

Porovnání vlastností konstrukčních polymerů a kovů

Bc. Petr Stuchlík

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Stuchlík**
Osobní číslo: **T11180**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Porovnání vlastností konstrukčních polymerů a kovů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Porovnejte vlastnosti vybraných typů polymerů a kovů.
3. Vypracujte návrh výrobku z termoplastu jako alternativu výrobku z kovu.
4. Vypracujte ekonomické zhodnocení obou návrhů.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. David Maňas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

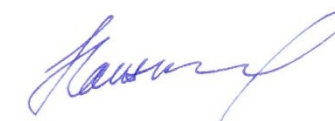
Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Stuchlík Petr

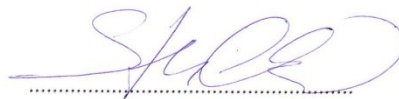
Obor: Výrobní inženýrství

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 1. 5. 2013



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 nevydělečně 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.

²⁾ 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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Náplní této diplomové práce je zhodnocení možností využití konstrukčního polymeru jako náhrady oceli v montážním nástroji. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou.

V teoretické části je popsáno obecné rozdělení a vlastnosti plastů a základních kovových materiálů. Dále jsou tyto materiály porovnány s využitím specifické pevnosti v tahu. Zmíněny jsou základní druhy mechanických zkoušek krátkodobých a zpracovatelské technologie vstřikování.

Praktická část řeší návrh výrobku, návrh vhodného typu polymeru, analýzu procesu vstřikování, analýzu mechanického chování, ekonomické zhodnocení navrženého nástroje a zhodnocení realizovatelnosti návrhu.

Klíčová slova: polymery, vstřikování, analýza, náhrada kovu, specifická pevnost v tahu

ABSTRACT

The content of this thesis is to evaluate the use of engineering polymer to substitute steel in assembly tool. The work is divided into theoretical and practical parts.

The theoretical part describes the general distribution and properties of plastics and basic metals. Further the comparison of properties of these materials using specific tensile strength. Mentioned are the basic types of mechanical tests and injection molding processing technology.

The practical part deals with product design, choice of suitable type of polymer, injection process analysis, analysis of mechanical behavior, economic evaluation of the proposed tool design and the final evaluation of the feasibility of the product.

Keywords: plastics, polymers, injection, analysis, substitution of metal, specific tensile strength

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. za odborné vedení, a pomoc při zpracování této diplomové práce. Dále za cenné rady a velkou ochotu děkuji panu doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc., panu doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D a panu Ing. Štěpánu Šandovi, Ph.D..

Dále za pomoc při realizaci prototypového modelu děkuji panu Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D., a za poskytnuté materiálové vlastnosti a ekonomické informace firmě BASF, spol. s r.o., konkrétně panu Martinu Dobroňovi.

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

Ve Zlíně 1. 5. 2013

.....

OBSAH

ÚVOD	12
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ	14
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	14
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ DLE APLIKACE	15
1.2.1 Komoditní polymery	16
1.2.2 Konstrukční polymery	16
1.2.3 Speciální polymery a Ultra polymery	16
1.3 ROZDĚLENÍ PLASTŮ DLE TEPLOTNÍHO CHOVÁNÍ	16
1.3.1 Termoplasty	16
1.3.2 Reaktoplasty	16
1.3.3 Kaucuky, pryže, elastomery	17
1.4 ROZDĚLENÍ PLASTŮ DLE NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY	18
1.4.1 Amorfnní plasty	18
1.4.2 Krystalické (semikrystalické) plasty	18
1.5 MODIFIKACE VLASTNOSTÍ POLYMERŮ	19
2 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	24
2.1 OCEL	24
2.1.1 Základní třídy konstrukčních ocelí (třídy 10 – 19) – značení dle starého způsobu	24
2.1.2 Základní rozdělení ocelí – způsob značení dle ČSN EN 10 027-2 – nový způsob	27
2.1.2.1 Nelegované oceli	27
2.1.2.2 Legované oceli	27
2.1.3 Značení ocelí dle EN 10027-1	28
2.2 HLINÍK	29
2.2.1 Slitiny hliníku určené k tváření	30
2.3 TITAN	31
2.3.1 Slitiny titanu	31
3 POROVNÁNÍ SPECIFICKÉ PEVNOSTI V TAHU POLYMERŮ A KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	33
4 ZKOUŠKY MATERIÁLŮ – STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ	36
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA	36
4.1.1 Zkušební tělesa	36
4.1.2 Kondicionování	38
4.1.3 Zkušební stroj	38
4.1.4 Výpočet a vyjádření výsledků	39
4.1.4.1 Napětí	39
4.1.4.2 Poměrné prodloužení	39
4.1.4.3 Modul pružnosti určený regresní analýzou	39
4.1.5 Smluvní pracovní diagram tahové zkoušky	40
4.1.5.1 Mez úměrnosti (U)	41
4.1.5.2 Mez pružnosti (E)	42

4.1.5.3	Mez kluzu (K).....	42
4.1.5.4	Mez pevnosti v tahu (S).....	43
4.2	OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	43
4.2.1	Zkušební tělesa.....	44
4.2.2	Pevnost v ohybu.....	45
4.2.3	Stanovení modulu pružnosti z ohybu.....	46
4.3	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	47
4.3.1	Tvrdost dle Brinella.....	48
4.3.1.1	Zkušební tělesa.....	50
4.3.1.2	Zkušební zařízení.....	50
4.3.2	Tvrdost dle Vickerse.....	50
4.3.3	Tvrdost dle Rockwella.....	51
4.3.3.1	Zkušební zařízení.....	52
4.3.3.2	Zkušební tělesa.....	52
4.3.4	Tvrdost dle Knoopu.....	52
4.3.5	IRHD.....	53
4.3.6	Tvrdost Shore.....	53
4.3.7	Tvrdost dle Barcola.....	55
4.4	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY JEDNORÁZOVÉ.....	55
4.4.1	Rázová a vrubová houževnatost metoda Charpyho kladiva.....	55
4.4.1.1	Zkušební tělesa.....	58
4.4.2	Metoda Izod.....	59
4.4.3	Rázová zkouška pádem.....	61
4.4.4	Rázové zkoušky tahem.....	62
5	ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE.....	64
5.1	OBECNÝ POPIS VSTŘIKOVÁNÍ.....	64
5.1.1	Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku.....	65
5.2	VSTŘIKOVÁNÍ GIT.....	66
5.2.1	Krátký vstřík – dofukovací způsob.....	67
5.2.2	Dlouhý vstřík – vyfukovací způsob.....	68
5.3	VÍCEKOMPONENTNÍ VSTŘIKOVÁNÍ.....	68
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	70
6	STANOVENÍ CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	71
7	NÁVRH VÝROBKU/NÁSTROJE Z POLYMERU.....	73
7.1	SOUČASNÉ ŘEŠENÍ MONTÁŽNÍHO NÁSTROJE.....	73
7.2	NÁVRH VÝROBKU Z POLYMERU.....	73
7.2.1	Hlavní část nástroje.....	76
7.2.2	Koncovka rukojeti.....	76
7.2.3	Zhodnocení navrženého tvaru a geometrie.....	77
7.3	ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MODELU.....	77
7.4	POUŽITÉ MATERIÁLY.....	78
7.4.1	PA Ultramid A3HG7 (plněn 35% skelných vláken).....	78
7.4.2	PPS Fortron 1140E7.....	79
8	ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	81

8.1	MODEL S VYTVOŘENOU SÍTÍ.....	81
8.2	PROCESNÍ PODMÍNKY	82
8.3	ZVOLENÝ VSTŘIKOVACÍ STROJ	83
8.4	ANALÝZA POLOHY VTOKU	83
8.4.1	Určení vhodného místa pro vtokové ústí	84
8.5	PLNĚNÍ DUTINY FORMY	88
8.6	VZNIK STUDENÝCH SPOJŮ	88
8.7	TENDENCE K TVORBĚ PROPADLIN	89
8.8	PRŮBĚH TLAKU V MÍSTĚ VSTŘIKU	90
8.9	VÝVOJ TEPLoty V PRŮBĚHU CELÉHO CYKLU	91
8.9.1	Vývoj teploty u trnu nástroje.....	91
8.9.2	Vývoj teploty u rukojeti nástroje.....	93
8.9.3	Vývoj teploty v řezu – polovina rukojeti nástroje.....	95
8.10	ČAS ZATUHnutí VÝROBKU.....	97
8.11	UZAVÍRACÍ SÍLA	99
8.12	CELKOVÁ DEFORMACE VSTŘIKOVANÉHO VÝROBKU.....	101
8.13	HMOTNOST VSTŘIKOVANÉ ČÁSTI	102
8.14	VOLBA VHODNÉHO TYPu POLYMERU	103
9	MECHANICKÁ ANALÝZA.....	105
9.1	NASTAVENÍ MATERIÁLU UVAŽOVANÉHO MODELU	106
9.2	MECHANICKÁ ANALÝZA TRNU	106
9.2.1	Pevné uchycení poloviny trnu.....	108
9.2.2	Částečné uchycení poloviny trnu	109
9.2.3	Výsledky simulace v případě ocelového trnu	110
9.3	MECHANICKÁ ANALÝZA ŠPICE TRNU.....	111
9.3.1	Výsledky simulace v případě ocelové špice trnu	113
9.4	SROVNÁNÍ MECHANICKÉ ODOLNOSTI TRNU Z POLYMERU A TRNU Z OCELI	114
10	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO VÝROBKU	115
10.1	JEDNOKOMPONENTNÍ FORMA SE DVĚMA DUTINAMI – JÁDRO MECHANICKY (RUČNĚ) VKLÁDÁNO.....	117
10.1.1	Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu.....	118
10.1.2	Výpočet nákladů za spotřebu materiálu - N_m	120
10.1.3	Výpočet výrobních nákladů - N_s	120
10.1.4	Celkové náklady při výrobě 300 ks – N_c	120
10.1.5	Celkové náklady na jeden výrobek při výrobě 300 ks – N_{c1}	121
10.2	JEDNOKOMPONENTNÍ FORMA SE DVĚMA DUTINAMI – JÁDRO TAŽENO HYDRAULICKY.....	121
10.2.1	Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu.....	121
10.3	DVOUKOMPONENTNÍ FORMA.....	122
10.3.1	Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu.....	123
10.3.2	Výpočet nákladů za spotřebu materiálu - N_m	124

10.4	JEDNOKOMPONENTNÍ FORMA S JEDNOU DUTINOU – TECHNOLOGIE GIT	125
10.4.1	Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu	126
10.5	JEDNOKOMPONENTNÍ FORMA PRO NÁSTŘIK TRNU + JEDNOKOMPONENTNÍ FORMA PRO NÁSTŘIK RUKOJETI Z TPU	126
10.5.1	Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu	127
10.6	SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT VÝROBY	128
	ZÁVĚR	130
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	133
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	137
	SEZNAM OBRÁZKŮ	145
	SEZNAM TABULEK	148
	SEZNAM PŘÍLOH	150

ÚVOD

Polymery za více než stoletou dobu existence zažily obrovský celosvětový rozvoj. Velká expanze a rozmanitost druhů je způsobena velkou variabilitou jejich vlastností. Lze jmenovat tvrdost, tepelnou odolnost, pružnost, pevnost, chemickou odolnost, hustotu, elektroizolační vlastnosti, teplotní vodivost, nasákavost, zpracovatelnost, zdravotní nezávadnost aj. Variabilita vlastností umožnila vývoj mnoha nových výrobků, které nacházejí uplatnění jak v běžném životě, kdy jejich přítomnost již člověk bere jako samozřejmost, tak i v mnoha konstrukčních a speciálních případech, kdy je jejich aplikace vnímána širokou veřejností jako velký posun kupředu.

Kromě vývoje nových polymerních výrobků je velmi často uplatňována i náhrada dříve používaného materiálu za polymerní. Namátkou lze jmenovat automobilový průmysl, kde konstrukce automobilu za posledních 20 let zažila neobvyklou proměnu nahrazením mnohých kovových součástí polymerními, či celkové využití polymerních materiálů v různých sportovních odvětvích.

Tato diplomová práce řeší náhradu oceli u montážního nástroje využívaného k montážním pracím v elektrotechnickém průmyslu polymerem. Byl komplexně posouzen návrh nástroje z pohledu zpracovatelského, konstrukčního, pevnostního a ekonomického. Při studiu tohoto problému byly využity počítačové programy, jež simulují a analyzují chování materiálu při zpracování a výrobě nástroje a jeho pevnostní chování při předpokládaném zatížení v praxi.

Výsledné hodnoty analýz jsou podrobně komentovány, rozebrány a hodnoceny. Řešení diplomové práce ukazuje na reálnou možnost využití polymerů jako konstrukčních materiálů nahrazujících kovy včetně ocelí. Porovnání navrhovaného řešení se současným stavem ukazuje na ekonomickou výhodnost náhrady kovu polymerem i při relativně malých sériích výrobků.

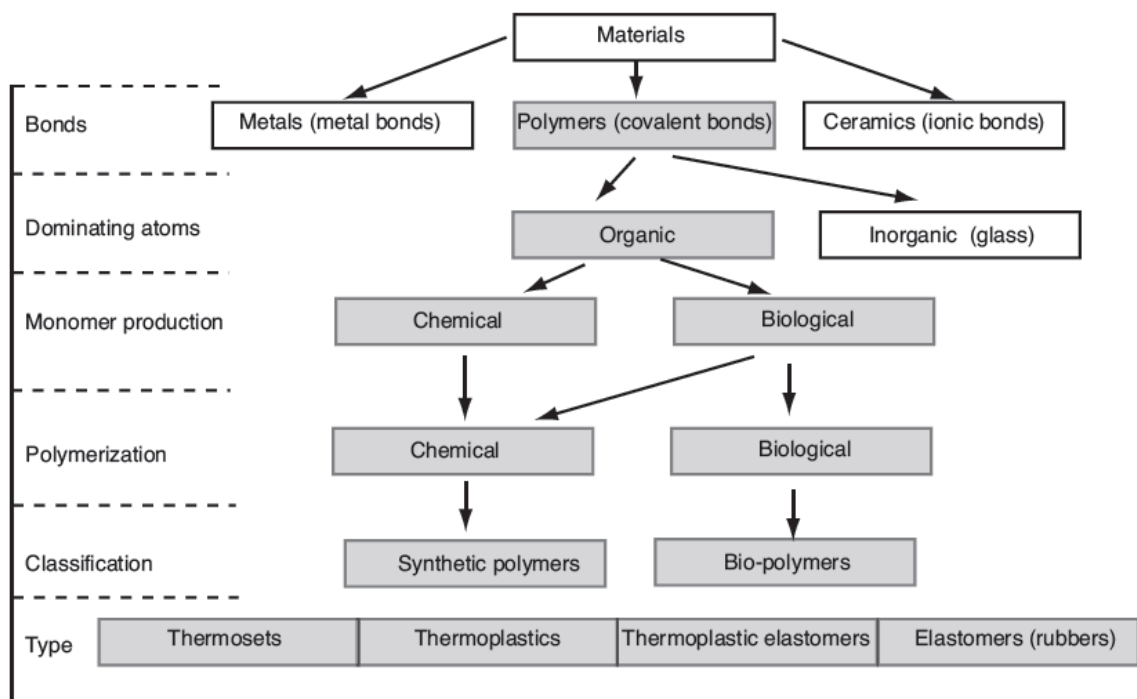
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ

Polymery jsou v dnešní době již nedílnou součástí každodenního života společnosti. Jsou to makromolekulární látky organického, či semi-organického charakteru o vysoké molekulové hmotnosti. Polymery jsou tvořeny dlouhými řetězci, které se skládají z jednotlivých monomerů. Specifické pro ně je velké množství možností jejich modifikací, změny vlastností a použití. Velký rozvoj polymery zažily zejména ve druhé polovině 20. století. V dnešní době je výzkum a vývoj zaměřen především na modifikace již známých polymerů, či výzkum blendů (složení dvou či více různých materiálů). [1, 2]

Základní suroviny pro výrobu plastů jsou ropa, oleje, plyny a uhlí. Z rostlinných surovin lze využít dřevo, bavlnu, olej. Základními prvky běžných polymerů jsou uhlík s vodíkem, ale často mohou obsahovat i např. kyslík, dusík, chlór, fluor aj.[2]

Základní zařazení polymerních materiálů ve vědě zobrazuje Obr. 1.



Obr. 1: Základní zařazení polymerních materiálů ve vědě [1]

1.1 Základní rozdělení polymerů

Polymery je možné dělit do několika skupin, dle různých parametrů. Využívá se dělení:

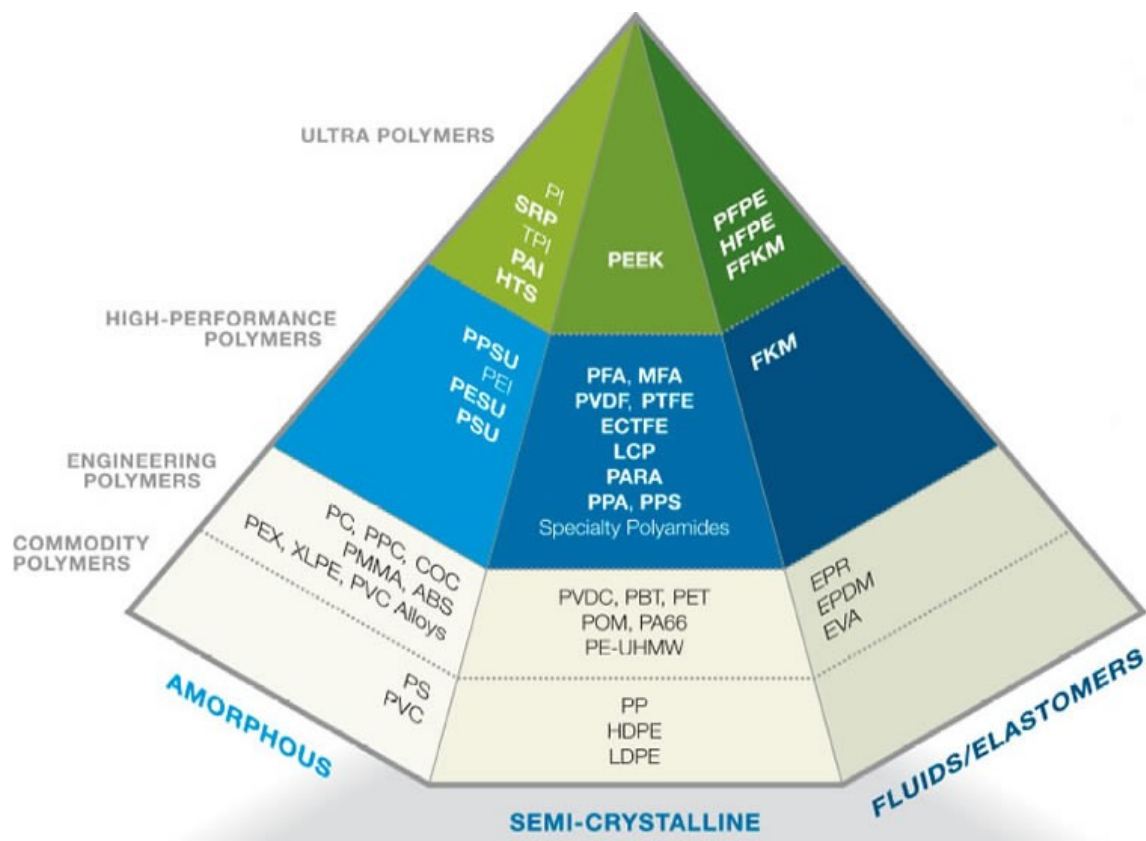
- dle aplikace (polymery pro běžné, konstrukční a speciální aplikace),
- dle teplotního chování (termoplasty, reaktoplasty, elastomery),

- dle nadmolekulární struktury (amorfní, krystalické),
- dle druhu přísad (plněné a neplněné),
- dle polaritý (polární, nepolární),
- dle chemické struktury,
- dle původu (přírodní, syntetické),
- dle druhu polymerních makromolekul (lineární, rozvětvené a zesíťované). [3]

V dalších kapitolách (1.2, 1.3, 1.4, 1.5) je více přibliženo dělení dle aplikace, dle teplotního použití, dle nadmolekulární struktury a dle plnění.

1.2 Rozdělení polymerů dle aplikace

Obecně se dají rozčlenit polymery do čtyř základních skupin, ve kterých nacházejí své uplatnění. Platí zde přímá úměra, čím lepší vlastnost polymeru, tím obvykle vyšší cena.



Obr. 2: Rozdělení polymerů dle aplikace [4]

1.2.1 Komoditní polymery

Komoditní polymery nacházejí uplatnění především v běžných aplikacích. Nejsou obvykle na ně kladeny vysoké mechanické nároky ani nároky na teplotní odolnost. Jsou levné. Mezi hlavní zástupce patří PS, PVC, PP, HDPE a LDPE.

1.2.2 Konstrukční polymery

Konstrukční polymery již nacházejí uplatnění v konstrukčních aplikacích, které vyžadují určitou tepelně-mechanickou odolnost. Jejich vlastnosti se výrazně zlepšují při modifikaci plnivem (např. skelná, uhlíková vlákna). Mezi základní zástupce patří PC, PMMA, ABS, PET, POM, PA.

1.2.3 Speciální polymery a Ultra polymery

Speciální a ultra polymery nacházejí uplatnění především v náročných aplikacích vyžadující dobré mechanické vlastnosti a velkou teplotní odolnost. Využití nacházejí v automobilovém a leteckém průmyslu. Jsou velmi drahé. Mezi základní zástupce řadíme PPSU, PEI, PPA, PPS, PTFE, PEEK, PAI, PI.

1.3 Rozdělení plastů dle teplotního chování

1.3.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymerní materiály, které zahříváním přecházejí ze stavu tuhého do stavu plastického, kde je lze tvářet, či zpracovávat různými technologiemi. Ochlazením přecházejí termoplasty do tuhého stavu, což se děje pod teplotou tání T_m (u semikrystalických polymerů), resp. teplotou viskózního toku T_f (u amorfních polymerů). Teoreticky lze u termoplastů proces ohřevu polymeru a jeho opětovného zpracování opakovat bez omezení, a to z toho důvodu, že nedochází ke změnám v chemické struktuře. V tomto případě hovoříme pouze o fyzikálním procesu. Prakticky je možnost opětovného zpracování limitována zejména z důvodu možných degradačních procesů. K termoplastům řadíme většinu používaných polymerů: PE, PP, PC, PS, PMMA, PVC, PA a další. [3]

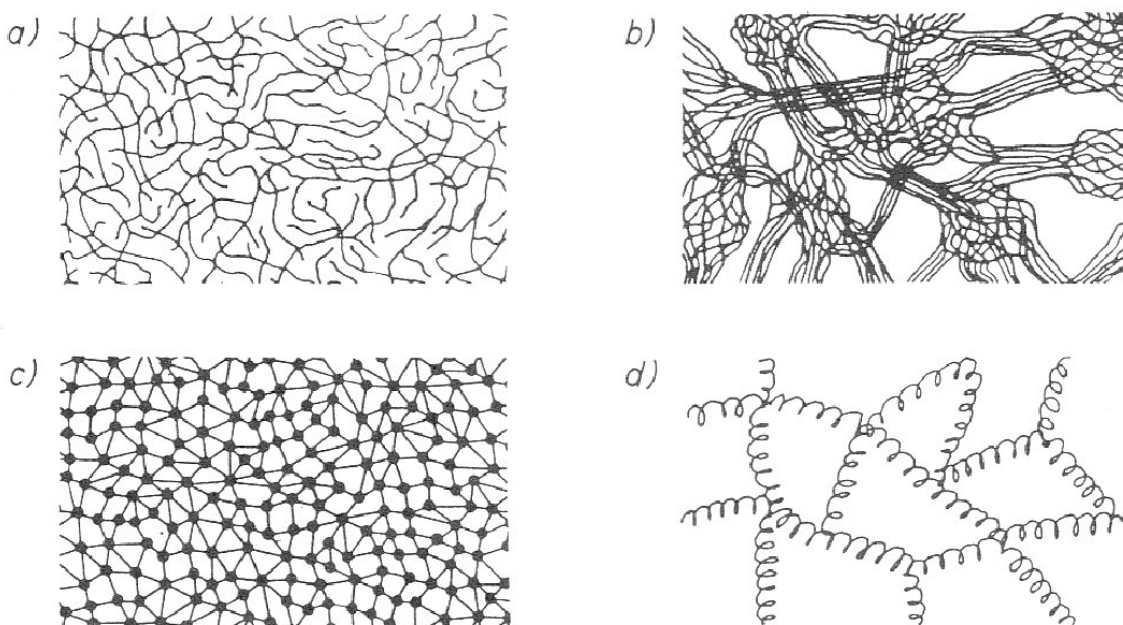
1.3.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou polymerní látky, které v první fázi zahřívání také měknou a lze je tvářet, ale jejich zpracování je omezeno určitou dobou. V dalším průběhu zahřívání již dochází k chemickým reakcím, při kterých dochází k prostorovému zesíťování struktury polymeru

(probíhá tzv. vytvrzování). Chlazení reaktoplastů se děje obvykle mimo formu, protože zajištění vysoké teploty formy pro vytvrzení a následné rychlé ochlazení na vyhazovací teplotu by bylo technicky náročné a ekonomicky nevýhodné. Vytvrzování je nevratný děj, kdy není možné polymery znovu roztavit, při opětovném zahřívání totiž dochází k jejich degradaci. Do této skupiny patří epoxidové pryskyřice, močovinoformaldehydové pryskyřice, polyesterové pryskyřice a další. [3]

1.3.3 Kaučuky, pryže, elastomery

Tyto polymerní materiály také v první fázi ohřevu pozvolna měknou a dají se tvářet. Nicméně tak, jako u reaktoplastů, pouze po určitou dobu. Dalším zahříváním za přítomnosti síťovacích činidel probíhá chemická reakce, kdy dochází k prostorovému zesíťování struktury, tzv. vulkanizaci. Materiály vykazující chování termoplastů, které jsou opakovatelně tavitelné, tvoří skupinu termoplastických elastomerů. Spojují výhody termoplastů (opakovatelně tavitelné) s vlastnostmi elastomerů. [3]



Obr. 3: Nadmolekulární struktura polymerů – a) amorfní termoplast, b) semikrystalický termoplast, c) reaktoplast, d) elastomer [2]

1.4 Rozdělení plastů dle nadmolekulární struktury

1.4.1 Amorfní plasty

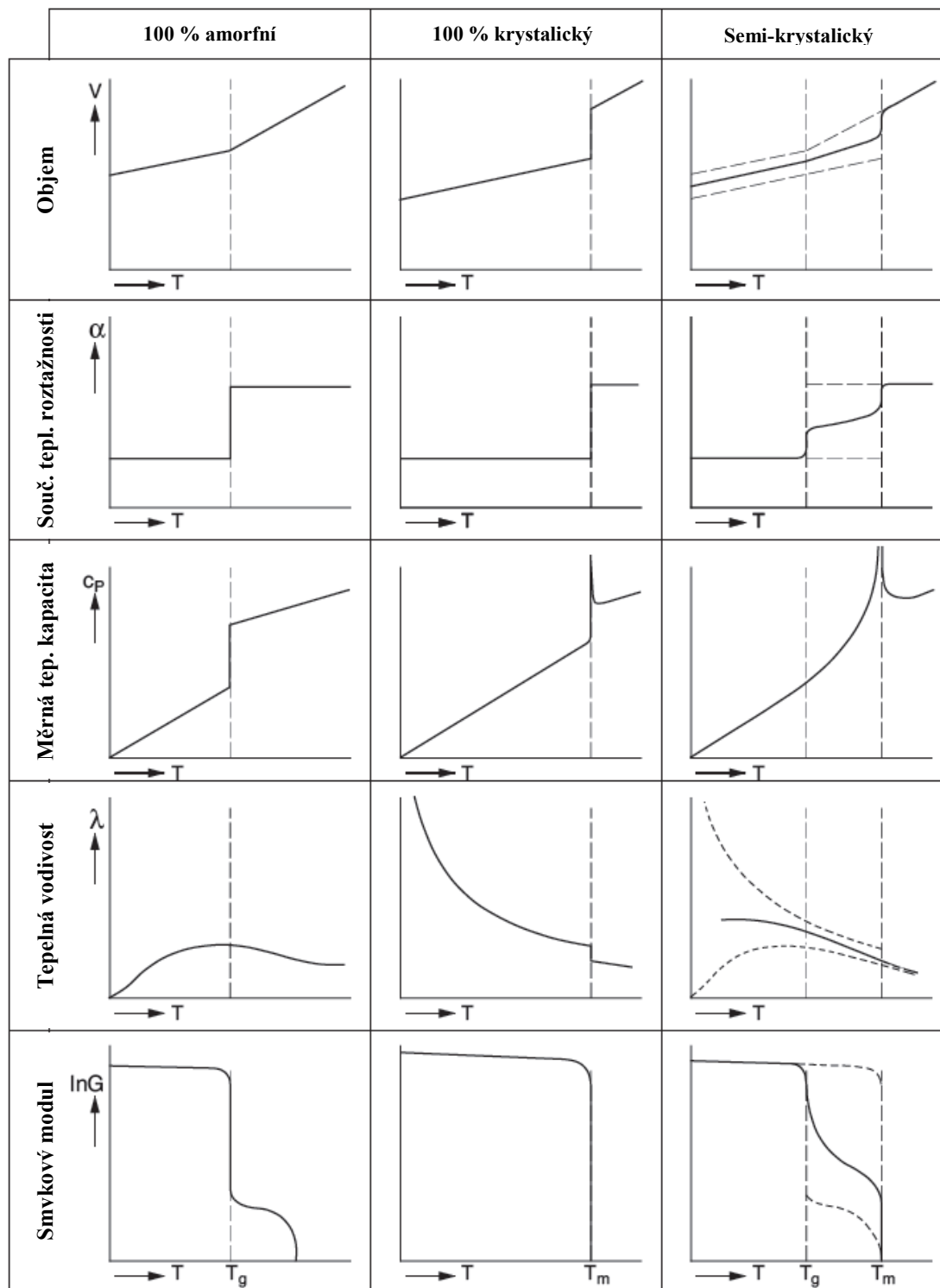
Amorfní polymery jsou látky, které nemají pravidelnou strukturu. Uspořádání částic (makromolekul) je v těchto látkách zcela náhodné. K jejich obvyklým vlastnostem patří křehkost, vysoká pevnost a modul pružnosti. Mají nízký index lomu světla (1,4 až 1,6), což způsobuje jejich průhlednost. Dělíme je na čiré (92 % propustnosti světla), a transparentní (60 % propustnosti světla). Amorfní polymery lze použít v aplikacích do teplot skelného přechodu T_g . Patří sem např. PMMA, PC, PVC a další. [3]

1.4.2 Krystalické (semikrystalické) plasty

Krystalické, nebo semikrystalické polymery mají oproti amorfním určitý stupeň uspořádanosti. Podíl krystalických oblastí v semikrystalických polymerech se označuje jako stupeň krystalinity (od 30 do 90 %). Jako typické vlastnosti lze uvést mléčnou zakalenost (vyšší index lomu světla), vyšší houževnatost materiálu. S vyšším stupněm krystalinity roste i jejich pevnost a modul pružnosti. Semikrystalické polymery lze použít v aplikacích do teploty tání T_m . Patří sem PE, PP, PET, PPS, PTFE, PA, POM, aj. [3]

Obecně platí, že všechny vlastnosti polymerů, zejména pak mechanické a tepelné, jsou závislé na teplotě. [1]

Změny vybraných vlastností s teplotou ukazuje obr. 4.



Obr. 4: Schéma chování amorfního, krystalického a semikrystalického polymeru [1]

1.5 Modifikace vlastností polymerů

Obecně se polymery rozlišují na plněné a neplněné, kdy u neplněného neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice množství dodaných přísad. [3]

Neplněné polymery nemusí vždy dosahovat požadovaných vlastností. Proto se jejich vlastnosti často upravují (modifikují).

Nejčastěji se jedná o změnu mechanických či tepelných vlastností. Mezi nejpoužívanější způsoby patří přidavek vhodného typu plniva.

Plniva mohou být hodnocena třemi způsoby. A to jako plniva, která zlepšují především mechanické vlastnosti polymeru, dále jsou to plniva taková, která výrazně zlevňují materiál. Méně častá jsou pak plniva, která se přidávají např. pro zabezpečení elektrické vodivosti. [1]

Vysoce výkonné polymery mají obvykle plnění mezi 30 – 80 % výztužného materiálu. Velmi často jsou používána skelná vlákna. Naopak na výrazné zlevnění materiálu se využívají plniva, jako jsou uhličitán vápenatý, oxid křemičitý, jíl, silika, dřevěná moučka. Některá z nich i mírně zlepšují tuhost polymerní matrice, a to například hlína, či dřevěná vlákna. [1]

Tab. 1 a Obr. 5 a 6 názorně demonstrují srovnání některých materiálů používaných jako plniva (ve formě vláken). Pro srovnání jednotlivých materiálů byla využita specifická pevnost v tahu a specifický modul pružnosti. Vysvětlení specifické pevnosti v tahu je uvedeno v kapitole 3.

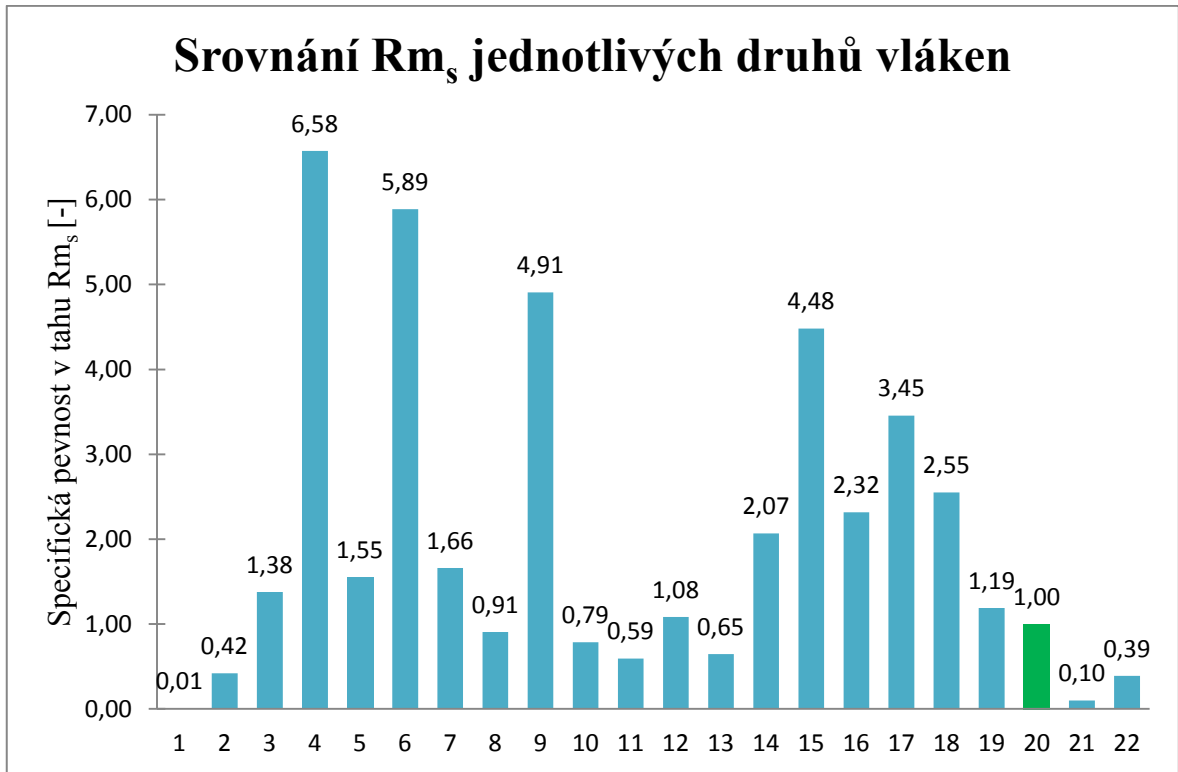
Jako etalon, čili hodnotu 1, ke kterému byly ostatní materiály porovnávány, byla využita ocel. Čísla jednotlivých sloupců v grafech odpovídají číslům materiálů v tabulce. Materiály v tabulce i grafech jsou řazeny vzestupně dle své hustoty.

Obr. 7 názorně ukazuje stupeň ovlivnění a změnu vlastností polymerů různými druhy plniv.

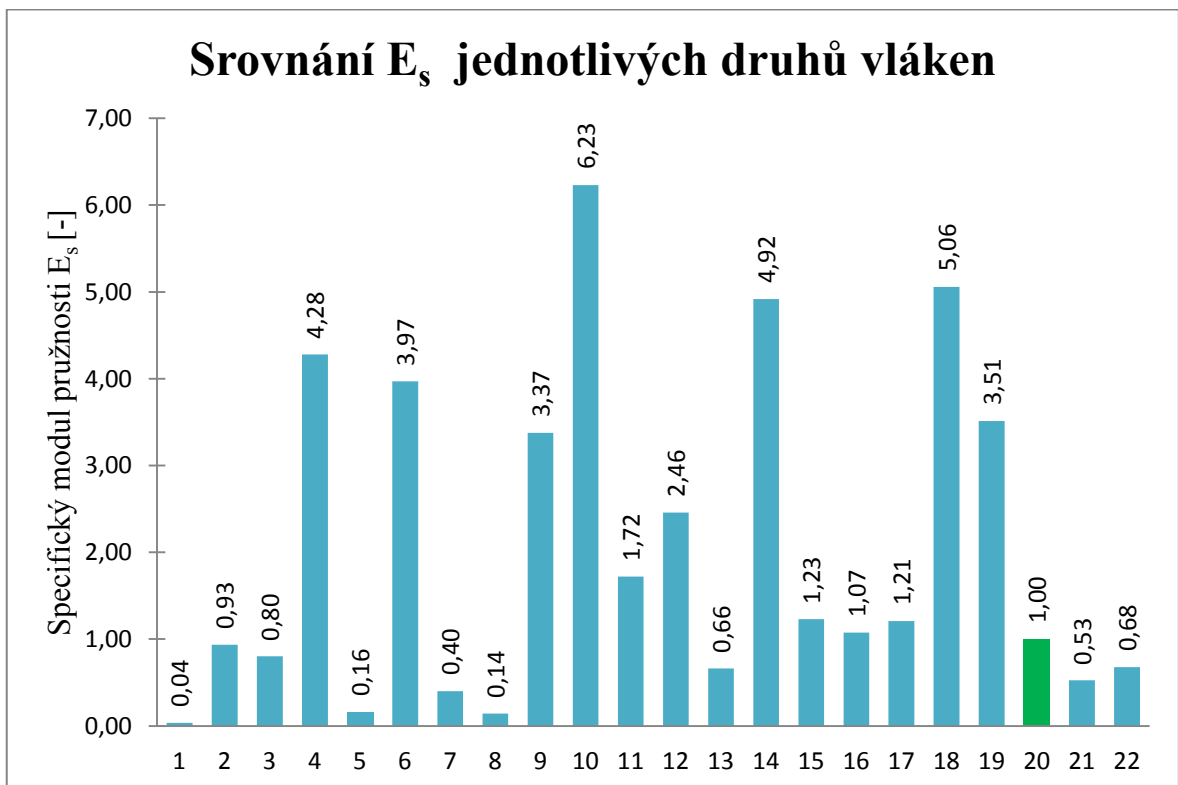
Mezi velmi významné metody modifikace vlastností patří také ozařování polymerů, které vede ke zlepšení mechanických vlastností, zvýšení teplotní odolnosti, zlepšení chemické odolnosti a úprava dalších vlastností.

Tab. 1: Srovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti specifických vlastností vybraných plniv (vláken) [25, 26, 27]

Č.	Materiál	Hustota [g.cm ⁻³]	R _m [MPa]	E [MPa]	R _{m_s} [-]	E _s [-]
1	Dřevo (smrk, vlhk. 12%, napříč vl.)	0,48	2,2	480	0,01	0,04
2	Dřevo (smrk, vlhk. 12%, ve směru vl.)	0,48	103,0	12000	0,42	0,93
3	PP (HMPP - vysokomodulová vl. PP)	0,84	590,0	18000	1,38	0,80
4	UHMWPE (vlákna z PE, Spectra 1000)	0,97	3250,0	111000	6,58	4,28
5	PA66 (vlákno Nylon)	1,14	900,0	5000	1,55	0,16
6	LCP (vlákno Ekonol)	1,30	3900,0	138000	5,89	3,97
7	PET (Silon)	1,30	1100,0	14000	1,66	0,40
8	Hedvábí z bource morušového	1,30	600,0	5000	0,91	0,14
9	Aramid (Kevlar - ve směru vláken)	1,44	3600,0	130000	4,91	3,37
10	Novoloid (uhlíková vlákna)	1,50	600,0	250000	0,79	6,23
11	Konopí	1,52	460,0	70000	0,59	1,72
12	Len	1,52	840,0	100000	1,08	2,46
13	Bavlna	1,52	500,0	27000	0,65	0,66
14	PAN (uhlíková vlákna)	1,90	2000,0	250000	2,07	4,92
15	Křemenné sklo (vlákna)	2,19	5000,0	72000	4,48	1,23
16	E-sklo (vlákna)	2,54	3000,0	73000	2,32	1,07
17	Čedičové vlákno	2,75	4840,0	89000	3,45	1,21
18	Karbid křemíku (CVD technika)	3,00	3900,0	406000	2,55	5,06
19	Whiskery (bezdefektní monokrystaly)	3,30	2000,0	310000	1,19	3,51
20	Ocel	7,85	4000,0	210000	1,00	1,00
21	Měď	8,90	450,0	125000	0,10	0,53
22	Wolfram	19,30	3820,0	350000	0,39	0,68



Obr. 5: Srovnání materiálů používaných na plniva ve formě vláken s využitím specifické pevnosti v tahu [25, 26, 27]



Obr. 6: Srovnání materiálů používaných na plniva ve formě vláken s využitím specifického modulu pružnosti [25, 26, 27]

Vlastnost	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Pevnost v tahu	++	+		+	-+			+	o					+			
Celková pevnost	+								+		+	+		+	+		
Modul pružnosti	++	++	++	++	+			++	+		+	+		+	+	+	+
Mechanická odolnost	-+	-	-	-	-	++	+	-+	-		-	-	-	-	-+	-	+
Snížení tepelné roztažnosti	+	+			+			+	+		+	+	+			+	
Snížení smrštění	+	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Tepelná vodivost		+	+	+					+	+	+	+			+		+
Tvarová stálost	++	+	+	++				+	+				+		+	+	
Elektrická vodivost			+	+						+							+
Elektrická pevnost			+					++	+			+	++			+	
Teplotní odolnost			+					+	+		+	+	+			+	+
Chemická odolnost		+	+					+	o	+			+	+			
Odolnost vůči opotřebení				+				+	+	+			+				
Rychlost extruze	-+	+						+					+			+	
Otěruvzdornost	+	o			o	o	o		o	o	-			o	o		o
Snížení ceny	+	+	+					+	+	+	+	++	+	+	+	++	

(++) výrazné vylepšení, (+) pozitivní efekt, (o) žádný vliv, (-) negativní efekt

Obr. 7: Vliv různých plniv na vlastnosti polymerní matrici [1]

Popis Obr. 7:

1. Skelné vlákno, 2. Azbest, 3. Křemičitan vápenatý, 4. Uhlíkové vlákno, 5. mikrovlákná, 6. Syntetická vlákna 7. Celulóza, 8. Slída, 9. Mastek, 10. Grafít, 11. písek (prášek), 12. Silika, 13. Jíl, 14. Skleněné kuličky, 15. Uhličitan vápenatý, 16. Oxidy kovu, 17. Karbon.

2 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

Tato kapitola se zabývá přiblížením základních vlastností vybraných kovových materiálů, které byly následně využity ke srovnávání různých vlastností s polymerními materiály.

2.1 Ocel

Podstatný vliv na vlastnosti ocelí má uhlík C. Uhlík sice nelze považovat za leguru, ale jeho zvyšující se obsah zvyšuje pevnost, tvrdost a zakalitelnost ocelí, zatímco houževnatost i nárazová práce klesají. [10]

Oceli kromě uhlíku obsahují mnoho dalších prvků, ať už jako pozůstatek výroby (doprovodné – škodlivé nebo prospěšné), či přidané za účelem zlepšit dané vlastnosti (legury).

Z doprovodných škodlivých prvků lze zmínit např. síru, kyslík, fosfor, dusík, vodík, arsen aj. [10]

Jako legury lze označit např. mangan, křemík, chrom, nikl, molybden, vanad, wolfram, hliník, kobalt, niob, tantal aj. [10]

Měrná hmotnost ocelí je přibližně $7,85 \text{ kg.dm}^{-3}$.

2.1.1 Základní třídy konstrukčních ocelí (třídy 10 – 19) – značení dle starého způsobu

Oceli třídy 10 mají dle ČSN zaručenou pouze minimální pevnost a tažnost ve stavu přírodním – ocel není po tváření za tepla nijak tepelně upravená.

- Obsah C, ostatních prvků a čistota není zaručena.
- Dobře svařitelné a obrobitelné.
- Užití ve tvarech tyčí, profilů a plochých vývalků. [10]

Oceli třídy 11 mají dle ČSN předepsanou čistotu a zajišťují určité mechanické vlastnosti. Pevnost je zajišťována především úměrným obsahem C a pohybuje se v rozmezí 280 až 900 MPa. Dělí se:

- na oceli s nízkým obsahem C (do 0,25 hm. %), které se používají na výrobu pásů a plechů, jsou dobře tvářitelné za studena,
- na oceli se středním obsahem C (od 0,3 hm. % do 0,8 hm. %), které jsou používány na různé konstrukční prvky a strojní součásti. [10]

Oceli třídy 12 zahrnují oceli, které nemají žádné další legury, obsah C je od 0,1 až do 1 hm. %. Dalším tepelným zpracováním získávají velké spektrum užitečných vlastností.

- Vysoká tvrdost povrchu při zachování vysoké houževnatosti a odolnosti proti dynamickému namáhání.
- Vyšší cena než ocel tř. 11.
- Ocelí nízkouhlíkových (do 0,2 hm. %) se používá na tzv. cementační oceli.
- Oceli s vyšším obsahem C (do 1 hm. % C) se používají k výrobě strojních součástek, a levnějšího nářadí. [10]

Oceli třídy 13 obsahují z legur především Mn a Si, a použití nacházejí tam, kde již uhlíková ocel nedostačuje – středně namáhané součásti s odolností proti opotřebení. Do této skupiny patří i pružinové, transformátorové a dynamové oceli. [10]

Oceli třídy 14 obsahují z legur především Cr, Mn, Al, a Si. Tyto oceli jsou značně používané pro cementování. Vyznačují se:

- vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení,
- vysokou pevností v tlaku. [10]

Oceli třídy 15 obsahují z legur stejné prvky jako třída 14 + V a Mo.

- Vyznačují se dobrou prokalitelností, vysokou pevností a mezí kluzu při normální teplotě, zvýšenou odolností proti korozi.
- Používají se především k zušlechťování a následné instalaci na namáhané součásti strojů a letadel – klikové hřídele, torzní tyče, ozubená kola. [10]

Oceli třídy 16 obsahují z legur Ni, Cr, a Mo. Jsou to nejkvalitnější oceli pro vysoce namáhané součásti. Dosahuje se u nich vysoké meze kluzu při dostatečné houževnatosti. [10]

Oceli třídy 17 se dělí na martenzitické, feritické, austenitické a austeniticko-feritické. Jsou zde zahrnuty oceli korozivzdorné, žáruvzdorné, žárovevné a speciální.

Oceli třídy 18 dle ČSN neexistují, nejedná se totiž o běžnou ocel. Jedná se o prášky těžkých kovů, které se za velkých tlaků lisují na požadovaný tvar (tzv. prášková metalurgie). Proces se nazývá slinování a spékání. Tyto materiály se používají na břity rezných nástrojů. Jedná se o Slinuté karbidy (SK), nikoliv o oceli. [10]

Oceli třídy 19 jsou oceli nástrojové, jejichž chemické složení zahrnuje všechny oceli z tříd 10 až 16 a mnoho dalších ocelí s nízkými i vysokými obsahy legur. Výjimečností této skupiny je náročná ocelářská výroba, která zaručuje maximální čistotu oceli a úzké rozmezí obsahu jednotlivých prvků a to ještě vyšší, než jsou zaručovány v třídách nižších. Použití je převážně na nástroje. Přísady karbidotvorných prvků (Cr, W, V, Mo) tvoří tvrdé a do vysokých teplot stálé karbidy. Vyznačují se vysokou odolností proti otěru a proti popouštění. [10]

Dělí se obvykle na oceli:

- uhlíkové [19 (0-2)XX]
 - do 1,5%C, jsou levné,
 - pro menší a méně namáhané nástroje (nože, plechy, frézy),
 - mají malou prokalitelnost,
- nízkolegované [19(3-7)XX]
 - hlavní přísady Cr, V, Mo, W > zvyšují tepelnou stabilitu karbidů,
 - menší náchylnost ke vzniku trhlin při i kalení,
 - použití: vrtáky, závitníky, frézy,
- vysokolegované [19(3-7)XX]
 - hlavní přísady Cr, V, Mo, W,
 - na silně namáhané řezné nástroje – protahovací trny,
 - výstružníky,
- rychlořezné [19 8XX]
 - $W + Cr + V > 15 - 25\%$, $C > 0,7 - 1,3\%$,
 - vyšší tvrdost nad 60 HRC do 600°C,
 - vyšší odolnost proti otěru. [10]

2.1.2 Základní rozdělení ocelí – způsob značení dle ČSN EN 10 027-2 – nový způsob

Nový způsob značení ocelí se nedělí dle jednotlivých tříd, nýbrž dle vlastností jednotlivých ocelí. Dále je uvedeno základní rozdělení dle hlavních skupin jakosti. [32]

2.1.2.1 Nelegované oceli

- oceli obvyklých jakostí – B
 - nejsou určeny pro tepelné zpracování,
 - nemají žádné zvláštní kvalitativní charakteristiky,
 - Mez pevnosti $R_m < 690$ MPa,
 - Tažnost $A < 26\%$, nárazová práce $KV^{+28^\circ C} < 27$ J,
- nelegované jakostní oceli – Q
 - není předepsána rovnoměrná reakce na tepelné zpracování,
 - mohou být kladeny zvýšené požadavky na hodnotu KV, velikost zrna aj.,
- nelegované ušlechtilé oceli - S
 - požadována nárazová práce v oblasti nízkých teplot,
 - prokalitelnost nebo tvrdost v povrchově zakaleném stavu,
 - požadavky na čistotu, minimální hodnota elektrické vodivosti. [32]

2.1.2.2 Legované oceli

- legované jakostní oceli
 - určeny k povrchovému kalení, či zušlechťování,
 - svařitelné jemnozrnné oceli,
 - mez pevnosti $R_m < 380$ MPa,
 - požadované magnetické vlastnosti,
 - legované Si a Al,
- legované ušlechtilé oceli
 - potřebných vlastností se dosahuje pomocí tepelného zpracování a dodržováním chemického složení,

- patří sem korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli, nástrojové oceli. [32]

2.1.3 Značení ocelí dle EN 10027-1

Je to značení vytvořené na základě použití a vlastností ocelí (mechanické, fyzikální, chemické).

Tab. 2: Označení ocelí dle EN 1027-1[32]

Označení	Použití oceli
G – ocel na odlitky	S – oceli pro ocelové konstrukce
	P – pro tlakové nádoby
	L – oceli na potrubí
	E – oceli pro strojní součásti
B	oceli pro výztuž do betonu + hodnota meze pevnosti
Y	oceli pro předpínací výztuž do betonu + hodnota meze pevnosti
R	oceli pro kolejnice + hodnota meze pevnosti
H	ploché výrobky válcované za studena + hodnota meze pevnosti
D	ploché výrobky z měkkých ocelí pro tváření za studena
T	tenké pocínované plechy a pásy
M	plechy a pásy pro elektrotechniku

Tab. 3: Označení ocelí dle EN 1027-1 – doplňující údaje [32]

Označení	druh vlastností
C	se zvláštní tvářitelností za studena
D	pro žárové pokovování
E	pro smaltování
F	pro kování
H	duté profily
L	pro nízké teploty
M	termomechanicky válcováno
N	normalizačně žiháno nebo válcováno
O	konstrukce off shore
P	štetovnice
Q	zušlechtěno
T	trubky
W	odolný proti atmosférické korozi

Tab. 4: Základní vlastnosti vybraných ocelí [10, 14, 18, 19, 20, 21, 33, 34]

ČSN (staré)	W.Nr.	EN (nové)	Mechanické vlastnosti			Použití
			Rm [MPa]	Re _{min} [MPa]	Tvrdost HB	
10 370	1.0036	S185	360 až 440	205	-	Nelegovaná ocel, součásti bez nosných tvarů.
11 373	1.0036	S235JRG1	340 až 440	186	Max. 225	Jednoduché mírně namáhané součásti.
11 500	1.0050	E295	470 až 610	245	Max. 268	Strojní součásti namáhané staticky i dynamicky.
11 700	1.0070	E360	685 až 835	345	Max. 290	Jako 11500, ale snese vyšší namáhání.
12 010.0	1.1121	C10E	450 až 710	295	Max. 236	Méně namáhané součásti, cementované.
13 141.6	1.1170	28Mn6	650 až 800	450	Max. 239	Menší hřídele, strojní součásti (páky, táhla aj.)
14 220.4	1.7131	16MnCr5	Min. 785	590	Min. 239	Cementování. Menší hřídele, ozubená kola aj.
15 217	1.8962	S355JOW	980 až 1180	835	300 až 359	Bezešvé trubky, klikové hřídele, hlavy vrtulí aj.
16 224	1.8928	S690QL	785 až 930	590	239 až 285	Středně namáhané součásti strojů a vozidel.
17020	1.4000	X6Cr13	441 až 637	245	127 až 183	Výroba plechů, chromová ocel.
SK18510	-	P10 (ISO)	1225 (ohyb)	*	89,5(HRA)	Břítové destičky – těžko obrobitelné materiály.
19083	1.1730	C45U	*	*	Max. 190	Kovářské, zámečnické, zednické nářadí.
19421	1.2210	115CrV3	*	*	Max. 220	Jednoduché nástroje k obrábění tvrdých hmot.
RO19830	1.3339	HS6-5-2	*	*	Max. 270	Řezné nástroje – vrtáky, závitníky, výstružníky.

* Příslušné normy jednotlivých materiálů neuvádějí konkrétní hodnotu parametru

2.2 Hliník

Hliník je stříbrobílý kov s velmi nízkou hustotou $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$. Díky své tvrdé, elektricky nevodivé pasivační ochranné vrstvě Al_2O_3 je velmi stálý v běžných atmosférách (tloušťka cca $0,1 \text{ }\mu\text{m}$). Hliník je korozivzdorný, velmi dobře tvárný za tepla i za studena, významná je i jeho elektrická a tepelná vodivost (má 64% vodivosti Cu). Teplota tavení hliníku je 660°C . Vliv tváření se odstraňuje žháním 250 až 350°C . [10]

Jako konstrukční materiál se však z důvodu relativně špatných mechanických vlastností nepoužívá.

Slitiny Al se vyznačují nízkou hustotou, dobrými mechanickými vlastnostmi, jsou dobře obrobitelné, nemagnetické, a až na výjimky korozivzdorné. Těchto dobrých vlastností se jednak dosahuje přidávkem kovů, jako Cu, Si, Zn, Mn, Ni, a jednak precipitačním vytvrzováním. [10]

Tab. 5: Vlastnosti hliníku [15]

Teplota tání	660 [°C]
Hustota	2,690 [g.cm ⁻³]
Modul pružnosti v tahu	71 [GPa]
Mez pevnosti v tahu	70 [MPa] (vyžíhaný stav)
Mez kluzu	20 [MPa] (vyžíhaný stav)
Tažnost	20-30% (vyžíhaný stav)
tvrdost	20 HB (vyžíhaný stav)

2.2.1 Slitiny hliníku určené k tváření

Ze slitin hliníku je neznámější dural (4 až 4,5 hm. % Cu, 0,5 hm. % Mn, a 0,6 až 1,5 hm. % Mg), který je až 5 krát pevnější v tahu a tvrdší při typické měrné hmotnosti 2,8 kg.dm⁻³, než hliník. [10]

Nejpevnější z duralů je superdural, který obsahuje horní množství Mg, a po tváření za studena a vytvrzování získá $R_m =$ až 500 MPa. Z důvodu malé odolnosti vůči korozi se případně plátuje tenkou vrstvou Al (především u plechů). [10]

Z duralů se nejčastěji vyrábí kompletní hutnický sortiment – plechy, pásy, tyče, profily aj. Hlavní uplatnění je pro stavbu letadel a dopravních zařízení. [10]

V tabulce č. 6 jsou uvedeny základní příklady slitin hliníku s pevností v tahu a základním použitím.

Tab. 6: Pevnost v tahu a použití pro základní slitiny hliníku ke tváření [10, 14]

Materiál	R_m [MPa]	Použití
Hliník Al 99,8	60 – 150	Elektrotechnika, chemický průmysl
Dural (AlCu4Mg)	Měkký stav 200 Po vytvrzení až 400	Konstrukční materiál – komponenty letadel, aut aj.
Superdural (AlCu4Mg1)	Měkký stav 200 Po vytvrzení až 500	Konstrukční materiál o velké pevnosti – komponenty letadel, aut, menší výkovky a výlisky aj.
Slitina (AlZn6MgCu)	Po vytvrzení až 500	Vysoce namáhané součásti dopravních zařízení

2.3 Titan

Titan je kov stříbrobílé barvy, který je čtvrtým (po Al, Fe a Mg) nejčastěji se vyskytujícím prvkem v zemské kůře. Vyniká skvělými mechanickými vlastnostmi srovnatelnými s oceli (až do 500 °C), ale má jen 60% jejich měrné hmotnosti ($4,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). [10]

Velkou výhodou titanu je jeho odolnost vůči korozi, která je dokonce vyšší než u korozi-vzdorných ocelí, tudíž není nutné řešit jeho povrchovou úpravu. Jako jediný kov odolává Cl a chloridům. Jako jeho další vlastnosti lze jmenovat nízkou tepelnou vodivost, teplotní roztažnost, vysoký měrný odpor. Je obvykle velmi dobře snášen lidskou tkání. [10]

Jako negativní vlastnost titanu lze označit jeho velkou slučivost téměř se všemi plyny za zvýšené teploty, jako jsou O, N a H. Proto je nutno provádět zpracování titanu nejlépe ve vakuu. Teplota tavení titanu je 1 668 °C a vyskytuje se ve dvou krystalových modifikacích:

- $\alpha(\text{Ti})$ s hexagonální krystalovou strukturou (do teploty 882 °C),
- a $\beta(\text{Ti})$ s kubickou, prostorově centrovanou strukturou (na teplotou 882°C. [10, 15]

Čistý titan nachází uplatnění ve zdravotnictví, používá se na implantáty (zubní, kloubní, kardio).

Mezi hlavní nevýhody patří vysoká cena, malá otěruvzdornost a náchylnost k zadírání – nemožnost tření titanových součástí s jiným materiálem. [10]

2.3.1 Slitiny titanu

Slitiny titanu dosahují ještě daleko výrazně lepších vlastností v porovnání s čistým titanem. Hlavními legujícími prvky jsou Al a V, dále i Sn, Nb, Cr, Mo, Zr atd.

Slitiny titanu se dle struktury dělí na 3 typy:

- slitiny α – slitiny legované zejména hliníkem – např. TiAl5Sn2,5,
- slitiny β – vysoce legované prvky jako Fe, Cr, Mo, V – např. TiV10Fe2Al3,
- slitiny $\alpha + \beta$ – vedle hliníku obsahují vyšší množství prvků, které stabilizují fázi $\beta(\text{Ti})$ – např. TiAl6V4. [10] [15]

Tab. 7: Pevnost v tahu a použití pro základní slitiny titanu [10, 14]

Materiál	Rm [MPa]	Použití
Titan Ti	Ve vyžeháném stavu 300 Po def. zpevnění až 800	Implantáty, chemický, letecký, kosmický průmysl
<i>TiAl5Sn2,5</i>	860	Méně náročné součásti, vhodný pro použití v nízkých teplotách
<i>TiV10Fe2Al3</i>	Až 1400	-
<i>TiAl6V4</i>	Po tepleném zpracování až 1100	Vysoce namáhané součásti - le- tecký, kosmický průmysl

3 POROVNÁNÍ SPECIFICKÉ PEVNOSTI V TAHU POLYMERŮ A KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

V této kapitole byly využity poznatky z mé bakalářské práce (Polymery jako konstrukční materiály), která byla zaměřena na srovnání polymerních materiálů se základními kovovými materiály.

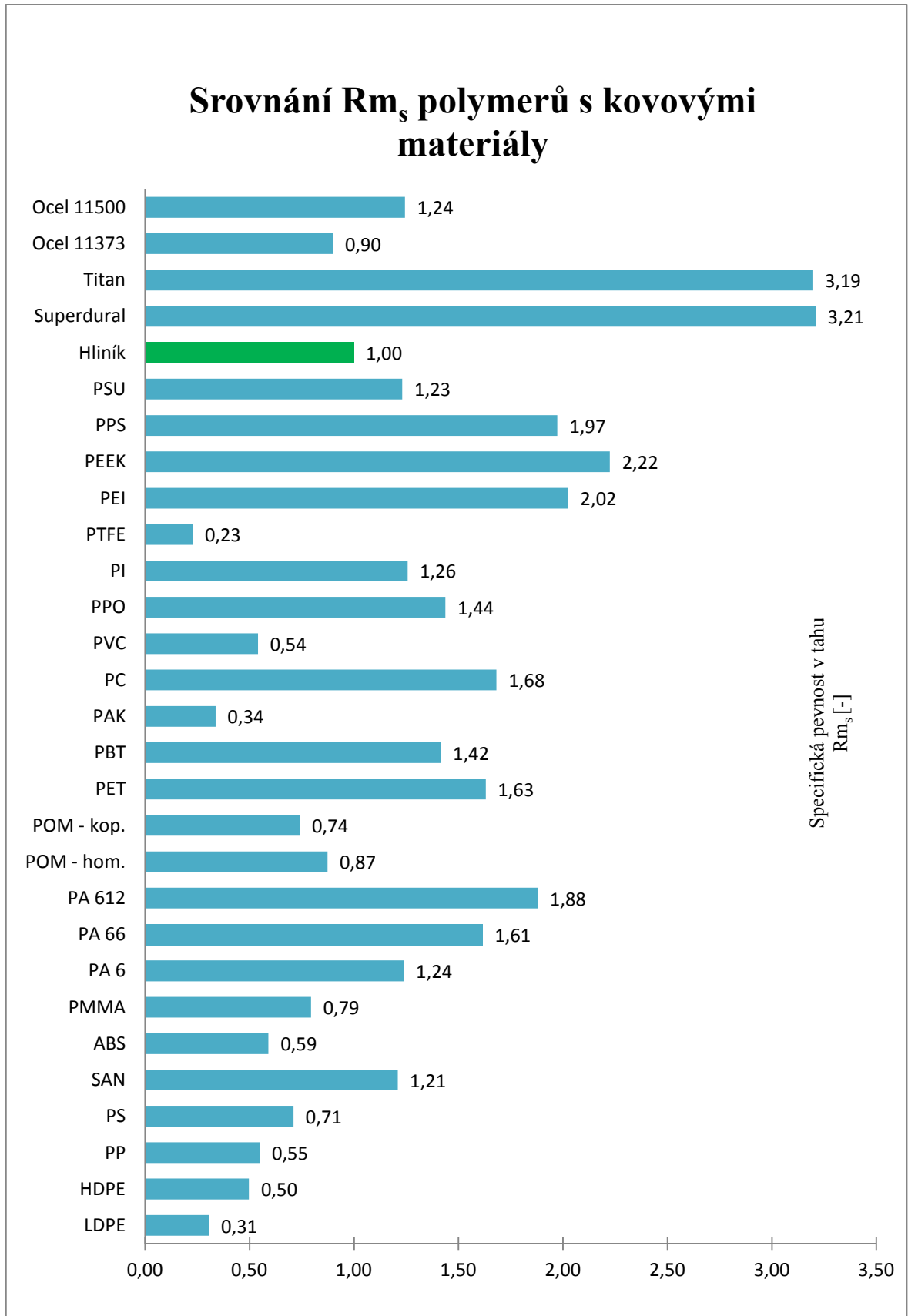
Samotná hustota, pevnost v tahu a modul pružnosti jsou u polymerů výrazně nižší, než u kovových materiálů. Využití specifické pevnosti v tahu zohledňuje kromě samotné pevnosti v tahu i danou hustotu materiálu. Tuto specifickou pevnost vypočítáme podílem známé pevnosti v tahu R_m a hustoty daného materiálu. Pro srovnání jednotlivých materiálů byl využit tzv. etalon. Etalon je bezrozměrné číslo o hodnotě 1. V tomto případě byl zvolen hliník jako etalon. Ostatní hodnoty pevnosti v tahu byly děleny specifickou pevností hliníku, a tak bylo možné získat různé poměrné hodnoty, které znázorňují, jak se liší bezrozměrná specifická pevnost v tahu daného polymeru v porovnání se specifickou pevností v tahu hliníku. [28]

V následující Tab. 8 a Obr. 8 je provedeno srovnání běžných, konstrukčních a speciálních polymerů právě s vlastnostmi kovových materiálů. U některých z polymerů jsou uvedeny jejich vlastnosti po vyztužení skelnými vlákny (většinou 30 %) a to z toho důvodu, že jejich použití jako neplněných materiálů je méně časté. [28]

Porovnání v Tab. 8 je zaměřeno na porovnání hustoty materiálu ρ , pevnosti v tahu R_m , modul pružnosti E a především na tzv. specifickou pevnost v tahu R_{m_s} , která je porovnávána i graficky. U polymerů se běžně pevnost v tahu označuje jako σ . Z důvodu smíšených údajů polymerů a kovů v tabulkách bylo zvoleno jednotné označení pevnosti v tahu R_m . [28]

Tab. 8: Porovnání specifické pevnosti v tahu jednotlivých skupin polymerů s kovovými materiály [28]

Druh	Materiál	Hustota [g.cm ⁻³]	Rm [MPa]	E [MPa]	Rm _s [-]
Semi-krystalické běžné polymery	LDPE	0,91	15,5	345	0,31
	HDPE	0,94	26,0	1379	0,50
	PP	0,90	27,5	1172	0,55
Amorfnní běžné polymery	PS	1,05	41,5	3102	0,71
	SAN	1,07	72,0	3310	1,21
	ABS	1,05	34,5	2068	0,59
	PMMA	1,17	51,7	2620	0,79
Semi-krystalické Konstrukční polymery	PA 6 (33 % SV)	1,30	89,6	5515	1,24
	PA 66 (33 % SV)	1,38	124,0	6205	1,61
	PA 612 (33 % SV)	1,32	138,0	6205	1,88
	POM - hom.	1,42	69,0	2800	0,87
	POM - kop.	1,42	58,5	3200	0,74
	PET (33 % SV)	1,67	151,5	1150	1,63
	PBT (33 % SV)	1,53	120,5	9308	1,42
	PAK	2,40	45,0	13445	0,34
Amorfnní konstrukční polymery	PC (33 % SV)	1,40	131,0	8618	1,68
	PVC	1,38	41,5	2413	0,54
	PPO (33 % SV)	1,25	100,0	7584	1,44
Semi-krystalické hi-tech polymery	PI	1,43	100,0	3000	1,26
	PTFE	2,17	27,5	408	0,23
	PEI (33 % SV)	1,50	169,0	8963	2,02
	PEEK	1,45	179,5	10000	2,22
Amorfnní hi-tech polymery	PPS (33 % SV)	1,38	151,5	11721	1,97
	PSU (33 % SV)	1,46	100,0	9308	1,23
Kovové materiály	Hliník	2,70	150,0	70000	1,00
	Superdural	2,80	500,0	-	3,21
	Titan	4,50	800,0	120000	3,19
	Ocel 11373	7,80	390,0	200000	0,90
	Ocel 11500	7,80	540,0	200000	1,24



Obr. 8: Porovnání specifické pevnosti v tahu jednotlivých skupin polymerů s kovovými materiály [28]

4 ZKOUŠKY MATERIÁLŮ – STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ

4.1 Tahová zkouška

V technické praxi se nejčastěji ze statických mechanických zkoušek využívá zkouška tahem, a to jak u kovových, tak polymerních materiálů. [5]

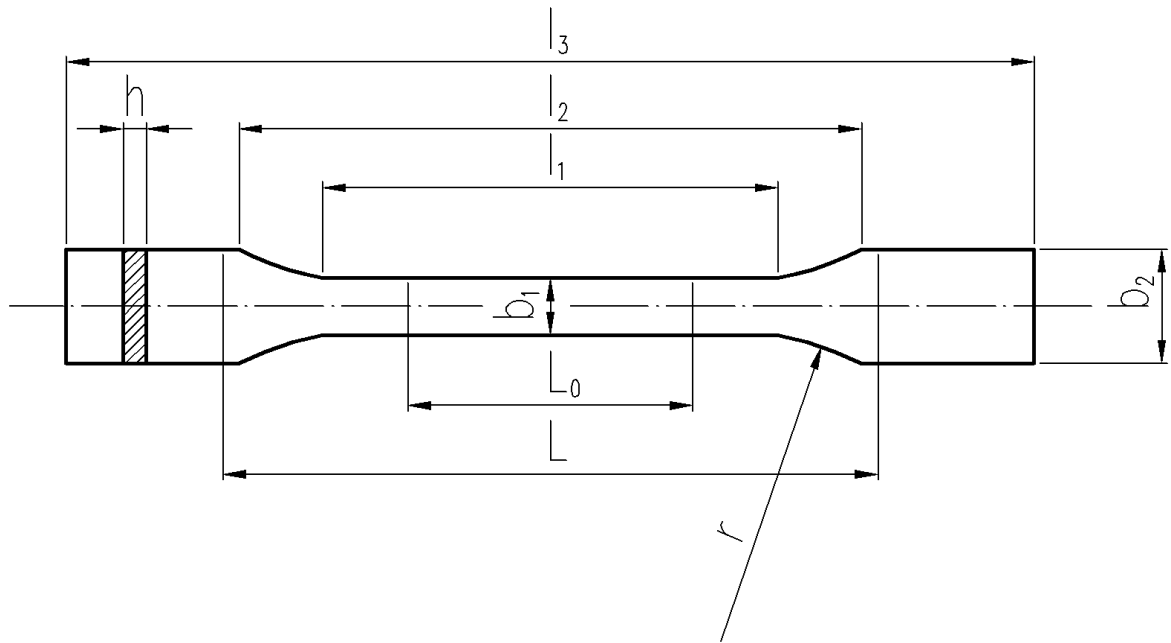
Principy a postup měření tahovou zkouškou předepisují normy ČSN EN ISO 527-1, ČSN EN ISO 527-2.

Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí (zatížení) nebo deformace (prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení. [11]

Uvažujeme-li, že zkoušený materiál je izotropní, tak by v ideálním případě napětí v tahu mělo být rozloženo rovnoměrně po celém průřezu zkušebního tělesa. V praxi ovšem tento ideální stav neexistuje, a to z důvodu anizotropie. Vlastnosti polymerů jsou v různých místech rozdílné a při tomto tahovém namáhání je napětí v tahu rozloženo po celém průřezu nerovnoměrně. [5]

4.1.1 Zkušební tělesa

Tvar a velikost zkušebního tělesa je dán normou ČSN EN ISO 527. Norma definuje různé druhy, tvary a velikosti zkušebních těles pro tahovou zkoušku. Zároveň rozlišuje i způsob výroby zkušebních těles, která mohou být obrobena, vyřezána nebo vyseknuta z již hotových výrobků nebo polotovarů (výlisky, fólie). Dále mohou být vyrobeny např. vstřikováním či tvářením. [5, 11]



Obr. 9: Normalizované rozměry pro zkušební těleso pro tahovou zkoušku plastů [12]

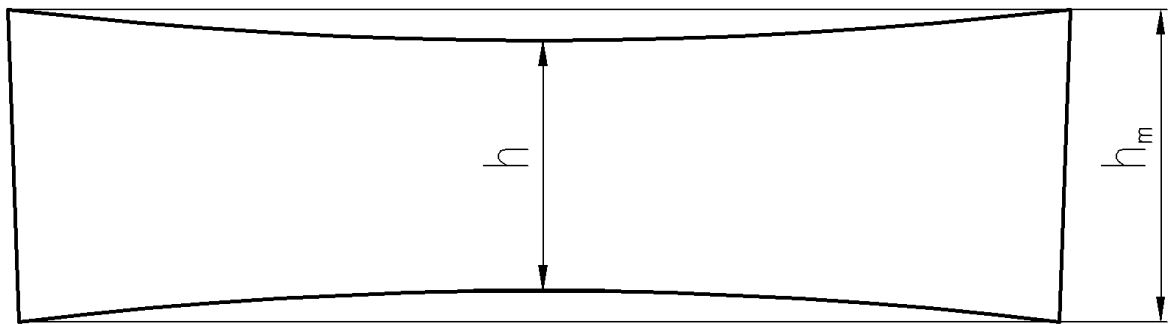
Tab. 9: Rozměry zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 527-2 [12]

	Typ zkušebního tělesa	1A	1B
l_3	Celková délka	170	≥ 150
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
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)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality nebo když je předepsaná)	$50,0 \pm 0,5$	
L		115 ± 1	115 ± 1

U některých materiálů je dovoleno zvětšit délku l_3 až na 200 mm, aby se zabránilo porušení, či prokluzu v čelistech zkušebního stroje.

V ideálním případě nejsou zkušební tělesa zkroucená, jednotlivé dvojice ploch jsou na sebe kolmé a hrany a plochy jsou bez škrábanců, propadlin a přetoků. Tyto parametry jsou kontrolovány. [11]

U vstřikovaných zkušebních těles je úkos stěny 1° až 2° k usnadnění vyjmutí z formy. Zároveň také nejsou vždy vstřikovaná zkušební tělesa bez propadlin a změny tloušťek (z důvodu chlazení). Rozdíl tloušťek $\Delta h \leq 0,1$ mm se považuje za přijatelný. [11]



Obr. 10: Průřez vstříkovaného zkušební tělesa s propadlinami a úkosem (zvětšeno) [11]
– platnost i pro ohybovou zkoušku

Kde je

h_m největší tloušťka průřezu zkušební tělesa;

h nejmenší tloušťka průřezu zkušební tělesa.

$$\Delta h = h_m - h \leq 0,1 \text{ mm}$$

(1)

4.1.2 Kondicionování

Zkušební tělesa je nutné kondicionovat dle příslušných norem pro daný materiál. Pokud tyto normy nejsou k dispozici, použijí se nejvhodnější podmínky z normy ČSN EN ISO 291 a doba kondicionování alespoň 16 hodin.

Zkušební prostředí by mělo mít teplotu 23 ± 2 °C a relativní vlhkost 50 ± 10 %. [11]

4.1.3 Zkušební stroj

Obecně musí zkušební zařízení vyhovovat normám ČSN EN ISO 7500-1 a ČSN EN ISO 9513. Mezi hlavní požadavky, jež norma předepisuje, lze zmínit – udržení konstantní specifikované rychlosti, správný tvar a poloha upínacích čelistí, správné využití indikátorů poměrného prodloužení (extenzometr, tenzometr) aj. [11]

Norma ČSN EN ISO 527-1 dále předepisuje přesný postup zkoušky, zkušební prostředí, rozměry zkušebních těles, upínání, předpětí, nastavení průtahoměrů, velikost zkušební rychlosti aj.

4.1.4 Výpočet a vyjádření výsledků

4.1.4.1 Napětí

Všechny hodnoty napětí (viz dále kapitola 4.1.5) se vypočítají pomocí vzorce

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

Kde je

σ hodnota příslušného napětí [MPa];

F příslušná naměřená síla [N];

S počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]. [11]

4.1.4.2 Poměrné prodloužení

Poměrné prodloužení se stanovuje pomocí průtahoměru. Využívá se pro materiály, u kterých převládá homogenní rozložení poměrného prodloužení pracovní části zkušebního tělesa (tj. do poměrného prodloužení do meze kluzu), pak se počítá dle rovnice:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3)$$

Kde je

ε hodnota poměrného prodloužení [-] nebo [%];

L_0 počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm];

ΔL_0 zvětšení počáteční měřené délky zkušebního tělesa [mm]. [11]

4.1.4.3 Modul pružnosti určený regresní analýzou

Tento výpočet modulu pružnosti se využívá, je-li zkušební zařízení vybaveno počítačem. Je využita lineární regrese:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (4)$$

Kde je

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ směrnice regresní přímky, která dle metody nejmenších čtverců odpovídá části křivky napětí/poměrné prodloužení v intervalu poměrného prodloužení $0,0005 \leq \varepsilon \leq 0,0025$ [MPa]. [11]

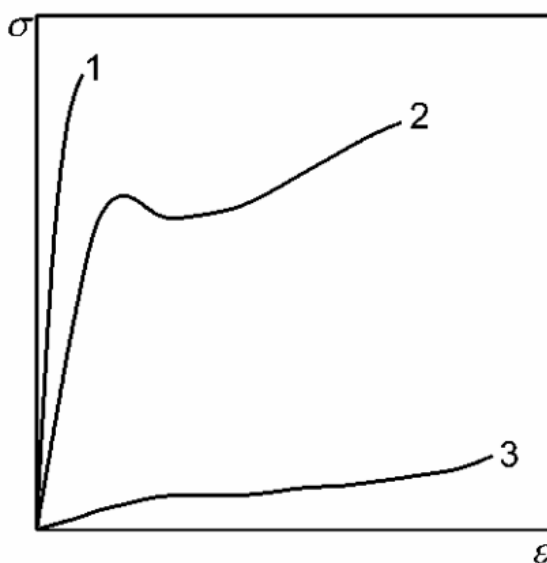
4.1.5 Smluvní pracovní diagram tahové zkoušky

Obr. 11 znázorňuje typické průběhy tahového chování různých materiálů.

První křivka č. 1 označuje tvrdé a elastické materiály, které obvykle mají tahové křivky s vysokou pevností (vysoký modul) a malou tažností. Materiály jsou méně houževnaté a jejich lom je křehký (pryskyřice, polystyren, PMMA, sklo, lehké kovy). [22]

Druhá křivka č. 2 značí materiály s plastickým chováním, které jsou sice méně tuhé s přibližně lineárním počátkem, ale větší plastickou oblastí, ve které se projeví horní mezí kluzu. Za touto mezí pak nastává pokles napětí a k lomu dochází zároveň s mezí pevnosti. Jde o měkké materiály, u kterých dochází k poklesu napětí za horní mezí kluzu a materiál se přetrhne až při mnohanásobném protažení. U těchto materiálů je mez pevnosti rovna horní mezí kluzu. [22]

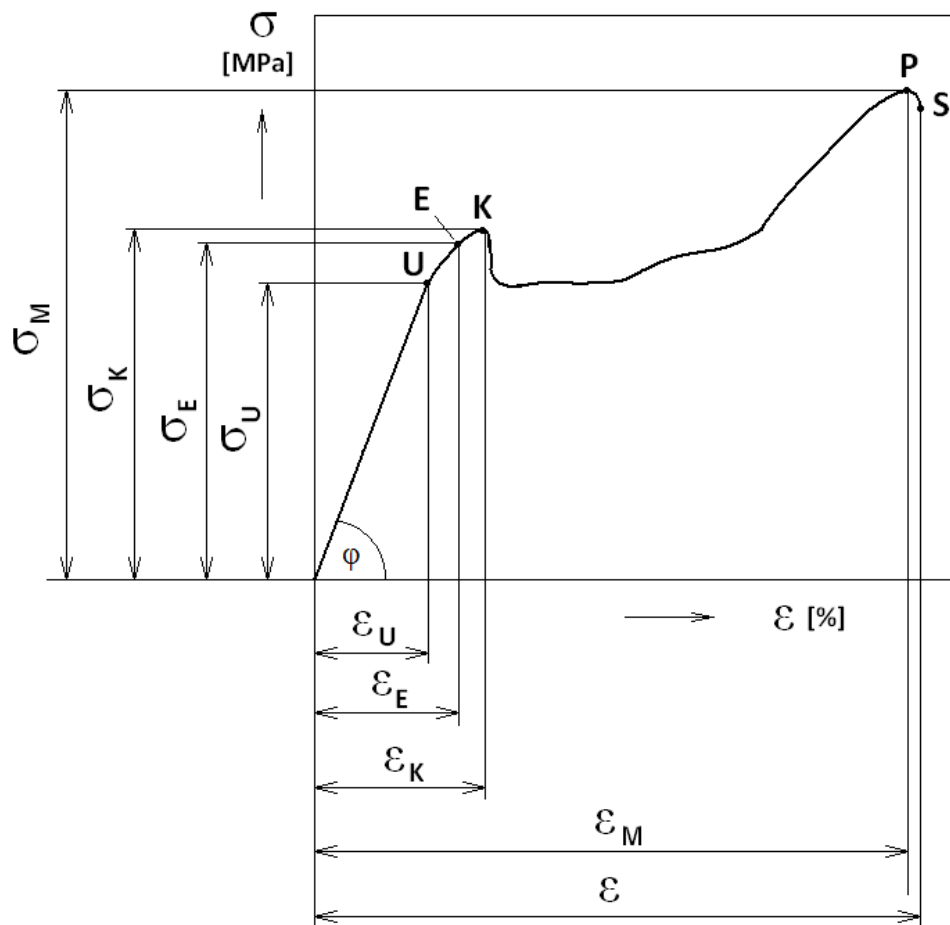
Třetí křivka č. 3 znázorňuje obvyklé chování elastomerů. Nelineární plynulý průběh, kdy je velká deformace na počátku při nízkém napětí a na konci zvýšené napětí s tažným lomem, který je zároveň mezí pevnosti v tahu. [22]



Obr. 11: Typy pracovních diagramů polymerních materiálů [22]

Na křivce smluvního pracovního diagramu se nacházejí tyto meze: (Obr. 12)

- U – mez úměrnosti σ_U ,
- E – mez pružnosti σ_E ,
- K – mez kluzu (dříve průtažnosti) σ_K ,
- P – mez pevnosti neboli pevnost v tahu σ_{Pt} (R_m),
- S – napětí při přetržení,
- Bodům odpovídají hodnoty tažnosti ε_E , ε_U , ε_K , ε_P .



Obr. 12: Smluvní pracovní diagram tahové zkoušky [5]

4.1.5.1 Mez úměrnosti (U)

Je to mezní napětí v tahu, pro které platí úměrnost mezi napětím a celkovou deformací.

Pro mez úměrnosti platí Hookeův zákon: [5]

$$\varepsilon = kR(\sigma) \quad (5)$$

Kde je

ε poměrné prodloužení $\Delta l/l_0$;

k je součinitel úměrnosti;

$R(\sigma)$ je napětí v tahu [MPa].

Mez úměrnosti je vyjádřena smluvním napětím:

$$R_U = \frac{F_U}{A_o} \quad [MPa] \quad (6)$$

Modul pružnosti (Youngův model): [5]

$$E = \frac{R(\sigma)}{\varepsilon} \quad [MPa] \quad (7)$$

4.1.5.2 Mez pružnosti (E)

Zakřivení, vznikající v dalším průběhu křivky, zahrnuje již časově závislou elastickou a plastickou deformaci. Mez pružnosti je největší napětí, po jehož odstranění se ještě zkušební vzorek téměř úplně vrátí do původního stavu, označuje se R_E : [6]

$$R_E = \frac{F_E}{A_o} \quad [MPa] \quad (8)$$

4.1.5.3 Mez kluzu (K)

Zvětšuje-li se napětí nad mez úměrnosti, tak hodnota modulu pružnosti (Youngova modulu) klesá, zatímco napětí pomalu stoupá nebo se zastaví, deformace se zvětšuje rychleji. [6]

Mez kluzu R_K je nejmenší napětí, při němž vznikají podstatné a hlavně trvalé deformace. Lze ji vyjádřit vztahem: [5]

$$R_K = \frac{F_K}{A_o} \quad [MPa] \quad (9)$$

4.1.5.4 Mez pevnosti v tahu (S)

Mez pevnosti v tahu je definována jako napětí potřebné k přetržení zkušebního tělesa vztážené na původní průřez. Pro výpočet se dosahuje vždy maximální hodnota F_{max} , i když k přetržení došlo později při nižším napětí: [6]

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0} \quad [MPa] \quad (10)$$

4.2 Ohybová zkouška

Zkouška ohybem je využívána především pro ty polymery, které jsou namáhány ohybem, a to hlavně v konstrukčních aplikacích. Jsou to například střešní krytiny, obklady ve stavebnictví a jiné. Stanovení ohybových vlastností předepisuje norma ČSN EN ISO 178. [6]

Princip rozložení napětí při ohybu je takový, že v horních vrstvách působí tahové napětí, které se směrem k neutrální ose zmenšuje a přes nulové napětí se mění v dolní polovině průřezu na tlakové. [6]

Maximální napětí se určí dle rovnic:

$$\sigma_t = \frac{M_o \cdot h}{I} ; \sigma_h = \frac{M_o \cdot h'}{I} \quad (11)$$

Kde je

M_o ohybový moment [Nm];

I moment setrvačnosti plochy průřezu zkušebního tělesa vzhledem k neutrální ose [kg.m²];

h tloušťka v tahové oblasti od neutrální osy [mm];

h' tloušťka v tlakové oblasti [mm].

Dosazením poměru $I/h = W$, kde W je modul průřezu, vychází pro napětí v ohybu:

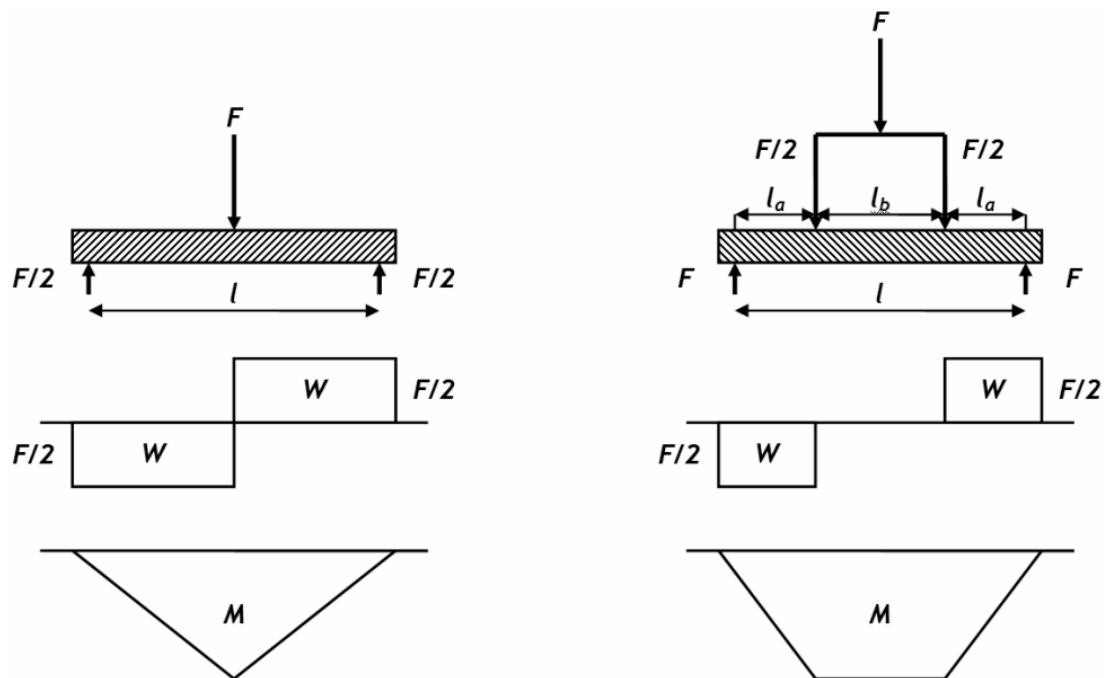
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W} \quad [MPa] \quad (12)$$

4.2.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa pro ohybovou zkoušku mají tvar kvádrů o určitých rozměrech, které musí být v souladu s příslušnou materiálovou normou, nebo musí být zkušební tělesa odsouhlaseny. [13]

Přednostní typ zkušebního tělesa má délku 80 ± 2 mm, šířku $10,0 \pm 0,2$ mm a tloušťku $4,0 \pm 0,2$ mm. [13]

Zkušební těleso plní funkci nosníku umístěného na dvou podpěrách vzdálených od sebe o vzdálenost l . Působící síla F působí buď uprostřed mezi podpěrami (tříbodový systém – Obr. 11). [6]

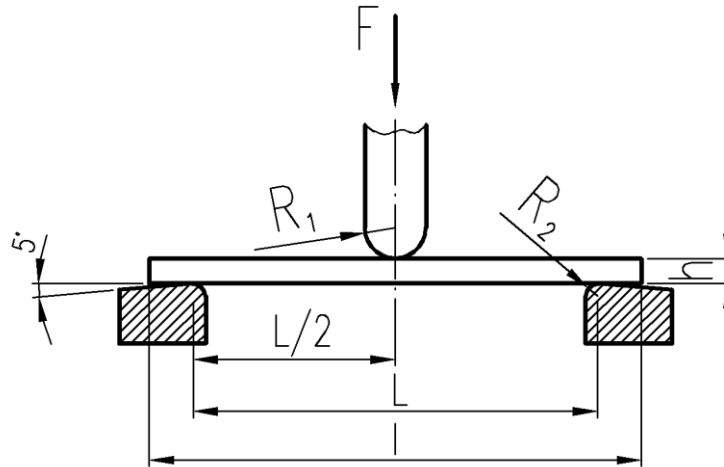


Obr. 13: Tříbodový a čtyřbodový systém ohybové zkoušky a jeho rozložení průřezového modulu a ohybového momentu [6]

Obr. 13 ukazuje rozložení průřezového modulu a ohybového momentu, který je minimální v místě podpěr a maximální uprostřed. Dojde-li při M_{\max} k prolomení zkušebního tělesa, tak: [6]

$$\sigma_y = \frac{M_{\max}}{W} \quad [MPa]$$

(13)



Obr. 14: Poloha zkušebního tělesa na začátku zkoušky [13]

Kde

- F použitá síla [N];
- R_1 poloměr zatěžovacího trnu [mm];
- R_2 poloměr podpěr [N];
- h tloušťka zkušebního tělesa [mm];
- l délka zkušebního tělesa [mm];
- L rozpětí mezi podpěrami [m]. [13]

4.2.2 Pevnost v ohybu

Pro tříbodový systém a těleso obdélníkového průřezu šířky b a výšky h platí, že: [22]

$$M_{max} = \frac{F_{max} \cdot l}{4} \quad [N \cdot mm]; W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [mm^3] \quad (14)$$

A pevnost v ohybu: [22]

$$\sigma_y = \frac{3F_{max} \cdot l}{2b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (15)$$

Kde je

- σ_y příslušné napětí v ohybu [MPa];
- F použitá síla [N];

- l rozpětí [mm];
 b šířka zkušebního tělesa [mm];
 h tloušťka zkušebního tělesa [mm]. [13]

Při čtyřbodovém ohybu je umožněno přesnější stanovení modulu pružnosti, a to z důvodu rovnoměrnějšího rozložení ohybového momentu. Pevnost v ohybu pro čtyřboký hranol se vypočítá: [22]

$$\sigma_y = \frac{F_{max} \cdot m}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot F_{max} \cdot m}{b \cdot h^2} \quad [MPa] \quad (15)$$

Tab. 10 udává orientační hodnoty pevnosti v ohybu pro některé vybrané materiály.

Tab. 10: Orientační hodnoty pevnosti v tahu pro vybrané materiály [6]

Materiál	Pevnost v ohybu [MPa]
PTFE	Pod 20
PP	29 – 49
PA	50 – 100
ABS	57 – 80
Dřevo	60 – 10
LDPE	110 – 140
Železo lité	300

4.2.3 Stanovení modulu pružnosti z ohybu

Ohybové zkoušky lze využít i pro stanovení modulu pružnosti E , a to především u těch materiálů, kde to není možné stanovit z tahové, či tlakové zkoušky. Jedná se především o polymery s malou tažností. [6]

V oblasti elastických deformací platí, že prohnutí je přímo úměrné síle a délce podpěr a nepřímo úměrné pružnosti a momentu setrvačnosti. Pro obdélníkový průřez zkušebního vzorku platí pro třibodový systém: [22]

$$y = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot E_y \cdot b \cdot h^3} \quad [mm] \quad (17)$$

$$E_y = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot y \cdot b \cdot h^3} \quad [MPa] \quad (18)$$

kde je

y prohnutí [mm];

E_y modul pružnosti [MPa].

pro čtyřbodový systém platí: [22]

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot m}{E_y \cdot b \cdot h^3} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot m^2) \quad [mm] \quad (19)$$

$$E_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot m}{b \cdot h^3 \cdot y} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot m^2) \quad [MPa] \quad (20)$$

Modul pružnosti se stanovuje tak, že se stanoví průhyby při různých zatíženích a ze směrnice závislosti zatěžovací síly a odpovídajícího prohloubení se odečte hodnota modulu. [22]

4.3 Zkoušky tvrdosti

Obecně se dá tvrdost popsat jako odolnost materiálu proti vniknutí jiného tvrdšího tělesa. Avšak houževnaté polymerní materiály a jejich povrchy jsou více či méně deformovatelné. Z toho důvodu se vyvinuly zkoušky v měření celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při měření tvrdosti u kovů, které jsou plastické, se vyhodnocuje tvrdost dle stopy, kterou ten daný tvar zanechal. U polymerů je nutné postupovat jinak, vzhledem k jejich viskoelastickému chování. Neměří se stopa, ale rovnovážná hloubka vniknutí daného tvaru, při určité konstantní síle vtlačování. Zkoušky tvrdosti, jež jsou používány u kovů, byly upraveny tak, aby je bylo možno použít i u polymerních materiálů.[6]

Zkoušky tvrdosti plastů jsou předepsány normami ČSN EN ISO 2039-1 a ČSN EN ISO 2039-2.

4.3.1 Tvrdość dle Brinella

Tato zkouška, běžně používaná u kovových materiálů, byla upravena pro zkoušky polymerů. Byly zvětšeny průměry měřících kuliček a snížena síla při jejich vtlačování.

Metoda měření tvrdosti dle Brinella spočívá ve vtlačení kuličky pod daným specifikovaným zatížením do povrchu zkušebního tělesa. Plocha vtlačení je počítána z hloubky, a hloubka vtlačení se měří pod zatížením. [16]

Tvrdość dle Brinella je vyhodnocována dle vztahu: [6]

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F_r}{\pi D h_r} \quad [MPa] \quad (21)$$

Kde je

HB tvrdost vtlačení kuličky [$N \cdot mm^2$];

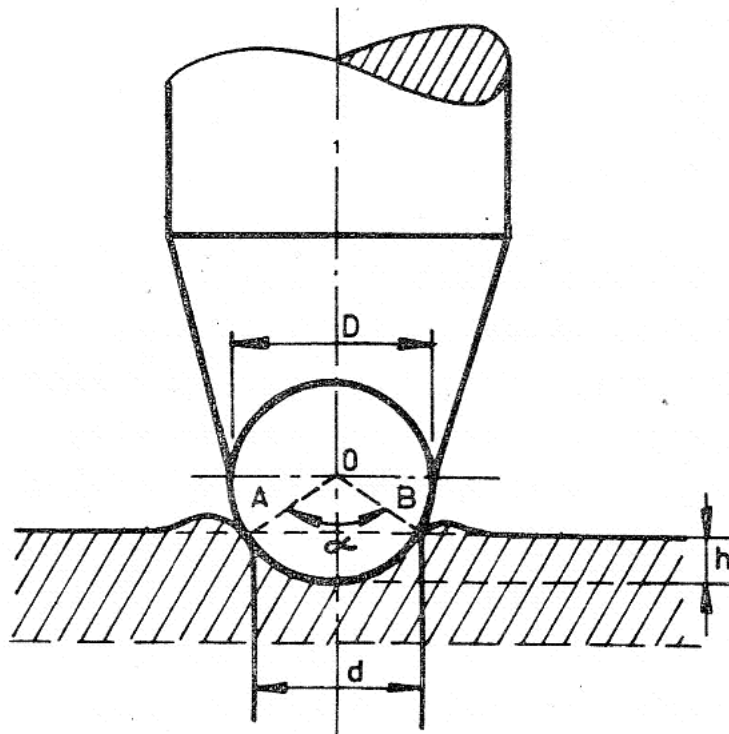
F_r redukované zatížení [N];

S plocha vytlačeného důlku [mm^2];

D průměr kuličky [mm] (= 5 mm);

h_r hloubka vtisku [mm] (= 0,25 mm).

Průměr kuličky a zatížení jsou při zkoušce konstantní a proměnlivou veličinou je jen hloubka vtisku h , která je odčítána dle výškového indikátoru. Indikátor zamezuje nepřesnému odečtení hloubky vtisku, či průměru vtistu, kterému by mohl bránit vytvořený návalek (Obr. 15) [6]



Obr. 15: Princip měření tvrdosti kuličkou dle Brinella [6]

Pro stejný úhel α dvou různých kuliček má být vztah mezi silou F a čtvercem velikosti D dle rovnice 22 konstantní. Teprve pak jsou výsledky tvrdosti při použití různých průměrů kuliček srovnatelné. [6]

$$\frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2} = \frac{F}{D^2} = konst.$$

(22)

K výpočtu hodnoty tvrdosti se používá redukovaných hodnot F_r a h_r :

$$F_r = F_m \cdot \frac{\alpha}{(h - h_r) + \alpha} = F_m \cdot \frac{0,21}{(h - 0,25) + 0,21}$$

(23)

Kde je

F_m zatížení působící na měřící kuličku [N];

h_1 hloubka vtlačení při zkušebním zatížení měřící kuličky [mm];

h_2 deformace zkušebního zařízení při zkušebním zatížení [mm];

h ($= h_1 - h_2$) hloubka vtlačení po provedení opravy na deformaci rámu [mm];

α je konstanta (0,21). [6]

4.3.1.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa musí mít hladké plochy, nejlépe tvaru hranolu, tak aby byl minimalizován vliv okrajů na výsledky zkoušky. (např. 20 x 20 mm). Plochy zkušebního tělesa musí být rovnoběžné. Doporučuje se tloušťka 4 mm.

Kondicionování zkušebních těles probíhá v jednom z prostředí, definovaných v ISO 291. [16]

4.3.1.2 Zkušební zařízení

Tvrdoměr se skládá z rámu s nastavitelnou základnou, desky pro uložení zkušebního tělesa, měřicí kuličky s příslušnými nastavci a zařízením.

Měřicí kulička musí být vyrobena z tvrzené oceli o průměru 5 mm ± 0,05 mm.

Zkušební zatížení F_m se zvolí z hodnot 49 N, 132 N, 358 N, 961 N, tak, aby dosažená hloubka vtlačení h po opravě na deformaci rámu ležela v rozsahu 0,15 až 0,35 mm. Další podrobnější informace a přesný postup zkoušky jsou uvedeny v příslušné normě ČSN EN ISO 2039-1. [16]

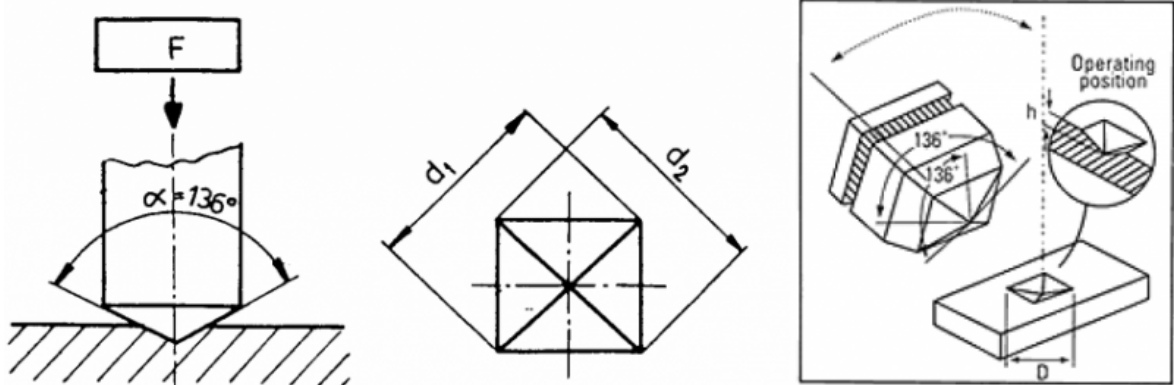
4.3.2 Tvrдость dle Vickerse

Princip měření tvrdosti dle Vickerse spočívá ve vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu. Vtisk je proveden určitou konstantní silou a po odlehčení se měří úhlopříčky u . Jehlan má úhel 136°. Tvrдость je dána poměrem zatěžující síly F a plochou vtisku S : [6]

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{1,8544 \cdot F}{u^2} \quad [MPa] \quad (24)$$

$$S = \frac{u^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{u^2}{1,8544} \quad [mm^2] \quad (25)$$

Výhodou metody je, že při použití různých zatížení se nemění hodnoty tvrdosti.



Obr. 16: Princip měření jehlanem dle Vickerse [9]

4.3.3 Tvrdost dle Rockwella

Metoda měření tvrdosti, při níž je na ocelovou kuličku spočívající na zkoušeném materiálu aplikováno konstantní předběžné zatížení. Poté následuje aplikace přidavného zatížení a návrat na předběžné zatížení. Všechny tyto procesy probíhají v daných časových intervalech zatěžování. Vlastní měření spočívá ve stanovení hloubky vtláčení, přičemž se odpočte elastické zotavení za určitou dobu po sejmutí přidavného zatížení, poté se rovněž odpočte hloubka vtláčení způsobeného předběžným zatížením. Hodnota tvrdosti dle Rockwella je přírůstek mezi hodnotami při zvýšeném zatížení a předběžném zatížení. [17]

Každý dílek na Rockwellově stupnici představuje vzdálenost (posun měřicí kuličky) o 0,002 mm.

V praxi je tvrdost dle Rockwella určena:

$$HR = 130 - e \quad (26)$$

Kde je

HR hodnota tvrdosti dle Rockwella;

e hloubka vtláčení po odstranění přidavného zatížení, v jednotkách 0,002 mm. [17]

Norma udává různé stupnice tvrdosti dle Rockwella, dělí se na R, L, M, E. Jejich odlišnosti jsou uvedeny v tabulce:

Tab. 11: Hodnoty přídavných zatížení, předběžného zatížení a průměrů měřicí kuličky [17]

Stupnice tvrdosti dle Rockwella	Předběžné zatížení [N]	Přídavné zatížení [N]	Průměr měřicí kuličky [mm]
R	98,07	588,4	12,7 ± 0,015
L	98,07	588,4	6,35 ± 0,015
M	98,07	980,7	6,35 ± 0,015
E	98,07	980,7	3,175 ± 0,015

4.3.3.1 Zkušební zařízení

Zařízením pro měření tvrdosti je Rockwellův tvrdoměr, který je složen z tuhého rámu (nese nastavitelný držák s kruhovou deskou pro zkušební těleso), měřicí kuličky (leštěná tvrzená ocel) s příslušnými držáky a zařízení pro aplikaci různých zatížení na měřicí kuličku bez rázu. [17]

4.3.3.2 Zkušební tělesa

Obvyklé zkušební těleso musí být plochá rovná deska o tloušťce minimálně 6 mm. Tvar zkušebního tělesa není nutně stanoven.

Zkušební tělesa se kondicionují dle normy ISO 291.

Další podrobnosti a konkrétní postupy jsou uvedeny v příslušné normě ČSN EN ISO 2039. [17]

4.3.4 Tvrdost dle Knoop

Zjišťování tvrdost dle Knoop je principem stejné jako měření tvrdosti dle Vickerse (tvrdost dle Knoop je citlivější k materiálové anizotropii). Od této metody se liší tvarem vtlačovaného tělesa a výpočtem z plochy vtisku. Vtlačované těleso má tvar anizotropního jehlanu s poměrem úhlopříček 7,114 : 1. HK se vypočítá z délky dlouhé úhlopříčky vtlačovaného tělesa: [22]

$$HK = \frac{F}{S} = \frac{14,23F}{l^2}$$

(27)

kde je

HK tvrdost dle Knoop [N.mm²];

- F zkušební zatížení [N];
- S promítnutá plocha vtlačeného povrchu [mm²];
- l délka delší vtlačené úhlopříčky [mm] [22].

Další podrobnosti jsou uvedeny v příslušné normě ČSN ISO 4545.

4.3.5 IRHD

Metoda měření IRHD vychází z anglických slov International Rubber Hardness Degrees, a tak již z názvu plyne, že je určena pro pryže (měkké a středně tvrdé) a plasty (pouze velmi měkké – měkčené PVC). Předepisuje ji norma ČSN ISO 7619-2.

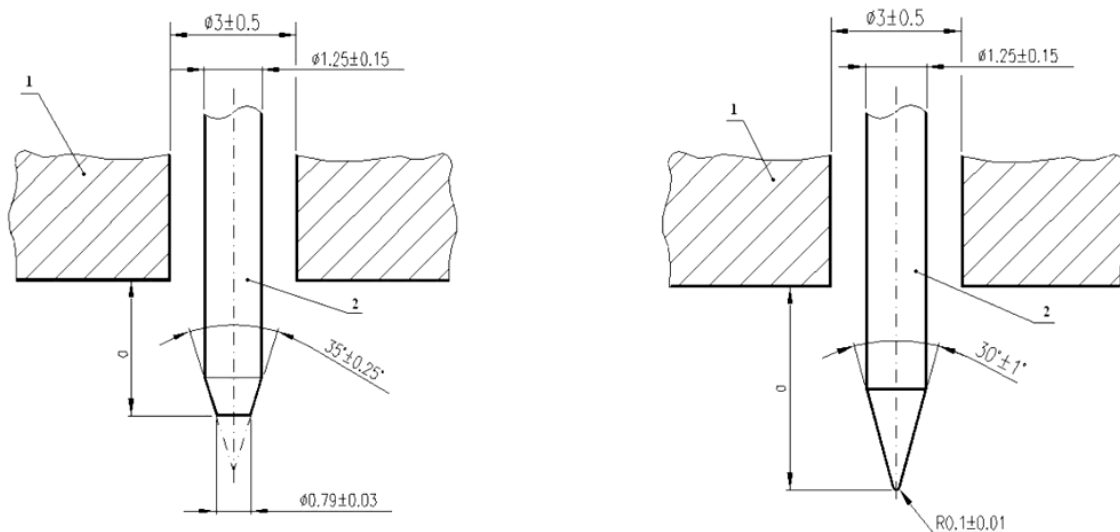
Princip metody spočívá ve vtlačování kuličky o určitém průměru a zatížení povrchu materiálu po dobu 5 s. Po 30 s se odečte hloubka vtlačení a následně se z tabulek pro tvrdost IRHD odečte příslušná tvrdost. Stupnice tvrdosti IRHD je taková, že hodnota 0 odpovídá tvrdosti materiálu s modulem pružnosti rovno nule a naopak hodnota 100 potom odpovídá tvrdosti materiálu s nekonečně velkým modulem. [22]

Dle očekávané tvrdosti materiálu se zvolí vhodná metoda zatížení:

- N – standardní zkouška, průměr kuličky 2,5 mm a zatížení 5,4 N,
- H – vysoká tvrdost, průměr kuličky 1 mm a zatížení 5,4 N,
- L – nízká tvrdost, průměr kuličky 5 mm a zatížení 5,4 N,
- M – mikrotvrdost, průměr kuličky 0,395 mm a zatížení 0,145 N. [22]

4.3.6 Tvrdost Shore

Metoda měření tvrdosti Shore patří k nejrozšířenějším metodám měření v průmyslové praxi. Využívá se měření tvrdosti Shore A, které slouží pro měření měkčích materiálů, a Shore D pro měření tvrdších materiálů. Způsoby měření se liší tvarem hrotů, kdy Shore A využívá komolý kužel, a Shore D využívá komolý kužel s kulatým vrchlíkem. Hroty jsou vtlačeny pomocí pružiny do materiálu a jako míra tvrdosti slouží hloubka, Shore využívá stupnici od 0 do 100. Měření tvrdosti dle Shore předepisuje norma ČSN ISO 7619-1. [22]



Obr. 17: Schematické zobrazení zkušební hrotu typu Shore A (vlevo) a typu shore D (vpravo) [23]

Kalibrované pružiny působí na zkušební hrot tvrdoměru určitou silou dle rovnic 27 a 28.

$$F = 550 + 75H_A \quad (28)$$

kde je

F síla vtlačování [N];

H_A hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu A.

$$F = 455H_D \quad (29)$$

kde je

H_D hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D [23]

Při samotném měření je důležité, aby těleso bylo položeno na vodorovný povrch. Tvrdoměr se přiloží kolmo na zkušební těleso tak, aby špička zkušební hrotu byla od kteréhokoli okraje zkušební tělesa vzdálena nejméně 9 mm. Na zkušební těleso se co nejrychleji a bez nárazu přitlačí opěrná patka, přičemž musí být stále rovnoběžná s povrchem zkušební tělesa. Tlak se volí dostačující k tomu, aby došlo k pevnému kontaktu mezi zkušebním tělesem a opěrnou patkou. Tvrdost se odečítá na stupnici přístroje po uplynutí určené doby. [23]

4.3.7 Tvrdost dle Barcola

Tato metoda je převážně vhodná pro okamžité (přenosný přístroj) měření tvrdosti velmi tvrdých reaktoplastů a termoplastů. Principem je velmi blízká metodě Shore. Zkušební zatížení je pomocí pružiny a komolé kuličky z kalené oceli vyvozeno na zkušební vzorek.

Vypočet dle vztahu: [22]

$$TB = 100 - \frac{h}{0,0076} \quad (30)$$

kde je

h hloubka vtlačení měřená při zatížení [mm]. [22]

4.4 Dynamické zkoušky jednorázové

Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti se provádějí metodou Charpy, při které je zkušební těleso umístěno na dvou podpěrách a přeráží se otáčivým kladivem uprostřed.

Další metoda, je metoda Izod, při které se zkušební těleso ve tvaru kvádrů na jednom konci upevní (vetknutí) a na druhém se přerazí.

4.4.1 Rázová a vrubová houževnatost metoda Charpyho kladiva

Zkouška rázové a vrubové houževnatosti metodou Charpy je předepsána normou ČSN EN ISO 179.

Charpyho metodou zjišťujeme rázovou energii pomocí kyvadlového kladiva, znázorněném na obr. 18. Energie pro rázovou deformaci se získává pomocí kyvadlového kladiva. Otočně zavěšené kladivo má ve své horní poloze potenciální energii: [6] [5]

$$E_p = mgh = Gh \quad [J] \quad (31)$$

kde je

G hmotnost kladiva [kg];

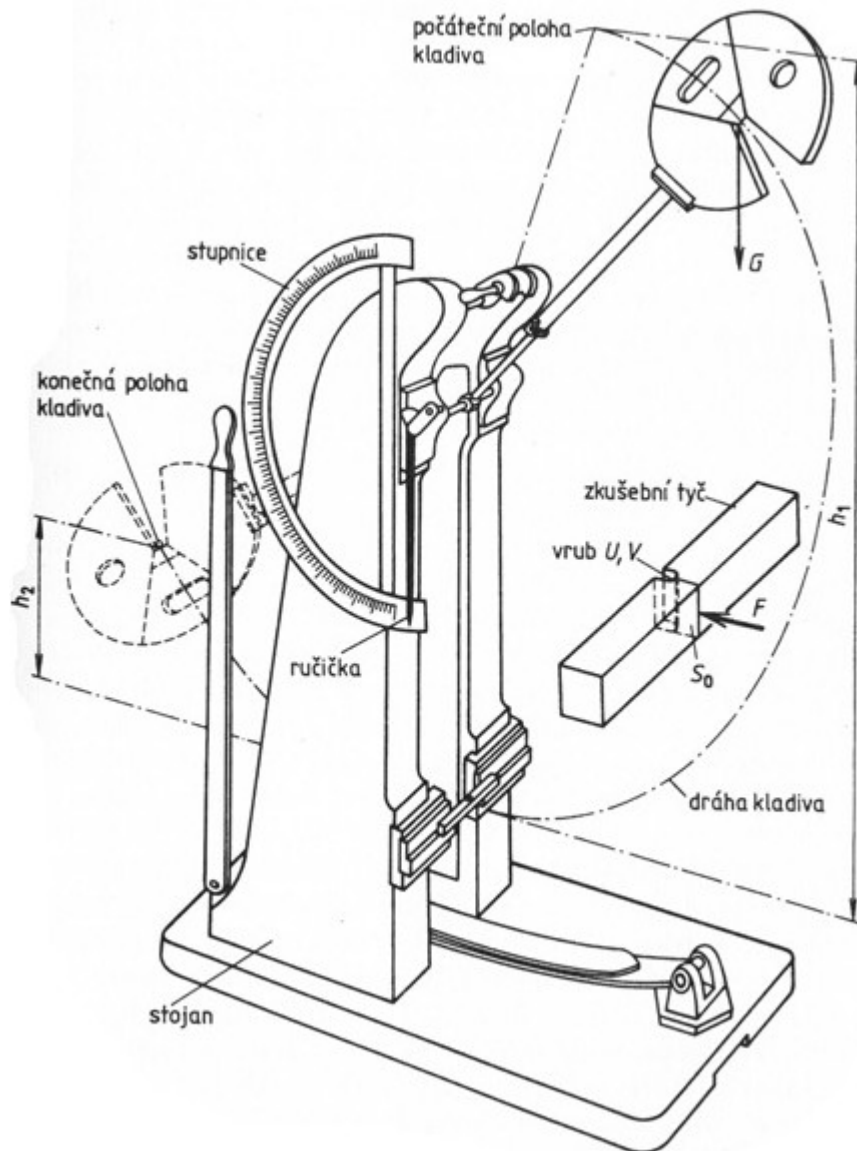
h je výška [mm].

Po uvolnění kladivo padá, kdy projde nejnižší polohou a maximální kinetickou energií při které proráží zkušební vzorek. Hodnota kinetické energie je dána polohou zavěšení,

a protože hmotnost kyvadla je konstantní, je rozdíl výšky kladiva před a po zkoušce měřítkem kinetické energie spotřebované při přeražení zkušebního tělesa. [6] [5]

$$W = G \cdot (h_1 - h_2) = Gr(\cos\beta - \cos\alpha) \quad [N \cdot m; J]$$

(32)



Obr. 18: Schéma Charpyho kladiva [8]

Rázová houževnatost je kinetická energie kyvadlového rázového kladiva, spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa bez vrubu. Je vztažena na původní plochu jeho příčného průřezu. [6]

$$A_n = \frac{W}{b \cdot h} \quad [kJ \cdot m^{-2}] \quad (33)$$

Kde je

W deformační energie spotřebovaná k přeražení tělesa a odečtená na stupnici zkušebního přístroje [kJ];

b šířka [m];

h tloušťka zkušebního tělesa [m].

Vrubová houževnatost je hodnota zjištěná ze zkušebních těles, které byly zeslabeny vrubem různého tvaru. Je vztažena na průřez po odečtení hloubky vrubu. [6]

$$A_k = \frac{W}{b \cdot h_k} \quad [kJ \cdot m^{-2}] \quad (34)$$

Kde je

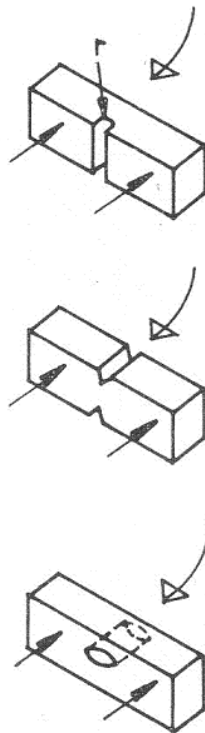
h_k tloušťka tělesa v místě vrubu [m].

Při samotné zkoušce se tělesa vkládají tak, aby byl vrub na opačné straně, než kde dojde k deformaci nebo nárazu kladiva. U izotropních materiálů by měl být teoreticky minimální rozdíl mezi rázovou a vrubovou houževnatostí. Ve skutečnosti je ovšem vliv narušení hladkého povrchu vrubem tak markantní, že hodnoty vrubové houževnatosti jsou 5 až 10 krát nižší, než hodnoty rázové houževnatosti. Aby bylo možné vyhodnotit citlivost různých polymerů na zeslabení nejen vrubem, zavádí se tzv. vrubový koeficient jako poměrná rázová houževnatost: [6]

$$K_v = \frac{A_k}{A_n} \quad (35)$$

Podstatný vliv na vrubovou houževnatost má tvar a hloubka vrubu. Nejvyšší hodnoty vrubové houževnatosti udává půlkruhový vrub o větším průměru. Při dosažení hloubky vrubu většího než 20% již nemá další vliv na hodnoty vrubové houževnatosti. [6]

Vruby zhotovené obráběním se připravují dle normy ISO 2818. Je možné použít zkušební tělesa s vrubem, který vznikl tvářením, nicméně výsledky těchto zkoušek nejsou srovnatelné s výsledky u vrubu zhotoveného obráběním. [7]



Obr. 19: Typy vrubů zkušebních těles pro vrubovou houževnatost [6]

Tab. 12: Orientační hodnoty rázové a vrubové houževnatosti pro vybrané materiály [6]

Materiál	Rázová houževnatost [kJ.m ⁻²]	Vrubová houževnatost [kJ.m ⁻²]
PP	9 – 13	4 – 15
PVC – tvrdý	<i>nezlomí se</i>	2 – 5
PS	10 – 20	2 – 3
ABS	80 – 100	6 – 10
PMMA	<i>10 – 11</i>	2 – 3
PA 66	<i>nezlomí se</i>	20
PA6 (SV 30%)	45	14

4.4.1.1 Zkušební tělesa

Je nutné, aby zkušební tělesa byla připravena v souladu s příslušnými materiálovými specifikacemi. Pokud jsou lisována, tak musí odpovídat normám ISO 293, nebo ISO 295. Pokud

jsou zkušební tělesa vstříkována, tak je nutné, aby odpovídala dle norem ISO 294-1, ISO 294-3 nebo ISO 10724-1.

Zkušební tělesa nesmí být nijak zkroucená, jednotlivé dvojice ploch na sebe musejí být kolmé a nesmí obsahovat vrypy, nerovnosti, propadliny a přetoky. Požadované vlastnosti se kontrolují mikrometrem. [7]

4.4.2 Metoda Izod

Metoda IZOD, využívaná především v USA, se od metody Charpy liší především ve způsobu přeražení zkušebního vzorku. Jako nevýhodu této metody lze označit brzdění kladiva zbytkem přeraženého vzorku, který brání v jeho pohybu a část energie je spotřebována na jeho odmrštění. U nás metodu Izod předepisuje norma ČSN EN ISO 180. [5]

Při zkoušce se využívá vrub typu V, s úhlem 45°. Jeden konec zkušebního vzorku je chycen v upínací čelisti přístroje. Otočně uchycené kladivo naráží ze strany vrubu v určité vzdálenosti od volného konce. [5]

Metodu lze rozdělit na dva postupy:

Při prvním se postupuje obdobně jako u metody Charpy. Energie potřebná k přeražení se dělí šířkou zkušebního tělesa měřenou podél vrubu. [5]

Při druhém postupu se zjišťuje čistá energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa. To znamená, že se musí zjistit energie potřebná k odmrštění uražené poloviny zkušebního tělesa. [5]

Uražená polovina zkušebního vzorku se umístí na část uchycenou v čelisti a provede se úder jako při rázové zkoušce, ovšem z takové výšky, aby bylo těleso odmrštěno asi stejnou rychlostí jako při rázové zkoušce. Energie se zjistí volným kyvem z této výšky. Energie potřebná k odmrštění přeražené části se nazývá rázový faktor. Rozdíl rázové energie a rázového faktoru je čistá rázová práce. [5]

$$A_n = \frac{W - (W_0 - W_z)}{b \cdot h} \quad [kJ \cdot m^{-2}]$$

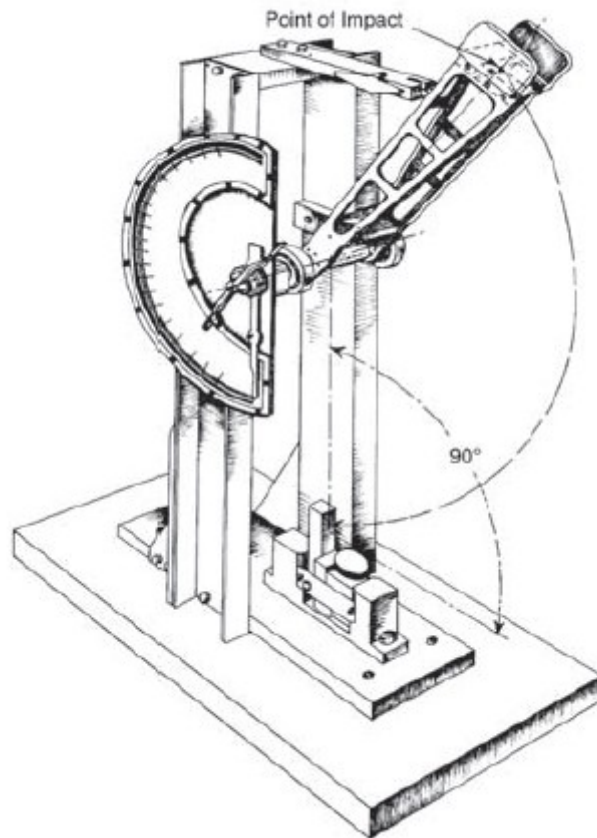
(36)

kde je

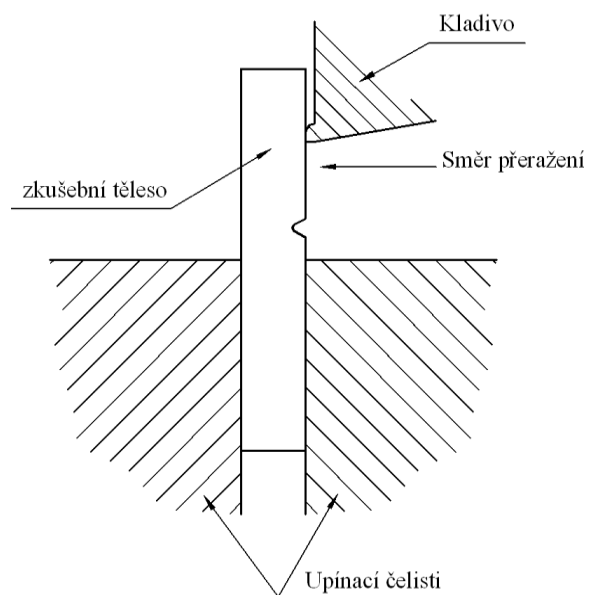
W práce odečtená na stupnici po přeražení zkušebního tělesa [kJ];

W_0 hodnota volného kyvu ze stejné výchozí výšky [kJ];

W_z hodnota odečtená při volném kyvu a odmrštění části přeraženého zkušebního tělesa [kJ]. [22]



Obr. 20: Schéma zařízení pro metodu Izod [1]



Obr. 21: Schematický náčrt metody Izod [1]

4.4.3 Rázová zkouška pádem

Rázová zkouška pádem se provádí tzv. padostrojem. Má výhody ve volbě energie a rychlosti oproti metodám s kyvadlovým kladivem. Princip je založen na volně padajícím tělese s libovolnou kinetickou energií. Velikost kinetické energie E je závislá na hmotnosti tělesa a výšce, z něž je spuštěno. [5]

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (37)$$

kde

m je hmotnost pádového tělesa [kg];

h je výška dopadu [m];

v je okamžitá rychlost pádu pádového tělesa [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. [5]

Zkouší se již hotové výrobky, lze jmenovat například laminát, kdy se zkušební těleso upne do stroje a následně se nechá zatížit volným pádem padající kuličky nebo čidla, kde dle potřeby zvyšujeme závaží. V případě, že po dopadu tělesa zkušební vzorek nepraskne, tak se zvýší zatížení. V případě, že praskají všechny vzorky, tak se zatížení sníží. Při každém zkoušeném materiálu se zkouší 10 vzorků, a hledá se zatížení, při kterém praskne 50 % vzorků. Rázovou zkoušku pádem určuje norma ČSN EN ISO 6603. [5]

Následné vyhodnocování naměřených hodnot probíhá tak, že se počet prasklých vzorků při jednotlivých hmotnostech tělesa vyjádří v procentech. Hmotnost pro výpočet zahrnuje hmotnost nárazníku (kuličky, čidla) a součet hmotností přidaných závaží.

$$G_{50} = G_{100} - \Delta G \cdot \left(\frac{S}{100} - \frac{1}{2} \right) \quad (38)$$

kde je

G_{50} hmotnost 50% porušení [kg];

G_{100} nejmenší hmotnost, při které prasknou všechny vzorky [kg];

ΔG hmotnost přídavných závaží [kg];

S součet procentuálních hodnot všech jednotlivých zkoušek. [5]



Obr. 22: Moderní pádový stroj [24]

4.4.4 Rázové zkoušky tahem

Tato metoda nachází uplatnění především pro stanovení odporu materiálu vůči přetržení při vysokých rychlostech, a lze je popsat jako tahové zkoušky při vysoké rychlosti deformace. Tímto způsobem se zkouší vysoce houževnaté polymery. Zkouška je předepsána normou ČSN EN ISO 8256. [22]

Zkušební tělesa mají tvar podobný jako u zkoušky tahem, ale s různou délkou pracovní části. Tělesa s krátkou pracovní částí mají podobné výsledky jako u ohybové zkoušky. U těles s delší pracovní částí vzniká určité protažení, což umožňuje vyhodnotit dynamickou tažnost a deformaci. Práce vynaložená na přetržení měřené části tělesa se rovná součinu působící síly a prodloužení (spotřebované energii a deformace tělesa). [22]

Rázová houževnatost v tahu se spočítá dle vztahu:

$$A_{\varepsilon} = \frac{W_{\varepsilon}}{b \cdot h} \quad [kJ \cdot m^{-2}] \quad (39)$$

kde je

W_{ε} korigovaná rázová práce [kJ]. [22]

$$W_{\varepsilon} = W - (W_k + c) \quad (40)$$

kde je

W deformační práce odečtená na stupnici Charpyho kladiva [kJ];

W_k ztráty třením a kyvem [kJ];

c rázový korekční faktor daný konstrukcí kyvadla [-]. [22]

Trvalá deformace se vyhodnocuje ze změny délky pracovní části zkušebního tělesa:

$$TD = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

(41)

kde je

l délka zkušebního tělesa měřená jednu minutu po přeražení [mm];

l_0 původní délka zkušebního tělesa [mm]. [22]

5 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE

Nejčastěji používanými technologiemi při zpracování polymerů jsou vstřikování, vytlačování, lisování, válcování, natírání, vyfukování a rotační tváření. V řešené aplikaci bude použito vstřikování, které je v následujících podkapitolách popsáno podrobněji, zejména s ohledem na případné použití.

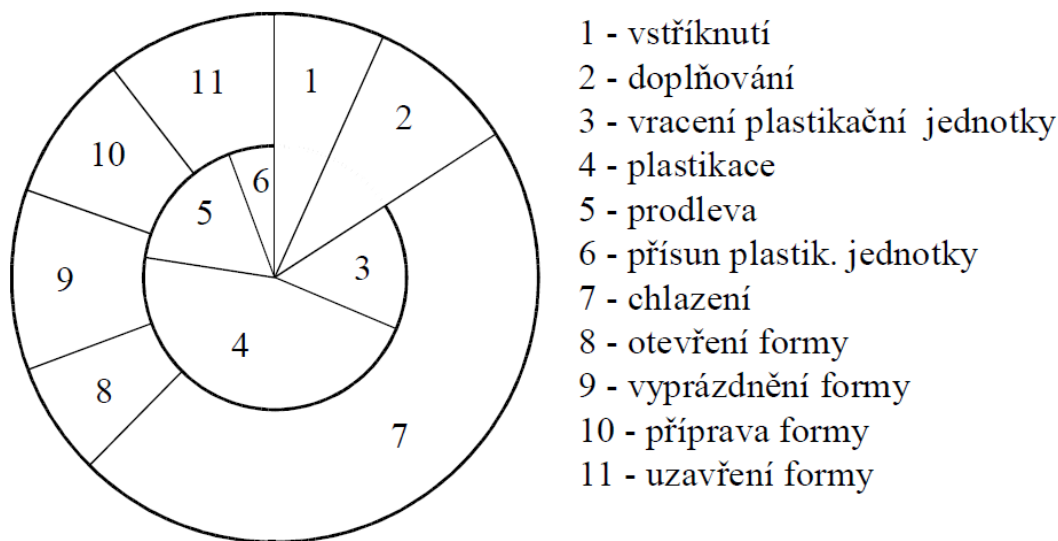
Tato kapitola krátce shrnuje popis technologií, kterými by bylo možné navržený výrobek vyrobit. A to především jejich klady a zápory. Kromě klasické technologie vstřikování, by bylo možné využít tzv. GIT vstřikování (gas injection technology), kdy se využívá vstřikování s podporou plynu.

5.1 Obecný popis vstřikování

Vstřikováním se vyrábějí velmi přesné výrobky s vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností.

Je to nejrozšířenější technologie na zpracování výrobků, či polotovarů z polymerů, je to proces cyklický. Zpracovávají se téměř všechny termoplasty, a v omezené míře i reaktoplasty a kaučuky. [36]

Postup tváření polymerů vstřikováním je následující: Polymer ve formě granulí je z násypky odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje, která ho dopravuje do tavicí komory, kde za působení tření a topných těles je tuhý polymer přeměněn v taveninu. Tavenina je následně vstřikována do předem připravené dutiny formy, kde zaujme její tvar. Následuje dotlak, pro snížení rozměrových změn a smrštění. Poté je forma intenzivně chlazená, a tavenina ztuhne ve finální výrobek. Po zatuhnutí je výrobek vyhozen z formy a celý cyklus se opakuje. [36]



Obr. 23: časový průběh vstřikovacího cyklu [37]

Hlavní výhody vstřikování:

- krátký čas cyklu,
- schopnost vyrábět složité součásti,
- konstrukční flexibilita,
- vysoká a požadovaná kvalita povrchu,
- relativně dobré tolerance výsledných rozměrů. [36]

Hlavní nevýhody vstřikování:

- vysoké investiční náklady (stroj, forma),
- dlouhé doby nutné pro výrobu forem,
- neúměrně velké zařízení v porovnání s vyráběným dílem. [36]

5.1.1 Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku

Mechanické a fyzikální vlastnosti budoucího výrobku ovlivňují druh polymeru, konstrukce formy, technologické parametry a stroj. Všechny tyto činitele se ovlivňují navzájem.

Důležité vlastnosti polymeru, jež ovlivňují vlastnosti výstřiku:

- rychlost plastikace polymeru (co nejkratší),
- reologické vlastnosti – dostatečná tekutost – nesmí se měnit s teplotou příliš rychle,

- dostatečná tepelná stabilita polymeru v rozsahu zpracovatelských teplot,
- velikost vnitřního pnutí – co nejnižší,
- smrštění polymeru. [36]

Technologické parametry, které nejvíce ovlivňují vlastnosti výstřiku:

- vstřikovací tlak – ovlivňuje rychlost plnění, uzavírací sílu, vnitřní pnutí, smrštění, orientaci,
- teplota taveniny – ovlivňuje tekutost polymeru, vstřikovací tlak, dobu chlazení, dobu cyklu, smrštění, tlakové ztráty, dotlak atd.,
- teplota formy – ovlivňuje tekutost polymeru, rychlost plnění, dobu chlazení, lesk výrobku, povrch výrobku, teplotu taveniny, dotlak, vnitřní pnutí smrštění atd.,
- rychlost plnění dutiny formy – co nejvyšší, nutnost kontrolovat teplotu taveniny, aby nedošlo k degradaci materiálu,
- velikost a doba trvání dotlaku – ovlivňuje rozměry, smrštění a vnitřní pnutí výrobku. [36]

5.2 Vstřikování GIT

Tato technologie byla vyvinuta za účelem tvorby uzavřených dutin (vyplněna plynem), čímž vzniká výlisek o zdánlivě velkém průřezu, přičemž ale odpadá nutnost chlazení velkého množství roztavené hmoty. [35]

Vlastní proces vstřikování je obdobný jako u klasické technologie vstřikování, tedy zavření formy, vstřik, dotlak, chlazení, otevření formy a vyhození výrobku. Tlak plynu zde však přebírá funkci dotlaku, je však nutné pomocí konstrukce tvaru (geometrická opatření) kontrolovat směr pohybu plynu. Žebra a rozdílné tloušťky stěn potom slouží k vedení plynu. [35]

Výhody procesu vstřikování GIT:

- snížení uzavíracích sil,
- snížení smrštění,
- zkrácení délky cyklu (menší tloušťka stěny = kratší chlazení),
- snížení hmotnosti výrobku (= spotřeby materiálu),

- nízká deformace ploch výrobku,
- zachování požadovaných vlastností a minimalizace deformace výstřiku,
- tuhost při zachování vysoké kvality povrchu. [35]

Naopak jako nevýhody lze označit:

- vyšší cena nástroje i stroje,
- problematické chlazení v místě kanálu,
- řízení procesu. [35]

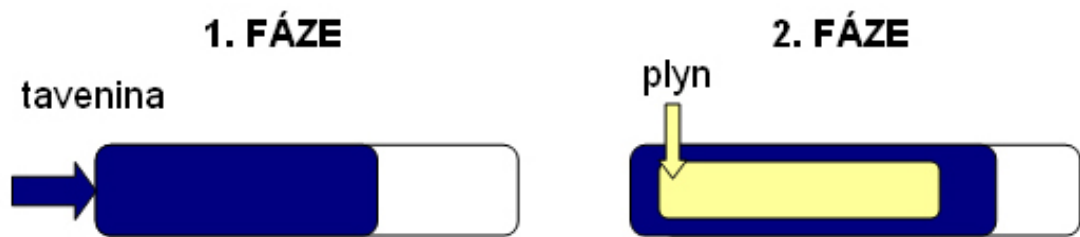
Při vstřikování s podporou plynu je nejdříve vstříknut polymer (nejlépe s pomocí horkých vtoků pro ideální homogenitu a teplotu taveniny) a teprve potom plyn, protože při současném vstřikování by se plyn dostal na povrch výstřiku. Proto je velmi důležité načasování (prodleva mezi vstříknutím polymeru a plynu), což klade velké nároky na konstrukci formy. [35]

Tab. 13: Parametry pro GIT vstřikování [35]

Plyn	Dusík (min. čistota 99,8 %)
Možnost stlačení plynu	10 až 30 MPa
Redukce hmotnosti	Až 50 %
Zkrácení doby cyklu	Až 50 %
Pokles výrobních nákladů	30 až 50 %
Možnost použití pro	PE, PP, PS, PA, ABS, PC, TPE aj.
Přívod plynu	Tryska nebo injektor

5.2.1 Krátký vstřík – dofukovací způsob

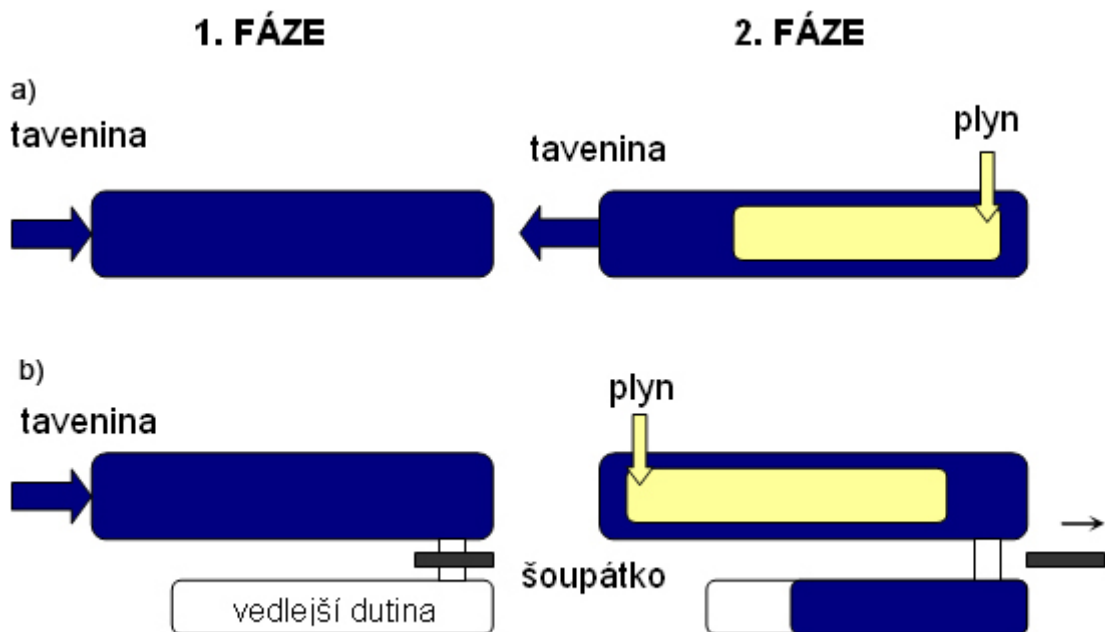
První ze způsobů tvorby dutiny je dofukovací způsob. Dutina při vstřikování je naplněna jen částečně (50 až 90% objemu taveniny) a následně je tlakem plynu zcela vytvarována dutina formy. Největším problémem je správné určení objemu dávky taveniny. [35]



Obr. 24: Metoda krátkého vstříku – dofukovací způsob

5.2.2 Dlouhý vstřík – vyfukovací způsob

Druhý ze způsobů tvorby dutiny je vyfukovací způsob, kdy se plyn do dutiny vstříkuje až po té, co polymer zcela vyplní tvarovou dutinu. Následně je tavenina vytlačována zpět před čelo šneku nebo do pomocné dutiny. U krátkého vstříku klesá tloušťka stěny se vzdáleností dráhy plynu, u dlouhého vstříku je rovnoměrnější po délce kanálu. [35]

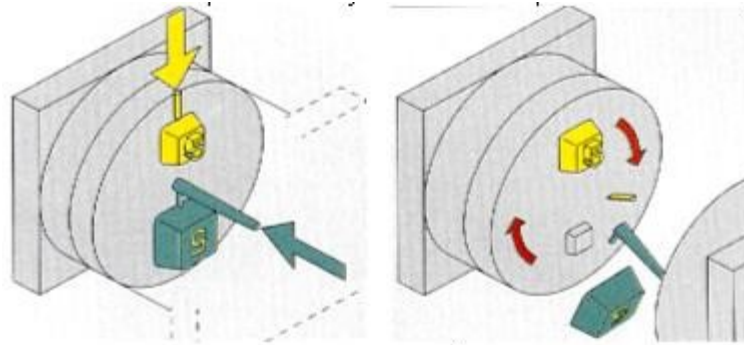


Obr. 25: Metoda dlouhého vstříku – a) se zpětným odtokem taveniny zpět před čelo šneku, b) s vedlejší pomocnou dutinou

5.3 Vícekomponentní vstříkování

Tato technologie umožňuje na jednom výstříku kombinaci dvou či více materiálů (i nemísitelných), nebo barev. V tomto případě nepřijímá funkci dotlaku plyn, jak tomu bylo u procesu GIT, ale proces je shodný s klasickou technologií vstříkování. Od klasického

vstřikování se tato technologie liší pouze tím, že k vstřikovací formě jsou připojeny dvě, tři, respektive čtyři vstřikovací jednotky. [35]



Obr. 26: Dvoukomponentní vstřikování s rotací poloviny formy kolem vodorovné osy [35]

Mezi nejdůležitější činnosti u vícekomponentního vstřikování patří překládání výstřiků z jedné pozice do další. Všechny procesy se dějí automaticky během pracovního cyklu. Z hlediska překládání výlisku se používají tyto způsoby:

- rotace kompletní poloviny formy kolem vodorovné osy
- rotace kompletní poloviny formy kolem vertikální osy
- rotace části formy
- použití šoupátka – hlavně velké výlisky (měkký materiál + tvrdý polymer)
- použití robotu – velké výlisky – světla, zpětná zrcátka, prvky palubní desky

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomová práce řeší návrh náhrady kovového nástroje za polymerní. V řešeném případě se jedná o montážní nástroj, označený výrobcem a uživatelem jako „montážní jehla“. Nástroj je tvořen funkční částí, vyrobenou z oceli, a upevněnou do univerzální dřevěné rukojeti.

Ze strany výrobce a uživatele byl nejprve vznesen požadavek na řešení ergonomie rukojeti z důvodu vzniku zdravotních problémů při dlouhodobém užívání. Současné řešení nástroje, respektive rukojeti, je z uživatelských důvodů nevyhovující.

Nástroj je využíván při výrobě elektrických motorů, slouží pro zarovnání měděných drátů (již opláštěvaných) při výrobě těchto motorů. Princip použití nástroje spočívá v tom, že trn se zasouvá mezi opláštěvané dráty, které jsou k sobě přitlačovány v jednom svazku. Vzniká zde mezera a tím se brání možnému zkratu s dalším svazkem.

Funkční část nástroje musí být velmi hladká (u ocelové jehly řešeno leštěním), aby nedocházelo při vlastní montážní operaci k poškození montovaného objektu. Vzhledem k charakteru operace je montážní nástroj namáhán zejména ohybem.

Po počáteční analýze a rozvaze bylo rozhodnuto řešit nástroj komplexně, a to jak s ohledem na ergonomii, tak i s ohledem na funkčnost nástroje. Jako hlavní cíl byl vytyčen návrh nástroje, který bude vyhovovat bezpečnostním i funkčním požadavkům při ekonomicky přijatelných nákladech.

Diplomová práce má za úkol posoudit, zda již navržený tvar a geometrie vyhovuje v oblastech zpracování či výroby, použití a ekonomické náročnosti. Především je nutno posoudit, zda navržený tvar vyhovuje obvyklým požadavkům vstřikovacího procesu, zda z pevnostního hlediska je předpokládaná mechanická odolnost vůči ohybu dostačující, a zda bude ekonomicky únosné vyrábět nástroj technologií vstřikování i při relativně malých objemech výroby. Funkční část vychází z existujícího řešení.

Řešení bude zahrnovat:

- návrh výrobku,
- návrh vhodných typů polymerů,
- analýzu nástroje,
 - simulaci procesu vstřikování,

- pevnostní analýzu – předpokládaná odolnost na ohybové zatížení,
- ekonomické hodnocení návrhu.

7 NÁVRH VÝROBKU/NÁSTROJE Z POLYMERU

Tato část diplomové práce řeší návrh výrobku, návrh technologie, návrh vhodných typů polymerů, obecnou simulaci procesu, rychlost a průběh vstřikování.

Cílem práce není navržení vstřikovací formy a optimalizace procesu, ale hodnocení, zda má opodstatnění tento nástroj vyrábět technologií vstřikování, zda bude dostatečně mechanicky odolný a od jakého počtu kusů bude ekonomicky výhodný. Návrh formy by byl námětem na další diplomovou práci.

Pro konstrukci modelu ve 3D rozhraní a následnou analýzu procesu výroby vstřikováním byly využity programy Catia V5R18 a Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013 (dále jen ASMS 2013).

7.1 Současné řešení montážního nástroje

Současný montážní nástroj je tvořen dřevěnou rukojetí a kovovou pracovní částí – jehlou, jak je zřejmé z obr. 27 a 28.



Obr. 27: Současné řešení montážního nástroje – čelní pohled



Obr. 28: Současné řešení montážního nástroje – boční pohled

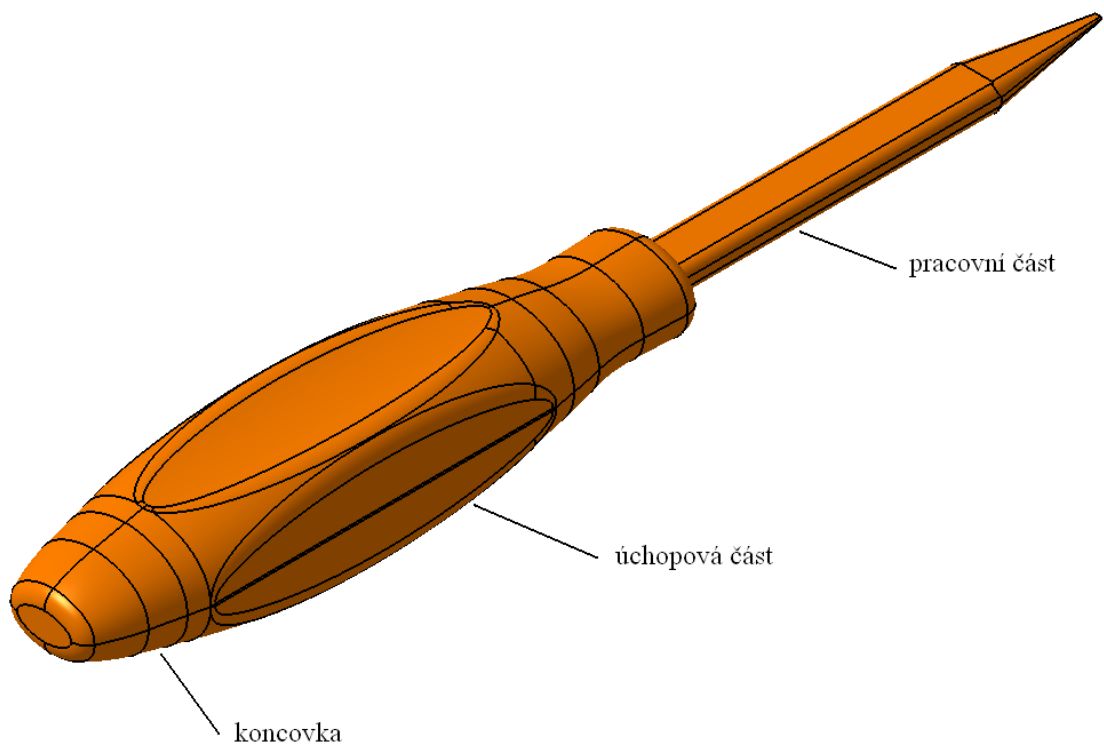
7.2 Návrh výrobku z polymeru

Návrh a geometrie nástroje byl zpracován konstruktérem, a následně předán k hodnocení v diplomové práci.

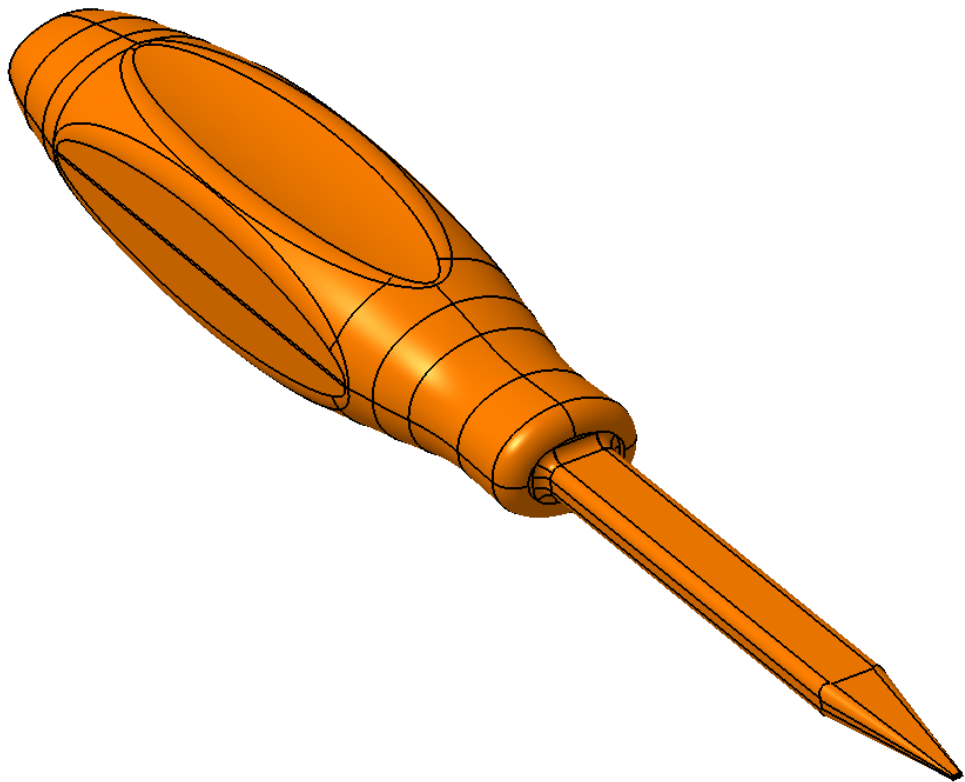
Návrh nového nástroje předpokládá využití jednoho materiálu – polymeru a to jak pro úchopovou, tak pracovní část. Návrh vychází z požadavků uživatele a snaží se řešit

jak ergonomii rukojeti, tak vlastní funkční část. Zvažuje též výrobní možnosti, které umožňuje předpokládaná technologie vstřikování. V zájmu snížení hmotnosti a zachování rovnoměrné tloušťky stěny je navrhovaná rukojeť dutá. V návrhu je uvažována dutina tvořena výsuvným jádrem. Uzavření dutiny se předpokládá koncovou zátkou.

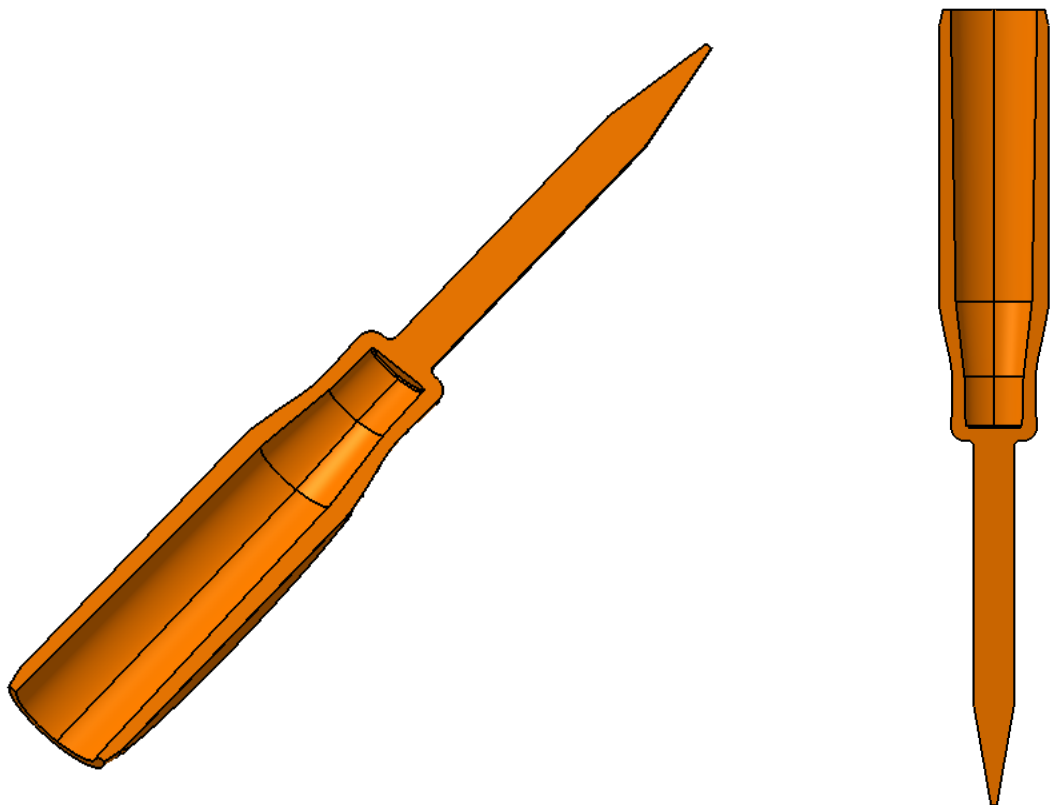
Jak lze vidět na Obr. 29, 30 a 31, nástroj je navržen s ergonomickou rukojetí, z které je veden 110 mm dlouhý trn.



Obr. 29: Návrh modelu nástroje



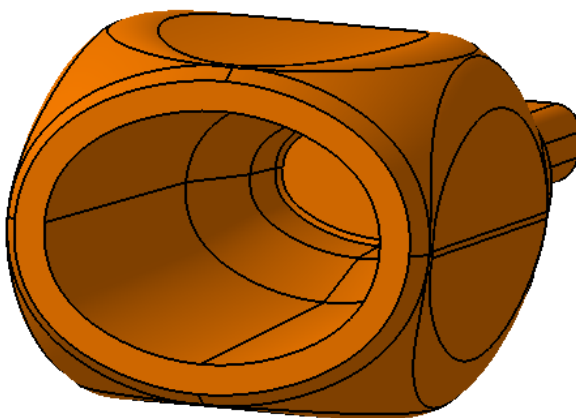
Obr. 30: Návrh modelu nástroje – přední pohled



Obr. 31: Návrh modelu nástroje – řez bez koncovky

7.2.1 Hlavní část nástroje

Celý nástroj by byl vyráběn jednorázově, jedním cyklem vstřikování. Z důvodu úspory materiálu, zkrácení vstřikovacího cyklu a nechtěnému vzniku vnitřního pnutí má navržený výrobek dutou rukojeť.

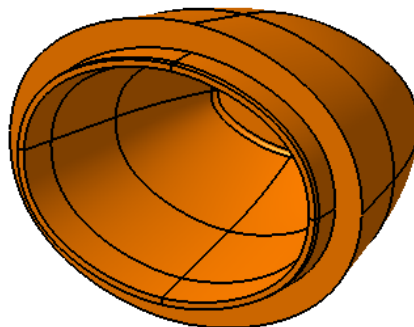


Obr. 32: Hlavní část nástroje – rukojeť dutá

7.2.2 Koncovka rukojeti

Tato část výrobku nebude uvažována v analýze vstřikování v programu ASMS 2013. A to z toho důvodu, že na koncovku rukojeti, která slouží pouze k uzavření otvoru rukojeti, nejsou kladeny žádné speciální požadavky, dokonce by ani nemusela být nutně ze stejného materiálu. Bylo by i možné ji kupovat od jiného dodavatele, nebo případně použít koncovku jiného tvaru.

Spojení koncovky s hlavní částí nástroje by bylo řešeno mechanickým spojením, či případně nalepením.



Obr. 33: Navržená koncovka rukojeti

7.2.3 Zhodnocení navrženého tvaru a geometrie

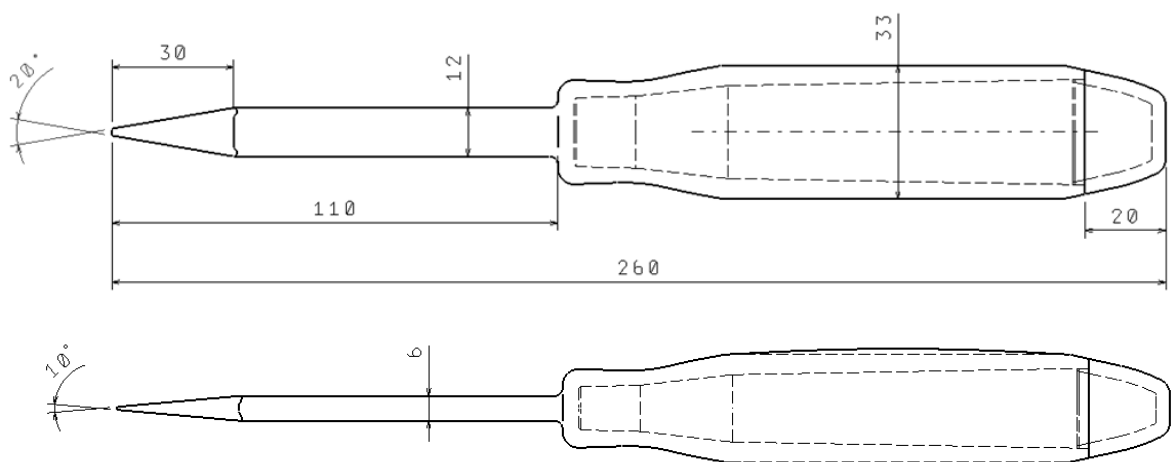
Bez využití analýz je z prvotního pohledu zřejmé, že bude nutné přemýšlet nad odformováním uvažovaného výrobku. Navržený tvar nástroje, konkrétně rukojeti bude při výrobě vstřikováním vyžadovat využití dlouhých jader při odformování vnitřní části rukojeti. Bude tedy nutné k vysouvání dlouhých jader využít hydraulického, či pneumatického systému, což bude mít ovšem vliv na konečnou cenu formy, která bude vyšší. Mechanický způsob za využití šikmých čepů je téměř nerealizovatelný, a to z důvodu přílišné délky těchto čepů.

Nicméně jelikož by se s velkou pravděpodobností nejednalo o velkou zakázku, nabízí se možnost formy s ručně vyjímatelným jádrem, což by snížilo náklady na konstrukci formy. Vyjímání výrobku z formy a následné vyjmutí jádra a jeho vložení zpět do formy by bylo prováděno obsluhou vstřikovacího stroje.

Další možností je využití jiných speciálních technologií vstřikování zmíněných v kapitole 5, a to vstřikování s využitím technologie GIT, či dvoukomponentní vstřikování.

V případě využití technologie GIT by odpadl již zmíněný problém s příliš dlouhými jádry ve formě. Výsledkem by byl výrobek, který je složen z jedné části (oproti současným dvěma) se vzduchovou kapsou uvnitř. V případě dvoukomponentního vstřikování, by byl v první fázi vstřikován tvrdý PA, v druhé fázi vstřikování by bylo možno využít elastomerního materiálu na výrobu rukojeti, např. TPU.

7.3 Základní rozměry modelu



Obr. 34: Základní rozměry modelu

7.4 Použité materiály

Jako materiály vhodné pro výrobu nástroje byly navrženy Polyamid 66 (PA66) a polyfenylén sulfid (PPS). Tyto materiály jsou součástí databáze materiálů v programu ASMS 2013. Následně byly materiály porovnány s ohledem na výsledky analýz a jejich obvyklých vlastností, a byl vybrán vhodnější.

7.4.1 PA Ultramid A3HG7 (plněn 35% skelných vláken)

Obecně jsou polyamidy lineární semi-krytalické konstrukční polymery. Do skupiny polyamidů patří PA 6, PA 66, PA 610, PA612, PA 11 a PA 12. Jako jejich typické vlastnosti lze označit vysokou houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a dobré elektroizolační vlastnosti. Mechanické vlastnosti polyamidů jsou závislé na typu polyamidu, na jeho molekulové hmotnosti a množství obsažené vody. Nasákavost je dána koncentrací amidových skupin. Čím vyšší je poměr skupin $-CONH-$ a $-CH_2-$, tím vyšší je nasákavost. [28]

Všechny polyamidy odolávají oleji, pohonným hmotám a velké řadě technických rozpouštědel. [28]

Nejvýznamnější technologie zpracování je vstřikování a vytlačování. Dále lze polyamidy i svařovat, lepit, potiskovat i pokovovat. [28]

Díky již zmíněným vlastnostem se polyamidy staly nepostradatelnou součástí ve všech oblastech strojírenství, pro nejrůznější komponenty a strojní díly. [29]

Ultraamid je výjimečný pro svoji vysokou mechanickou pevnost, tuhost a tepelnou stabilitu. Má velmi dobrou odolnost proti nárazu a tření i při nízkých teplotách a velmi snadné zpracování. [29]

PA Ultraamid A3HG7 je vyztužen 35 % skelných vláken. Kromě již zmíněných vlastností ultramidů má vynikající elektroizolační vlastnosti. [29]

Tab. 14: Vlastnosti polymeru PA Ultramid A3HG7 (plněn 35% skelných vláken) [29, 38]

Typické vlastnosti při 23 °C	HODNOTA	JEDNOTKA
Vlastnosti		
Zkratka polymeru	PA66-GF35	–
Cena*	3,80 – 5,00	Euro
Hustota	1,41	g.cm^{-3}
Index viskozity	145	$\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$
Absorpce vlhkosti	1,40 – 1,80	%
Nasákavost ve vodě	4,7 – 5,3	%
Zpracovatelské vlastnosti		
Teplota taveniny	260	°C
MVR (Objemový ITT při 275 °C)	30	$\text{cm}^3.10\text{min}^{-1}$
Teplota při vstřikování	280 – 300	°C
Teplota formy při vstřikování	80 – 90	°C
Smrštění	0,5 – 1	%
Mechanické vlastnosti		
Modul pružnosti	11500	MPa
Napětí při přetržení	210	MPa
Deformace při přetržení	3	%
Modul pružnosti v ohybu	10000	MPa
Pevnost v ohybu	300	MPa
Charpy bez vrubu (23°C)	95	kJ.m^{-2}
Charpy bez vrubu (-30°C)	75	kJ.m^{-2}
Charpy s vrubem (23°C)	14	kJ.m^{-2}
Charpy s vrubem (-30°C)	12	kJ.m^{-2}
Izod s vrubem (23°C)	14	kJ.m^{-2}

* Cena je bližší specifikována v kapitole ekonomické zhodnocení, je závislá na více faktorech

7.4.2 PPS Fortron 1140E7

Obecně je polyfenylén sulfid semi-krystalický speciální polymer. Mezi jeho výrazné vlastnosti patří tepelná a rozměrová stabilita, dobrá pevnost, nerozpustnost, chemická odolnost, nehořlavost a malá nasákavost. [28]

Hlavní použití nachází v elektrickém, elektronickém, mechanickém, chemickém a automobilovém průmyslu. Příklady typických výrobků jsou konektory, rukojeti, čerpadla, ventily, senzory paliva, klimatizační komponenty aj. [28]

Tento polymer má velkou odolnost proti tepelnému namáhání, vysokou tvrdost a tuhost.
[30]

Tab. 15: Vlastnosti polymeru PPS Fortron 1140E7 (plněn 40% skelných vláken) [30, 31]

Typické vlastnosti při 23 °C	HODNOTA	JEDNOTKA
Vlastnosti		
Zkratka polymeru	PPS-GF40	–
Cena	11 – 13	Euro
Hustota	1,70	g.cm^{-3}
Absorpce vlhkosti	0,02	%
Zpracovatelské vlastnosti		
Teplota taveniny	325	°C
Teplota při vstřikování	310 – 340	°C
Teplota formy při vstřikování	135 – 160	°C
Vyhazovací teplota	220	°C
Smrštění	0,2 – 1	%
Mechanické vlastnosti		
Modul pružnosti	15700	MPa
Napětí při přetržení	150	MPa
Deformace při přetržení	1,2	%
Tvrdost, Rockwell M	100	MPa
Pevnost v ohybu	230	MPa
Charpy bez vrubu (23°C)	28	kJ.m^{-2}
Charpy bez vrubu (-30°C)	28	kJ.m^{-2}
Charpy s vrubem (23°C)	7	kJ.m^{-2}
Charpy s vrubem (-30°C)	7	kJ.m^{-2}
Izod s vrubem (23°C)	7	kJ.m^{-2}

8 ANALÝZA PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ

Analýza byla provedena v programu Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2013.

Diplomová práce má za úkol především zhodnotit, zda je možné po technologické a ekonomické stránce vyrábět tento výrobek. Z toho důvodu není navržen rozvodný kanál, temperační systém a blok formy.

Jako materiál formy je uvažován dural, a to především z důvodu zlevnění konečné ceny formy, jelikož se bude jednat pouze o malosériovou výrobu.

Rozvodný kanál není třeba navrhovat, protože se počítá s využitím pouze jednonásobné formy. Jednonásobná forma s jedním vtokovým ústím je uvažována především z ekonomických důvodů tak, aby případná konstrukce formy byla co nejjednodušší, a zároveň i nejlevnější.

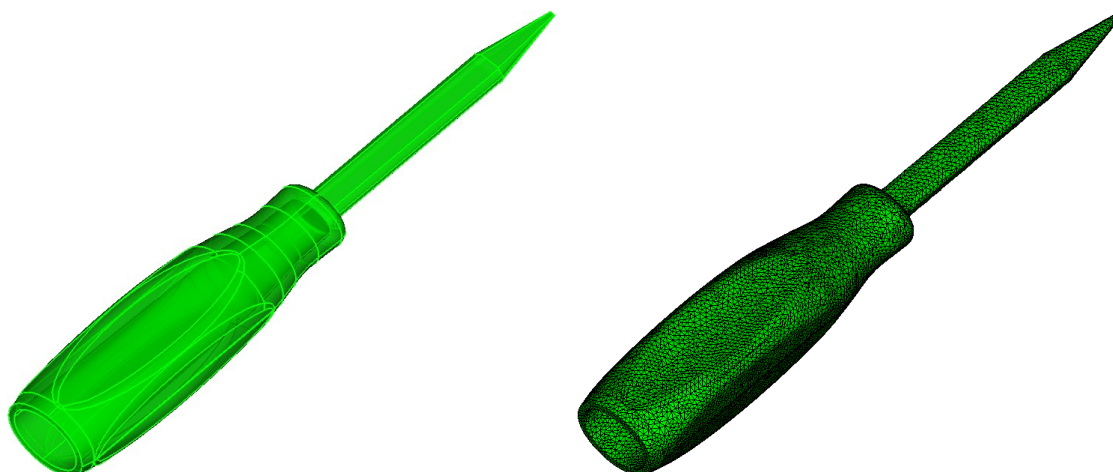
Pro temperační systém a blok formy jsou využity funkce programu ASMS 2013, které umožňují uživatelské nastavení, tzn., že program sám určí ideální temperační systém a blok formy.

V komentářích jednotlivých analýz jsou komentovány a srovnávány výsledky analýz pro vybrané dva polymery (vyjma kapitoly 8.9 vývoj teploty v průběhu celého cyklu – komentován pouze PA).

V případech shodných, nebo velmi podobných výsledků u konkrétní analýzy, je vyjádřen obrázkem pouze jeden z výsledků, obvykle u PA – GF35.

8.1 Model s vytvořenou sítí

Po přenesení modelu z programu Catia V5R18 do programu ASMS 2013 je nutné vytvořit 3D síť, která je využita v následné analýze: Fill + Pack + Warp = analýza plnění + dotlak + deformace (smrštění).



Obr. 35: Model s vytvořenou sítí (a – model bez sítě, b – model s 3D sítí)

8.2 Procesní podmínky

Nezbytné a důležité je správně nastavit procesní podmínky tak, aby mohla analýza proběhnout. Procesní podmínky byly zvoleny na základě výsledků z automaticky nastavených analýz, které předcházely vyhodnocovaným analýzám. V některých sekcích byla ponechána nastavení, která doporučuje program ASMS 2013, protože nebylo možné tyto hodnoty zjistit. Nastavení zvolených podmínek je zobrazeno v Tab. 16. Následně byla spuštěna analýza „gate location“, která slouží k určení vhodného místa vtoku. Po zvolení místa vtoku byla spuštěna již zmíněná analýza Fill – Pack – Warp.

Tab. 16: Nastavené procesní podmínky

Podmínky	HODNOTA	HODNOTA	JEDNOTKA
Vstříkovaný materiál	PA66 – GF35	PPS – GF40	–
Teplota taveniny při vstříkování	290	325	°C
Teplota formy při vstříkování	85	150	°C
Čas plnění	2	2	s
Čas chlazení	65	55	s
Bod přepnutí	10	10	s
Čas dotlaku	10	10	s
Pokles tlaku vůči vstříkovacímu	90	90	%
Vstříkovací stroj	Allrounder 470 S 110 tons 7.4 oz (40 mm)		
Materiál fiktivní formy	Dural A1		–

8.3 Zvolený vstřikovací stroj

Pro analýzu technologie vstřikování byl zvolen stroj Allrounder 470 S od firmy Arburg s maximální uzavírací silou 100 tun a průměrem šneku 40 mm. Tento stroj byl vybrán z katalogu strojů, jež poskytuje databáze programu ASMS 2013. Při této analýze je nutné vybrat stroj, který vyhovuje podmínkám vzhledem k velikosti plastikační jednotky a odhadované velikosti formy, tzn. dostatečné vzdálenosti mezi sloupy. Velikosti uzavírací síly musí být větší, než síly, které vznikají uvnitř dutiny formy.

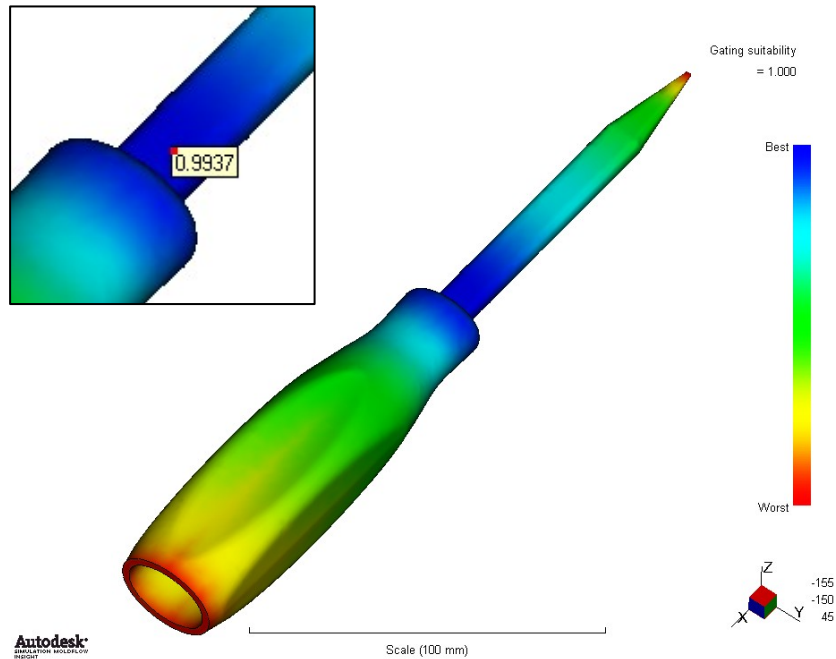
Dle výpočtů (viz kapitoly 8.13 a 10) je odhadovaný objem vstřikovaného materiálu výrobku na 59,423 cm³ pro hlavní část, 4,673 cm³ pro objem koncovky. Odhadovaný maximální celkový objem vtokového systému je 7,86 cm³. Při součtu všech požadovaných objemů, bude minimální výkon vstřikovací jednotky 72 cm³. Uvažovaný stroj Allrounder 470 S s plastikačním výkonem 168,2 cm³.s⁻¹ tomuto parametru vyhovuje.

Stroj bylo nutné volit i s ohledem na vzdálenost mezi sloupy tak, aby bez problému vyhovovala případné velikost vstřikovací formy. Délka uvažovaného nástroje je 260 mm, v případě konstrukce vstřikovacího, temperačního systému, a vodícího systému formy by nesměla konečná konstrukce formy přesáhnout rozměry 470x470 mm.

8.4 Analýza polohy vtoku

Zpracovaná analýza doporučuje ideální místo pro vtokové ústí do výrobku (Gate Location). Za nejvhodnější je považováno takové místo, ze kterého by měl polymer přibližně stejnou dráhu do všech dutin formy. Před výpočtem je nutné stanovit tvar vstřikované části, definovat stroj, druh a teplotu vstřikovaného polymeru.

Analýza polohy ukazuje nejvhodnější místo pro umístění vtokového ústí (Gate suitability) znázorněné na obr. 36. Tmavě modře je znázorněna oblast, kterou program doporučuje, jako nejvíce vhodnou pro umístění vtokového ústí. Naopak červeně označuje oblast, která je k využití vtokového ústí zcela nevhodná. Analýza doporučuje navržené řešení z 99,37%.



Obr. 36: Umístění vtokového ústí (Gating suitability)

8.4.1 Určení vhodného místa pro vtokové ústí

V rámci zjištění a ověření analýzy *Gate Location* na určení vhodného umístění vtokového ústí bylo uvažováno 6 různých míst, která jsou znázorněna na Obr. 37. Pro jednotlivé vtoky byly spuštěny kompletní analýzy procesu vstřikování, a z výsledků následně vyhodnoceno nejvhodnější místo pro vtokové ústí.

Ze všech analýz je patrné, že po vstříknutí má výrobek snahu se svými kraji deformovat směrem k ústí vtoku (vztaženo k bodu 0, 0, 0), jak je patrné z Obr. 38, který je pro ilustraci deformace zvýrazněn v měřítku 20:1. Deformace u nich číselně uvedená je v měřítku 1:1 (vtažena k bodu 0, 0, 0), nicméně nelze ji považovat za reálnou deformaci, která by odpovídala skutečnosti, lze ji brát pouze jako určitou tendenci, jež by materiál u dané polohy vtoku vykazoval.

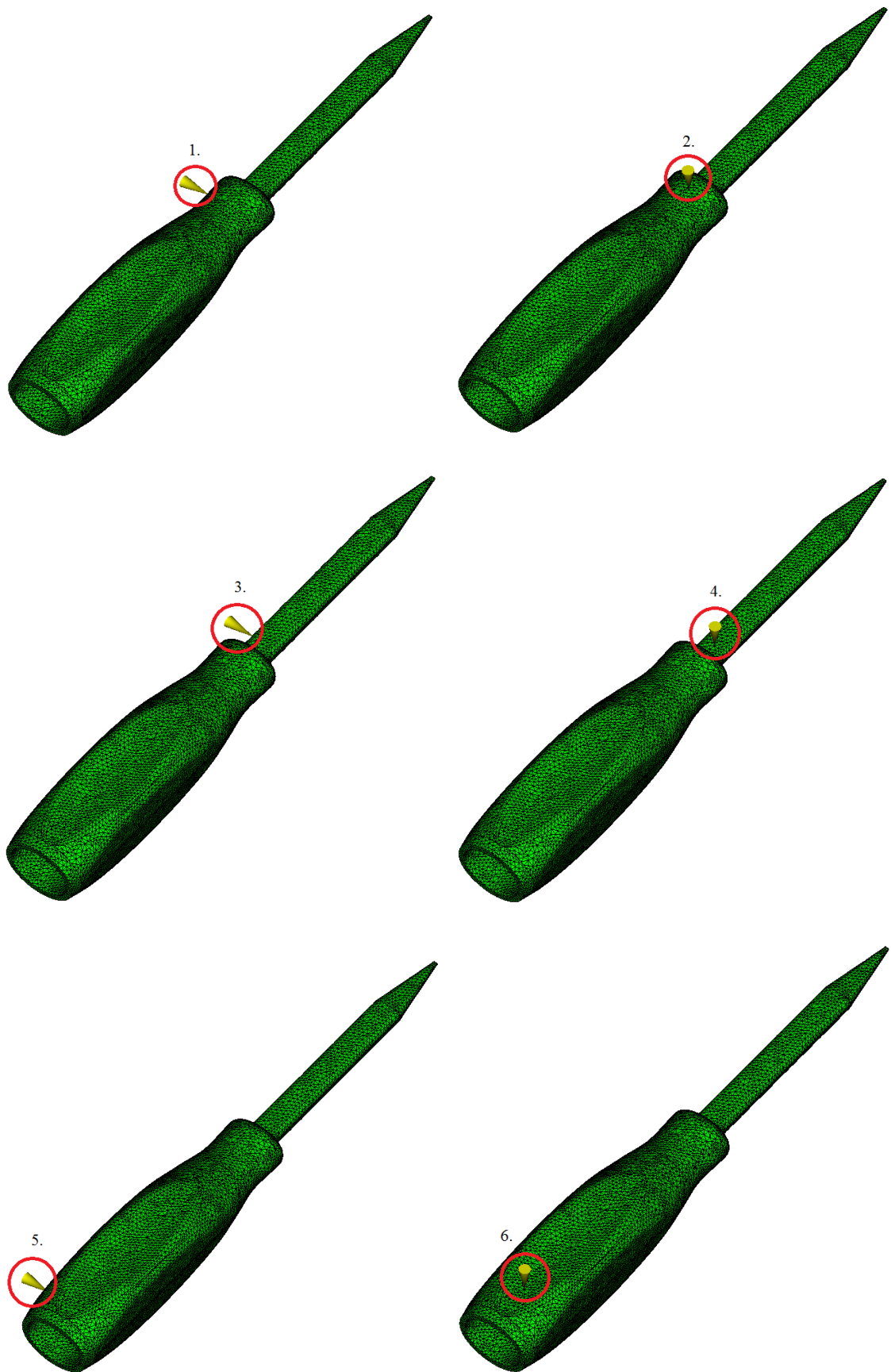
S ohledem na tyto tendence, jež vykazují jednotlivá místa vtoku, jako nejvíce vhodný se jeví vtok č. 4. U vtoku č. 4 lze jako výhody označit, že nezasahuje do úchopových částí, tudíž by nebylo nutné dokonalé začištění vtokového ústí po vstřikování. Dle Obr. 34 by u této varianty měla probíhat nejrovnoměrnější deformace. Nevýhodou této varianty s umístěním širší strany do dělicí roviny může být typ použitého vtoku. Ze studených vtoků by připadaly v úvahu pouze bodový nebo banánový vtok. Varianta s bodovým vtokem,

by vyžadovala využití třideskového systému formy. U formy s banánovým vtokem by byl problém se zalamováním vtoku. Tyto varianty by se odrazily v ceně konstrukce formy.

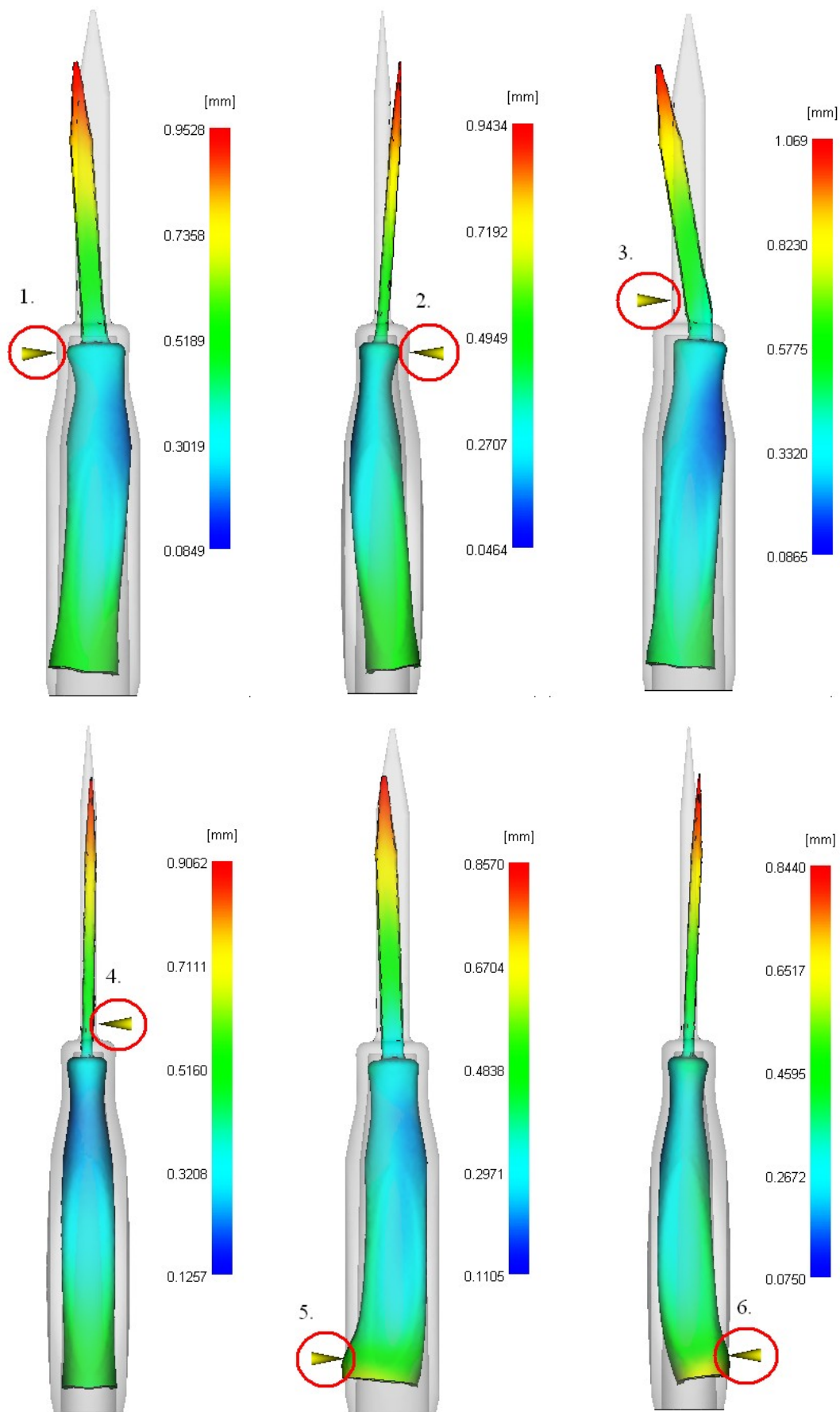
Z pohledu umístění trnu do dělicí roviny je nejvýhodnější varianta č. 3, kdy je trn umístěn do dělicí roviny užší stranou. Dalo by se zde využít tunelového vtoku, kde by byla konstrukce nejlevnější a nejjednodušší. Problémem je ovšem odformování a vyhození výrobku. K lepšímu vyhození by se využilo zkosení o velikosti 1° pro trn. Problém ovšem nastává u rukojeti, která by si žádala změnu své geometrie, jelikož vzhledem k zápornému úhlu v rukojeti by se nedala jednoduše odformovat.

Jako nevhodné lze označit vtoky č. 5 a 6. Vtoky č. 5 a 6 sice vykazují pravděpodobnost nejnižší deformace, nicméně oba tyto vtoky jsou náchylnější na vznik studených spojů a možnost zatuhnutí vrstev před dotlakem, což by mělo vliv na pevnostní vlastnosti špice trnu, protože ta by se plnila až jako poslední. Vtokové ústí se nachází v úchopové části, tudíž by bylo nutné dokonalé začištění daného místa, tak aby zaměstnancům nevznikaly otlačeniny a jiné poškození jejich dlaní (platí i pro vtoky č. 1 a 2). Dokonalé začištění míst po vstříkování by však nutně znamenalo přidání další výrobní operace, což by mělo za následek prodražení výroby.

Pro podrobnější rozbor analýz byla tedy vybrána varianta vtokového ústí č. 4, která se jeví jako nejvhodnější.



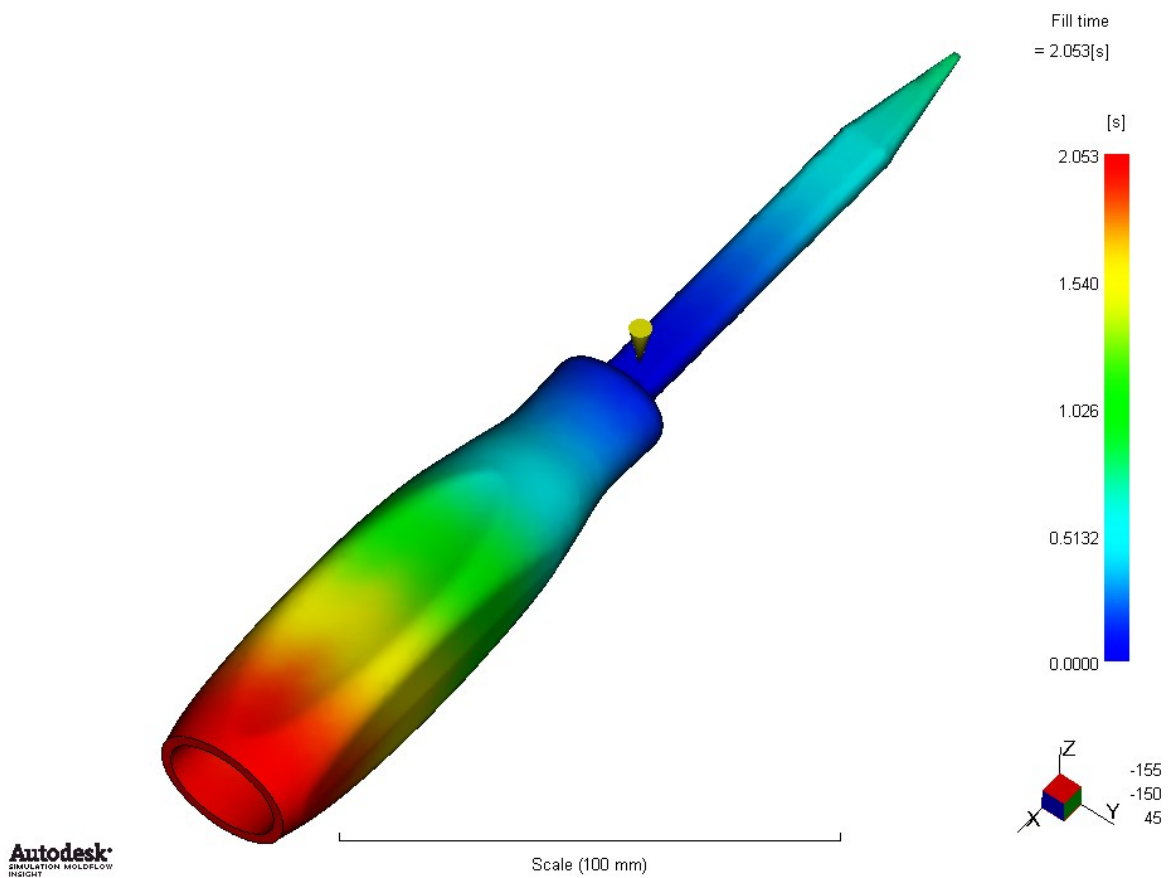
Obr. 37: Uvažovaná vtoková ústí



Obr. 38: Deformace výrobku po vstřikování (zobrazení v měřítku 20:1)

8.5 Plnění dutiny formy

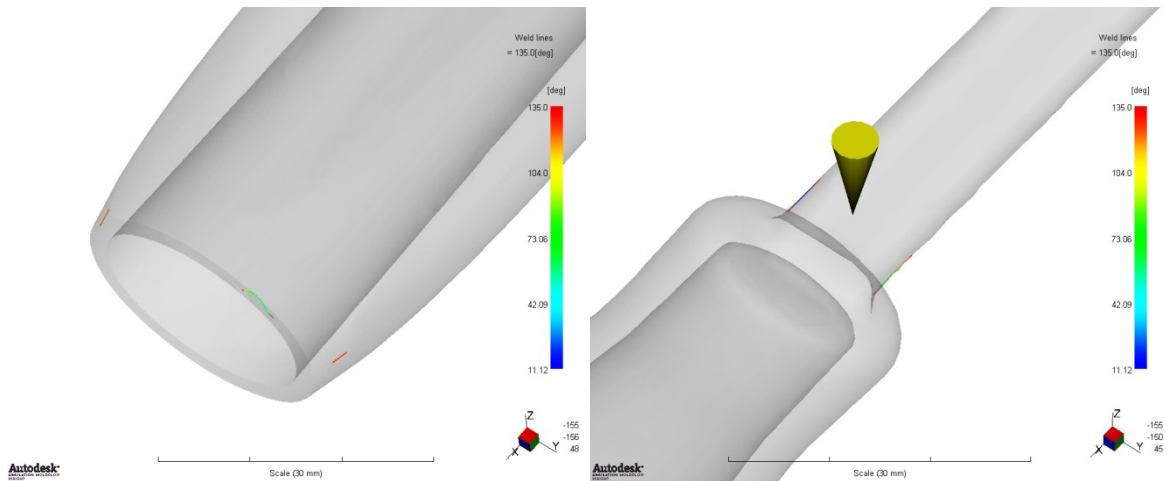
Výsledek analýzy vyjadřuje graficky i početně čas potřebný k zaplnění dutiny formy (Fill time). V nastavení procesních podmínek byl určen požadavek zaplnění dutiny do 2 s. Dutina formy byla zcela zaplněna v čase 2,053s u PA, za téměř stejný čas by se tedy plnila dutina u polymeru PPS (2,045s). Na Obr. 39 lze vidět tok taveniny v čase, kdy modře jsou znázorněny místa, která se plní nejdříve a červeně, která se plní jako poslední.



Obr. 39: Plnění dutiny formy PA – GF35

8.6 Vznik studených spojů

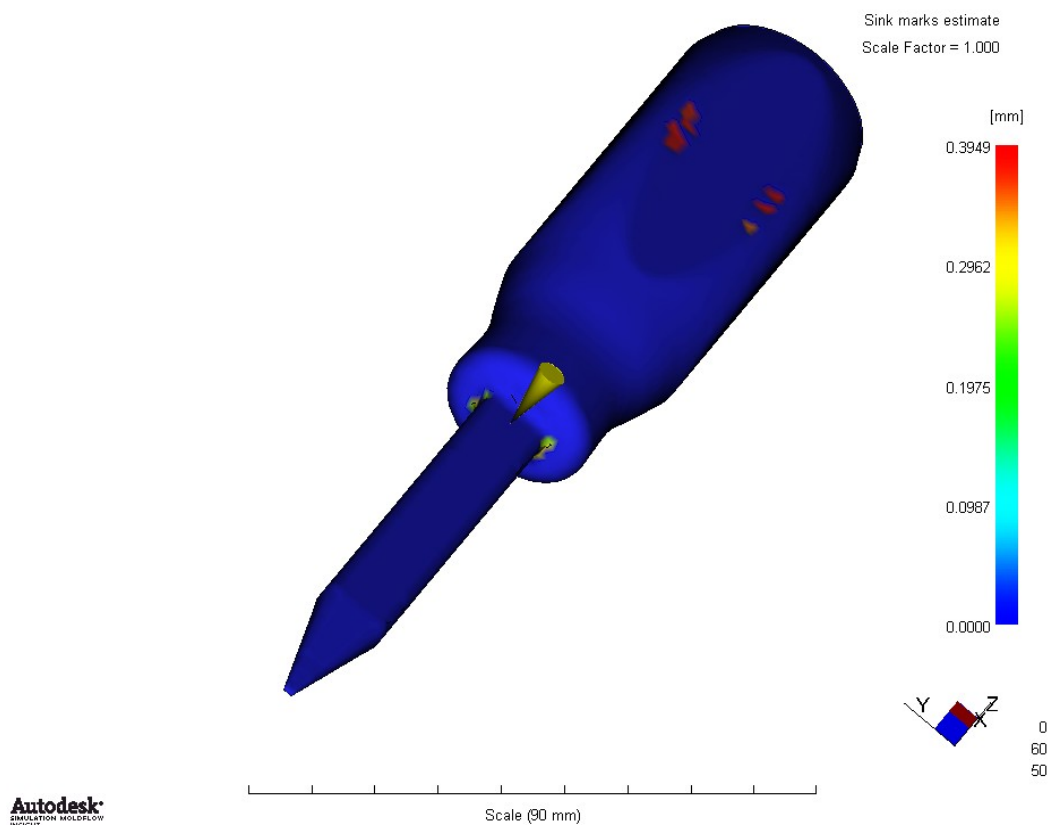
Studené spoje (Weld lines) vznikají v místech styku čel (proudů) taveniny, které mohou mít výrazný vliv na mechanické a vzhledové vlastnosti. V případě provedené analýzy jsou tendence ke vzniku studených spojů ojedinělé u obou polymerů, jak lze vidět na Obr. 40.



Obr. 40: Vznik studených spojů

8.7 Tendence k tvorbě propadlin

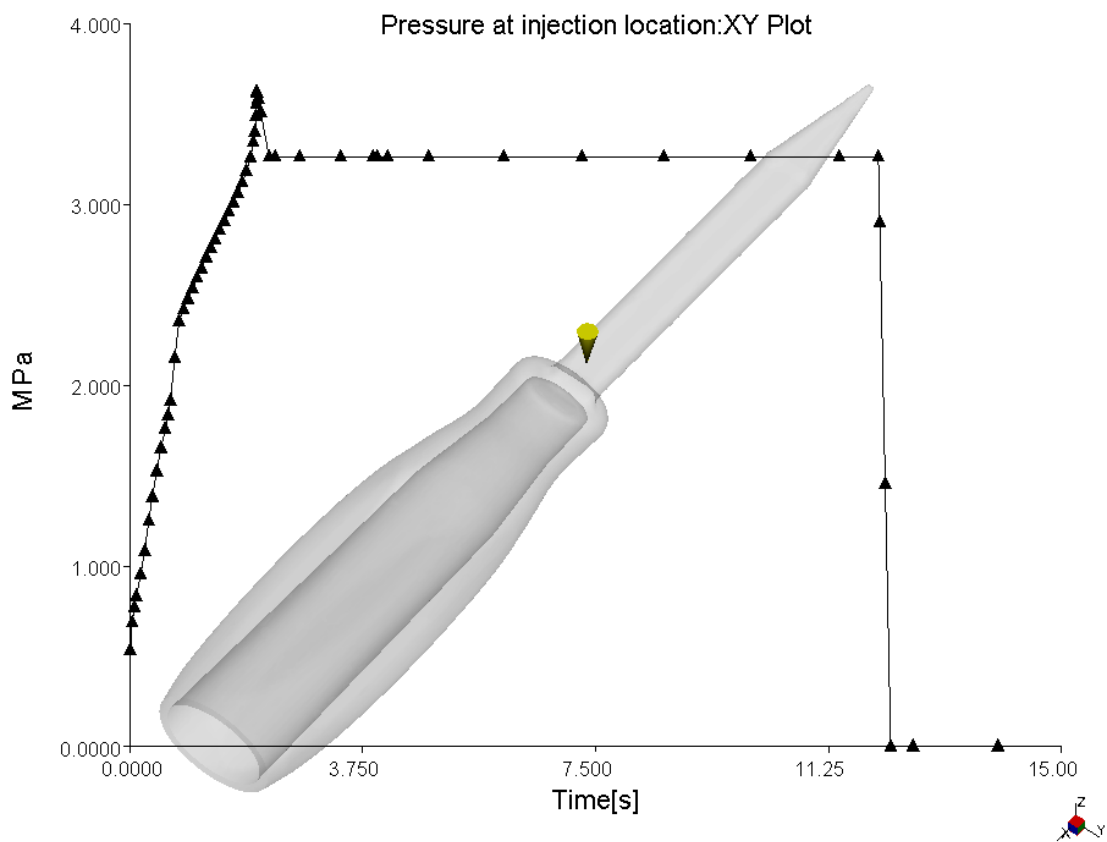
Analýza možného vzniku propadlin (sink marks) znázorňuje tendence materiálu k tvorbě nerovnoměrností na povrchu výrobku. Červeně označené části na Obr. 41 označují místa, která jsou tvorbou propadlin ohrožena. Oblast rukojeti má různé síly stěn, což způsobuje odlišné tuhnutí i nebezpečí propadlin.



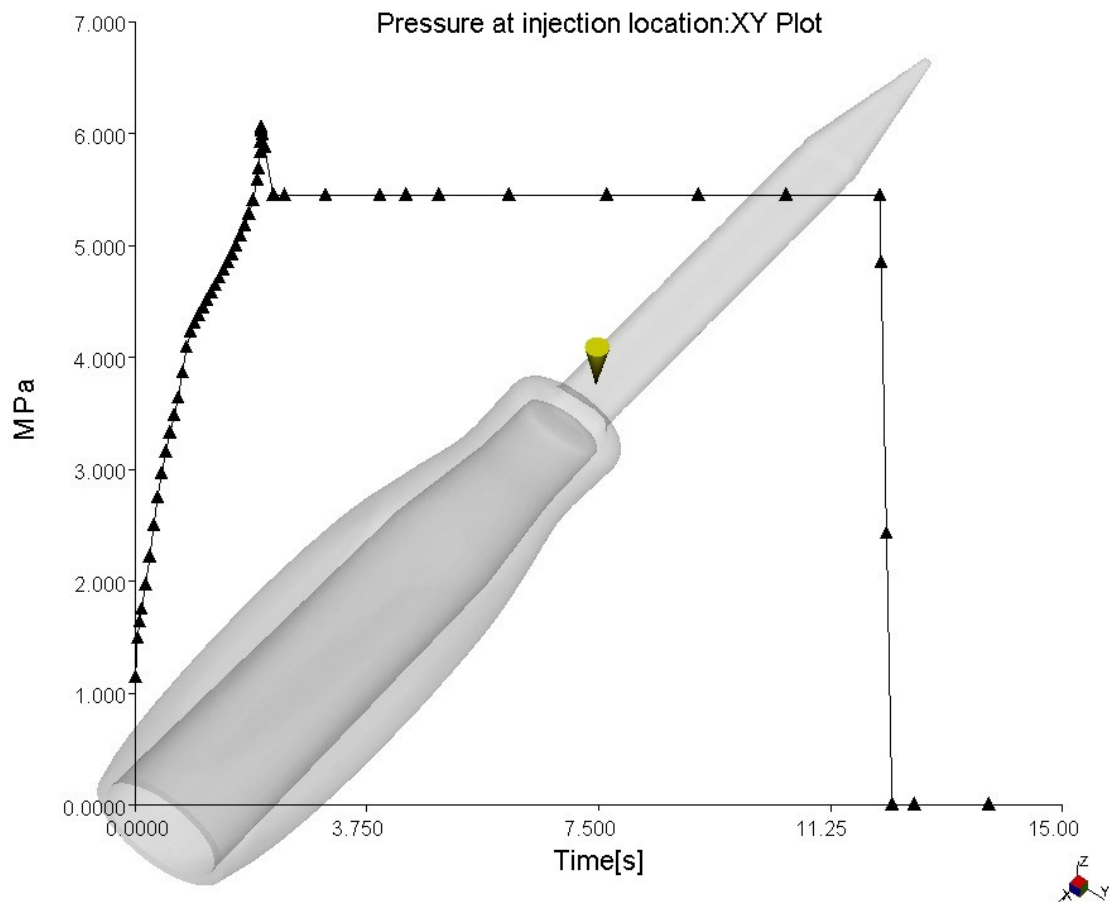
Obr. 41: Tendence k tvorbě propadlin PA – GF35

8.8 Průběh tlaku v místě vstříku

Graf na obr. 42 znázorňuje tlak při vstřikování, který byl nastaven v procesních podmínkách. Po dobu plnění formy tlak stoupne na maximální hodnotu 3,62 MPa u PA – GF35, u PPS – GF40 (obr. 43) tlak stoupne až na hodnotu 6,14 MPa. Po vstříknutí následuje dotlak s využitím 90 % trvající 10 s. Dotlaková fáze je jedním z nejdůležitějších parametrů při nastavování procesních podmínek vstřikovacího procesu a ovlivňuje kvalitu výrobku, ať už se jedná o tvarovou nebo rozměrovou přesnost. Pokud by byl čas dotlaku příliš krátký, mohlo by dojít k tvorbě propadlin, nerovností, bublin a dalších nežádoucích vlivů.



Obr. 42: Průběh tlaku v místě vstříku PA – GF35



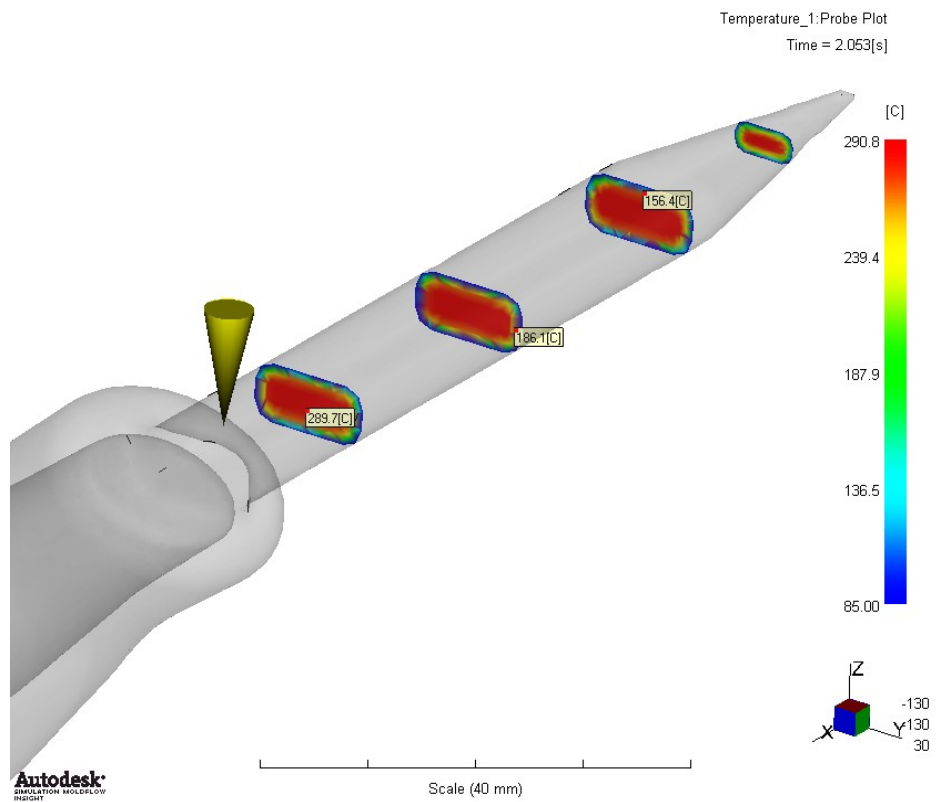
Obr. 43: Průběh tlaku v místě vstříku PPS – GF40

8.9 Vývoj teploty v průběhu celého cyklu

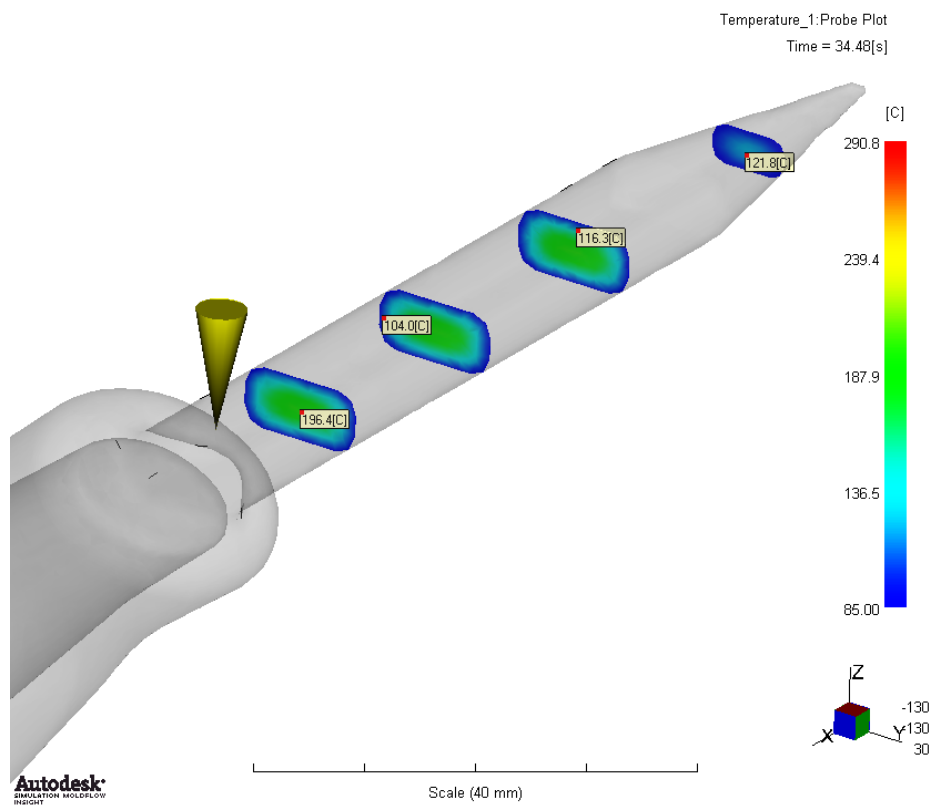
Výsledek analýzy ukazuje vývoj teploty od uzavření formy, až po vyhození výrobku z formy. Celý cyklus procesu vstříkování je odhadován na 77 s.

8.9.1 Vývoj teploty u trnu nástroje

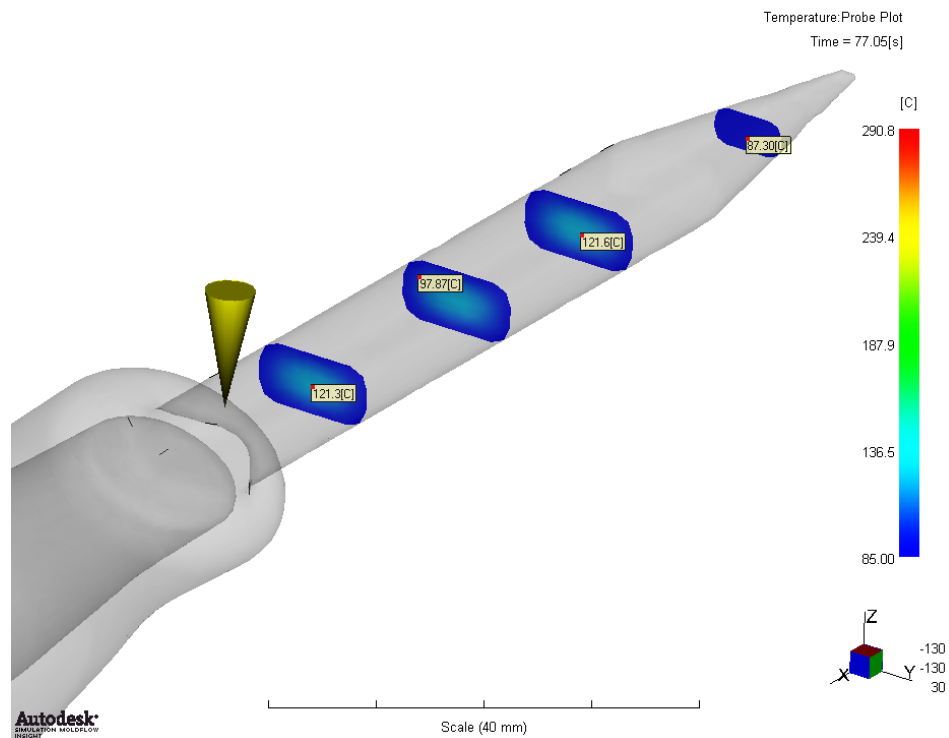
Na následujících Obr. 44, 45 a 46 jsou barevně znázorněny průběhy teplot ihned po vstříkování, v polovině cyklu chlazení a při vyhození. Po vstříkování (v čase 2,053 s) je teplota trnu z velké části přibližně 290 °C, a začíná tuhnutí polymeru od vnějších stěn trnu, na obrázku znázorněno modře. Přibližně v polovině cyklu chlazení (33,48 s), již jsou vnější stěny zatuhlé, jak lze vidět z obr. 44 střední část trnu má teplotu okolo 190 °C. Na konci cyklu při ochlazení na teplotu vyhození je teplota v rozmezí 80 až 120 °C (střed trnu).



Obr. 44: Rozmezí teplot ihned po vstřikování v čase 2,053 s - trn



Obr. 45: Rozmezí teplot v polovině cyklu v čase 34,48 s - trn



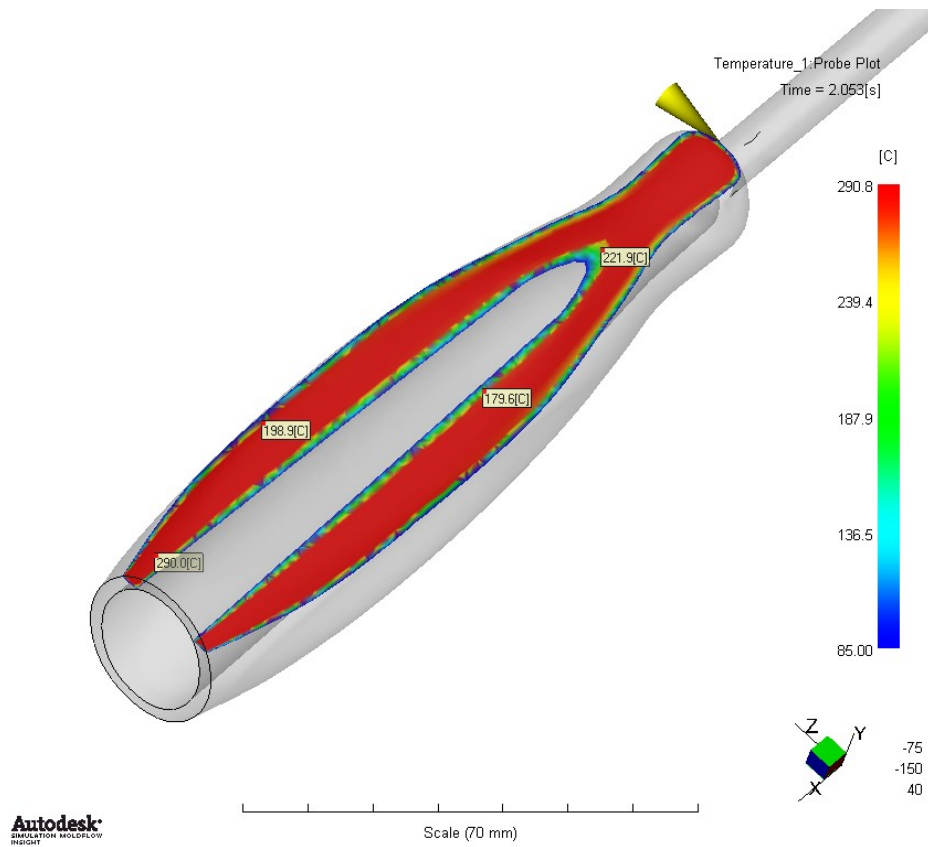
Obr. 46: Rozmezí teplot na konci cyklu v čase vyhození 77,05 s - trn

8.9.2 Vývoj teploty u rukojeti nástroje

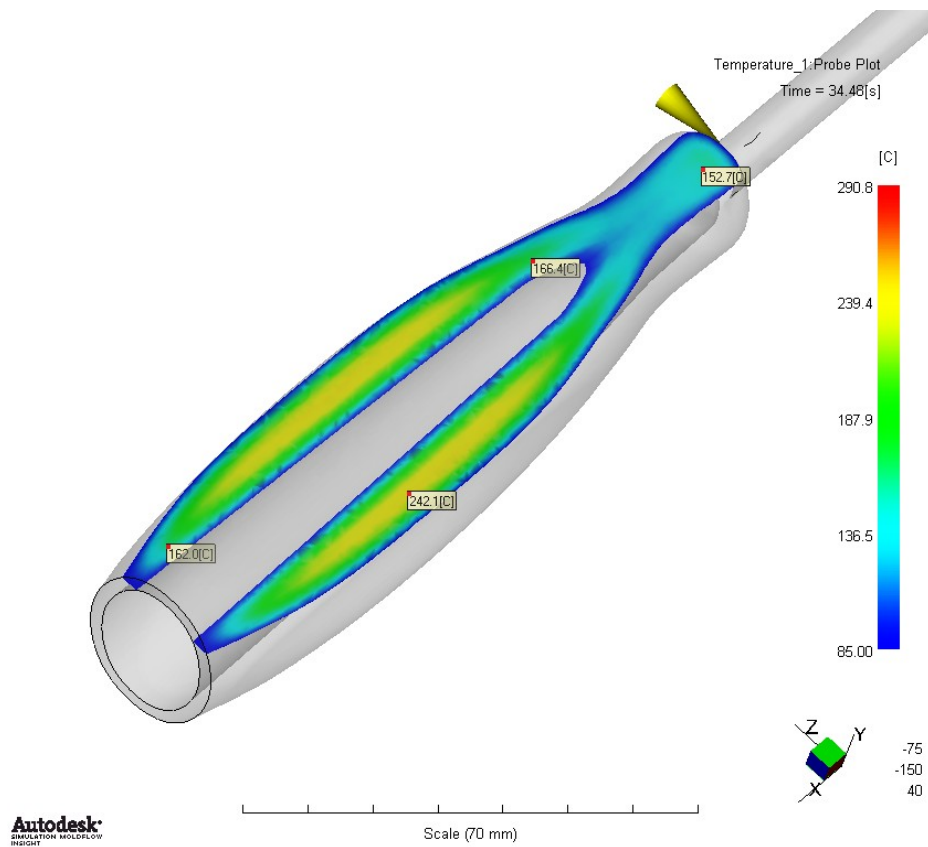
Na následujících obr. 47, 48 a 49 jsou znázorněny průběhy teplot stejně jako v kapitole 8.9.1, ale ne pro trn, nýbrž pro rukojeť.

Po vstříkování (v čase 2,053 s) je teplota téměř celé rukojeti přibližně 290 °C, a stejně jako u trnu začíná tuhnutí polymeru od vnějších stěn, na obrázku znázorněno modře.

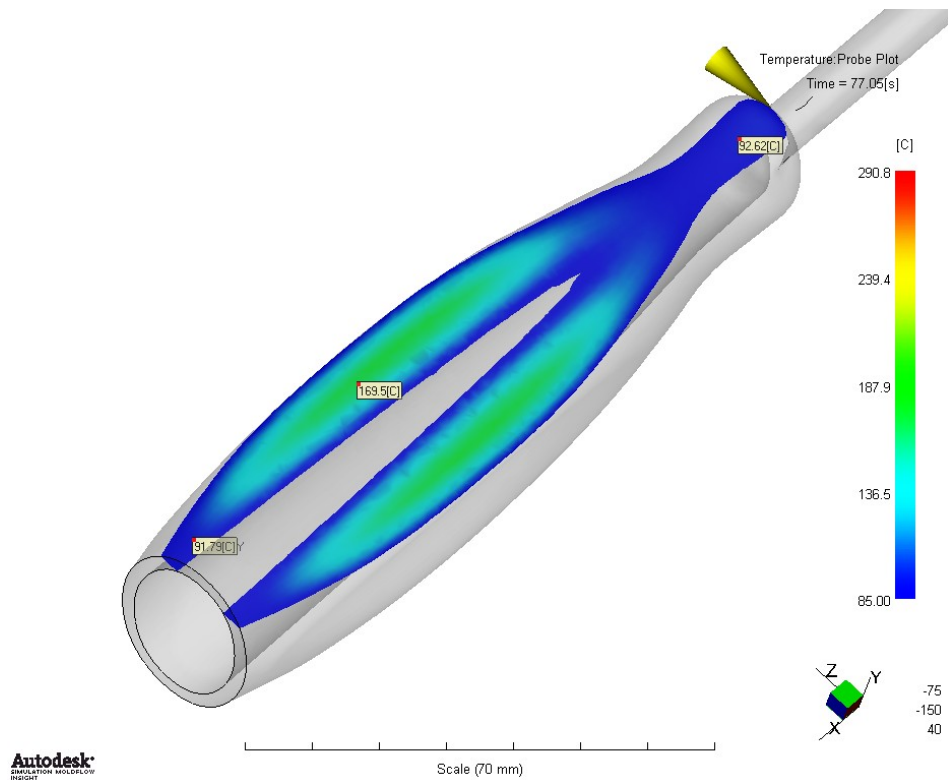
Zde je vidět na obrázcích důvod, proč je nutné, aby chlazení trvalo 77s. Trn je ochlazen na vyhazovací teplotu již v 50 s, to ale neplatí u rukojeti, která v čase 34,48 má vnitřní teplotu až 250 °C (obr. 48) a při vyhození má předpokládanou teplotu uvnitř rukojeti okolo 170 °C (Obr. 49). Chlazení trvá dlouho z důvodu relativně velké a proměnné tloušťky stěn rukojeti.



Obr. 47: Rozmezí teplot ihned po vstřikování v čase 2,053 s - rukojeť



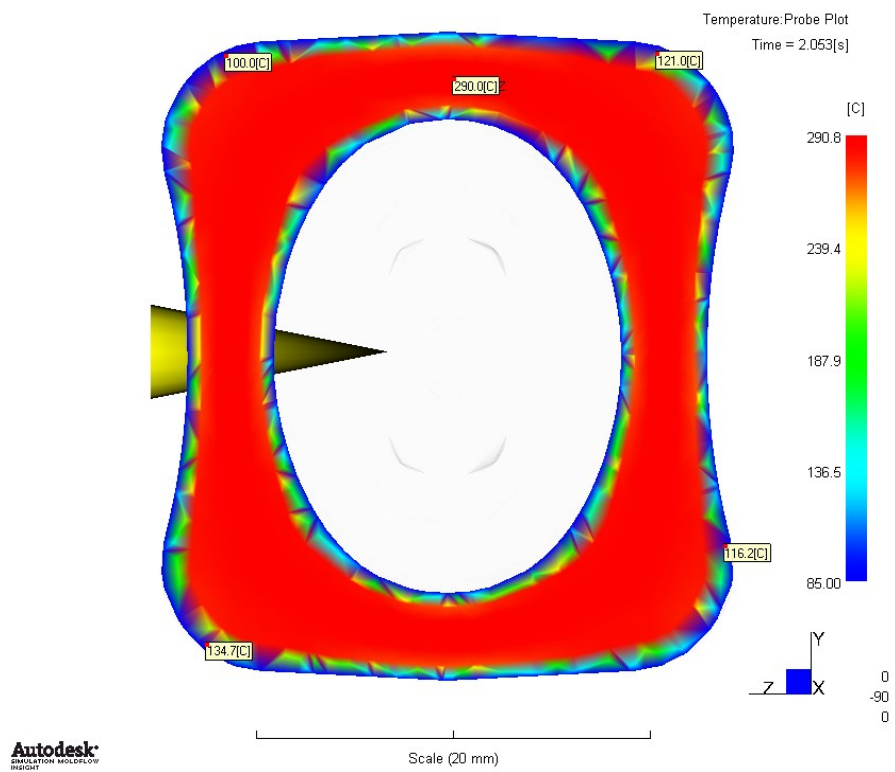
Obr. 48: Rozmezí teplot v polovině cyklu v čase 34,48 s - rukojeť



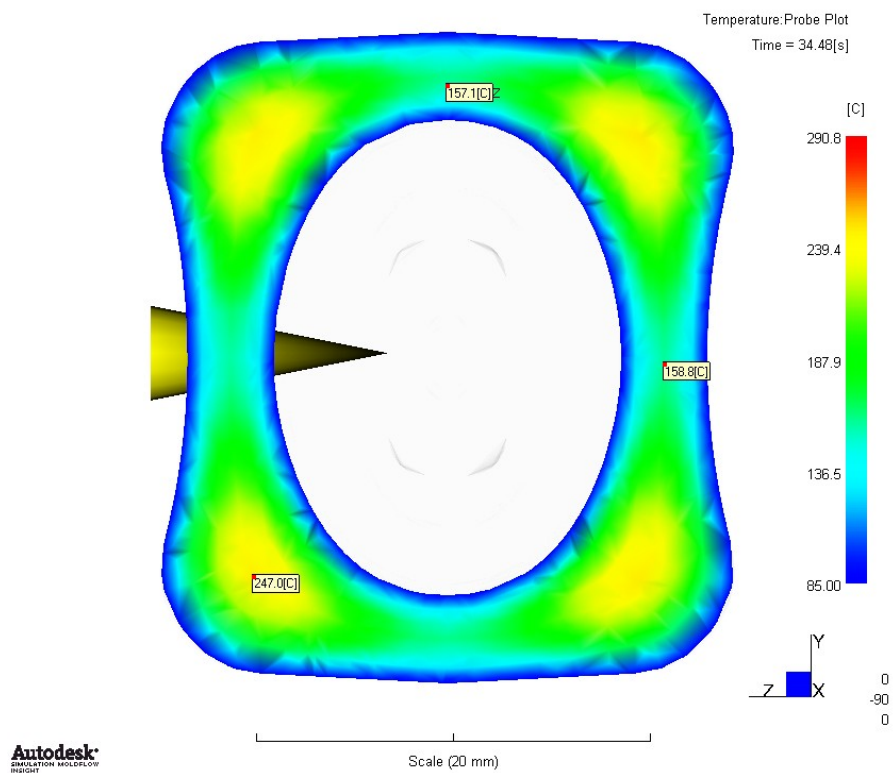
Obr. 49: Rozmezí teplot na konci cyklu v čase vyhození 77,05 s – rukojeť

8.9.3 Vývoj teploty v řezu – polovina rukojeti nástroje

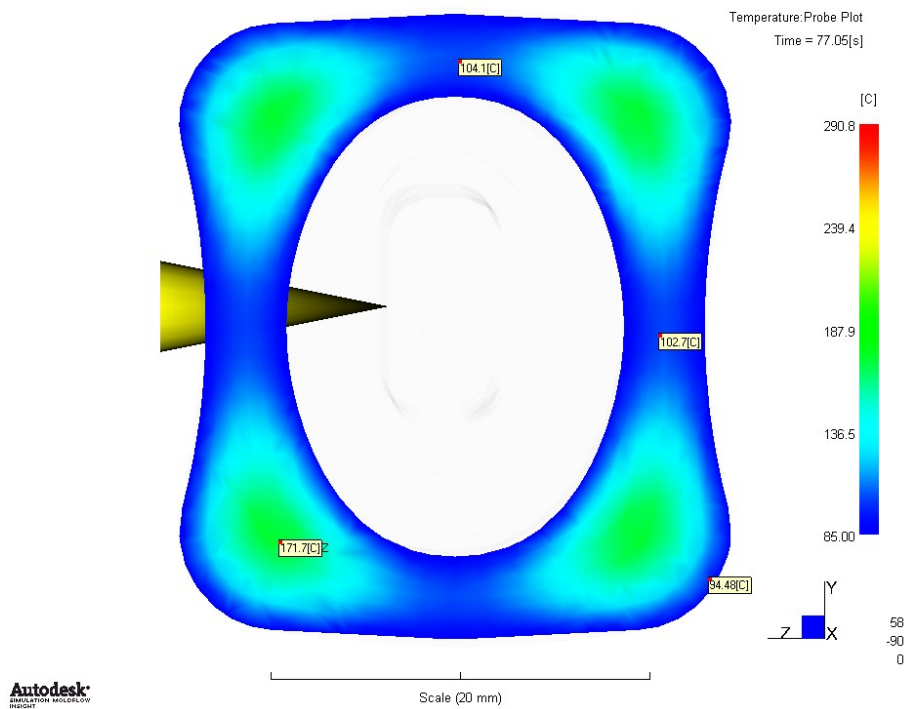
Na následujících Obr. 50, 51 a 52 jsou ilustrativně znázorněny průběhy teplot u rukojeti, ale v příčném řezu, které jsou okomentovány již v kapitole 8.9.2.



Obr. 50: Rozmezí teplot ihned po vstřikování v čase 2,053 s – řez rukojetí



Obr. 51: Rozmezí teplot v polovině cyklu v čase 34,48 s – řez rukojetí



Obr. 52: Rozmezí teplot na konci cyklu vstřikování c čase vyhození
77,05 s – řez rukojeti

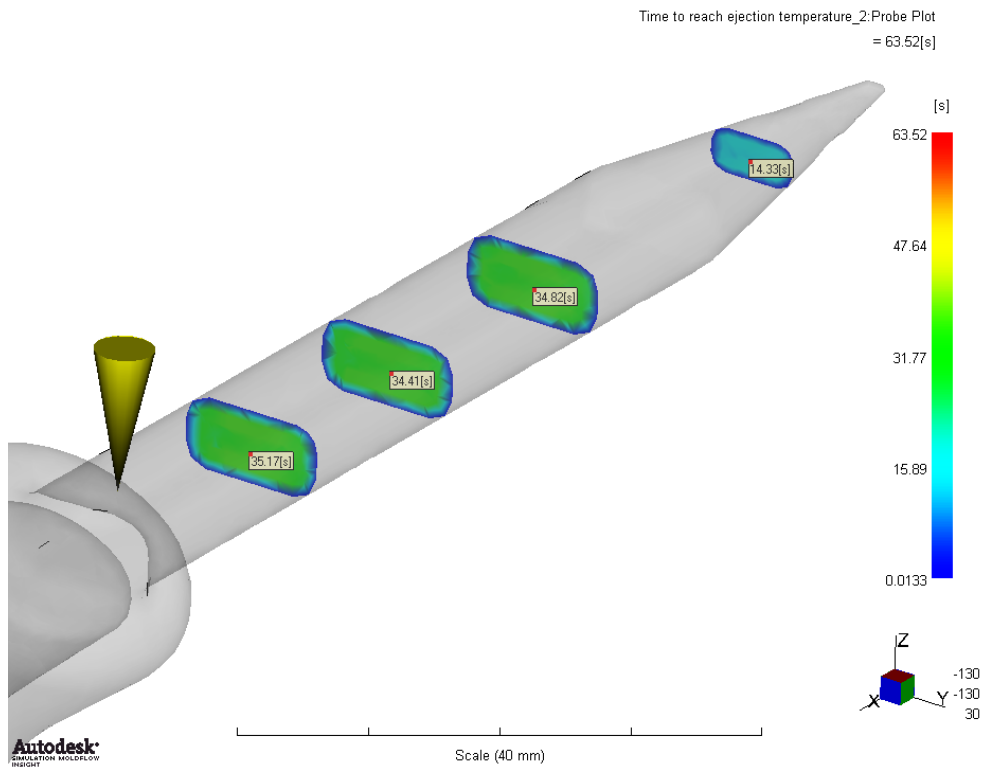
8.10 Čas zatuhnutí výrobku

Jedná se o výsledek analýzy času chlazení potřebného k ochlazení na vyhazovací teplotu (time to reach ejection). Tento výsledek ukazuje (oproti předchozí analýze vývoje teploty) v jakém čase chlazení je dané místo připraveno k vyhození z formy. Do času chlazení nejsou započítány čas vstřikování a dotlak.

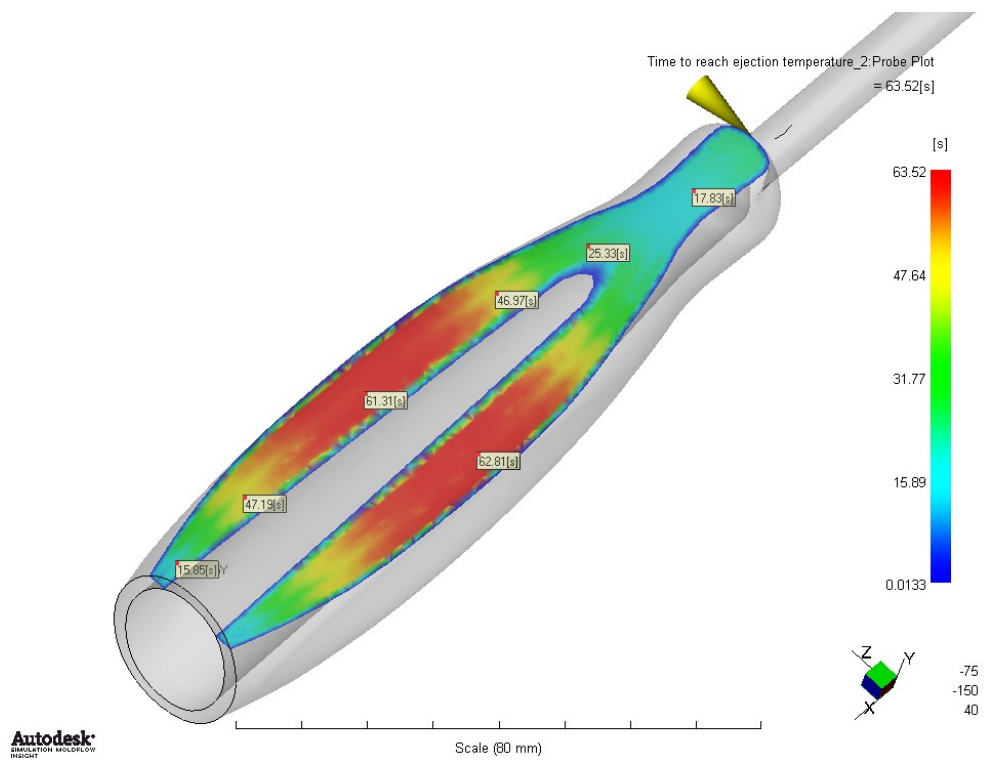
Čas chlazení u PA je odhadován na 63,52 s. U PPS je tento čas doporučován na čas 56,3 s.

Obr. 53,54 a 55 ukazují výrobek v jednotlivých řezech a udávají, v jakém čase chlazení bude ta daná část připravena k vyhození. Trn z důvodu relativně malé tloušťky se ochlazuje rychleji, přibližně v 35 s chlazení je trn z PA připraven k vyhození. Trn u PPS se ochlazuje rychleji, a to přibližně za 31 s.

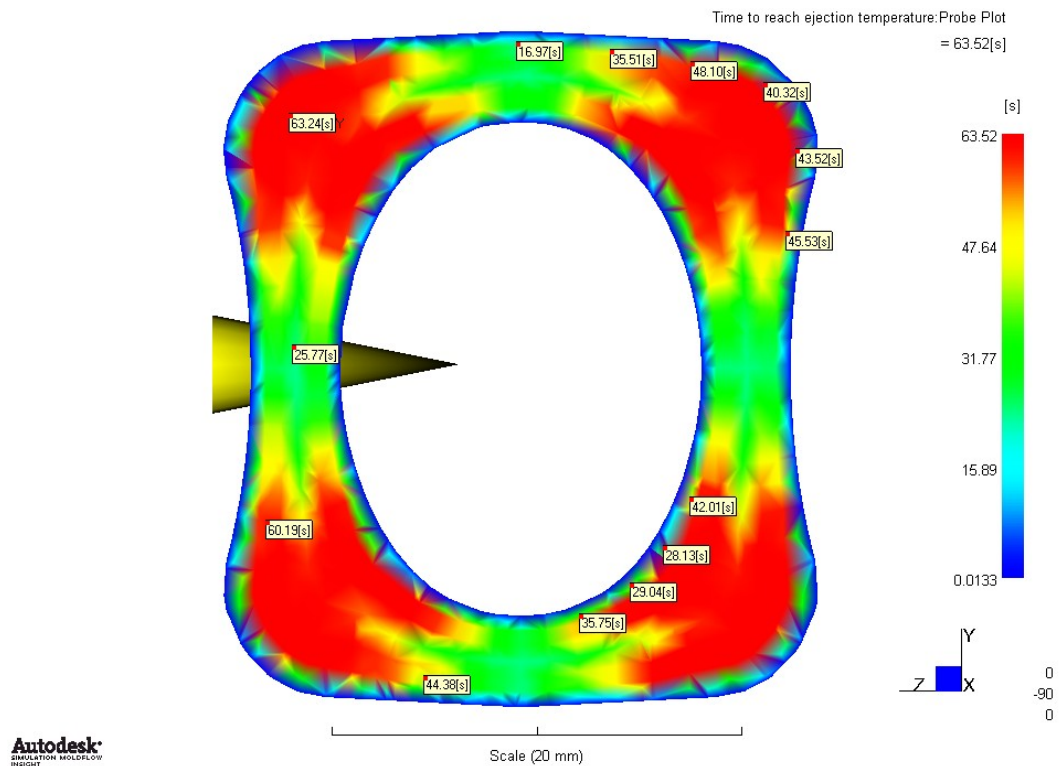
U rukojeti v oblasti největší tloušťky se ovšem doba chlazení výrazně prodlužuje, a to jak již bylo zmíněno z důvodu relativně velké a nerovnoměrné tloušťky stěn, jak lze vidět z Obr. 54 a 55.



Obr. 53: Čas chlazení potřebný k ochlazení na vyhazovací teplotu – řez trn PA – GF35



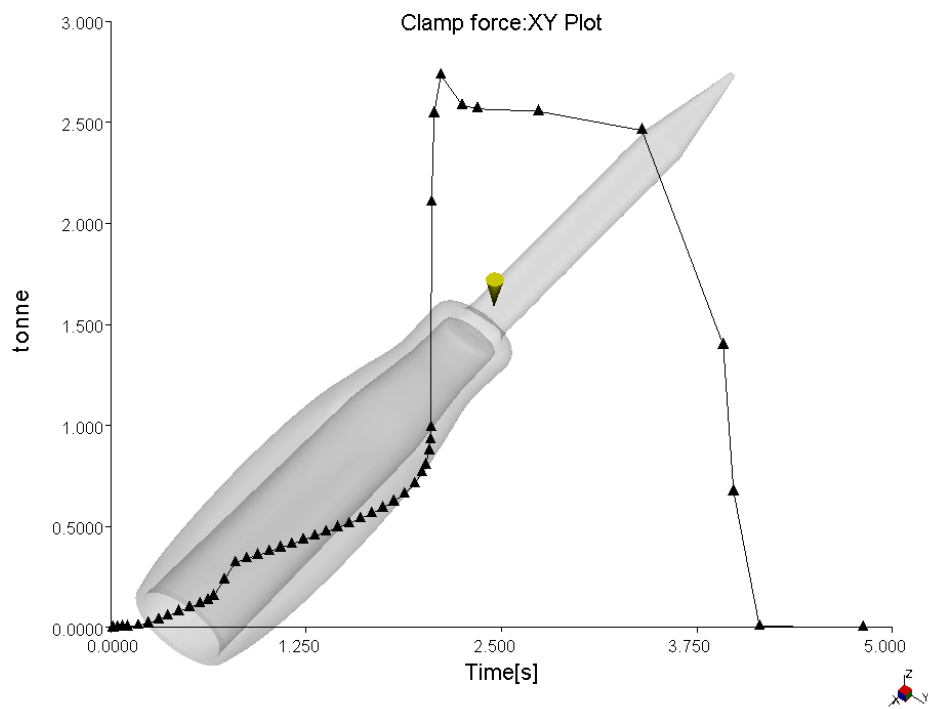
Obr. 54: Čas potřebný k ochlazení na vyhazovací teplotu – řez rukojet PA – GF35



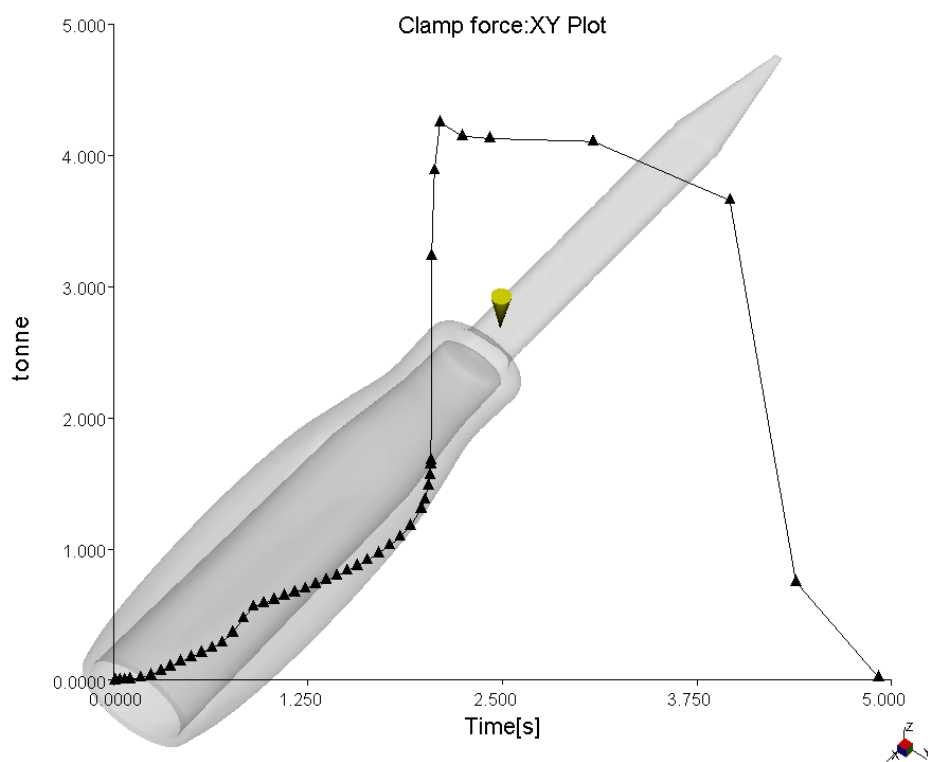
Obr. 55 Čas potřebný k ochlazení na vyhazovací teplotu – řez příčný v polovině rukojeti – detail – PA – GF35

8.11 Uzavírací síla

Analýza graficky znázorňuje průběh uzavírací síly na vstřikovacím stroji (Clamp force). V průběhu vstřikování PA síla narůstá na svoji maximální hodnotu 2,73 tuny, kterou dosahuje v čase 2,112 s. U PPS roste na maximální hodnotu 4,25 tuny, kterou dosahuje v čase 2,099 s. Tato analýza se provádí především k volbě vhodného vstřikovacího stroje. Maximální uzavírací síla při vstřikování by měla být nejvýše 80% maximální uzavírací síly stroje. Zbylých 20 % se považuje za bezpečnostních, které chrání před poškozením. Zvolený vstřikovací stroj z pohledu uzavírací síly pro výrobu navrženého nástroje vyhovuje.



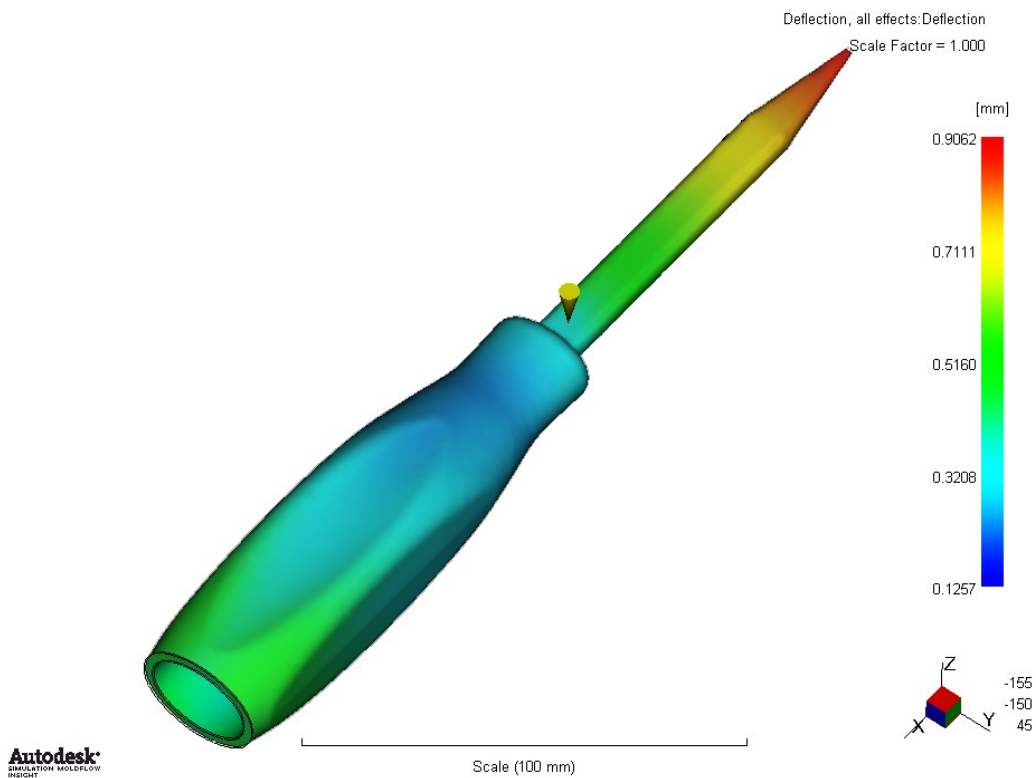
Obr. 56: Průběh uzavírací síly vstřikovacího stroje – PA – GF35



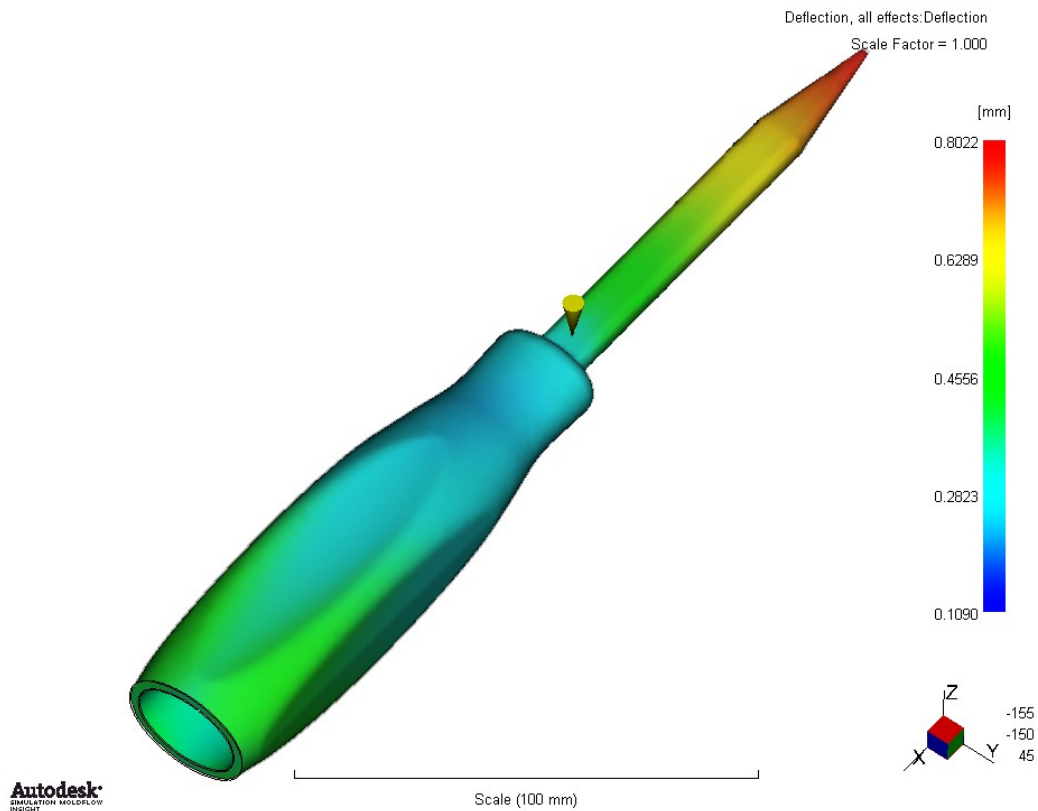
Obr. 57: Průběh uzavírací síly vstřikovacího stroje – PPS – GF40

8.12 Celková deformace vstříkovaného výrobku

Tento výsledek analýzy zobrazuje hodnotu celkové deformace od všech působících vlivů (deflection, all effects), a to chlazení, smrštění, orientace vztaženou k bodu 0, 0, 0. Největší vliv na výslednou deformaci má smrštění materiálu. Jak lze vidět z Obr. 58 a 59, tak problém deformace se týká především trnu výrobku. Hodnotu smrštění by bylo možné snížit zvýšením dotlakové síly, zároveň by ale nejspíš bylo nutné zvýšit i teplotu taveniny na maximální dovolenou z 290 °C na 300 °C u PA, a u PPS z 325 °C na 340 °C, aby dotlak působil správně, a po celou dobu.



Obr. 58: Celková deformace vstříkovaného výrobku – PA – GF35



Obr. 59: Celková deformace vstříkovaného výrobku – PPS – GF40

8.13 Hmotnost vstříkované části

Objem vstříkované části byl v programu Catia V5R18 vypočítán na hodnotu $5,959 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$.

Program ASMS 2013 objem vstříkované části spočítal na $59,423 \text{ cm}^3$, což téměř souhlasí s výsledkem v programu Catia.

Při výpočtu hmotnosti využijeme hustotu PA Ultramid A3HG7, která je $1,41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

$$m = V \cdot \rho = 59,423 \cdot 1,410 = 83,78 \text{ [g]}$$

Při výpočtu hmotnosti výrobku z PPS Fortron 1140E7 využijeme hustotu, která je $1,70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

$$m = V \cdot \rho = 59,423 \cdot 1,70 = 101 \text{ [g]}$$

Spočítané teoretické hmotnosti výrobků se liší oproti výsledkům spočítaným v analýzách o 9,0 g (PA), respektive o 9,8 g (PPS). Odlišné hmotnosti souvisí se způsobem nastavení procesních podmínek.

Tab. 17: Hmotnostní a objemové údaje vstříkované části

Objem hlavní části dle Catia V5R18	$5,959 \cdot 10^{-5}$	m^3
Objem hlavní části dle ASMS 2013	59,423	cm^3
Objem koncovky dle Catia V5R18	$4,673 \cdot 10^{-6}$	m^3
Hustota PA Ultramid A3HG7	1,41	$g \cdot cm^{-3}$
Hustota PPS Fortron 1140E7	1,70	$g \cdot cm^{-3}$
Hmotnost hlavní části z PA dle výpočtu	83,78	g
Hmotnost hlavní části z PPS dle výpočtu	101,61	g
Hmotnost koncovky z PA dle výpočtu	6,59	g
Hmotnost koncovky z PPS dle výpočtu	7,94	g
Hmotnost hlavní části z PA – GF35 dle ASMS 2013	74,80	g
Hmotnost hlavní části z PPS – GF40 dle ASMS 2013	91,80	g

8.14 Volba vhodného typu polymeru

Při porovnání dvou materiálů PA Ultramid A3HG7 od firmy BASF a PPS Fortron 1140E7 od firmy Ticona byl shledán vhodnější pro použití PA, a to z následujících důvodů:

- dostupnost materiálu
 - PA je více zpracováván firmami v ČR, případně je v menším množství dostupný od jiných distributorů, než jsou přímo výrobci.
 - PPS není tak často zpracováván v ČR, a to především kvůli vysokým zpracovatelským teplotám.
- lepší mechanické vlastnosti
 - PA dle materiálového listu od firmy BASF vykazuje napětí při přetržení 210 MPa.
 - PPS dle materiálového listu od firmy Ticona vykazuje hodnotu napětí při přetržení pouze 150 MPa.
 - Obdobná situace je i u pevnosti v ohybu, kdy PA vykazuje pevnost 300 MPa, zatímco PPS 230 MPa.
- nižší zpracovatelské teploty, tím menší opotřebení formy
 - PA má dle materiálového listu od firmy BASF obvyklou teplotu taveniny o teplotě 260 °C, zatímco u PPS se uvádí teplota 325°C.

- Teplota formy u PA se předpokládá v rozmezí teplot 80 – 90 °C, u PPS je to 135 – 160 °C, z čehož plyne opět nižší teplotní zatížení formy a tím předpokládané nižší opotřebení
- výrazně nižší cena PA (4 – 5 Euro.kg⁻¹) oproti PPS (11 – 13 Euro.kg⁻¹)
- nižší hmotnost uvažovaného výrobku
 - Výrobek z PA díky své hustotě 1, 41 g.cm⁻³ je přibližně o 17 g na jeden výrobek lehčí, než výrobek z PPS, který má hustotu 1, 70g.cm⁻³. Vzhledem k nižší hustotě bude i z hlediska materiálu výroba levnější.

9 MECHANICKÁ ANALÝZA

Vzhledem k navrženému tvaru a volbě polymerního materiálu bylo nutné výrobek (nástroj) otestovat ve virtuální mechanické analýze, kterou nabízí ve svém modulu program Catia V5R18 s názvem Generative Structural Analysis.

Mechanickou analýzou (simulací) zjišťujeme přibližné hodnoty síly, kterou by bylo nutné vynaložit na porušení struktury trnu a špice trnu. Simulace zkoumá případ zatížení na ohybové namáhání. Zanedbává namáhání na krut, které je v tomto případě, jako druhotné namáhání.

Reálný ocelový trn se při využití v praxi vsouvá mezi opláštěvané vodiče přibližně do poloviny trnu. S touto skutečností byla uvažována i provedená simulace zatížení. V další druhé simulaci byla uvažována situace, kdy je mezi vodiče vsunuta pouze špice trnu.

Z důvodu velké podobnosti trnu stávajícího návrhu a reálného nástroje byly pro porovnání mechanických vlastností polymerního a ocelového trnu vybrány stejné simulace, tzn., že ve třetí simulaci byla využita navržená geometrie pro posouzení mechanického chování ocelového nástroje, kdy místo polymerního je v simulaci uvažován materiál ocelový.

Ve všech případech je silové zatížení zvoleno jako jednotkové zatížení, čili zatížení hodnotou 1N. Následně simulace programu určí hodnotu von Misesova napětí při zatížení 1 N. Hodnota Von Misesova napětí při zatížení 1N se dále využije společně s hodnotou napětí při přetržení samotného materiálu k výpočtu maximální síly, kterou vydrží zatěžované těleso (jedná se o přímou úměru).

I když je testovaná geometrie nástroje namáhána na ohyb, tak bylo rozhodnuto, že pro výpočet maximálního zatížení, kterému trn ještě odolá, bude využita hodnota napětí při přetržení. K výpočtu by bylo možné použít i hodnotu pevnosti v ohybu, která je vyšší, než hodnota pevnosti při přetržení. Vzhledem k této skutečnosti by se zvýšilo i maximální dovolené zatížení, nicméně vzhledem k bezpečnosti a ponechání nějaké rezervy bylo doporučeno k výpočtu využít právě hodnotu pevnosti při přetržení.

9.1 Nastavení materiálu uvažovaného modelu

Možnosti nastavení programu neumožňuje přesné nastavení uvažovaného materiálu PA Ultramid A3HG7, a to z důvodu, že tento materiál se nenachází v materiálové databázi. Nicméně bylo využito ruční nastavení, kdy se zvolí hodnota materiálu jako polymerní, a dále se nastavují data v tab. 18. Materiál ocel se nachází v materiálové databázi programu. Data, která byla využita v simulaci, jsou také uvedena v tab. 18.

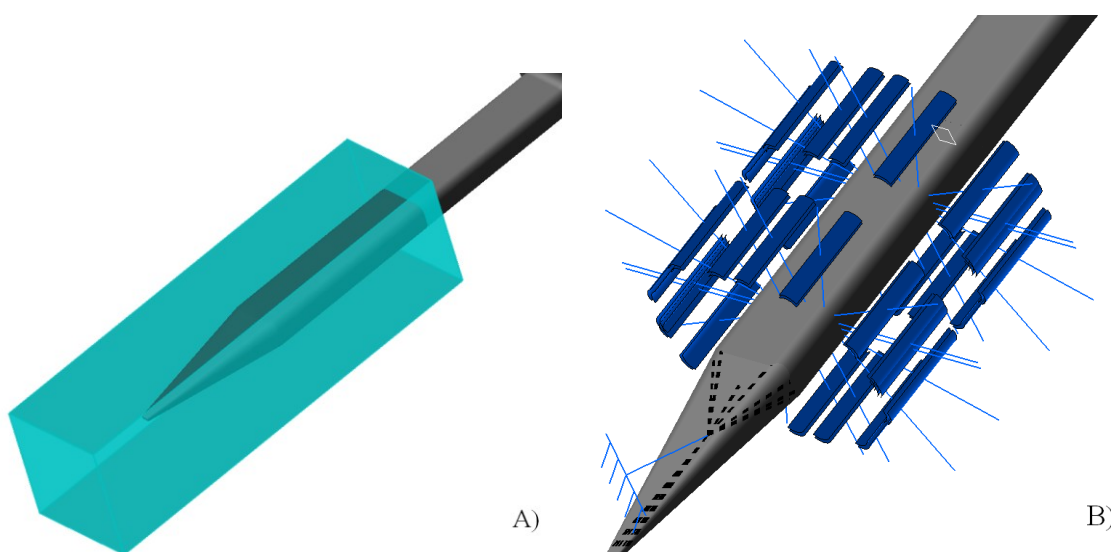
Tab. 18: Nastavení testovacích podmínek mechanické analýzy

Podmínky	HODNOTA	HODNOTA	JEDNOTKA
Materiál	polymer	ocel	–
Modul pružnosti	11500	210000	MPa
Poissonovo číslo	0,350	0,266	–
Hustota	1410	7860	Kg.m ⁻³

9.2 Mechanická analýza trnu

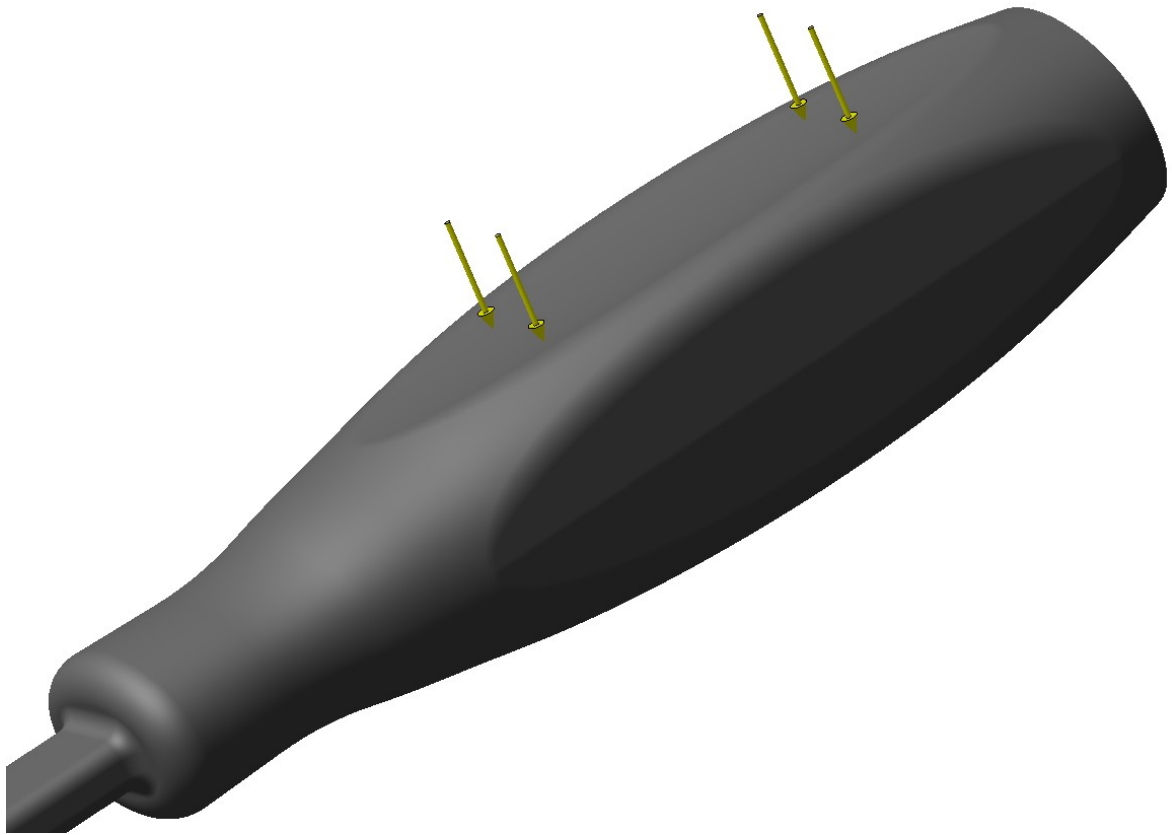
Tato mechanická analýza simuluje namáhání přibližně v polovině trnu, což nejvíce odpovídá reálnému využití nástroje v praxi. Bylo uvažováno dvojí uchycení trnu nástroje:

- pevné uchycení – bez možnosti pohybu uchycené poloviny trnu (Obr. 60 – A)
- částečné uchycení – možnost částečného pohybu uchycené poloviny trnu (Obr. 60 – B)



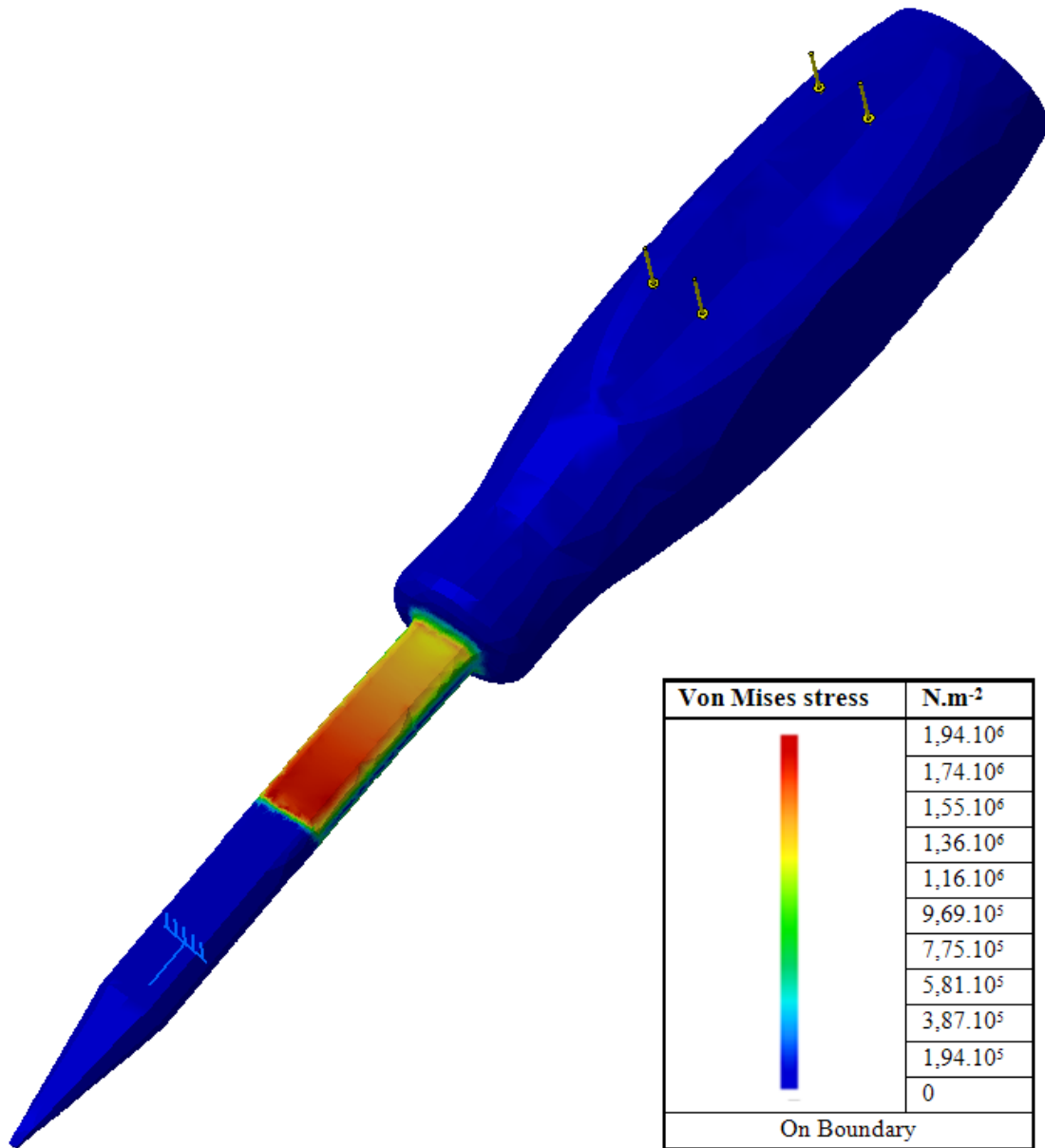
Obr. 60: Pevné a částečné uchycení poloviny trnu

Jak již bylo zmíněno, tak zatížení bylo ve všech analýzách využito stejné, a to jednotkové zatížení rukojeti o velikosti 1N. Na Obr. 61 znázorněno žlutými šipkami.



Obr. 61: Směr a zvolené zatížení rukojeti

9.2.1 Pevné uchycení poloviny trnu

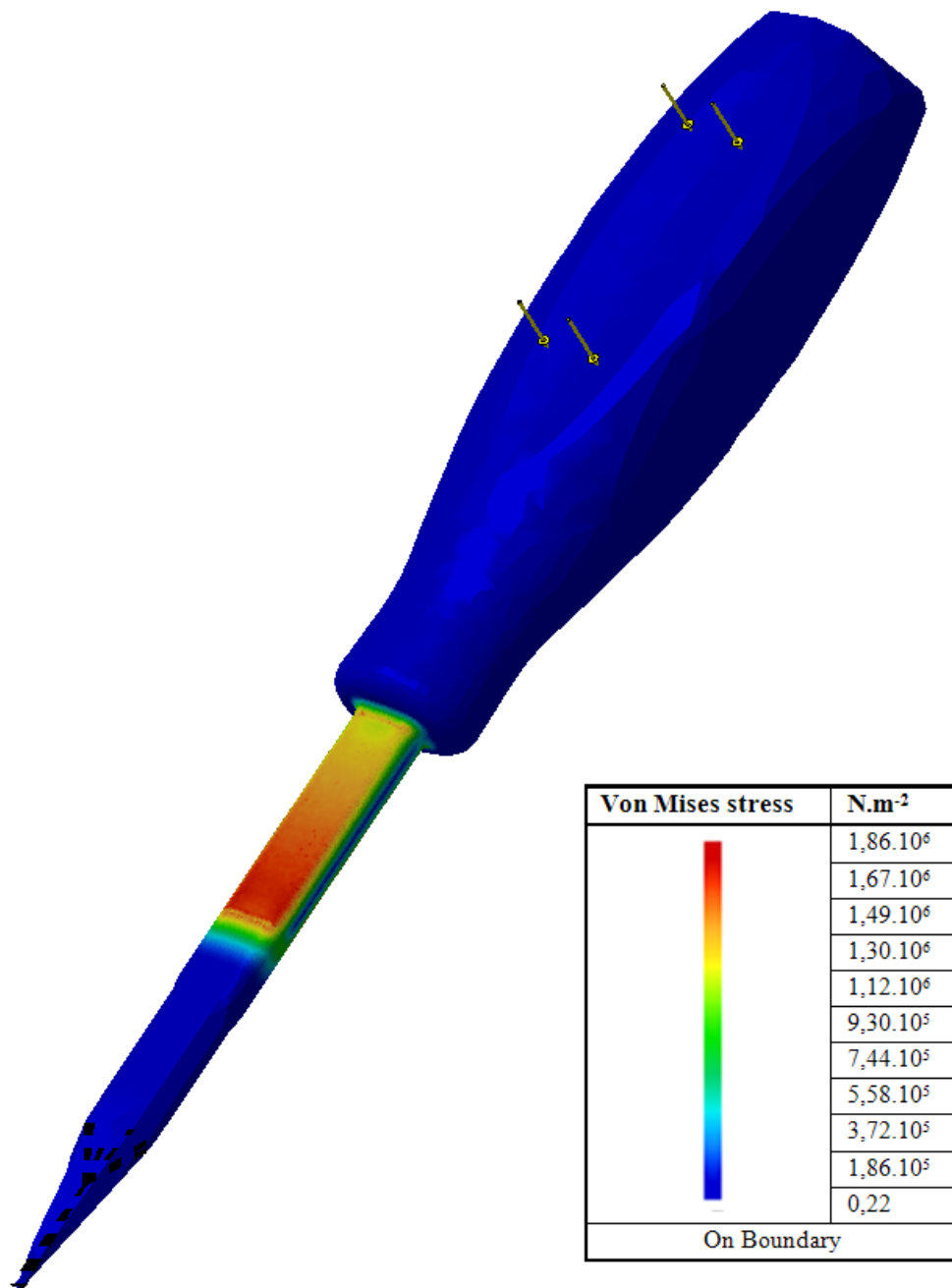


Obr. 62: von Misesovo napětí při zatížení 1N – pevné uchycení poloviny trnu

Pro výpočet maximální síly, kterou vydrží trn nástroje je využita hodnota napětí při přetržení PA Ultramidu A3HG7, která je 210 MPa. (viz. Tab. 14) a von Misesovo napětí, které má hodnotu $1,94 \cdot 10^6 \text{ N.m}^{-2}$ určeného výpočtem analýzou při silovém zatížení 1N. Výpočet maximální síly tedy bude:

$$F_{max} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{vM}} = \frac{210 \cdot 10^6}{1,94 \cdot 10^6} = 108,248 \text{ N} \doteq 108 \text{ N}$$

9.2.2 Částečné uchycení poloviny trnu



Obr. 63: von Misesovo napětí při zatížení 1N – částečné uchycení poloviny trnu

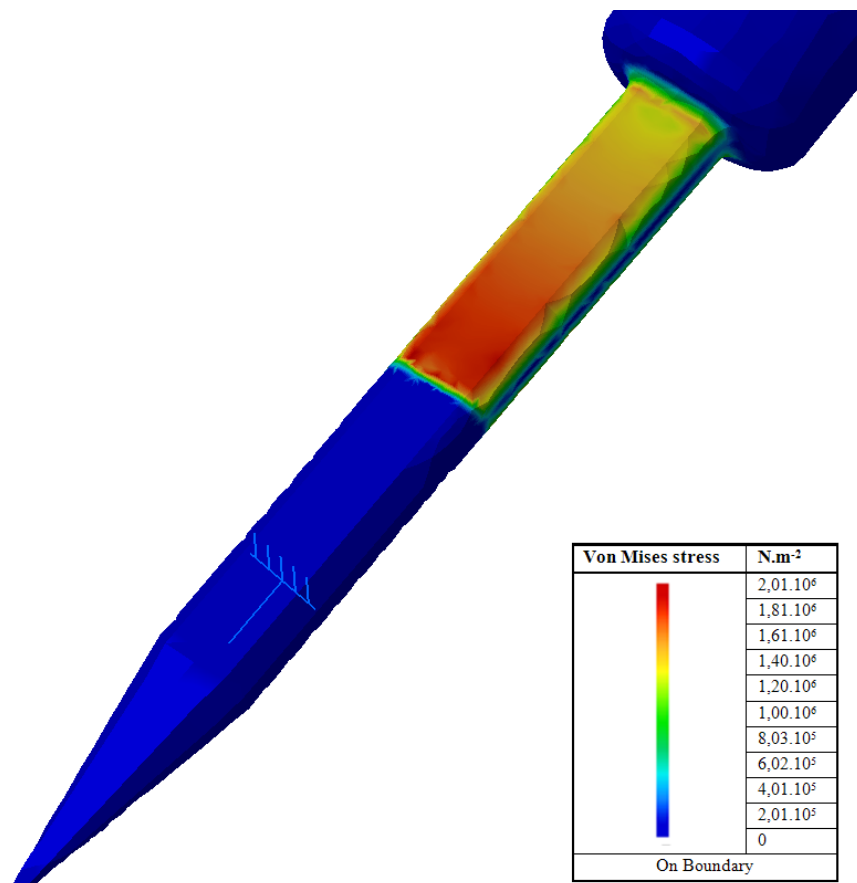
Částečné uchycení by mělo simulovat reálné využití lépe, než pevné uchycení. Nicméně výsledná hodnota maximálního zatížení je téměř shodná, jako v předchozím případě:

$$F_{max} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{vM}} = \frac{210 \cdot 10^6}{1,86 \cdot 10^6} = 112,903 \text{ N} \doteq 113 \text{ N}$$

Maximální zatížení nástroje tedy musí být $F_{\max} < 113 \text{ N}$, aby nedošlo k porušení struktury materiálu a ztráty funkčnosti nástroje. Pro kontrolu správnosti výpočtu byla zadána stejná analýza, kdy místo jednotkového zatížení, bylo zvoleno zatížení právě 108 N, respektive 113 N. Výsledkem analýzy je maximální napětí s hodnotou $2,10 \cdot 10^8 \text{ N.m}^{-2}$, což odpovídá hodnotě napětí při přetržení 210 MPa materiálu PA Ultramid A3HG7.

9.2.3 Výsledky simulace v případě ocelového trnu

Stejně analýzy, tj. pevné uchycení a částečné uchycení byly využity i ke zjištění odolnosti ocelového trnu. Jako ocel je použita ocel 11500 s označením E295 (dle EN) s pevností v tahu 540 MPa. V obou případech uchycení se hodnota von Misesova napětí pro ocel pohybovala kolem $2 \cdot 10^6 \text{ N.m}^{-2}$.



Obr. 64: von Misesovo napětí při zatížení 1N – ocelový trn

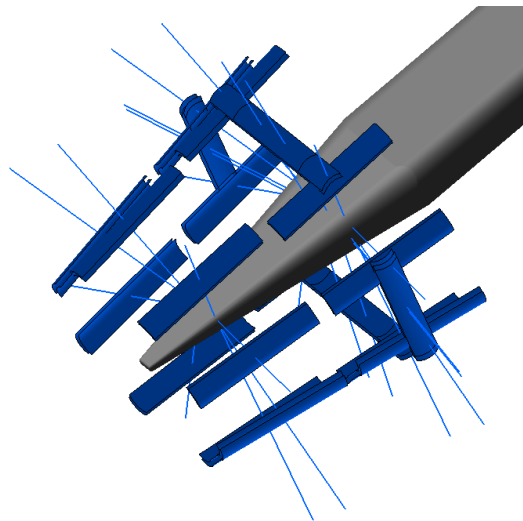
Hodnota maximálního zatížení ocelového trnu:

$$F_{\max} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{vM}} = \frac{540 \cdot 10^6}{2,01 \cdot 10^6} = 268,657 \text{ N} \doteq 269 \text{ N}$$

Maximální zatížení ocelového nástroje tedy musí být $F_{\max} < 269 \text{ N}$, aby nedošlo k porušení struktury materiálu a ztráty funkčnosti nástroje.

9.3 Mechanická analýza špice trnu

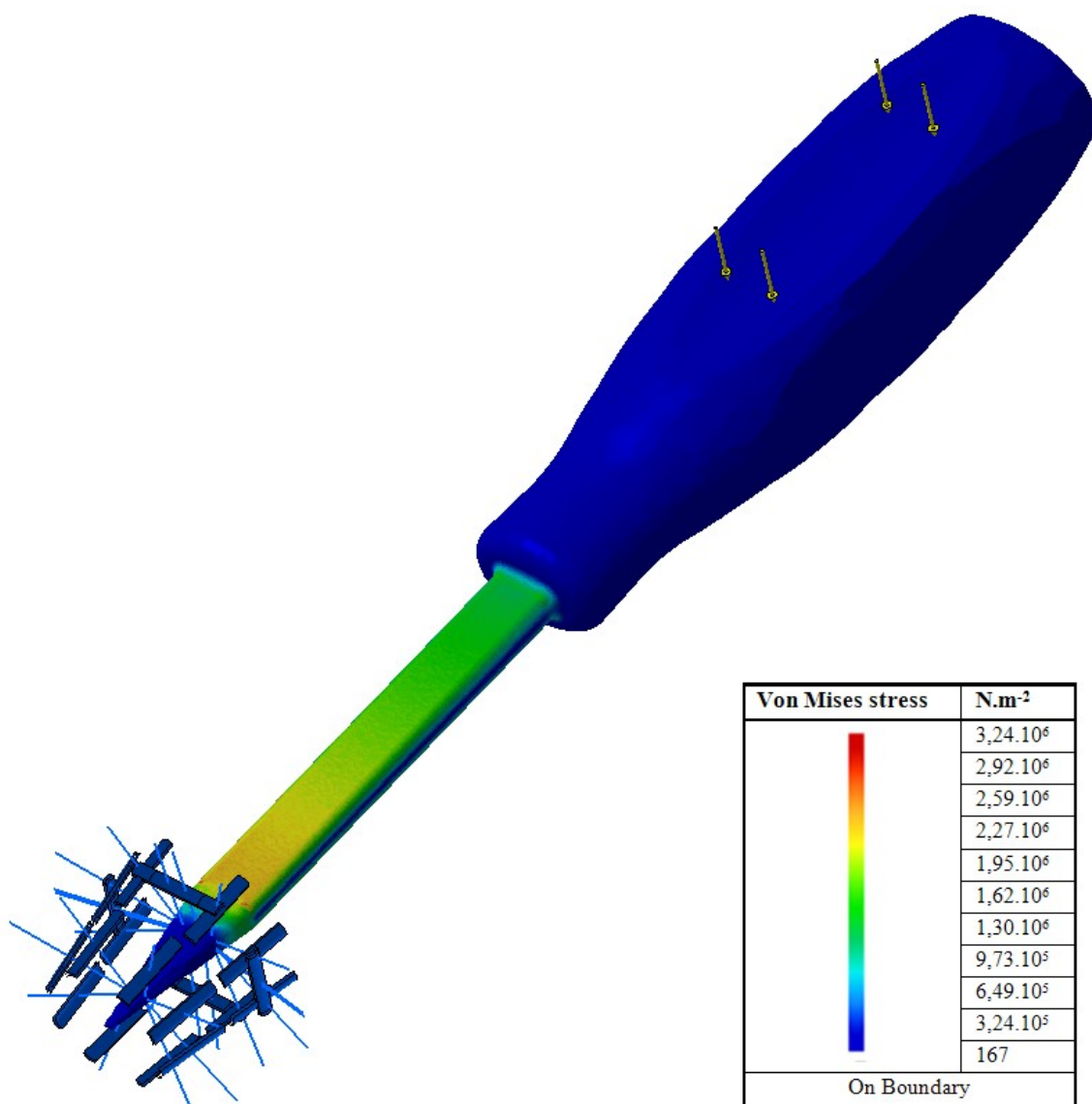
V mechanické analýze špice trnu uvažujeme případ, že bude mezi opláštěvané vodiče zasunut pouze špice trnu, což výrazně sníží jeho mechanickou odolnost. Následně bylo nutné provést uchycení a zatížení uvažovaného nástroje. (viz. Obr. 65)



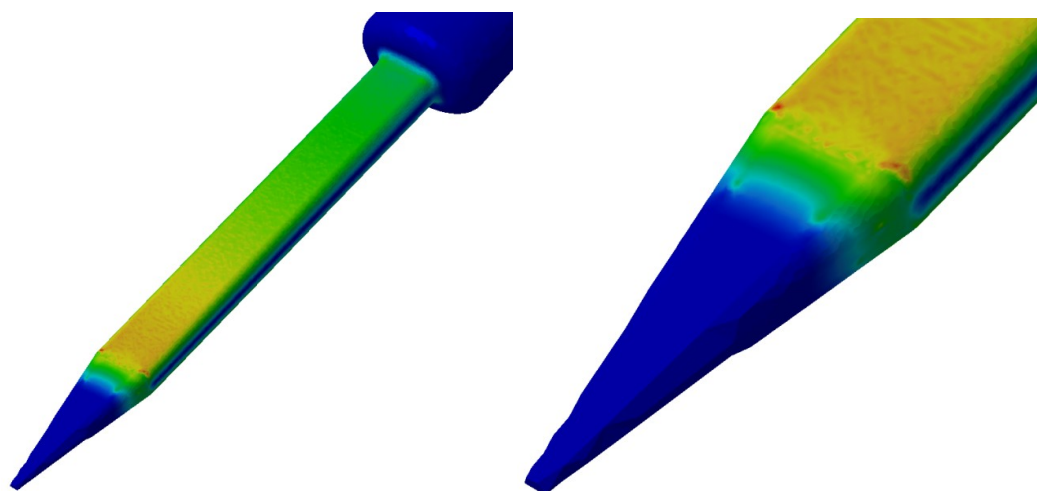
Obr. 65: Detail uchycení špice trnu

Jak je patrné z Obr. 66 a 67, mechanická odolnost špice bude zhruba o polovinu menší, než odolnost trnu, a to:

$$F_{\max} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{vM}} = \frac{210 \cdot 10^6}{3,24 \cdot 10^6} = 64,815 \text{ N} = 65 \text{ N}$$



Obr. 66: Von Misesovo napětí při zatížení 1N

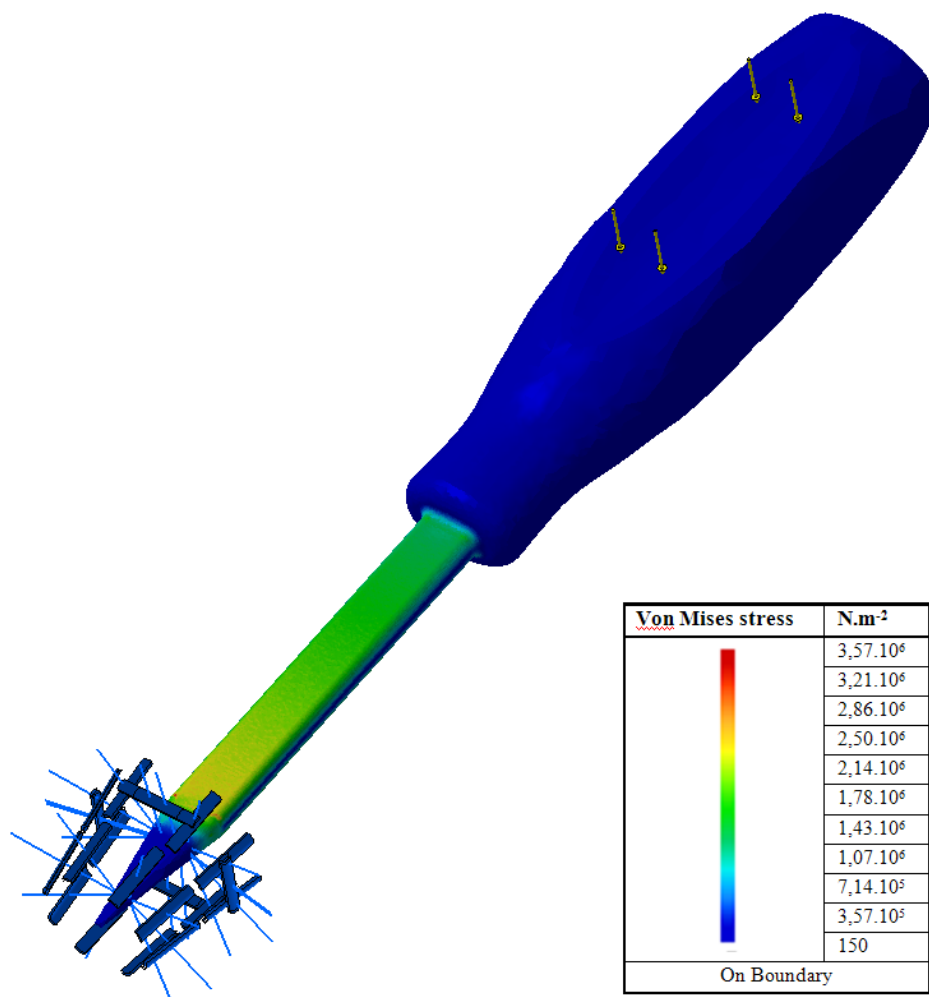


Obr. 67: Von Misesovo napětí při zatížení 1N - detail

Maximální zatížení špice nástroje tedy musí být $F_{\max} < 65 \text{ N}$, aby nedošlo k porušení struktury materiálu a ztráty funkčnosti nástroje. Jako v předchozí simulaci, byla pro kontrolu správnosti výpočtu zadána stejná analýza, kdy místo jednotkového zatížení, bylo zvoleno zatížení právě 65 N. Výsledkem analýzy je maximální napětí s hodnotou $2,11 \cdot 10^8 \text{ N.m}^{-2}$, což odpovídá hodnotě napětí při přetržení 210 MPa materiálu PA Ultramid A3HG7.

9.3.1 Výsledky simulace v případě ocelové špice trnu

Stejná analýza špice trnu byla využita i ke zjištění odolnosti ocelové špice trnu. Výsledná hodnota von Misesova napětí pro ocel je $3,57 \cdot 10^6 \text{ N.m}^{-2}$.



Obr. 68: von Misesovo napětí při zatížení 1N – ocelová špice trnu

Hodnota maximálního zatížení ocelové špice trnu:

$$F_{\max} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{vM}} = \frac{540 \cdot 10^6}{3,57 \cdot 10^6} = 151,261 \text{ N} \doteq 151 \text{ N}$$

Maximální zatížení ocelové špice nástroje tedy musí být $F_{\max} < 151 \text{ N}$, aby nedošlo k porušení struktury materiálu a ztráty funkčnosti nástroje.

9.4 Srovnání mechanické odolnosti trnu z polymeru a trnu z oceli

Z výsledků mechanických analýz je zřejmé, že předpokládaná mechanická odolnost trnu z oceli je 2 – 3 krát vyšší než odolnost polymeru PA Ultramid A3HG7. Nicméně vzhledem k výsledkům von Misesova napětí a po jeho přepočtu (uvedených v tab. 19) se zdá být mechanická odolnost 113 N trnu z polymeru pro danou aplikaci dostačující.

Problém by mohl nastat při mechanickém zatížení pouze části špice trnu. V tomto případě odolnost proti zlomení velmi klesá. Nicméně špice, jak udává zadavatel, slouží k dobrému proniknutí trnu mezi svazek opláštěvaných vodičů.

Tab. 19: Předpokládaná odolnost trnu nástroje F_{\max}

Vlastnost	Polovina trnu (reálné)		Špice trnu (extrém)	
	Ocel E295	PA A3HG7	Ocel E295	PA A3HG7
Materiál	Ocel E295	PA A3HG7	Ocel E295	PA A3HG7
Pevnost [MPa]	540	210	540	210
von Mises $[\text{N}\cdot\text{m}^{-2}]^*$	$2,01\cdot 10^6$	$1,86\cdot 10^6$	$3,57\cdot 10^6$	$3,24\cdot 10^6$
F_{\max} [N]	269	113	151	65

* von Misesovo napětí při zatížení o velikosti 1 N

F_{\max} – předpokládané zatížení, při kterém dochází k prvním deformačním změnám

10 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO VÝROBKU

Ekonomické zhodnocení návrhu uvažuje náklady spojené s budoucí výrobou nástroje z polymeru.

Uvažuje náklady na materiál PA A3HG7 od firmy BASF, kde cena byla stanovena po konzultaci s obchodním zástupcem firmy, panem Martinem Dobroněm. Obvyklá cena tohoto polymeru se pohybuje okolo $3,80 \text{ Euro.kg}^{-1}$, ovšem tyto údaje jsou platné pouze v případě odběru minimálního množství 3 tun, a s ročním odběrem minimálně 30 tun. Výsledná cena materiálu za kilogram je závislá od odebraného množství materiálu. V případě menšího množství odběru materiálu byl doporučen odběr od místních distributorů, či firem, kde se obvyklá cena pohybuje řádově o 1 Euro.kg^{-1} výše. Z toho důvodu je cena materiálu uvažována na hodnotě 5 Euro.kg^{-1} , což je v přepočtu na naši měnu přibližně 125 Kč. V případě využití radiačního síťování by náklady spojené s materiálem vzrostly na 150 Kč.kg^{-1} . V ekonomickém zhodnocení se uvažuje využití PA A3HG7 bez síťování, jelikož rozdíl v ceně síťovaného a nesíťovaného polymeru se v konečné ceně projeví pouze minimálně z důvodu malosériové výroby.

Dále jsou uvažovány výrobní náklady, které jsou stanoveny na 800 Kč.hod^{-1} . Tyto náklady zahrnují provoz stroje, jeho amortizaci, odpisy, spotřebované energie a mzdu obsluhy stroje.

Uvažované náklady spojené s konstrukcí a výrobou formy bylo nutné vzhledem ke skutečnosti, že je návrh ve stádiu vývoje, uvažovat ve více variantách, a to:

1. jednokomponentní forma se dvěma dutinami – jádro mechanicky (ručně) vkládáno
2. jednokomponentní forma se dvěma dutinami – jádro taženo hydraulicky
3. dvoukomponentní forma
4. jednokomponentní forma s jednou dutinou – technologie GIT
5. jednokomponentní forma pro nástřik trnu + jednokomponentní forma pro nástřik rukojeti z TPU

Následně byl proveden odhad ceny forem konzultovaných s nástrojárnou. Číselné označení forem platí i pro označování v dalším textu.

Vstupní parametry:

Tab. 20: Vstupní parametry pro ekonomické zhodnocení

Původní cena ocelového nástroje [Kč]	1200	
Materiál [Kč.kg ⁻¹]	PA A3HG7	125
	PA A3HG7 ¹	150
	TPU	100
Výrobní náklady [Kč.hod ⁻¹] ²	800	
Předpokládaná hmotnost hlavní části ³ [kg]	0,084	
Předpokládaná hmotnost koncovky ³ [kg]	0,007	
Odhad hmotnosti vtokového systému ³ [kg]	0,011	
Bezpečnostní „polštář“ [kg]	10 % z hmotnosti vstřiku	
Hmotnost materiálu TPU na nástřik ³ [kg]	0,014	
Odhadovaná cena forem [Kč]	1	260000
	2	350000
	3	380000
	4	260000
	5	260000
		200000

¹ cena polymeru při využití radiačního síťování pro zlepšení mechanických vlastností

² výrobní náklady zahrnují amortizaci stroje, odpisy, energie a mzdu obsluhy

³ hodnoty se mohou lišit s ohledem na použitým druhu formy, blíže specifikovány v dané kapitole

Kromě výše zmíněných vstupních parametrů v tab. 20 bylo nutné stanovit délku jednoho cyklu vstřikování pro daný výrobek. Ke zjištění délky cyklu byla využita analýza v kapitole 8.9 – Vývoj teploty v průběhu celého cyklu. Tato analýza udává, že při využití ideálních podmínek chlazení (stejný odběr tepla ze všech míst výrobku) se čas od uzavření formy až do vyhození výrobku z formy pohybuje kolem 77 s. Nicméně je nutné počítat, že při konstrukci temperačního systému, se nebude jednat o ideální chlazení.

Z toho důvodu pro ekonomické zhodnocení byly navrženy hodnoty délek cyklu vyšší (viz tab. 21), než by byly pravděpodobně hodnoty reálné. Nejdelsí cyklus je zvolen u jednokomponentní formy s mechanicky (ručně) vyjímatelným jádrem, kde by bylo nutné, aby obsluha stroje vyjmula jádro z výrobku, připravila ho na další použití a opět vložila do připravené formy.

U formy číslo 5 by bylo nutno využití dvou vstřikovacích strojů z důvodu využití dvou forem. Jeden stroj by byl využit pro zhotovení trnu a kostry rukojeti. Druhý by sloužil ke zhotovení zástřiku TPU na kostru rukojeti. To by znamenalo i zkrácení cyklu na obou

strojích. Pro vstřík trnu a kostry rukojeti je počítáno s 90 s na jeden cyklus stroje, u zástříku rukojeti TPU je počítáno s cyklem dlouhým 30 s.

Délka jednoho cyklu má v ekonomickém hodnocení jen malý vliv na konečnou cenu výrobku, a to z důvodu, že by se jednalo pouze o malosériovou výrobu. Hlavním parametrem, jež ovlivňuje konečnou cenu výrobku, je cena formy.

Tab. 21: Doba cyklu pro jednotlivé formy

Forma	t[s]	x [ks.hod ⁻¹]
1	150	24
2	120	30
3	120	30
4	120	30
5	90	40
	30	120

kde je

t doba cyklu [s];

x počet kusů vyrobených za hodinu [ks.hod⁻¹].

Výpočet počtu kusů za hodinu pro variantu formy č. 1:

$$x = \frac{1 \text{ hod}}{t} = \frac{3600}{150} = 24 [\text{ks} \cdot \text{hod}^{-1}]$$

V jednotlivých podkapitolách je zhodnoceno všech pět variant návrhů forem. V každé podkapitole je uvedena tabulka, která uvádí náklady spojené s výrobou o počtu 50, 100, 300, 500, 1000 a 2000 kusů. Následně je vždy připojen graf bodu zvratu, případně vzorový výpočet. Nakonec jsou v grafu porovnány všechny jednotlivé varianty společně.

10.1 Jednokomponentní forma se dvěma dutinami – jádro mechanicky (ručně) vkládáno

Jak již bylo uvedeno, tak v prvním případě návrhu formy se jedná o formu s dvěma dutinami pro hlavní část nástroje a koncovku rukojeti. Jádro rukojeti je uvažováno jako mechanicky (ručně) vyjímatelné, a to především z důvodu úspory financí a předpokladem malosériové výroby.

Tab. 22: Náklady při využití jednokomponentní formy s mechanicky vkládaným jádrem

z	50	100	300	500	1000	2000
N_m	701,25	1402,50	4207,50	7012,50	14025,00	28050,00
N_s	1666,67	3333,33	10000,00	16666,67	33333,33	66666,67
N_f	260000,00	260000,00	260000,00	260000,00	260000,00	260000,00
N_c	262367,92	264735,83	274207,50	283679,17	307358,33	354716,67
$N_c \cdot z^{-1}$	5247,36	2647,36	914,03	567,36	307,36	177,36

Kde je

N_m náklady za spotřebu materiálu [Kč];

N_s výrobní náklady (amortizaci stroje, odpisy, energie a mzdu obsluhy) [Kč];

N_f náklady na pořízení formy [Kč];

N_c celkové náklady [Kč];

z objem produkce [ks];

$N_c \cdot z^{-1}$ průměrné náklady na 1 výrobek při produkci z [Kč].

10.1.1 Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu

Analýza bodu zvratu vychází z kapacitního členění nákladů na fixní (v tomto případě vstřikovací forma) a variabilní (v tomto případě nákladů na materiál + výrobní náklady) a slouží především ke zjištění kritického množství produkce, minimální prodejní ceny a maximálně přípustných nákladů.

V případě navrženého nástroje jde o porovnání s nástrojem ocelovým, který má hodnotu 1200 Kč. Níže uvedené grafy a výpočty ukazují právě body zvratu, od jakého množství produkce je průměrná suma na výrobu 1 ks nástroje nižší, než u původního ocelového nástroje.

Tab. 23: Bod zvratu u varianty formy I

	PA A3HG7
PVN [ks]	47,36
N_f [ks]	260000
Bod zvratu [ks]	226

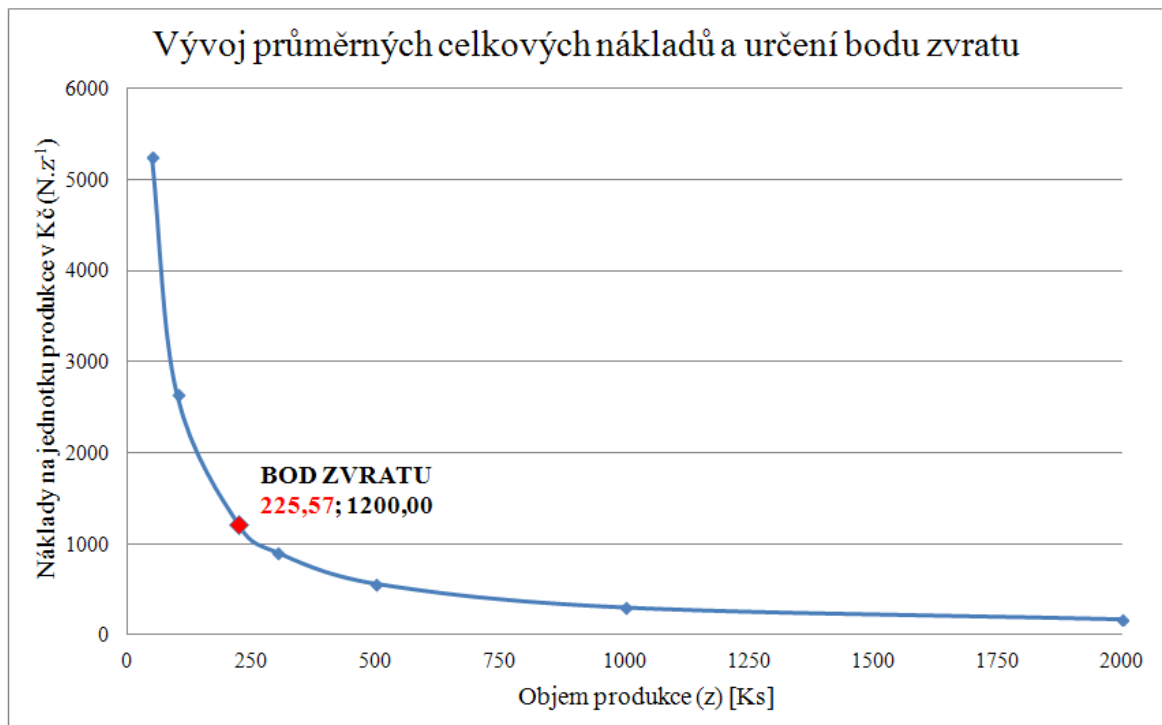
- Průměrné variabilní náklady pro PA A3HG7:

$$PVN = \frac{N_m + N_s}{z} = \frac{701,25 + 1666,67}{50} = 47,36 \text{ [Kč]}$$

- Kritické množství produkce, bod zvratu pro PA A3HG7:

$$z_k = \frac{N_f}{1200 - PVN} = \frac{260000}{1200 - 47,36} = 225,57 \text{ ks}$$

U první varianty formy při využití polymeru PA A3HG7 nastává bod zvratu při hodnotě 225,57 ks, čili při výrobě 226 kusu se výroba dostává pod hodnotu 1200 Kč za jeden kus nástroje. Další vývoj ceny při určitém množství produkce ukazuje Tab. 22 a Obr. 69.



Obr. 69: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 1

V následujících podkapitolách je uveden vzorový výpočet pro jednokomponentní formu s mechanicky vkládaným jádrem pro výrobu o velikosti 300 ks, dle kterého bylo postupováno i v ostatních návrzích s určitými úpravami (všechny výsledné hodnoty uvedeny v tabulkách v příslušných kapitolách). Vstupní hodnoty byly použity z tab. 20 a 21. Výsledné hodnoty výpočtů jsou uvedeny v tab. 22.

10.1.2 Výpočet nákladů za spotřebu materiálu - N_m

Tab. 24: Vstupní hodnoty pro výpočet nákladů za materiál

Předpokládaná hmotnost hlavní části [kg] – m_1	0,084
Předpokládaná hmotnost koncovky [kg] – m_2	0,007
Odhad hmotnosti vtokového systému [kg] – m_3	0,011
Bezpečnostní „polštář“ [kg] – $B_{10\%}$	10 %
Velikost výroby [ks] – z	300
Cena materiálu PA A3HG7 [Kč] – C_m	125

- Hmotnost bezpečnostního polštáře:

$$B_{10\%} = (m_1 + m_2 + m_3) \cdot 0,1 = (0,084 + 0,007 + 0,011) \cdot 0,1 = 0,0102 \text{ kg}$$

- Celková hmotnost spotřebovaného polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks – m_{300} :

$$m_{300} = (m_1 + m_2 + m_3 + B_{10\%}) \cdot z = (0,084 + 0,007 + 0,011 + 0,0102) \cdot 300 = \\ = 0,1122 \cdot 300 = 33,66 \text{ [kg]}$$

- Celková cena polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks – N_{m300} :

$$N_{m300} = m_{300} \cdot C_m = 36,66 \cdot 125 = \mathbf{4207,50 \text{ [Kč]}}$$

10.1.3 Výpočet výrobních nákladů - N_s

Tab. 25: Vstupní hodnoty pro výpočet výrobních nákladů

Výrobní náklady [Kč.hod ⁻¹] – N_1	800
Velikost výroby [ks] – z	300
Počet ks za hodinu [ks.hod ⁻¹] – x	24

- Celková cena výrobních nákladů při výrobě 300 ks - N_{s300} :

$$N_{s300} = \frac{z}{x} \cdot N_1 = \frac{300}{24} \cdot 800 = \mathbf{10000 \text{ [Kč]}}$$

10.1.4 Celkové náklady při výrobě 300 ks – N_c

- Celkové náklady při výrobě 300 ks – N_{c300} :

$$N_{c300} = N_{m300} + N_{s300} + N_f = 4207,50 + 10000 + 260000 = \mathbf{274207,50 \text{ [Kč]}}$$

10.1.5 Celkové náklady na jeden výrobek při výrobě 300 ks – N_{c1}

- Celkové náklady na jeden výrobek při výrobě 300 ks – N_{c1-300}

$$N_{c1-300} = \frac{N_{c300}}{z} = \frac{274207,50}{300} = \mathbf{914,025 [Kč]}$$

10.2 Jednokomponentní forma se dvěma dutinami – jádro taženo hydraulicky

V tomto případě se jedná o stejnou vstřikovací formu jako v kapitole 10.1 s tím rozdílem, že jádro již nebude vytahováno mechanicky, nýbrž hydraulicky. Tato skutečnost bude vyžadovat konstrukční řešení hydraulického tahače jádra, což prodraží konstrukci a výrobu formy.

Principy výpočtu nákladů jsou shodné s výpočtem v podkapitolách kapitoly 10.1. Rozdíly jsou pouze v době předpokládaného cyklu, který je navržen o 30 s kratší, což zlevní výrobní náklady, a v ceně formy, která je naopak vyšší.

Tab. 26: Náklady při využití jednokomponentní formy s hydraulicky taženým jádrem

z	50	100	300	500	1000	2000
N_m	701,25	1402,50	4207,50	7012,50	14025,00	28050,00
N_s	1333,33	2666,67	8000,00	13333,33	26666,67	53333,33
N_f	350000,00	350000,00	350000,00	350000,00	350000,00	350000,00
N_c	352034,58	354069,17	362207,50	370345,83	390691,67	431383,33
$N_{c \cdot z^{-1}}$	7040,69	3540,69	1207,36	740,69	390,69	215,69

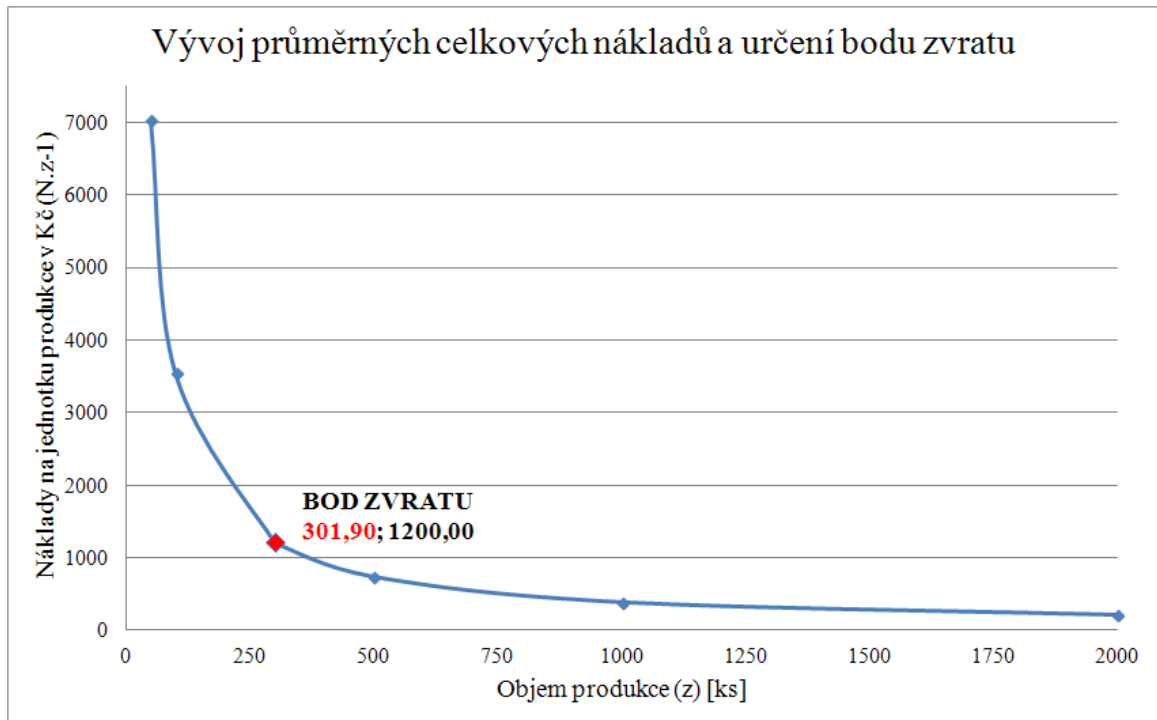
10.2.1 Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu

Výpočty PVN a bodů zvratu, neboli kritického bodu produkce jsou shodné s výpočtem v kapitole 10.1.1.

Tab. 27: Bod zvratu u varianty formy 2

	PA A3HG7
PVN [ks]	40,69
N_f [ks]	350000
Bod zvratu [ks]	302

U druhé varianty formy při využití polymeru PA A3HG7 nastává bod zvratu při hodnotě 301,90 ks, čili při výrobě 302 kusu se výroba dostává pod hodnotu 1200 Kč za jeden kus nástroje. Další vývoj ceny při určitém množství produkce ukazuje Tab. 26 a Obr. 70.



Obr. 70: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 2

10.3 Dvoukomponentní forma

Při předpokladu využití dvoukomponentní formy by se jednalo o vstřikování trnu s kostrou rukojeti z PA A3HG7 v první fázi, v druhé fázi by byl proveden nástřik materiálu TPU, jež by byl vnějším povrchem rukojeti.

Ve výpočtu je předpokládána minimální úspora materiálu PA A3HG7 alespoň 20 %, jenž by byl nahrazen materiálem TPU v místě rukojeti.

Principy výpočtu výrobních a celkových nákladů jsou shodné s výpočtem v podkapitolách kapitoly 10.1. Rozdíl je ve výpočtu materiálových nákladů, kde bylo nutné zohlednit využití materiálu TPU, a v ceně formy. Výpočet nákladů za spotřebu materiálu v této variantě je uveden níže v kapitole 10.3.1.

Tab. 28: Náklady při využití dvoukomponentní formy

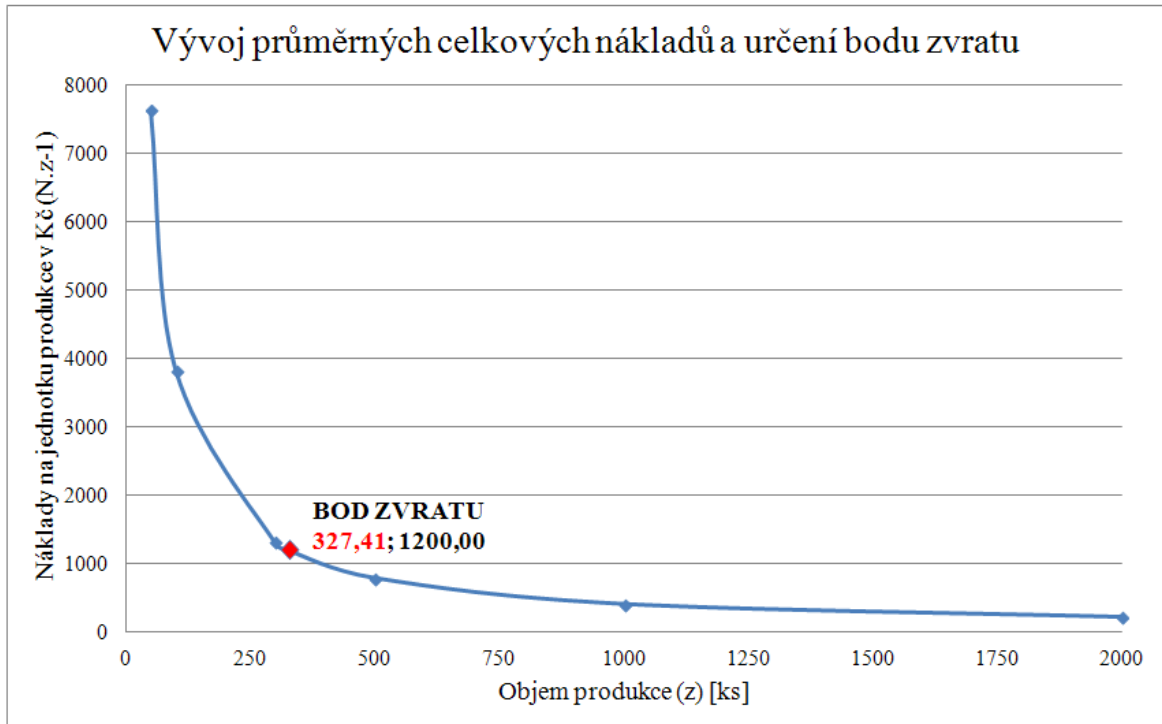
z	50	100	300	500	1000	2000
N_m	635,31	1270,61	3811,84	6353,07	12706,14	25412,28
N_s	1333,33	2666,67	8000,00	13333,33	26666,67	53333,33
N_f	380000,00	380000,00	380000,00	380000,00	380000,00	380000,00
N_c	381968,64	383937,28	391811,84	399686,40	419372,81	458745,62
$N_c \cdot z^{-1}$	7639,37	3839,37	1306,04	799,37	419,37	229,37

10.3.1 Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu

Tab. 29: Body zvratu u varianty formy 3

	PA A3HG7
PVN [ks]	39,37
N_f [ks]	380000
Bod zvratu [ks]	328

U třetí varianty formy při využití polymeru PA A3HG7 nastává bod zvratu při hodnotě 3027,40 ks, čili při výrobě 328 kusu se výroba dostává pod hodnotu 1200 Kč za jeden kus nástroje. Další vývoj ceny při určitém množství produkce ukazuje Tab. 28 a Obr. 71.



Obr. 71: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 3

10.3.2 Výpočet nákladů za spotřebu materiálu - N_m

Tab. 30: Vstupní hodnoty pro výpočet nákladů za materiál

Předpokládaná hmotnost hlavní části [kg] – m_1	0,084
Odhad hmotnosti vtokového systému [kg] – m_3	0,00765
Bezpečnostní „polštář“ [kg] – $B_{10\%}$	10 %
Velikost výroby [ks] – z	300
Cena polymeru PA A3HG7 [Kč] – C_m	125
Cena polymeru TPU [Kč] - C_{m2}	100
Hustota PA A3HG7 [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] – ρ_1	1,41
Hustota TPU [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] – ρ_2	1,20

- Množství spotřebovaného polymeru PA A3HG7 při výrobě trnu a kostry rukojeti – předpokládána minimální úspora materiálu 20%:

$$m_{1-20\%} = m_1 \cdot 0,8 = 0,084 \cdot 0,8 = 0,0672 \text{ [kg]}$$

- Množství spotřebovaného polymeru TPU při zástřiku rukojeti nástroje:

$$m_{TPU} = \frac{m_1 \cdot 0,2}{\rho_1} \cdot \rho_2 = \frac{0,084 \cdot 0,2}{1,41} \cdot 1,20 = 0,014298 \text{ [kg]}$$

- Celková hmotnost spotřebovaného polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks – m_{PA300} :

$$m_{PA300} = (m_{1-20\%} + m_3) \cdot B_{10\%} \cdot 300 = (0,0672 + 0,00765) \cdot 1,1 \cdot 300 = 24,7005 [kg]$$

- Celková hmotnost spotřebovaného polymeru TPU při výrobě 300 ks – m_{TPU300} :

$$m_{TPU300} = (m_{TPU} + m_3) \cdot B_{10\%} \cdot 300 = (0,014298 + 0,00765) \cdot 1,1 \cdot 300 = 7,2428 [kg]$$

- Celková cena polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks – N_{mPA300} :

$$N_{mPA300} = m_{PA300} \cdot C_m = 24,7005 \cdot 125 = 3087,56 [Kč]$$

- Celková cena polymeru TPU při výrobě 300 ks – $N_{mTPU300}$:

$$N_{mTPU300} = m_{TPU300} \cdot C_{m2} = 7,2428 \cdot 100 = 724,28 [Kč]$$

- Celková cena za spotřebu materiálu PA A3HG7 + TPU:

$$N_m = N_{mPA300} + N_{mTPU300} = 3087,56 + 724,28 = \mathbf{3811,84 [Kč]}$$

10.4 Jednokomponentní forma s jednou dutinou – technologie GIT

Forma s využitím technologie GIT využívá plyn pro tvorbu dutiny rukojeti. Nástroj tudíž bude vyroben kompletně z jedné části. Tato skutečnost sníží náklady na výrobu dutiny formy a vtokového, respektive rozvodného kanálu. Nicméně bude nutné konstrukčně vyřešit přívod plynu k rukojeti, což náklady na konstrukci formy opět zvýší.

Principy výpočtu materiálových, výrobních a celkových nákladů jsou shodné s výpočtem v podkapitolách kapitoly 10.1. Malý rozdíl je ve výpočtu materiálových nákladů, kde byl uvažován pouze hlavní vtokový systém (o hmotnosti 7,65 g), bez rozvodného, protože forma by měla pouze jednu dutinu.

Tab. 31: Náklady při využití jednokomponentní formy s technologií GIT

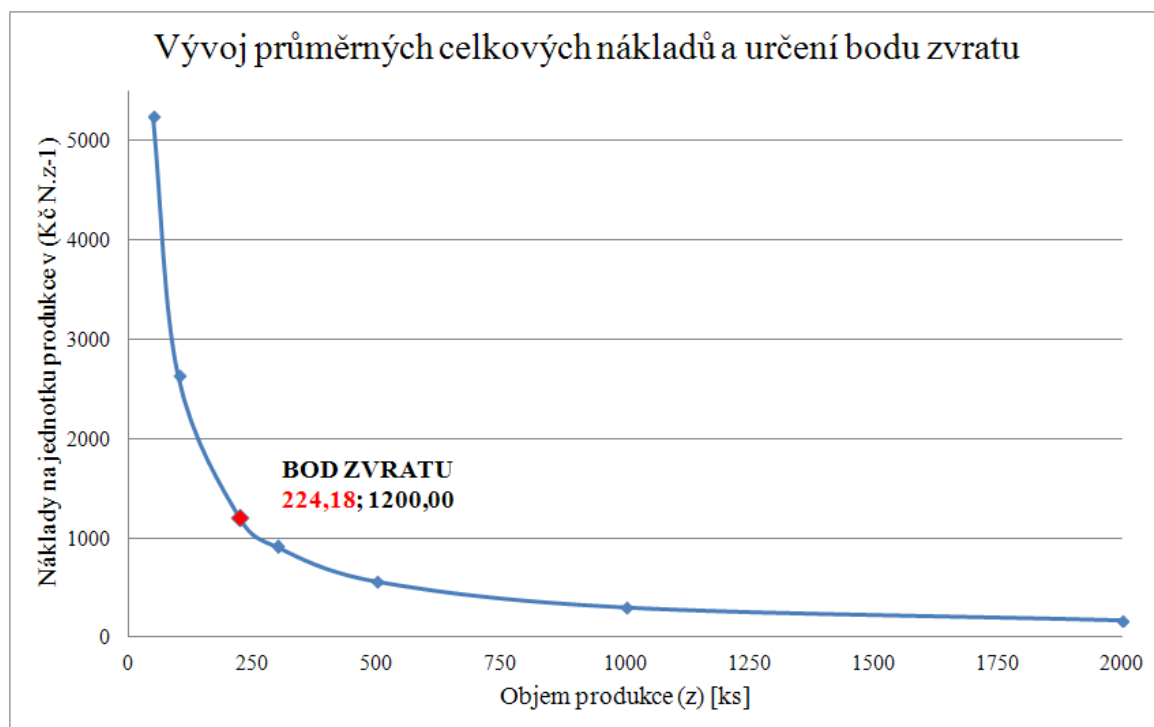
z	50	100	300	500	1000	2000
N_m	678,22	1356,44	4069,31	6782,19	13564,38	27128,75
N_s	1333,33	2666,67	8000,00	13333,33	26666,67	53333,33
N_f	260000,00	260000,00	260000,00	260000,00	260000,00	260000,00
N_c	262011,55	264023,10	272069,31	280115,52	300231,04	340462,08
$N_c \cdot z^{-1}$	5240,23	2640,23	906,90	560,23	300,23	170,23

10.4.1 Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu

Tab. 32: Bod zvratu u varianty formy 4

	PA A3HG7
PVN [ks]	40,23
N _f [ks]	260000
Bod zvratu [ks]	225

U čtvrté varianty formy při využití polymeru PA A3HG7 nastává bod zvratu při hodnotě 224,18 ks, čili při výrobě 225 kusu se výroba dostává pod hodnotu 1200 Kč za jeden kus nástroje. Další vývoj ceny při určitém množství produkce ukazuje Tab. 31 a Obr. 72.



Obr. 72: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 4

10.5 Jednokomponentní forma pro nástřík trnu + jednokomponentní forma pro nástřík rukojeti z TPU

Tato varianta výroby nástroje zahrnuje konstrukci dvou vstřikovacích forem, což bude i velmi finančně nákladné. Jedna forma by byla použita ke vstřikování trnu s kostrou rukojeti, na kterou by následně byl v druhé formě nástříknut materiál TPU, jako materiál ruko-

jeti. Ve výpočtu bylo nutné uvažovat dvě formy, jejich cena je odhadována na 260 000 Kč pro vstřikování trnu z PA A3HG7 a 200 000 Kč pro vstřikování rukojeti z TPU.

Materiálové náklady a jejich výpočty jsou shodné s variantou dvoukomponentní formy z kapitoly 10.3.

U výrobních nákladů je nutné uvažovat práci dvou strojů z důvodu využití dvou forem. Nicméně výrobní náklady jsou zde uvažovány stejné jako v předchozích variantách a to z toho důvodu, že u první formy se vstřikováním trnu by z důvodu změny tvaru rukojeti došlo k výraznému zkrácení času chlazení, odhadováno zkrácení vstřikovacího cyklu ze 120 s na 90 s. Zde tedy dochází ke snížení výrobních nákladů, nicméně po přičtení vstřikovacího cyklu druhé formy s nástřikem TPU (odhadován na 30 s), se výrobní náklady opět zvýší.

Tab. 33: Dvě jednokomponentní formy (nástřik trnu + nástřik rukojeti)

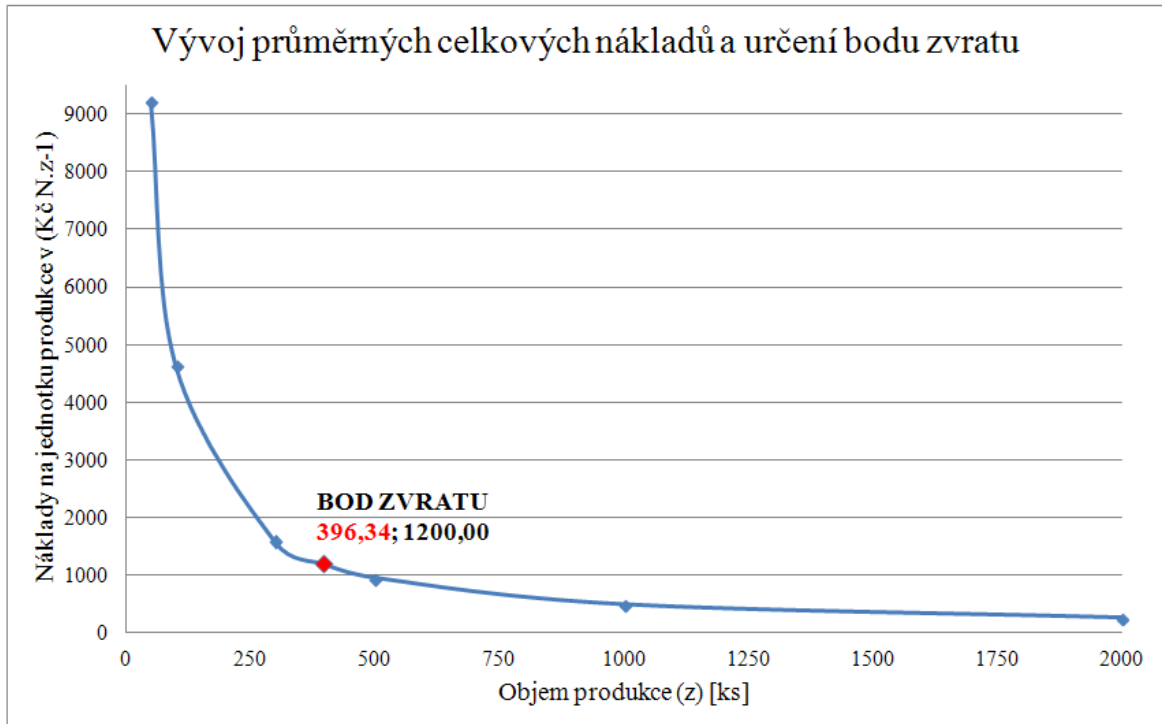
z	50	100	300	500	1000	2000
N_m	635,31	1270,61	3811,84	6353,07	12706,14	25412,28
N_s	1333,33	2666,67	8000,00	13333,33	26666,67	53333,33
N_f	460000,00	460000,00	460000,00	460000,00	460000,00	460000,00
N_c	461968,64	463937,28	471811,84	479686,40	499372,81	538745,62
$N_c \cdot z^{-1}$	9239,37	4639,37	1572,71	959,37	499,37	269,37

10.5.1 Vývoj celkových průměrných nákladů na jeden kus a analýza bodu zvratu

Tab. 34: Body zvratu u varianty formy 5

	PA A3HG7
PVN [ks]	39,37
N_f [ks]	460000
Bod zvratu [ks]	397

U páté varianty formy při využití polymeru PA A3HG7 nastává bod zvratu při hodnotě 396,34 ks, čili při výrobě 397 kusu se výroba dostává pod hodnotu 1200 Kč za jeden kus nástroje. Další vývoj ceny při určitém množství produkce ukazuje Tab. 33 a Obr. 73.



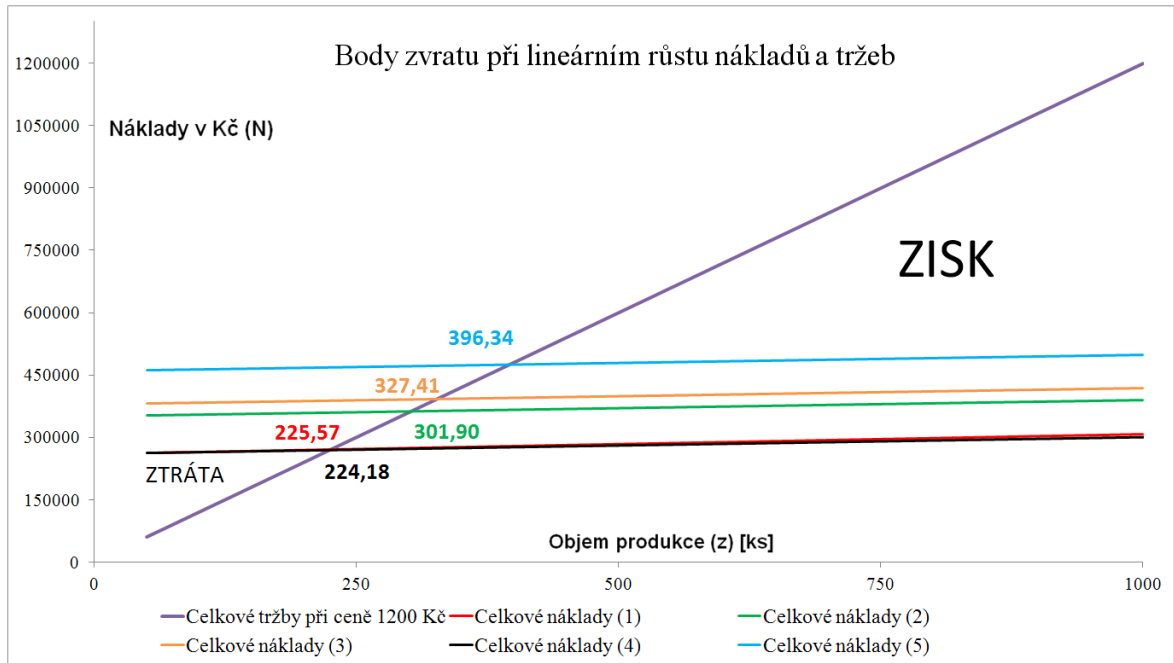
Obr. 73: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 5

10.6 Srovnání jednotlivých variant výroby

Následující graf (Obr. 74) zobrazuje předpoklady zisku nebo ztráty při jakémkoliv množství produkce. Jednotlivé varianty vstřikovacích forem jsou odlišeny barevně. Ve stejné barvě je následně zobrazen kritický bod produkce, respektive bod zvratu u dané varianty vstřikovací formy. Čísla v závorkách označují příslušnou variantu formy.

Nejziskovější by měly tedy být varianty forem 4 a 1, kde výroba nástroje začne být zisková od 225 ks, respektive 226 ks.

Nejnákladnější varianta je číslo 5. Tato skutečnost se dala předpokládat, jelikož jsou zde využity dvě vstřikovací formy, což zvýší náklady. Ziskovost formy by měla být od 397 kusů.



Obr. 74 Body zvratu při lineárním růstu nákladů a tržeb – PA A3HG7

ZÁVĚR

Diplomová práce řeší problematiku využití polymerů jako konstrukčních materiálů pro náhradu kovů a jiných materiálů při výrobě konkrétního montážního nástroje.

Zadavatelem byl zadán požadavek na řešení ergonomie rukojeti stávajícího nástroje, který je složen z ocelového trnu a dřevěné rukojeti. Nové řešení je navrhováno především ze zdravotních důvodů, kdy stávající tvar rukojeti nevyhovuje požadavkům předpisů na ergonomii a bezpečnost práce.

Bylo rozhodnuto, že nástroj bude řešen komplexně, a to jak s ohledem na ergonomii rukojeti, tak s ohledem na funkčnost nástroje. Cílem práce bylo posoudit realizovatelnost návrhu nástroje z pohledu zpracovatelského, konstrukčního, pevnostního a ekonomického. Jednotlivé kategorie byly posuzovány využitím virtuálních analýz a simulačních programů.

Z pohledu zpracovatelského a konstrukčního bylo dosaženo následujících závěrů:

Na základě výsledků analýz navržené konstrukce byl pro danou aplikaci vybrán polymer PA Ultramid A3HG7. Oproti druhému uvažovanému materiálu PPS je na českém trhu dostupnější, levnější, má lepší mechanické vlastnosti, nižší zpracovatelské teploty a tím i menší opotřebení formy.

Pro oba uvažované materiály byly provedeny analýzy vstřikovacího procesu zahrnující různé varianty umístění vtoku. Na základě výsledků těchto analýz bylo zvoleno nejvhodnější umístění vtoku. Výsledky jednotlivých analýz jsou diskutovány v předložené diplomové práci, kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze.

V práci byla dále diskutována konstrukce formy pro navržený nástroj zejména s ohledem na použitou technologii a předpokládaný počet vyráběných nástrojů. Vzhledem k tomu, že zadavatel předpokládá malou sérii výroby, tak jako nejvhodnější byl zvolen systém s ručním vyjímáním výrobků a jader. Diskutovány jsou i další možné technologie včetně technologie GIT a vícekomponentního vstřikování. Všechny diskutované varianty jsou v závěru práce využity pro ekonomickou analýzu.

Z pohledu mechanické odolnosti bylo dosaženo následujících závěrů:

Mechanická virtuální analýza nástroje byla provedena s ohledem na reálné využívání nástroje v praxi.

Z virtuální mechanické analýzy bylo zjištěno, že nástroj s polymerním trnem je možno zatěžovat maximálně silou 113 N, zatímco kovový nástroj stejné geometrie je schopen odolávat danému zatížení až do zatěžující síly 269 N.

V analýze byla následně testována i extrémní varianta se zatížením pouze špice trnu. Analýza ukázala odolnost do zatížení 65 N u špice z polymeru, respektive do zatížení 151 N u špice z oceli.

Mechanická analýza ukázala, že při identickém tvarovém řešení mají kovové nástroje více než dvojnásobnou únosnost než nástroje zhotovené z polymeru. S ohledem na striktní požadavek zadavatele na zachování stávajícího tvarového řešení nebyly další varianty tvarového řešení rozpracovány.

I přes skutečnost, že mechanické vlastnosti ocelového trnu jsou vyšší, tak se jeví mechanická odolnost 113 N trnu z polymeru pro danou aplikaci dostačující.

Z pohledu ekonomické náročnosti bylo dosaženo následujících závěrů:

Ekonomické hodnocení navrhovaného řešení pracovalo se všemi diskutovanými návrhy týkající se jak vlastního nástroje, vstřikovací formy tak použité technologie.

Z vypracovaného ekonomického zhodnocení všech variant je zřejmé, že vzhledem k předpokládané malosériové výrobě je nejvýraznějším nákladem pořízení formy. Ostatní variabilní náklady (související s provozem stroje + materiál) stoupají přímo úměrně s množstvím produkce.

Vzhledem ke skutečnosti, že náklady na výrobu 1 ks stávajícího ocelového trnu dosahují ceny 1200 Kč, byly v jednotlivých variantách určeny body zvratu. Tyto body zvratu udávají minimální množství produkce, které by bylo nutné při zvoleném řešení nástroje a technologii vyrobit, aby se konečná cena výrobku pohybovala pod cenou 1 ks ocelového nástroje.

Nejvýhodněji vycházejí varianty 1 (ručně tažené jádro) a 4 (technologie GIT), kdy cena za jeden kus klesá pod hodnotu 1200 Kč při objemu produkce 226, respektive 225 kusů. S množstvím rostoucí produkce se výrazně snižuje i cena za 1 kus a roste ziskovost projektu.

Vypracovaný návrh ukazuje, že i přes relativně vysoké náklady na zhotovení vstřikovací formy je použití polymerů vhodné i při malých sériích.

Výsledky řešení jsou podloženy realizovanými simulacemi, které potvrzují reálnost technologického řešení.

Výsledky zároveň ukazují, že je třeba s ohledem na rozdílné mechanické vlastnosti kovů a polymerů věnovat velkou pozornost analýze mechanického chování výrobků z polymerů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OSSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. 4th ed. Munich: Hanser Publishers, 2006, 902 s. ISBN 9781569903995.
- [2] DOMININGHAUS, Hans. *Plastic for Engineers: Materials, Properties, Applications*. Munich: Hanser Publishers, 1993. 785 s. ISBN 3-446-15723-9.
- [3] LENFELD, Petr. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. Technologie II.* [online]. [cit. 2012-11-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [4] Solvay Advanced Polymers – Company Profile. *GLOBALSPEC* [online]. 1999 – 2012 [cit.2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.globalspec.com/supplier/profile/SolvayAdvancedPolymers>
- [5] RYBNIKÁŘ, František. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965, 418 s.
- [6] SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů. 2., přepr. a dopl. vyd.* Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [7] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] Strojírenská technologie – 1. ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Strojírenství* [online]. 2005-2007 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
- [9] Tvrdost (mikrotvrdost) – významná mechanická vlastnost materiálů. *CHEMPOINT: Vědci pro průmysl a praxi* [online]. 2012 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost>
- [10] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu – 3 část. Speciální kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 118 s. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [11] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

- [12] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tváření plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [13] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003, 865 s. ISBN 8086490742.
- [15] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006, 185 s. ISBN 8070806001.
- [16] ČSN EN ISO 2039-1. *Plasty - stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtlačováním kuřičky*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [17] ČSN EN ISO 2039-2. *Plasty - stanovení tvrdosti – Část 2: Tvrdost dle Rockwella*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [18] ČSN 419083. *Ocel 19 083 uhlíková*. Praha: Český normalizační institut, 1967.
- [19] ČSN 419420. *Ocel 19 420 chromová*. Praha: Český normalizační institut, 1969.
- [20] ČSN 419830. *Ocel 19 830 rychlořezná*. Praha: Český normalizační institut, 1967.
- [21] ČSN 418510. *Slinutí karbid 18510 U1*. Praha: Český normalizační institut, 1991.
- [22] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta technologická. *Statické zkoušky krátkodobé*. 2009, 23 s. [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [23] ČSN EN ISO 868. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s
- [24] EPPM news: EPPM magazine Modern drop weight tester to its HIT instrument range. *EPPM* [online]. 2009 [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <http://www.eppm.com/x/guideArchiveArticle.html?gname=&id=33356>
- [25] Pevnost dřeva. MENDELOVA ZEMĚDĚLSKÁ A LESNICKÁ UNIVERZITA V BRNĚ. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva* [online]. 2004 [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=node/56>
- [26] KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. *Volny.cz* [online]. [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>

- [27] Kovová vlákna. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 2.1.2013 [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Kovov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [28] STUČHLÍK, Petr. *Polymery jako konstrukční materiály* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2013-02-02]. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/18081/stuchl%C3%ADk_2011_bp.pdf?sequence=1.
- [29] Product Information BASF Plastics AP: A3HG7 black 00564 polyamide. *BASF* [online]. 2001 - 2012 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://worldaccount.basf.com/wa/AP/Catalog/BASFPlastics/info/BASF/PRD/30043126>
- [30] Ticona FORTRON® 1140 E7 Polyphenylene Sulfide (PPS). *MatWeb: Material property data* [online]. 1996 - 2013 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=a19aa273f4e4400aa8aec59f315be5b&ckck=1>
- [31] FORTRON 1140E7 | PPS-GF40 | Ticona. *CAMPUS®: a material information system for the plastics industry* [online]. 2012 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/FORTRON+1140E7/Ticona/163/b5ee3bed>
- [32] BRHLÍK, David. *Evropské normy pro značení ocelí* [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-03-08]. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/928/EVROPSK%C3%89%20NORMY%20PRO%20ZNA%C4%8CEN%C3%8D%20OCEL%C3%8D.pdf?sequence=1>
- [33] Porovnání značení ocelí. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2005 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli>
- [34] Značky ocelí. *Metalmax s.r.o.: Váš dodavatel hutního materiálu* [online]. 2005 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.metalmax.cz/znacky.php>
- [35] LENFELD, Petr. Speciální způsoby vstřikování. *Technologie II.* [online]. [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/05.htm

- [36] LENFELD, Petr. Vstřikování plastů. *Technologie II*. [online]. [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [37] Laboratorní cvičení z předmětu Plastikářská technologie: Vstřikování. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: fakulta technologická* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://web.ft.utb.cz/cs/docs/Navod_DEMAG_OK.pdf
- [38] Ultramid®A3HG7: Product Information. *BASF: Product Locator* [online]. 1998 - 2007 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.plasticsportal.com/products/dspdf.php?type=iso¶m=Ultramid+A3HG7>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PS	Polystyrén
PVC	Polyvinylchlorid
PP	Polypropylén
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylén
LDPE	Nízko-hustotní polyetylén
PC	Polykarbonát
PPC	Polypropylén karbonát
COC	Cyklické olefinické kopolymery
PMMA	Polymethylmetakrylát
ABS	Akrylobutadienstyren
PEX	Sít'ovaný polyetylén
XLPE	Sít'ovaný polyetylén
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PBT	Polybutylentereftalát
PET	Polyetylentereftalát
POM	Polyoxymetylén
PA66	Polyamid66
PE-UHMW	Ultra vysoko-hustotní polyetylén
EPR	Etylén-propylenový elastomer
EPDM	Polyetylén-propylenový kaučuk
EVA	Etylén-vinyl-acetát
PPSU	Polyfenylsulfon
PEI	Polyéterimid
PESU	Polyétersulfon

PSU	Polysulfon
PFA	Perfluoralkoxyalkan kopolymer
MFA	Tetrafluoroetylén a perfluorometylvinyléter kopolymer
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PTFE	Polytetrafluoretylén
ECTFE	Etylén chlorotrifluoroetylén
LCP	Polymer s tekutými krystaly
PARA	Polyaril amid
PPA	Polyamid s vysokou teplotní odolností
PPS	Polyfenylénsulfid
FKM	Fluorový elastomer
PI	Polyimid
TPI	Termoplastický polyimid
PAI	Polyamidimid
PEEK	Polyéteréterketon
PFRE	Perfluórpolyéter
FFKM	Perfluórelastomer
TPU	Termoplastický polyuretan
T_m	Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Teplota viskózního toku [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	Teplota zesklnění [$^{\circ}\text{C}$]
V	Objem [m^3]
α	Součinitel teplotní roztažnosti [K^{-1}]
C_p	Měrná tepelná kapacita [$\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
λ	Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
InG	Smykový modul [Pa]

R _m , σ	Pevnost v tahu [Pa]
E	Mez pružnosti σ_E , Youngův modul [Pa]
R _{m_s}	Specifická pevnost v tahu [-]
E _s	Specifický modul pružnosti [-]
C	Uhlík
Mn	Mangan
Si	Křemík
Cr	Chróm
Al	Hliník
Ni	Nikl
V	Vanad
Mo	Molybden
O	Kyslík
Cu	Měď
Zn	Zinek
Mg	Hořčík
Fe	Železo
Cl	Chlor
H	Vodík
Sn	Cín
Nb	Niob
Ti	Titan
Zr	Zirkon
W	Wolfram
SK	Slinuté karbidy
A	Tažnost [%]

KV	Nárazová práce
ρ	Objemová hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Δh	Rozdíl tloušťek [mm]
σ	Napětí [Pa]
F	Síla [N]
S	Počáteční průřez [mm^2]
ε	Poměrné prodloužení [-] nebo [%]
L_0	Počáteční délka tělesa [mm]
ΔL_0	Zvětšení zkušebního tělesa [mm]
U	Mez úměrnosti σ_U [Pa]
K	Mez kluzu σ_K [Pa]
P	Pevnost v tahu σ_{Pt} [Pa]
S	Napětí při přetržení [Pa]
k	Součinitel úměrnosti [-]
R_U	Mez úměrnosti [Pa]
R_E	Mez pružnosti [Pa]
R_K	Mez kluzu [Pa]
R_M	Mez pevnosti v tahu [Pa]
M_0	Ohybový moment [Nm]
I	Moment setrvačnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
h	Tloušťka, výška, hloubka [mm]
W	Modul průřezu [m^3]
σ_0	Maximální napětí [Pa]
$R_{1,2}$	Poloměry [mm]
l	Délka [mm]
L	Rozpětí mezi podporami u zkoušky ohybem [m]

b	Šířka [mm]
σ_y	Napětí v ohybu [Pa]
E_y	modul pružnosti [Pa]
y	prohnutí [mm]
HB	tvrdost vtlačení kuličky, tvrdost dle Brinella [$N \cdot mm^2$]
F_r	redukované zatížení [N]
S	plocha vytlačeného důlku [mm^2]
D	průměr kuličky [mm]
h_r	hloubka vtisku [mm]
F_m	zatížení působící na měřící kuličku [N]
HV	Tvrdost dle Vickerse [MPa]
u	Úhlopříčka [mm]
HR	Tvrdost dle Rockwella
e	Hloubka vtlačení u HR
HK	Tvrdost dle Knoopu [$N \cdot mm^2$]
IRHD	International Rubber Hardness Degrees
H_A	Hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu A
H_D	Hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D
TB	Tvrdost dle Barcola
E_p	Potencionální energie [J]
E_k	Kinetická energie [J]
M	Hmotnost [g]
g	Gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
G	Hmotnost kladiva [kg]
$A_{n,\varepsilon}$	Rázová houževnatost [$kJ \cdot m^{-2}$]
A_k	Vrubová houževnatost [$kJ \cdot m^{-2}$]

K_v	Vrubový koeficient [-]
W	Deformační energie [kJ]
W_0	Hodnota volného kyvu ze stejné výchozí výšky [kJ]
W_z	Hodnota odečtená při volném kyvu a odmrštění části přeraženého zkušební- ho tělesa [kJ]
v	Okamžitá rychlost pádu pádového tělesa [$m \cdot s^{-1}$]
G_{50}	Hmotnost 50% porušení [kg]
G_{100}	Nejmenší hmotnost, při které prasknou všechny vzorky [kg]
ΔG	Hmotnost přídavných závaží [kg]
S	Součet procentuálních hodnot všech jednotlivých zkoušek
W_ε	Korigovaná rázová práce [kJ]
W_k	Ztráty třením a kyvem [kJ]
c	Rázový korekční faktor daný konstrukcí kyvadla [-]
TD	Trvalá deformace [%]
ASMS	Autodesk Simulation Moldflow Synergy
PA-GF35	Polyamid plněn 35 % skelných vláken
PPS-GF40	Polyfenylén sulfid plněn 40 % skelných vláken
m	Hmotnost [g]
V	Objem [m^3]
GIT	Vstřikování pomocí plynu
σ_R	Napětí při přetržení [MPa]
σ_{vM}	Von Misesovo napětí [$N \cdot m^{-2}$]
F_{max}	Zatížení, při kterém dojde k pravděpodobnému porušení struktury [N]
t	Doba cyklu [s]
x	Počet kusů vyrobených za hodinu [$ks \cdot hod^{-1}$]
z	Objem produkce [ks]

N_m	Náklady za spotřebu materiálu [Kč]
N_s	Výrobní náklady (amortizaci stroje, odpisy, energie a mzdu obsluhy) [Kč]
N_f	Náklady na pořízení formy [Kč]
N_c	Celkové náklady [Kč]
$N_{c \cdot z^{-1}}$	Průměrné náklady na 1 výrobek při produkci z [Kč]
N_{cx}	Celkové náklady při využití radiačně síťovaného polymeru [Kč]
PVN	Průměrné variabilní náklady [Kč]
PVN_x	Průměrné variabilní náklady pro radiačně síťovaný polymer [Kč]
z_k	Kritické množství produkce, bod zvratu [ks]
z_{kx}	Kritické množství produkce, bod zvratu pro radiačně síťovaný polymer [ks]
m_1	Předpokládaná hmotnost hlavní části [kg]
m_2	Předpokládaná hmotnost koncovky [kg]
m_3	Odhad hmotnosti vtokového systému [kg]
$B_{10\%}$	Bezpečnostní „polštář“ [kg]
C_m	Cena materiálu PA A3HG7 [Kč]
C_{mx}	Cena materiálu PA A3 HG7X – radiačně síťovaný [Kč]
m_{300}	Celková hmotnost polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks [kg]
N_{m300}	Celková cena polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks [Kč]
N_{mx300}	Celková cena polymeru PA A3HG7X při výrobě 300 ks [Kč]
N_1	Výrobní náklady [Kč.hod ⁻¹]
N_{s300}	Celková cena výrobních nákladů při výrobě 300 ks [Kč]
N_{c300}	Celkové náklady při výrobě 300 ks [Kč]
N_{cx300}	Celkové náklady při výrobě 300 ks – využití PA A3HG7X [Kč]
N_{c1-300}	Celkové náklady na jeden výrobek při výrobě 300 ks [Kč]
$N_{cx1-300}$	Celkové náklady na jeden výrobek při výrobě 300 ks – PA A3HG7X [Kč]

C_{m2}	Cena polymeru TPU [Kč]
ρ_1	Hustota PA A3HG7 [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
ρ_2	Hustota TPU [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
$m_{1-20\%}$	Množství spotřebovaného polymeru PA A3HG7 při výrobě trnu a kostry rukojeti [kg]
m_{TPU}	Množství spotřebovaného polymeru TPU při zástřiku rukojeti nástroje [kg]
$m_{\text{TPU}300}$	Celková hmotnost spotřebovaného polymeru TPU při výrobě 300 ks [kg]
$N_{\text{mPA}300}$	Celková cena polymeru PA A3HG7 při výrobě 300 ks [Kč]
$N_{\text{mTPU}300}$	Celková cena polymeru TPU při výrobě 300 ks [Kč]
$N_{\text{mPAX}300}$	Celková cena polymeru PA A3HG7X při výrobě 300 ks [Kč]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Základní zařazení polymerních materiálů ve vědě [1]</i>	14
<i>Obr. 2: Rozdělení polymerů dle aplikace [4]</i>	15
<i>Obr. 3: Nadmolekulární struktura polymerů – a) amorfní termoplast, b) semikrystalický termoplast, c) reaktoplast, d) elastomer [2]</i>	17
<i>Obr. 4: Schéma chování amorfního, krystalického a semikrystalického polymeru [1]</i>	19
<i>Obr. 5: Srovnání materiálů používaných na plniva ve formě vláken s využitím specifické pevnosti v tahu [25, 26, 27]</i>	22
<i>Obr. 6: Srovnání materiálů používaných na plniva ve formě vláken s využitím specifického modulu pružnosti [25, 26, 27]</i>	22
<i>Obr. 7: Vliv různých plniv na vlastnosti polymerní matrici [1]</i>	23
<i>Obr. 8: Porovnání specifické pevnosti v tahu jednotlivých skupin polymerů s kovovými materiály [28]</i>	35
<i>Obr. 9: Normalizované rozměry pro zkušební těleso pro tahovou zkoušku plastů [12]</i>	37
<i>Obr. 10: Průřez vstříkovaného zkušebního tělesa s propadlinami a úkosem (zvětšeno) [11] – platnost i pro ohybovou zkoušku</i>	38
<i>Obr. 11: Typy pracovních diagramů polymerních materiálů [22]</i>	40
<i>Obr. 12: Smluvní pracovní diagram tahové zkoušky [5]</i>	41
<i>Obr. 13: Tříbodový a čtyřbodový systém ohybové zkoušky a jeho rozložení průřezového modulu a ohybového momentu [6]</i>	44
<i>Obr. 14: Poloha zkušebního tělesa na začátku zkoušky [13]</i>	45
<i>Obr. 15: Princip měření tvrdosti kuličkou dle Brinella [6]</i>	49
<i>Obr. 16: Princip měření jehlanem dle Vickerse [9]</i>	51
<i>Obr. 17: Schematické zobrazení zkušebního hrotu typu Shore A (vlevo) a typu shore D (vpravo) [23]</i>	54
<i>Obr. 18: Schéma Charpyho kladiva [8]</i>	56
<i>Obr. 19: Typy vrubů zkušebních těles pro vrubovou houževnatost [6]</i>	58
<i>Obr. 20: Schéma zařízení pro metodu Izod [1]</i>	60
<i>Obr. 21: Schematický náčrt metody Izod [1]</i>	60
<i>Obr. 22: Moderní pádový stroj [24]</i>	62
<i>Obr. 23: časový průběh vstříkovacího cyklu [37]</i>	65
<i>Obr. 24: Metoda krátkého vstříku – dofukovací způsob</i>	68

<i>Obr. 25: Metoda dlouhého vstřiku – a) se zpětným odtokem taveniny zpět před čelo šneku, b) s vedlejší pomocnou dutinou</i>	68
<i>Obr. 26: Dvoukomponentní vstřikování s rotací poloviny formy kolem vodorovné osy [35]</i>	69
<i>Obr. 27: Současné řešení montážního nástroje – čelní pohled</i>	73
<i>Obr. 28: Současné řešení montážního nástroje – boční pohled</i>	73
<i>Obr. 29: Návrh modelu nástroje</i>	74
<i>Obr. 30: Návrh modelu nástroje – přední pohled</i>	75
<i>Obr. 31: Návrh modelu nástroje – řez bez koncovky</i>	75
<i>Obr. 32: Hlavní část nástroje – rukojeť dutá</i>	76
<i>Obr. 33: Navržená koncovka rukojeti</i>	76
<i>Obr. 34: Základní rozměry modelu</i>	77
<i>Obr. 35: Model s vytvořenou sítí (a – model bez sítě, b – model s 3D sítí)</i>	82
<i>Obr. 36: Umístění vtokového ústí (Gaiting suitability)</i>	84
<i>Obr. 37: Uvažovaná vtoková ústí</i>	86
<i>Obr. 38: Deformace výrobku po vstřikování (zobrazení v měřítku 20:1)</i>	87
<i>Obr. 39: Plnění dutiny formy PA – GF35</i>	88
<i>Obr. 40: Vznik studených spojů</i>	89
<i>Obr. 41: Tendence k tvorbě propadlin PA – GF35</i>	89
<i>Obr. 42: Průběh tlaku v místě vstřiku PA – GF35</i>	90
<i>Obr. 43: Průběh tlaku v místě vstřiku PPS – GF40</i>	91
<i>Obr. 44: Rozmezí teplot ihned po vstřikování v čase 2,053 s - trn</i>	92
<i>Obr. 45: Rozmezí teplot v polovině cyklu v čase 34,48 s - trn</i>	92
<i>Obr. 46: Rozmezí teplot na konci cyklu v čase vyhození 77,05 s - trn</i>	93
<i>Obr. 47: Rozmezí teplot ihned po vstřikování v čase 2,053 s - rukojeť</i>	94
<i>Obr. 48: Rozmezí teplot v polovině cyklu v čase 34,48 s - rukojeť</i>	94
<i>Obr. 49: Rozmezí teplot na konci cyklu v čase vyhození 77,05 s – rukojeť</i>	95
<i>Obr. 50: Rozmezí teplot ihned po vstřikování v čase 2,053 s – řez rukojetí</i>	96
<i>Obr. 51: Rozmezí teplot v polovině cyklu v čase 34,48 s – řez rukojetí</i>	96
<i>Obr. 52: Rozmezí teplot na konci cyklu vstřikování v čase vyhození 77,05 s – řez rukojetí</i>	97
<i>Obr. 53: Čas chlazení potřebný k ochlazení na vyhazovací teplotu – řez trn PA – GF35</i>	98

<i>Obr. 54: Čas potřebný k ochlazení na vyhazovací teplotu – řez rukojet PA – GF35</i>	98
<i>Obr. 55 Čas potřebný k ochlazení na vyhazovací teplotu – řez příčný v polovině rukojeti – detail – PA – GF35</i>	99
<i>Obr. 56: Průběh uzavírací síly vstřikovacího stroje – PA – GF35</i>	100
<i>Obr. 57: Průběh uzavírací síly vstřikovacího stroje – PPS – GF40</i>	100
<i>Obr. 58: Celková deformace vstřikovaného výrobku – PA – GF35</i>	101
<i>Obr. 59: Celková deformace vstřikovaného výrobku – PPS – GF40</i>	102
<i>Obr. 60: Pevné a částečné uchycení poloviny trnu</i>	106
<i>Obr. 61: Směr a zvolené zatížení rukojeti</i>	107
<i>Obr. 62: von Misesovo napětí při zatížení 1N – pevné uchycení poloviny trnu</i>	108
<i>Obr. 63: von Misesovo napětí při zatížení 1N – částečné uchycení poloviny trnu</i>	109
<i>Obr. 64: von Misesovo napětí při zatížení 1N – ocelový trn</i>	110
<i>Obr. 65: Detail uchycení špice trnu</i>	111
<i>Obr. 66: Von Misesovo napětí při zatížení 1N</i>	112
<i>Obr. 67: Von Misesovo napětí při zatížení 1N - detail</i>	112
<i>Obr. 68: von Misesovo napětí při zatížení 1N – ocelová špice trnu</i>	113
<i>Obr. 69: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 1</i>	119
<i>Obr. 70: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 2</i>	122
<i>Obr. 71: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 3</i>	124
<i>Obr. 72: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 4</i>	126
<i>Obr. 73: Vývoj průměrných celkových nákladů v Kč za 1 ks u varianty 5</i>	128
<i>Obr. 74 Body zvratu při lineárním růstu nákladů a tržeb – PA A3HG7</i>	129

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Srovnání hustoty, pevnosti v tahu, modulu pružnosti specifických vlastností vybraných plniv (vláken) [25, 26, 27]</i>	21
<i>Tab. 2: Označení ocelí dle EN 1027-1[32]</i>	28
<i>Tab. 3: Označení ocelí dle EN 1027-1 – doplňující údaje [32]</i>	28
<i>Tab. 4: Základní vlastnosti vybraných ocelí [10, 14, 18, 19, 20, 21, 33, 34]</i>	29
<i>Tab. 5: Vlastnosti hliníku [15]</i>	30
<i>Tab. 6: Pevnost v tahu a použití pro základní slitiny hliníku ke tváření [10, 14]</i>	30
<i>Tab. 7: Pevnost v tahu a použití pro základní slitiny titanu [10, 14]</i>	32
<i>Tab. 8: Porovnání specifické pevnosti v tahu jednotlivých skupin polymerů s kovovými materiály [28]</i>	34
<i>Tab. 9: Rozměry zkušebních těles dle normy ČSN EN ISO 527-2 [12]</i>	37
<i>Tab. 10: Orientační hodnoty pevnosti v tahu pro vybrané materiály [6]</i>	46
<i>Tab. 11: Hodnoty přidavných zatížení, předběžného zatížení a průměrů měřicí kuličky [17]</i>	52
<i>Tab. 12: Orientační hodnoty rázové a vrubové houževnatosti pro vybrané materiály [6]</i>	58
<i>Tab. 13: Parametry pro GIT vstřikování [35]</i>	67
<i>Tab. 14: Vlastnosti polymeru PA Ultramid A3HG7 (plněn 35% skelných vláken) [29, 38]</i>	79
<i>Tab. 15: Vlastnosti polymeru PPS Fortron 1140E7 (plněn 40% skelných vláken) [30, 31]</i>	80
<i>Tab. 16: Nastavené procesní podmínky</i>	82
<i>Tab. 17: Hmotnostní a objemové údaje vstřikované části</i>	103
<i>Tab. 18: Nastavení testovacích podmínek mechanické analýzy</i>	106
<i>Tab. 19: Předpokládaná odolnost trnu nástroje F_{max}</i>	114
<i>Tab. 20: Vstupní parametry pro ekonomické zhodnocení</i>	116
<i>Tab. 21: Doba cyklu pro jednotlivé formy</i>	117
<i>Tab. 22: Náklady při využití jednokomponentní formy s mechanicky vkládaným jádrem</i>	118
<i>Tab. 23: Bod zvratu u varianty formy 1</i>	118
<i>Tab. 24: Vstupní hodnoty pro výpočet nákladů za materiál</i>	120
<i>Tab. 25: Vstupní hodnoty pro výpočet výrobních nákladů</i>	120

<i>Tab. 26: Náklady při využití jednokomponentní formy s hydraulicky taženým jádrem.....</i>	121
<i>Tab. 27: Bod zvratu u varianty formy 2.....</i>	121
<i>Tab. 28: Náklady při využití dvoukomponentní formy.....</i>	123
<i>Tab. 29: Body zvratu u varianty formy 3.....</i>	123
<i>Tab. 30: Vstupní hodnoty pro výpočet nákladů za materiál.....</i>	124
<i>Tab. 31: Náklady při využití jednokomponentní formy s technologií GIT.....</i>	125
<i>Tab. 32: Bod zvratu u varianty formy 4.....</i>	126
<i>Tab. 33: Dvě jednokomponentní formy (nástřík trnu + nástřík rukojeti).....</i>	127
<i>Tab. 34: Body zvratu u varianty formy 5.....</i>	127

SEZNAM PŘÍLOH

- PI. CD1
- návrh nástroje Catia
 - analýza procesu vstřikování PA a PPS Moldflow
 - soubory pro výrobu prototypu
 - mechanická analýza FEM Catia
 - analýza trnu – ocel a PA A3HG7
- PII. CD2
- mechanická analýza FEM Catia
 - analýza špice trnu – ocel a PA A3HG7