. 236 s. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [9] MENGES, G., MICHAELI, W., MOHREN, P. *How to Make Injection Molds* 3. vyd. Munich: HANSER, 2007. 612 s. ISBN 1-56990-282-8
- [10] LENFELD, P. a TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Zpracování plastů* [online]. [2014-12-12]. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm>.
- [11] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv autorů. *Termoplasty v praxi. Praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. Svazek I*. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. Nestr. ISBN 80-8622-915-7.

- [12] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv autorů. *Termoplasty v praxi. Praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. Svazek II.* Praha: Verlag Dashöfer, 2001. Nestr. ISBN 80-8622-915-7.
- [13] MAŇAS, M. a J. HELŠTÝN. *Výrobní stroje a zařízení. Gumárenské a plastikářské stroje II.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1990. 199 s. ISBN 80-214-0213-X.
- [14] STOKLASA K. *Zpracovatelské inženýrství – I.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. 107 s.
- [15] ŘEHULKA, Z. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů. Polymery.* Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2013. 230 s. ISBN 978-80-7204-833-5.
- [16] ESTER INDUSTRIES LTD. *ABS* [online]. 2010 [2015-01-10]. Dostupné u WWW: <<http://www.esterindustries.com/product.aspx?clink-id=7&mcid=109>>.
- [17] RYBNIKÁŘ, F., DITRYCH, Z., KLÁCEL, Z. a O. ORDELT. *Analýza a zkoušení plastických hmot. Makromolekulární látky.* Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [18] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2. Zkušební podmínky pro tvářené plasty.* Praha: Český normalizační institut, 1998. 16 s.
- [19] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. *Statické zkoušky krátkodobé* [online]. 2011 [2015-01-10]. Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf>.
- [20] ČSN EN ISO 179-1. *Stanovení rázové houževnatosti metodou charpy – Část 1. Neinstrumentovaná rázová zkouška.* Praha: Český normalizační institut, 2010. 24 s.
- [21] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. *Dynamické zkoušky* [online]. 2011 [2015-01-10]. Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf>.
- [22] ASYNDAR. *Princip vstřikování plastů* [online]. 2013 [2014-12-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.asyndar.com/Pages/vstrikovani-princip.aspx>>.
- [23] BOBČÍK L. a kolektiv. *Formy pro zpracování plastů. I. DÍL - Vstřikování termoplastů.* 2. vyd. BRNO: Uniplast, 1999. 134 s.
- [24] BOBČÍK L. a kolektiv. *Formy pro zpracování plastů. II. DÍL - Vstřikování termoplastů.* 2. vyd. BRNO: Uniplast, 1999. 214 s.

- [25] ŠVORČÍK, V. *Polymery "stručně"* [online]. [2015-01-10]. Dostupné z WWW: <<http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>>.
- [26] RAGAN, E., RUŽBARSKÝ, J., MAŇAS M. a kolektiv. *Vstrekovanie a spracovanie plastických hmôt*. Prešov: Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2008. 549 s. ISBN 978-80-553-0002-0
- [27] ALUMINIUM INJECTION MOLD. *Why Aluminium?* [online]. 2010 [2015-04-15]. Dostupné z WWW: <<http://aluminuminjectionmold.com/whyaluminum.html>>.
- [28] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [29] ARBURG. *ALLROUNDER 470 H Facts and figures* [online]. 2014 [2015-04-16]. Dostupné z WWW: <http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470H_TD_680311_en_GB.pdf>.
- [30] THE DOW CHEMICAL COMPANY. *Data sheet DOW LDPE 780E*. 2009. 2 s.
- [31] SLOVNAFT PETROCHEMICALS, S.R.O. *Data sheet TATREN IM 45 74 PP*. 1 s.
- [32] SAMSUNG *Data sheet STAREX High Gloss ABS HG-0760*. 2006. 1s.
- [33] PRECIZ, S.R.O. *Ocel 1.2343* [online]. 2012 [2015-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.2343>>.
- [34] LISANET. *Fotogalerie* [online]. 2014 [2014-11-28]. Dostupné z WWW: <http://www.linaset.cz/editor/filestore/Image/fotogalerie/Formy_Housing/IMG_5423.jpg>.
- [35] ARBURG. *Hydraulické stroje* [online]. [2015-03-14]. Dostupné z WWW: <<https://www.arburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/vstrikovani/vstrikovaci-stroje/hydraulicke-stroje/#!/prettyPhoto>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Plocha (počáteční průřez tělesa)
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
A_{cU}	Rázová houževnatost
A_m	Vrubová houževnatost
C	Uhlík
C	Uhlík
Cr	Chrom
E	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
F	Síla
HDPE	Polyetylen s vysokou hustotou / High Density Polyethylen
CH_3	Metylová skupina polymeru
LDPE	Polyetylen s vysokou hustotou / High Density Polyethylen
LLDPE	Lineární polyetylen s nízkou hustotou / Linear Low Density Polyethylen
MDPE	Polyetylen se střední hustotou / Medium Density Polyethylen
Mn	Mangan
Mo	Molybden
n	Počet hodnot (počet měření)
Ni	Nikl
PE	Polyetylen
PP	Polypropylen
Ra	Parametr drsnosti povrchu
Rm	Pevnost v tahu
S	Plocha (průřez tělesa)
T_m	Teplota tavení

ua	Nejistota měření typu A
ULDPE	Polyetylen s velmi nízkou hustotou / Ultra Low Density Polyethylen
UV	Ultrafialové (záření) / Ultraviolet
V	Vanad
W	Wolfram
ε	Poměrné prodloužení
ε_m	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti
λ	Tepelná vodivost
ρ	Hustota
σ	Mechanické napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Produkce polymerů (2002 - 2013) [3]	12
<i>Obr. 2</i> Celosvětová spotřeba vybraných polymerů 2013 [3].....	13
<i>Obr. 3</i> Úsek makromolekuly Polyetyleny [6]	14
<i>Obr. 4</i> Tvary makromolekul - lineární (a), rozvětvený (b), zesíťovaný (c) [4].....	16
<i>Obr. 5</i> Rozdělení polymerů dle chování při zahřátí [4]	17
<i>Obr. 6</i> Vytlačovací stroj šnekový [10]	20
<i>Obr. 7</i> Uspořádání válců ve válcovacích strojích [5]	21
<i>Obr. 8</i> Lisování [14]	21
<i>Obr. 9</i> Monomer PE [4]	22
<i>Obr. 10</i> Monomer PP[4]	23
<i>Obr. 11</i> Rozdělení druhů PP podle metylových skupin CH ₃ [1]	24
<i>Obr. 12</i> Monomery ABS [16].....	25
<i>Obr. 13</i> Vstřikovaný výrobek [34]	27
<i>Obr. 14</i> Proces vstřikování [22]	28
<i>Obr. 15</i> Vstřikovací cyklus [14].....	29
<i>Obr. 16</i> Vstřikovací cyklus plastikační jednotky [10].....	30
<i>Obr. 17</i> Schéma vstřikovacího stroje [10].....	31
<i>Obr. 18</i> Vstřikovací jednotka firmy ARBURG [35].....	32
<i>Obr. 19</i> Šneková plastikace [10]	32
<i>Obr. 20</i> Šneková předplastikace pístového stroje [12].....	33
<i>Obr. 21</i> Uzavírací jednotka firmy ARBURG [35]	33
<i>Obr. 22</i> Řídící jednotka firmy ARBURG [35].....	34
<i>Obr. 23</i> Tahová křivka [19]	47
<i>Obr. 24</i> Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [18]	49
<i>Obr. 25</i> Vrubová houževnatost metodou Charpy [21]	51
<i>Obr. 26</i> Opatření vrubu [21]	52
<i>Obr. 27</i> Sušící zařízení ARBURG	56
<i>Obr. 28</i> Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 470 H 1000-400	57
<i>Obr. 29</i> Model pravé tvarové desky vstřikovací formy	58
<i>Obr. 30</i> Model levé tvarové desky vstřikovací formy.....	59
<i>Obr. 31</i> Tvarové desky ocelové formy	60
<i>Obr. 32</i> Tvarové desky měděné formy	61

<i>Obr. 33 Tvarové desky hliníkové formy</i>	62
<i>Obr. 34 Temperační zařízení</i>	64
<i>Obr. 35 Zkušební stroj ZWICK 1456</i>	66
<i>Obr. 36 Ukončení tahové zkoušky (PP)</i>	67
<i>Obr. 37 Vyhodnocení E zkoušky tahem materiálu LDPE</i>	68
<i>Obr. 38 Vyhodnocení R_m zkoušky tahem materiálu LDPE</i>	69
<i>Obr. 39 Vyhodnocení ε_m zkoušky tahem materiálu LDPE</i>	70
<i>Obr. 40 Vyhodnocení E zkoušky tahem materiálu PP</i>	71
<i>Obr. 41 Vyhodnocení R_m zkoušky tahem materiálu PP</i>	72
<i>Obr. 42 Vyhodnocení ε_m zkoušky tahem materiálu PP</i>	73
<i>Obr. 43 Vyhodnocení E zkoušky tahem materiálu ABS</i>	74
<i>Obr. 44 Vyhodnocení R_m zkoušky tahem materiálu ABS</i>	75
<i>Obr. 45 Vyhodnocení ε_m zkoušky tahem materiálu ABS</i>	76
<i>Obr. 46 Zkušební stroj CEAST</i>	77
<i>Obr. 47 Zařízení na výrobu vrubů</i>	78
<i>Obr. 48 Vzorek s vrubem</i>	78
<i>Obr. 49 Vyhodnocení F_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu LDPE</i>	79
<i>Obr. 50 Vyhodnocení A_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu LDPE</i>	80
<i>Obr. 51 Vyhodnocení F_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu PP</i>	81
<i>Obr. 52 Vyhodnocení A_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu PP</i>	82
<i>Obr. 53 Vyhodnocení F_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu ABS</i>	83
<i>Obr. 54 Vyhodnocení A_m při zkoušce vrubové houževnatosti materiálu ABS</i>	84

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Třídění PE podle hustoty [1]</i>	22
<i>Tab. 2 Požadované teploty formy pro různé plasty [12]</i>	36
<i>Tab. 3 Materiály dílů forem s tepelným zpracováním [24]</i>	41
<i>Tab. 4 Materiály dílů forem s tepelným zpracováním (pokračování Tab. 3) [24]</i>	42
<i>Tab. 5 Příklady použití tuzemských slitin mědi [24]</i>	43
<i>Tab. 6 Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [17]</i>	49
<i>Tab. 7 Rozměry zkušebního tělesa metodou Charpy [20]</i>	52
<i>Tab. 8 Typy a rozměry vrubů [20]</i>	52
<i>Tab. 9 Vlastnosti materiálu DOW LDPE 780E [30]</i>	54
<i>Tab. 10 Vlastnosti materiálu TATREN IM 45 74 [31]</i>	55
<i>Tab. 11 Vlastnosti materiálu STAREX ABS HG-0760 [32]</i>	55
<i>Tab. 12 Parametry sušení dle polymeru</i>	56
<i>Tab. 13 Parametry vstřikovacího stroje Arburg [29]</i>	57
<i>Tab. 14 Značení oceli 19 522</i>	59
<i>Tab. 15 Legující prvky v oceli 19 522[30]</i>	59
<i>Tab. 16 Značení slitiny mědi 42 3001</i>	60
<i>Tab. 17 Značení slitiny hliníku 7075</i>	61
<i>Tab. 18 Legující prvky ve slitině hliníku 7075</i>	62
<i>Tab. 19 Procesní parametry vstřikovacího stroje</i>	63
<i>Tab. 20 Parametry vytemperování formy</i>	64
<i>Tab. 21 Parametry zkušebního zařízení</i>	66
<i>Tab. 22 Výsledky měření zkoušky tahem (materiál LDPE)</i>	68
<i>Tab. 23 Výsledky měření zkoušky tahem (materiál PP)</i>	71
<i>Tab. 24 Výsledky měření zkoušky tahem (materiál ABS)</i>	74
<i>Tab. 25 Výsledky měření vrubové houževnatosti (materiál LDPE)</i>	79
<i>Tab. 26 Výsledky měření vrubové houževnatosti (materiál PP)</i>	81
<i>Tab. 27 Výsledky měření vrubové houževnatosti (materiál ABS)</i>	83

SEZNAM PŘÍLOH

- PI: Data měření - tahová zkouška - LDPE
- PII: Data měření - tahová zkouška - PP
- PIII: Data měření - tahová zkouška - ABS
- PIV: Data měření - zkouška vrubové houževnatosti - LDPE
- PV: Data měření - zkouška vrubové houževnatosti - PP
- PVI: Data měření - zkouška vrubové houževnatosti - ABS

PŘÍLOHA P I: DATA MĚŘENÍ - TAHOVÁ ZKOUŠKA - LDPE

Ocelová forma			Měděná forma			Hliníková forma		
bez teploty			bez teploty			bez teploty		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	εm [%]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	εm [%]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	εm [%]
293	11,1	88,5	265	11,1	86,6	215	11,3	80,2
313	11	84,1	158	11,2	86,4	242	11,2	80,2
261	11,2	92,4	140	11,2	89,8	278	11,3	54,8
260	11,2	82,1	265	11,1	84,2	256	11,4	85,3
258	11	56,9	214	11,2	83,7	215	11,3	81,5
266	11,1	88,2	225	11,2	89,9	235	11,4	53,8
220	10,9	55,8	224	11,1	81,9	288	11,2	54,2
258	11,1	82	184	11,2	90,4	239	11,3	81
266	11	85,8	138	11,2	82,1	272	11,4	57,9
267	11,1	45,6	175	11	59,7	244	11,4	78,7
218	11	56,5	215	11	58,8	288	11,3	57,7
227	11,1	50,3	215	11,2	89,7	222	11,2	50
252	11,1	56,4	155	11,2	85,2	291	11,2	52,7
241	11,1	86,6	246	11,1	59,9	271	11,4	66,9
234	11,2	81	311	11,1	85,1	404	11,3	60,4
228	11,1	76,8	197	11,2	81,3	260	11,4	65,8
223	11	77,5	383	11	83,2	228	11,3	51,8
204	11,1	78	204	11,1	81,3	264	11,3	58,7
229	11	77,7	230	11,2	83,7	256	11,3	67,3
220	10,8	83	235	11,1	89,8	219	11,3	54
256	11,1	56,7	192	10,9	84,2	219	11,3	53,2
271	10,9	81,9	249	11	77,6	244	11,4	75,5
244	11,1	88,5	163	11	87	209	11,5	79,5
231	11,2	80,5	212	11,1	86,5	290	11,3	53
246	11	49,7	312	11	83,1	284	11,3	59,1
246	11	85,8	217	11,1	58,3	217	11,3	64,7
225	11,1	84,5	224	11,2	80,8	211	11,5	86,9
215	11,2	90,4	271	11	62,6	250	11,5	80
313	11	52,1	262	11,1	64,1	180	11,4	64,5
241	11,3	82,3	325	11,2	63,7	274	11,4	59,2

Ocelová forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
266	11	62,3
241	10,9	54,3
255	11,3	83,3
209	11,2	53,6
223	11	56,6
227	11,2	80,5
276	11,1	51,1
260	11,3	83,6
216	11	50,7
211	11,2	80,3
216	11	81,2
190	10,8	46,9
215	11	52,7
238	11,1	83,6
209	11	79,5
188	11,1	79,1
248	11,1	50
221	11,1	52,4
249	11,1	51,9
257	11,1	61,3
243	11,1	57,1
225	11,1	80,1
263	11	84
246	11,1	79,1
217	11,1	83,9
317	11	86
241	11,1	85,6
244	11	53,5
271	10,9	79,4
244	11	52,7

Měděná forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
205	11,3	84,2
191	11,5	87,5
251	11,5	90,9
181	11,4	84,1
217	11,5	86,7
211	11,7	84,8
210	11,3	91,9
226	11,4	80,5
202	11,4	89,3
206	11,2	72,1
347	11,1	84,2
283	11,3	61,6
269	11,1	83,8
225	11,2	90,8
218	11,4	78
290	11,2	90,3
179	11	71,3
301	11,2	72,4
295	11,2	84,7
188	11,2	87,7
372	11,1	89,2
313	11,3	85,6
270	11,2	91,4
306	11,4	58,9
445	11,3	66,2
191	11,3	57,9
190	11,3	61,6
211	11,4	65,8
189	11,4	89
225	11,3	64,9

Hliníková forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
185	11,3	82,3
254	11,4	59,4
175	11,4	63,5
193	11,3	63,1
304	11,3	85,6
311	11,4	62,4
284	11,4	66,4
216	11,4	62
207	11,4	61,2
193	11,2	89,2
234	11,2	82,4
235	11,5	84,8
258	11,5	82,9
223	11,2	87,6
264	11,4	84,4
240	11,2	55,3
213	11,3	64,4
246	11,2	60,7
208	11,4	73,5
213	11,2	83,3
240	11,4	87,5
234	11,2	83,3
235	11,1	64,3
217	11,3	61
205	11,4	85,4
225	11,3	87,2
265	11,4	87,8
237	11,4	67,6
215	11,3	61,9
212	11,3	75,6

PŘÍLOHA P II: DATA MĚŘENÍ - TAHOVÁ ZKOUŠKA - PP

Ocelová forma			Měděná forma			Hliníková forma		
bez temperace			bez temperace			bez temperace		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	εm [%]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	εm [%]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	εm [%]
1790	24,6	2,8	1640	25,6	2,8	1530	25,9	2,7
1820	25,1	2,7	1300	25,3	3	2000	25,4	2,8
1850	25,5	2,6	1680	25,9	2,8	1360	25,5	2,9
1710	25,1	2,7	1710	25,4	2,8	1730	25,7	2,8
1700	24,7	2,8	2160	25,7	2,8	1560	25,5	2,9
1500	24,8	2,8	1620	25,9	2,8	2070	25,4	2,8
1730	24,7	2,7	2240	25,2	2,7	1750	25,4	2,8
1830	24,6	2,7	1970	25,8	2,9	1430	25,5	2,9
2050	25,5	2,6	1620	25,4	2,9	1280	25,4	2,9
1700	24,6	2,6	1940	25,3	2,9	1500	25,6	2,9
1410	24,4	2,9	2090	25,8	2,7	1550	25,6	2,9
1650	25,7	3	2170	25,4	2,8	1740	25,5	2,8
1840	25,7	2,7	2380	25,5	2,7	1280	25,5	2,9
1550	25,5	2,8	2130	25,5	2,7	1510	25,6	2,8
1890	25,6	2,7	1690	25,6	2,8	1660	25,4	2,8
1120	25,9	3	1660	25,3	2,9	2010	25,5	2,9
1720	25,8	2,6	1820	25,3	2,8	1470	25,7	2,9
1550	25,1	2,7	2130	25,4	2,7	1530	25,5	2,9
1660	25,5	2,7	1600	25,5	2,8	1340	25,3	2,7
1950	25,6	2,7	2140	25,4	2,7	1750	25,6	2,8
1590	25,7	2,8	1340	25,2	3	1450	25,6	2,8
1380	25,2	2,9	1730	25,3	2,8	1620	25,3	2,8
1670	24,9	2,7	2120	25,5	2,7	1470	25,4	2,8
1780	25,7	2,8	1800	25,5	2,8	1730	25,5	2,8
1840	25,1	2,7	1840	25,6	2,8	1660	26	2,9
1590	25,2	2,6	1330	25,6	2,9	1800	25,5	2,8
1780	25,5	2,6	2300	25,8	2,8	1540	25,7	2,8
1760	25,6	2,7	1930	25,3	2,7	1520	25,9	2,8
1760	25,6	2,8	1430	25,3	2,7	1440	25,7	2,8
1780	25,8	2,7	1230	25,1	2,9	1370	25,6	2,8

Ocelová forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
1810	25,3	2,6
1910	25,2	2,6
2120	25,3	2,6
1920	25,3	2,6
1950	25,2	2,6
1870	25	2,7
1890	25,1	2,6
2040	25,3	2,7
1930	25,1	2,8
1980	25,2	2,6
1970	25,1	2,6
2060	24,8	2,6
2090	25,3	2,7
1990	24,8	2,6
1950	25,1	2,5
2020	25,2	2,6
1890	25	2,6
2020	25,2	2,5
2110	25	2,6
1930	25,1	2,7
1800	25	2,7
2020	25,2	2,6
1940	25,1	2,6
1990	24,8	2,7
1760	25,1	2,7
1810	25,4	2,8
1920	25,1	2,7
1980	24,7	2,6
1920	25	2,7
1860	25,2	2,7

Měděná forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
1630	25,8	2,7
2210	24,9	2,8
1790	25,3	2,9
2150	25,2	2,9
1710	25,2	2,8
1320	25,5	2,9
2280	25,9	2,7
2150	25,2	2,7
1760	25,1	3
1800	25,2	2,8
2270	24,9	2,7
1640	25,4	2,9
2130	25,3	2,7
1650	25,5	2,9
1980	24,8	3
2000	25,4	2,8
1840	25,1	2,8
1780	24,7	2,9
1850	25,2	2,8
1580	25,6	2,9
1510	25,6	2,8
2350	25,3	2,6
1390	25,4	3
1480	25,6	2,9
2090	25,2	2,7
1930	25,7	2,8
2080	25,1	2,8
1610	25,1	2,9
1450	25,2	2,9
1810	25,5	2,7

Hliníková forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
1450	25	2,7
1480	25,6	2,7
1850	25,9	2,7
1700	24,9	2,6
1710	25,9	2,7
1280	25,6	2,8
1890	25,7	2,8
2470	25,8	2,6
1590	25,7	2,7
2160	25,4	2,6
1690	25,5	2,7
1670	25,8	2,6
2720	25,5	2,5
1630	25,4	2,6
1590	25,1	2,7
1940	25,8	2,8
2030	25,6	2,7
1810	25,7	2,7
1680	25,5	2,7
1660	25,8	2,8
1960	25,7	2,8
1820	25,5	2,8
1650	25,1	2,8
1480	25,5	2,8
1730	25,7	2,9
998	25,6	3
1620	25,8	2,8
1730	25,6	2,8
1690	25,4	2,6
2110	25,5	2,7

PŘÍLOHA P III: DATA MĚŘENÍ - TAHOVÁ ZKOUŠKA - ABS

Ocelová forma			Měděná forma			Hliníková forma		
bez temperace			bez temperace			bez temperace		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]	E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
2970	50,9	1,8	2440	52,3	1,9	3150	52	1,8
2750	50,5	1,9	2970	51,4	1,8	3180	51,7	1,9
2330	50,6	1,9	1670	52,5	2	2260	51,7	1,9
3360	50,9	1,7	4020	52	1,7	2820	52	1,8
2290	51	1,9	3520	51,3	1,6	2700	51,9	1,9
2530	50,3	1,8	2550	52,7	1,8	2780	51,6	1,8
3090	50,7	1,8	2450	52,1	1,9	2500	52	1,9
2220	50,7	1,9	3960	52,3	1,8	2590	52	1,9
3010	50,5	1,8	1470	51,9	2	2750	51,9	1,9
2690	50,6	1,9	2000	51,1	1,9	3730	52,1	1,7
3250	50,9	1,8	3130	51,9	1,8	2770	52,1	1,9
2770	50,7	1,9	3690	52,1	1,7	3070	52,1	1,8
3080	51	1,8	2710	52	1,8	3170	52,6	1,8
2680	50,9	1,8	2970	52,2	1,8	2510	52,5	1,9
3430	50,9	1,8	3040	52,2	1,9	3590	52,6	1,7
3090	50,7	1,8	3760	52,2	1,8	3190	52,7	1,8
3540	51,2	1,9	2980	51,5	1,7	3350	52,1	1,7
3310	51,2	1,8	1900	52,2	1,9	2650	52,3	1,8
3260	51	1,8	3080	52	1,9	3270	52,8	1,8
3190	50,9	1,8	2870	52	1,8	3780	52,7	1,7
2280	50,9	1,9	3690	52,2	1,8	3070	52,8	1,8
2970	50,2	1,8	2860	52	1,8	3560	52,4	1,7
2950	50,8	1,8	2940	52,1	1,8	2580	52,3	1,7
2940	51,1	1,8	3040	52,2	1,8	3190	52,6	1,7
2830	50,7	1,8	2410	51,3	1,8	2790	52	1,8
3720	51,1	1,8	3150	54	1,8	2710	51,8	1,8
3240	51,3	1,9	3310	53	1,8	2930	52	1,7
3670	51,2	1,8	3120	52,2	1,7	3500	52,6	1,7
2570	50,7	1,8	2280	53	1,9	3190	52,5	1,8
2270	50,7	1,8	1610	52,5	2	3170	51,3	1,7

Ocelová forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
1450	50,6	1,8
2650	50,8	1,8
2690	51	1,8
2720	50,9	1,7
2970	50,8	1,8
2470	50,7	1,8
2590	50,7	1,8
1840	50,8	2
2670	50,7	1,8
2130	51	1,9
2440	50,7	1,8
2350	51,2	1,9
1770	50,8	1,9
2640	50,8	1,8
1390	49,8	1,9
2070	50,7	1,8
2170	50,5	1,9
2120	50,6	1,9
2880	50,6	1,8
2580	50,5	1,9
1200	50,4	2,1
1910	51	2
1750	50,1	2
1710	50,5	2
2040	50,2	1,9
1540	49,8	1,8
1730	50,1	1,9
2120	50,7	1,8
1800	50,1	1,9
1480	50,3	1,9

Měděná forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
2120	52,2	1,9
2650	51,9	1,8
2490	52,2	2
2690	52,4	1,9
1060	51,1	2,3
3630	52,6	1,8
1240	51,5	2,1
2260	51,9	1,9
3430	52,3	1,8
3190	52,2	1,8
2870	50,5	2,1
2350	52,5	1,9
2020	51,6	1,9
3230	50,2	2,1
2600	52,9	1,8
3100	52,4	1,8
3670	51,5	2
2430	52	1,8
3410	52,7	1,8
3320	52,9	1,8
3760	52,4	1,7
3580	52,3	1,8
3790	51,9	1,7
3030	52,2	1,8
2430	51,7	1,9
3930	52,5	1,7
2920	50,5	2,1
3100	52,2	1,8
4090	50,5	2
3420	52,6	1,7

Hliníková forma		
s temperací		
E [Mpa]	Rm [Mpa]	ϵ_m [%]
3480	51,5	1,7
3020	52,2	1,8
2590	51,1	1,9
2620	52,1	1,8
2210	51,7	1,9
3250	52,3	1,8
2790	52,5	1,8
2590	51,8	1,8
3200	51,7	1,8
2460	52	1,9
2230	51,3	1,9
2570	51,7	1,8
2630	51,9	1,8
2770	52	1,8
2160	51,5	1,9
3070	51,5	1,9
3320	51,9	1,8
2880	51,8	1,8
3350	52	1,8
3130	51,7	1,8
3470	51,5	1,7
2850	51,4	1,8
2810	50,4	1,7
2740	51,2	1,8
2630	51,1	1,9
2850	51,5	1,9
3020	51,6	1,8
2580	51,9	1,8
2780	51,6	1,8
2920	51,6	1,8

**PŘÍLOHA P IV: DATA MĚŘENÍ - ZKOUŠKA VRUBOVÉ
HOUŽEVNATOSTI – LDPE**

Ocelová forma		Měděná forma		Hliníková forma	
bez temperace		bez temperace		bez temperace	
Fm [N]	Am [KJ/m2]	Fm [N]	Am [KJ/m2]	Fm [N]	Am [KJ/m2]
315,30	29,20	326,12	23,59	307,18	25,26
304,47	27,24	323,41	21,78	318,00	26,75
299,06	24,23	334,24	27,99	322,06	29,31
293,64	21,50	318,00	24,97	328,83	30,27
297,70	22,18	318,00	28,18	327,47	30,29
313,94	27,83	313,94	26,17	309,88	22,05
299,06	21,32	328,83	27,41	323,41	24,79
311,24	23,16	313,50	23,99	297,7	24,2
304,47	23,20	305,82	23,97	305,82	27,75
301,76	22,10	299,06	22,75	297,7	26,98
299,06	22,60	315,30	23,90	319,36	26,39
312,59	27,88	307,18	23,15	313,94	23,98
312,59	23,33	305,82	23,65	312,59	26,28
311,24	23,41	301,76	22,39	324,77	24,38
315,30	23,93	320,71	24,17	307,18	25,76
313,94	22,77	305,82	22,95	323,41	29,64
313,94	24,15	293,64	22,55	318,00	23,75
295,00	21,17	311,24	25,76	313,94	24,29
299,06	21,77	301,76	23,43	323,41	24,67
295,00	21,30	301,76	22,35	307,18	26,3
312,59	23,97	293,64	20,85	313,94	28,45
307,18	23,31	303,12	22,53	330,18	26,78
319,36	23,77	296,35	25,03	326,12	25,35
308,53	21,77	307,18	22,32	349,13	26,47
309,88	23,10	316,65	23,98	322,06	23,18
311,24	25,57	293,64	21,99	301,76	24,77
323,41	26,48	289,58	21,58	301,76	23,13
304,47	23,54	303,12	23,56	316,65	24,14
307,18	23,29	312,59	23,40	311,24	28,09
319,36	26,49	312,59	22,70	300,41	22,35

Ocelová forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
254,40	3,69
296,35	27,17
293,64	22,93
309,88	22,60
288,23	21,87
300,41	22,06
297,70	22,62
285,53	26,28
293,64	22,00
295,00	20,45
274,70	18,91
301,76	25,54
273,35	19,96
285,53	21,28
303,12	22,78
307,18	23,29
286,88	22,38
296,35	21,94
290,94	27,15
293,64	22,20
304,47	23,05
293,64	21,68
296,35	22,09
293,64	21,45
300,41	22,67
295,00	21,24
301,76	22,63
290,94	21,74
297,70	22,59
292,29	21,25

Měděná forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
292,29	24,31
290,94	22,06
307,18	22,66
307,18	23,10
295,00	21,82
289,58	22,20
299,06	22,03
300,41	22,27
285,53	25,86
285,53	23,65
286,88	21,89
284,17	25,47
281,47	23,53
293,64	21,66
289,58	24,64
273,35	19,22
299,06	22,27
301,76	22,11
295,00	22,05
299,06	21,97
288,23	22,20
300,41	22,80
284,17	21,69
281,47	19,89
308,53	23,03
303,12	22,61
288,23	24,16
320,71	24,01
313,94	23,46
289,58	24,25

Hliníková forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
286,88	20,24
299,06	24,83
301,76	22,10
308,53	22,92
307,18	22,35
297,70	22,24
300,41	22,99
307,18	25,94
307,18	27,75
308,53	25,71
316,65	26,02
323,41	26,81
318,00	23,96
318,00	24,50
315,30	26,61
308,53	24,79
300,41	27,13
299,06	21,84
297,70	27,23
301,76	27,21
308,53	22,32
293,64	24,37
307,18	25,56
305,82	25,86
307,18	27,75
307,18	27,49
309,88	29,90
311,24	23,30
293,64	22,03
308,53	25,94

**PŘÍLOHA P V: DATA MĚŘENÍ - ZKOUŠKA VRUBOVÉ
HOUŽEVNATOSTI – PP**

Ocelová forma		Měděná forma		Hliníková forma	
bez temperace		bez temperace		bez temperace	
Fm [N]	Am [KJ/m2]	Fm [N]	Am [KJ/m2]	Fm [N]	Am [KJ/m2]
592,70	4,65	606,23	4,61	602,17	7,48
581,88	4,59	607,59	8,97	592,70	7,6
579,17	5,50	638,71	5,38	809,21	5,33
576,46	4,59	561,58	5,79	767,26	4,67
541,28	4,75	579,17	9,13	845,75	5,4
576,46	4,79	615,71	9,13	625,18	9,45
531,81	4,75	607,59	4,40	734,79	5,04
538,57	4,75	690,13	4,81	775,38	5,17
560,22	8,34	630,59	9,03	776,74	4,65
515,57	5,40	645,48	6,13	623,83	4,65
671,19	4,86	568,34	5,21	813,27	4,99
548,05	5,33	637,36	5,47	761,85	5,08
575,11	8,39	615,71	4,20	591,35	8,37
523,69	7,82	660,36	4,91	608,94	10,19
557,52	5,14	654,95	5,15	604,88	8,6
676,60	4,72	590,00	7,74	752,38	5,36
557,52	8,11	665,77	4,99	649,54	8,28
511,51	8,13	699,60	4,18	560,22	7,58
514,22	7,91	630,59	9,29	740,20	4,5
534,51	8,23	550,75	8,13	713,14	4,82
552,11	4,53	573,76	5,20	733,43	5,44
506,10	8,67	602,17	5,67	729,37	5,34
485,80	8,28	631,94	9,17	815,98	5,12
533,16	4,72	577,82	5,81	595,41	9,33
572,40	7,69	573,76	7,67	884,99	5,2
537,22	4,87	627,88	9,99	749,67	5,17
538,57	8,71	607,59	5,76	694,19	5,39
537,22	8,63	626,53	9,00	614,35	7,57
592,70	7,91	748,32	5,38	600,82	8,73
497,98	5,11	761,85	4,92	706,37	4,58

Ocelová forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
557,52	4,82
571,05	8,03
564,28	4,64
545,34	5,05
604,88	4,85
538,57	4,75
529,10	8,11
566,99	4,70
577,82	5,26
573,76	7,50
751,03	4,59
917,47	4,83
588,64	5,51
825,45	4,84
650,89	4,88
537,22	7,89
525,40	8,16
507,45	5,44
550,75	8,16
565,64	4,67
546,69	8,12
912,06	4,74
541,28	5,11
549,40	4,47
525,04	8,30
534,51	8,97
531,81	4,80
602,17	4,33
525,04	4,05
558,87	4,57

Měděná forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
552,11	7,83
728,02	5,02
495,27	4,90
659,01	5,62
575,11	4,54
918,82	5,12
687,43	4,31
640,06	5,23
764,56	5,49
596,76	5,59
656,30	5,11
527,75	6,94
608,94	5,12
627,88	5,66
642,77	5,37
650,89	4,93
741,55	3,88
841,69	4,99
594,05	4,11
803,80	4,78
594,05	5,29
590,00	8,93
590,00	5,37
572,40	8,92
610,29	4,96
669,83	4,09
702,31	5,08
539,93	5,22
591,35	4,56
627,88	5,18

Hliníková forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
688,78	5,51
614,35	7,83
637,36	4,96
572,40	7,52
650,89	5,51
741,55	4,94
630,59	4,66
806,51	4,86
707,72	8,04
686,07	4,75
682,01	4,07
638,71	5,50
592,70	8,00
836,28	4,65
627,88	5,48
686,07	7,96
760,50	5,45
822,75	4,72
711,78	5,21
659,01	5,16
746,97	5,02
566,99	7,56
782,15	5,67
614,35	5,53
618,41	8,06
836,28	4,78
783,50	4,46
874,17	5,51
611,65	7,75
791,62	4,52

**PŘÍLOHA P VI: DATA MĚŘENÍ - ZKOUŠKA VRUBOVÉ
HOUŽEVNATOSTI – ABS**

Ocelová forma		Měděná forma		Hliníková forma	
bez temperace		bez temperace		bez temperace	
Fm [N]	Am [KJ/m2]	Fm [N]	Am [KJ/m2]	Fm [N]	Am [KJ/m2]
700,96	6,72	767,26	6,33	783,50	5,96
787,56	5,60	799,74	6,68	672,54	6,86
692,74	5,72	780,80	5,58	801,09	6,57
795,68	5,58	756,44	2,15	964,83	6,19
829,51	5,14	837,63	6,04	677,95	6,12
772,68	5,15	737,49	2,12	849,81	6,05
699,60	6,38	841,69	6,19	710,43	5,41
775,38	5,55	699,60	5,96	836,28	5,62
798,39	5,40	631,94	5,46	562,93	4,68
686,07	5,16	830,86	5,63	849,81	5,62
714,49	6,09	886,35	6,04	641,42	6,65
769,97	5,17	779,44	6,01	700,96	7,63
699,60	6,29	782,15	5,73	843,04	5,36
652,24	5,67	1181,34	6,49	676,60	6,59
767,26	5,84	802,45	5,50	876,87	6,39
687,43	5,88	803,80	6,38	832,22	5,97
779,44	5,30	779,44	1,87	745,61	6,27
763,20	5,40	899,88	5,59	631,94	7,04
824,10	5,69	653,60	5,34	852,52	5,74
856,58	5,50	986,48	6,68	755,09	5,66
797,03	5,68	838,98	6,38	1129,92	6,17
691,49	5,66	995,96	6,16	598,11	4,81
811,92	5,50	838,98	6,05	742,91	1,87
695,54	5,67	786,21	6,21	1110,98	9,94
782,15	5,58	844,40	6,08	723,96	2,15
791,62	5,13	1028,43	6,58	650,89	6,47
756,44	5,25	982,42	6,15	598,11	5,03
755,09	6,12	843,04	5,94	878,23	6,04
801,09	5,35	807,86	2,53	821,39	5,95
825,45	5,95	944,53	6,16	703,66	7,58

Ocelová forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
971,60	5,79
757,79	5,93
771,32	5,47
722,61	5,76
755,09	5,57
740,20	5,71
698,25	5,73
711,78	5,95
751,03	6,16
825,45	6,22
786,21	5,81
729,37	5,34
795,68	5,67
771,32	5,32
790,27	5,90
836,28	6,27
694,19	5,59
775,38	5,57
649,54	5,50
699,60	5,95
813,27	5,59
767,26	5,73
787,56	5,41
644,12	5,68
713,14	5,99
795,68	6,22
916,12	5,54
659,01	5,48
653,60	5,31
836,28	6,62

Měděná forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
698,25	7,08
699,60	5,95
634,65	6,48
814,63	6,19
634,65	6,76
664,42	6,50
626,53	6,28
705,02	6,19
745,61	5,53
820,04	6,11
634,65	6,09
717,20	6,60
667,13	6,81
657,66	7,06
694,19	5,91
683,37	6,60
679,31	6,63
714,49	6,77
631,94	6,54
34,79	2,05
948,59	6,64
672,54	6,29
675,25	6,51
741,55	5,53
702,31	6,49
749,67	7,00
741,55	5,81
736,14	6,98
717,20	7,06
834,92	6,93

Hliníková forma	
s temperací	
Fm [N]	Am [KJ/m2]
603,53	5,01
742,91	7,32
579,17	4,57
836,28	5,39
679,31	6,72
811,92	7,40
733,43	7,53
679,31	7,03
641,42	6,71
675,25	6,70
696,90	5,61
722,61	6,03
655,77	7,01
579,17	4,29
608,94	6,36
837,63	5,79
843,04	5,31
665,77	5,73
665,77	6,66
615,71	6,57
676,60	7,54
818,69	5,13
664,42	6,87
815,98	5,99
852,52	5,81
705,02	6,88
736,14	6,05
741,55	5,74
676,60	6,79
737,49	6,05