

Návrh a výroba plastového madla

Bc. Pavel Tajzler

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Pavel Tajzler
Osobní číslo:	T22352
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Návrh a výroba plastového madla

Zásady pro vypracování

- Provedte literární rešerši se zaměřením na technologie pro zpracování plastů a zásady pro návrh plastových dílů.
- Provedte návrh madla a systém jeho uchycení dle zadaných parametrů.
- Návrhy uchycení ověřte za využití simulačních softwarů.
- Provedte zhodnocení provedených návrhů.

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

Seznam doporučené literatury:

BRYCE, M. DOUGLAS. Plastic injection molding. Dearborn, Michigan: Society of manufacturing engineers, 1996. ISBN: 0-87263-472-8.

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.

RAO, Natti S. a Günter SCHUMACHER. Design formulas for plastics engineers. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2004, ix, 167 s. ISBN 1569903700. Dostupné také z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDFPEE007/design-formulas-plastics>

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje problematice vstřikování a výrobě plastového dílu. Teoretická část se zabývá technologií vstřikování, polymerními materiály a zásadami pro konstrukci plastových dílů.

Praktická část je zaměřena na konstrukci a výrobu sestavy transparentního zacvakávacího madla. Její součástí je vyhotovení 3D modelů, provedení mechanických simulací a analýzy vstřikovacího procesu, prototypování a testování sestavy. Výstupem práce je vyhotovení výrobních výkresů, technologického postupu montáže a zhodnocení finálního funkčního kompletu.

Klíčová slova: vstřikování, polymery, analýza, konstrukce

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the issue of injection molding and production of a plastic part. The theoretical part deals with injection molding technologies, polymer materials and principles for the construction of plastic parts.

The practical part deals with the design and production of transparent snap-on handle assemblies. Part of the experiment is the creation of 3D models, the results of mechanical simulations, moldflow analysis, prototyping and assembly testing. The output of the work is the preparation of production drawings, the technological assembly procedure and the evaluation of the final functional set.

Keywords: injection molding, polymers, analysis, design

Za skvělé vedení diplomové práce bych rád poděkoval vedoucímu panu Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D, který mi byl vždy nápomocný při řešení problémů, ať už dobře míněnou radou či správným tipem, které vedly až k úspěšnému vyhotovení závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval celé rodině za podporu a trpělivost během studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	12
1.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	12
1.1.1 Procesní parametry	14
1.1.2 Plnění formy.....	14
1.1.3 Dotlak.....	15
1.1.4 Chlazení.....	15
1.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	16
1.2.1 Vstřikovací jednotka	17
1.2.2 Uzavírací jednotka	18
1.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	19
1.3.1 Konstrukce formy.....	19
1.3.2 Materiál formy	21
1.3.3 Vtokový systém.....	21
1.3.4 Temperační systém.....	22
1.3.5 Vyhazovací systém.....	22
2 POLYMERNÍ MATERIÁLY	23
2.1 DĚLENÍ POLYMERŮ.....	23
2.1.1 Termoplasty.....	23
2.1.2 Reaktoplasty	25
2.1.3 Termoplastické elastomery	25
2.1.4 Elastomery.....	25
2.2 PŘÍPRAVA MATERIÁLU	25
2.2.1 Sušení	26
2.2.2 Úprava polymerů.....	26
2.3 KONSTRUKČNÍ TRANSPARENTNÍ POLYMERY.....	27
2.3.1 Polymethylmethakrylát (PMMA)	27
2.3.2 Polykarbonát (PC).....	28
3 KONSTRUKCE VÝROBKU	29
3.1 KONSTRUKCE NOVÉHO VÝROBKU	29
3.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ TVARU VÝROBKU.....	30
3.3 JAKOST VÝROBKU	30
3.4 KONSTRUKČNÍ ZÁSADY	31
3.4.1 Dělicí rovina.....	31
3.4.2 Pozice vtoku	32
3.4.3 Pozice studeného spoje	33
3.4.4 Tloušťka stěn.....	33
3.4.5 Žebra	34

3.4.6	Ostré hrany	35
3.4.7	Úkosy	36
3.5	VYUŽITÍ SIMULAČNÍCH SOFTWARE	37
3.5.1	Ansys Mechanical Enterprise 2023	37
3.5.2	Autodesk Moldflow	38
3.6	PROTOTYPOVÁNÍ.....	40
3.6.1	3D tisk metodou FDM	41
3.6.2	3D tisk metodou SLS	41
3.6.3	3D tisk metodou SLA.....	42
3.6.4	3D tisk metodou SAF.....	43
3.6.5	Vakuové lití.....	43
3.7	LEPENÍ PLASTOVÝCH DÍLŮ	44
3.7.1	Zásady lepení	45
3.7.2	Primer.....	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	46
4	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	47
5	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU.....	48
6	POPIS A FUNKCE VÝROBKU	50
6.1	SESTAVA MADLA.....	50
6.2	POŽADOVANÉ VLASTNOSTI DÍLŮ A SESTAVY	51
6.2.1	Transparentnost a povrchová úprava.....	51
6.2.2	Velikost madla a ergonomické požadavky	52
6.2.3	Požadované síly a varianty zácvaku.....	54
6.2.4	Lepený spoj	55
6.2.5	Úspora místa při transportu	56
6.2.6	Jednoduchá montáž	57
6.3	VOLBA MATERIÁLŮ	57
6.3.1	Madlo	57
6.3.2	Podložka.....	58
6.3.3	Transparentní oboustranná lepící páska + primer	58
6.4	VYHOTOVENÍ 3D MODELŮ	59
6.5	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	60
7	MECHANICKÉ SIMULACE	62
7.1	NASTAVENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU	63
7.1.1	Materiálové vlastnosti	63
7.1.2	Vazby	63
7.1.3	Okrajové podmínky.....	65
7.2	VÝSLEDKY MECHANICKÝCH SIMULACÍ A KOREKCE.....	65
7.2.1	Nacvaknutí madla přes dlouhý zácvak.....	66
7.2.2	Nacvaknutí madla přes krátké zácvaky	68
7.2.3	Vycvaknutí madla přes dlouhý zácvak	70

7.2.4	Vycvaknutí madla přes krátké zácvaky.....	72
8	PROTOTYPOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ.....	75
8.1	PROTOTYPOVÁNÍ.....	75
8.1.1	Laserové řezání + frézování.....	75
8.1.2	3D tisk – metoda FDM, SLS, SAF.....	76
8.1.3	Vakuové lití.....	77
8.1.4	Prototypová forma.....	79
8.2	TESTOVÁNÍ.....	80
8.2.1	Pevnost lepeného spoje.....	81
8.2.2	Testování zácvaku a výcvaku madla.....	82
8.2.3	Testování na Charpyho kladivu.....	83
8.2.4	Tahová zkouška.....	83
9	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU.....	85
9.1	VÝSLEDKY MECHANICKÝCH SIMULACÍ A KOREKCE.....	85
9.2	CENA VÝROBNÍHO KOMPLETU.....	86
	ZÁVĚR.....	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	96
	SEZNAM TABULEK.....	99
	SEZNAM PŘÍLOH.....	100

ÚVOD

Plastové výrobky se v současné době těší obrovské oblibě. Důvodů k jejich stále stoupající oblíbenosti je hned několik. Pomocí technologie vstřikování lze rychle, efektivně a levně vyrábět díly, které mohou disponovat mnoha různými vlastnostmi. Ať už jde o mechanickou či chemickou odolnost, pevnost, pružnost, anebo vzhledové vlastnosti jako jsou transparentnost či takřka nekonečná škála barevných odstínů. Díly mohou být hladké, hrubé, lesklé. Trh v současnosti nabízí v podstatě neomezené možnosti výroby plastových výstřiků od jednoduchých až po velmi složité a geometricky přesné. Plasty jsou navíc vhodné takřka do každého průmyslu, ať už se jedná o automobilový, elektronický, zdravotnický či letecký, kde nahrazují tradiční materiály.

Omezení při výrobě dílů vstřikováním spočívá pouze ve způsobu odformování a velikosti výstřiku. Na výrobu plastových dílů jsou kladeny velké nároky především z hlediska ceny a rychlosti uvedení na trh. Aby se docílilo co největší efektivity používají se simulační programy, které umí predikovat jak chování polymeru při vstřikování ve formě, po vyhození z formy, tak i chování hotového dílu při zatížení, čímž se dostáváme k tématu této práce.

Diplomová práce se dělí na dvě části – teoretickou a praktickou. Teoretická část je rozdělena na tři kapitoly. První se zabývá technologií vstřikování, vstřikovacím stroji a formami. Druhá část rozebírá polymerní materiály, jejich dělení a přípravu před zpracováním. Poslední kapitola je pak zaměřena na konstrukční zásady při navrhování dílu za pomoci simulačních softwarů.

Praktická část se zabývá návrhem, konstrukcí a výrobou sestavy transparentního zacvakávacího plastového madla a podložky. Součástí práce je vyhotovení 3D modelů, výsledky mechanických simulací plastových dílů, analýza vstřikovacího procesu, prototypování a testování sestavy. Nedílnou součástí experimentu jsou korekční smyčky, které bylo potřeba provést při hledání optimálního tvaru funkčního zácvaků madla. Posledním bodem je vyhotovení finálního funkčního kompletu.

V závěru jsou zhodnoceny poznatky z jednotlivých částí diplomové práce a porovnány s hodnotami softwarových simulací. Výstupem práce jsou výkresy dílů a technologický postup montáže.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování se řadí mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější technologii v oblasti zpracování polymerních materiálů. Principem je tváření plastů to požadovaného tvaru za použití vhodně zvoleného polotovaru, který je většinou dodáván ve formě granulátu. Vstupní materiál musí být obvykle vysušen a následně je taven v plastikační jednotce. Po roztavení je tekutý plast pod vysokým tlakem vstříknut do dutiny formy. Předehřátá forma udává výstřiku požadovaný tvar a po dosažení vyhazovací teploty je z formy vyhozen. Posledním krokem je dochlazení v okolním prostředí [1].

V posledních letech je zřejmý stále se zvyšující trend využití této operace, a to především v automobilovém a elektronickém průmyslu či ve stavebnictví. Mezi základní důvody, proč se řadí vstřikování mezi stále populárnější metody, patří zejména možnost nahrazení standartních materiálů za trvanlivější, lehčí a levnější. Vstřikování je zároveň velmi efektivní při výrobě velkých sérii. Navíc vstřikováním lze vyrábět složité tvary s relativně vysokou přesností, rychlostí za nízké náklady, čímž jednoznačně předčí ostatní technologie ke zpracování polymerů. V současnosti lze vstřikovat spoustu druhů materiálů. Mimo čtyři základní skupiny, mezi které patří amorfní a částečně krystalické termoplasty, kompozity s termoplastickou maticí a termoplastické elastomery, se jedná o vstřikování více komponentní, vstřikování dutých dílů za pomoci inertních plynů či vody, anebo vstřikování strukturně lehčených plastů [1,2,3].

1.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus (Obr. 1) popisuje pořadí jednotlivých kroků během vstřikování. Během každého cyklu dochází k příjezdu plastikační jednotky k uzavřené formě a vystříknutí roztaveného polymeru ve formě taveniny do dutiny formy. Čas, během kterého probíhá plnění dutiny, je nazýván jako doba plnění. Jakmile je dutina naplněna, nastává fáze dotlaku a doplnění, během něhož tlak ve formě dosahuje stejné nebo menší hodnoty jako u vstříknutí [1,4].

Princip dotlaku a doplnění spočívá v zabrání úniku taveniny z dutiny formy, kompenzací smrštění výstřiku a zbytkových napětí. Čas doplnění je však omezen na dobu zatuhnutí vstřikovaného polymeru ve vtokovém systému formy. Po dokončení dotlaku a doplnění následuje odjezd plastikační jednotky od formy, která zůstává uzavřená a výstřik chladne uvnitř. Jakmile se dosáhne vyhazovací teploty, forma se otvírá a výrobek je vyhozen a dochlazován za pokojové teploty. Během procesu chlazení, otevření formy a vyhození dílu

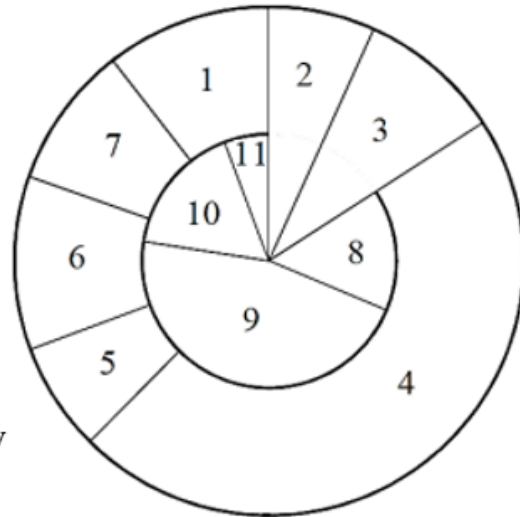
již paralelně probíhá plastikace další dávky polymeru v plastikační jednotce. Do procesu vstřikování bývá též zařazen cyklus přípravy formy, který obsahuje čištění, nanášení separačních činidel či umístění zástríku [1,4].

Vstřikovací forma:

1. Uzavření formy
2. Vstříknutí
3. Dotlak a doplnění
4. Chlazení
5. Otevření formy
6. Vyprázdnění formy
7. Příprava formy
8. Uzavření formy

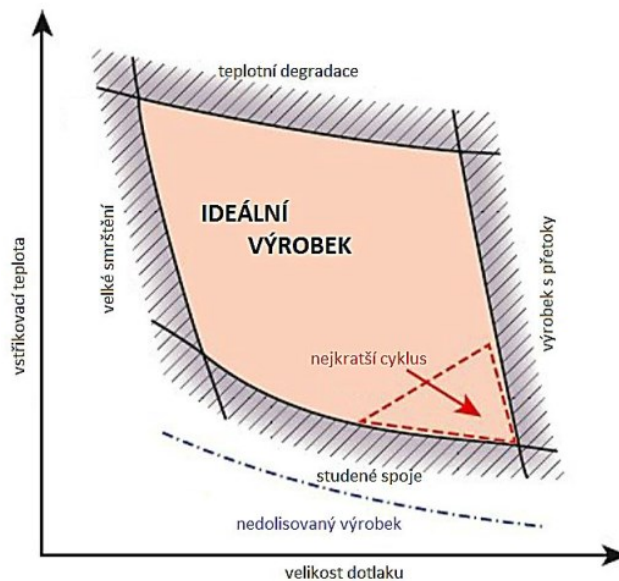
Plastikační jednotka:

2. Vstříknutí
3. Dotlak a doplnění
8. Odjezd plastikační jednotky
9. Plastikace
10. Prodleva
11. Příjezd plastikační jednotky



Obrázek 1. Cyklus vstřikování [4].

Podmínky k dosažení ideálního výrobku pomocí vstřikování jsou znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 2), ze kterého je zřejmé, že nejkratšího cyklu vstřikování je možné docílit při správně zvolené teplotě vstřikování a dotlaku. Vzhled diagramu bude pro každou formu i materiál odlišný [6].



Obrázek 2. Vstřikování ideálního výrobku [6].

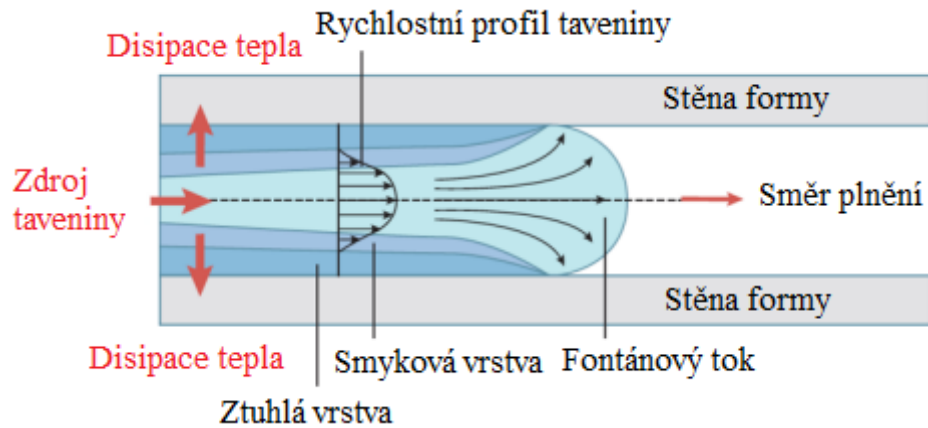
1.1.1 Procesní parametry

Hlavními veličinami, které charakterizují vstřikovací proces je tlak a teplota. Při vstřikování se teplota roztaveného polymeru pohybuje v rozmezí mezi 120 ÷ 350 °C, avšak během procesu dochází ke kolísání. Výkyvy teplot jsou způsobeny teplotou formy, která je u termoplastů nižší a zároveň disipací, která taveninu zahřívá. Tyto změny teplot lze ovlivnit správnou teplotou formy za použití vhodného média, které proudí v temperačních kanálech. Teplota formy je doporučena výrobcem granulátu a obvykle se pohybuje v rozmezí 0 ÷ 150 °C. Vstřikovací tlak začíná na 50 MPa a může dosahovat až stovek megapascalů v závislosti na druhu vstřikovacího stroje, typu vstřikovaného materiálu aj. Je však nezbytné, aby byl dostatečně vysoký k zaplnění celé dutiny formy. Nesmí být ale příliš vysoký, protože by mohlo docházet ke vznikům přetoků. Ty vznikají tak, že tlak při vstřikování je vyšší než uzavírací síla formy a tavenina nateče do dělicí roviny. Stanovení správné hodnoty tlaku probíhá pomocí simulačního softwaru [1,7].

1.1.2 Plnění formy

Plnění formy probíhá v době, kdy šnek vykonává dopředný pohyb. Mezi hlavní vlivy ovlivňující fázi plnění patří reologické vlastnosti daného plastu. Horká tavenina se při styku s chladným povrchem stěn formy ochlazuje a dochází k místnímu tuhnutí. Ztuhnutá vrstva následně slouží jako izolant mezi proudící taveninou a stěnou formy, což umožňuje vznik laminárního proudění a velkého smykání, které vedou k disipaci tepla. Vyprodukované teplo ovlivňuje především rychlost smykové deformace a smykové napětí. Velikost disipačního výkonu však může zapříčinit degradaci vstřikovaného materiálu. Mezi další faktor ohrožující kvalitu požadovaného výrobku patří příliš vysoká rychlost vstřikování, která může zapříčinit změnu laminárního proudění na turbulentní. To může způsobit narušení a odtrhnutí ztuhlé vrstvy materiálu od stěny formy a zanesení nežádoucích částí do taveniny [1].

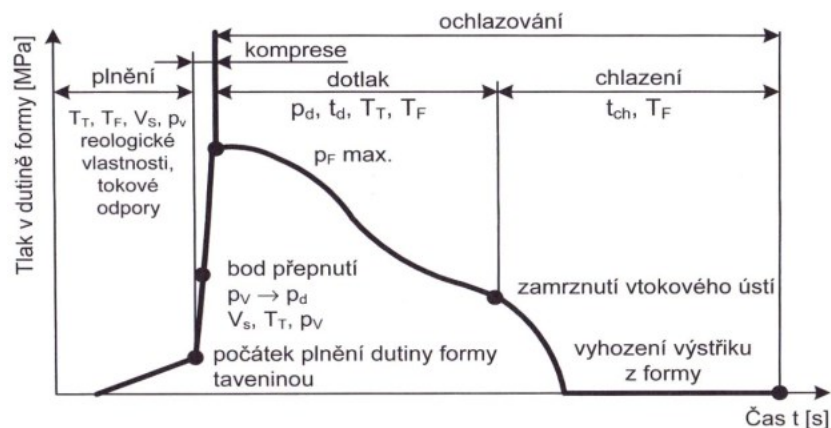
K dosažení ideálního plnění je nutné dosáhnout fontánového toku (Obr. 3), který vychází z chování taveniny při laminárním proudění. Tavenina se rozšiřuje směrem k bočním stěnám formy a tvoří požadovanou ztuhlou vrstvu. Její tloušťka závisí na teplotách taveniny, formy a rychlosti vstřikování – se snižující rychlostí tloušťka vrstvy roste. Naopak nežádoucím typem plnění je tryskový tok, nazývaný též jetting. Specifikem tohoto toku je vznik studených spojů v důsledku příliš rychlého proudění taveniny, což vede ke zhoršeným mechanickým a vzhledovým vlastnostem výstřiku [1].



Obrázek 3. Detail fontánového toku [7].

1.1.3 Dotlak

Fáze dotlaku je zařazena do cyklu vstřikování proto, aby se zabránilo velkému smrštění a defektům na díle po ochlazení na pokojovou teplotu. Po zaplnění dutiny formy je tok taveniny ukončen, následuje tuhnutí a objemové změny vstříknutého materiálu. Dotlak zajišťuje setrvání vstřikovacího stroje v nastaveném tlaku až do zamrznutí vtoku, což eliminuje objemové změny. Dotlak může být aplikován ve dvou různých variantách, a to s trvalým (konstantním) průběhem, anebo s klesajícím [3].



Obrázek 4. Graf tlaku během plnění, dotlaku a chlazení [3].

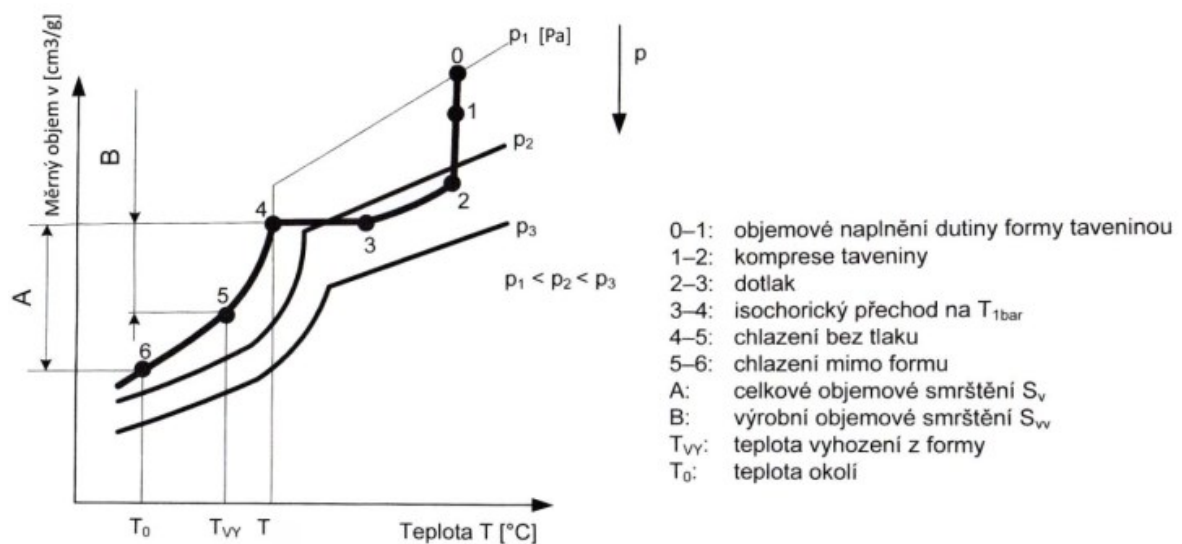
1.1.4 Chlazení

V technologii vstřikování se rozlišují dva pojmy – chlazení a ochlazování. Zatímco chlazení je doba od ukončení dotlakové fáze po vyhození výstřiku z formy, ochlazování zahrnuje i objemové plnění. Mezi parametry ovlivňující fázi chlazení patří nastavená doba chlazení, teplota formy, kterou určuje gradient chlazení (rozdíl mezi teplotou taveniny a formou) a teplota vyhazování výstřiku z formy. Vyhazovací teplota závisí na zpracovávaném materiálu (amorfní, částečně krystalický, TPE apod.), na konstrukci formy a systému vyhazování,

požadovaných přesnostech výstřiku a tloušťce stěn. Požadovaná přesnost a tloušťka stěn má zásadní vliv na dobu chlazení – čím delší, tím lepší – ale s negativním dopadem na ekonomiku výroby [3].

Tavenina začíná chladnout ihned po dotyku se stěnou formy. Jakmile skončí fáze plnění a dotlaku, začínají objemové změny na výstřiku. Po dosažení vyhazovací teploty se forma otevře a výstřik je vyhozen. Během chlazení při pokojové teplotě nedochází k zásadním tvarovým změnám. K zajištění co nejvyšší kvality dílů je nezbytné, aby teplotní pole na povrchu formy a vyrobeného dílu bylo co nejrovnoměrnější a tloušťky stěn co nejtenčí. Tím je zajištěno stejnoměrné chlazení, čehož však není jednoduché dosáhnout, protože temperační kanály obvykle nebývají stejně daleko, např. od rohů výrobku [1].

K nastavení optimálních parametrů vstřikování a dosažení ideálního výrobku napomáhají diagramy $p-v$, které popisují závislosti mezi tlakem, teplotou a specifickým objemem. Z diagramu je možné např. určit, jak se změní objem při změně tlaku pro danou teplotu, anebo při změně teploty pro daný tlak. Při určování požadovaných hodnot je nutné zohlednit zanedbání efektů ovlivňujících smrštění, jako jsou průběh tlaku v čase či gradient chlazení. Z diagramu vstřikovacího cyklu (Obr. 5) je možné určit přibližné změny objemu nebo teplotní a tlakové hodnoty [1].

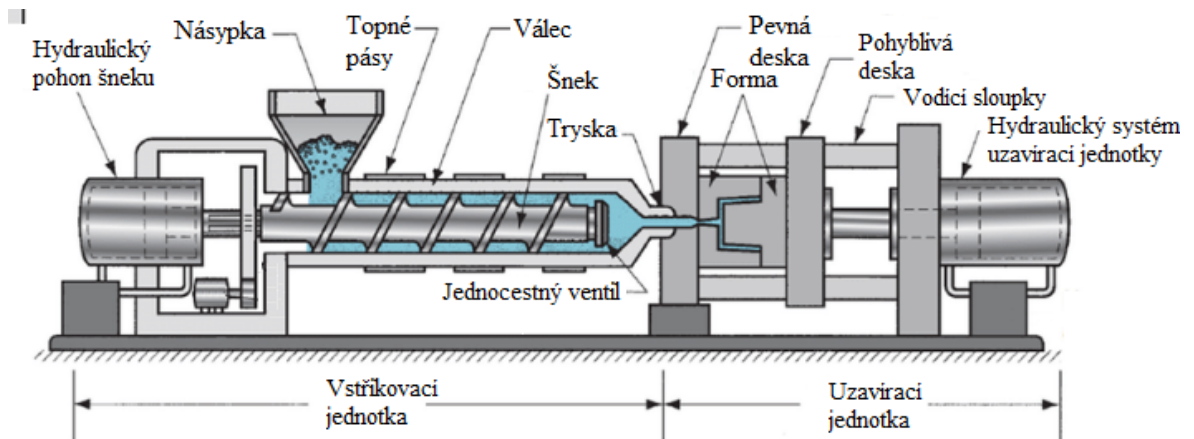


Obrázek 5. Vstřikovací cyklus v $p-v$ diagramu [3].

1.2 Vstřikovací stroj

Ke vstřikování plastů se využívá speciálních tzv. vstřikovacích strojů, které se dělí podle několika základních parametrů. Nejběžnějším způsobem je dělení podle polohy vstřikovací jednotky stroje na horizontální (nejběžnější) a vertikální, které se však nepoužívají příliš

často. Své uplatnění nachází při výrobě obsahující obštrík výrobku. Dále pak lze stroje dělit na základě použitého pohonu na hydraulické, elektrické a hybridní. Mezi další parametry rozlišující různé typy strojů patří velikost možné formy, uzavírací síla, stupeň řízení, rychlost výroby, náročnost obsluhy, tuhost stroje a hlavně cena. Výběr stroje ovlivňuje pevnost, přesnost a životnost výrobku [7,6].



Obrázek 6. Vstřikovací stroj [8].

Konstrukce vstřikovacího stroje je tvořena několika hlavními prvky (Obr. 6). Vstřikovací a plastikační jednotkou, která generuje tlak a zajišťuje přísun taveniny do dutiny formy. Uzavírací jednotkou zajišťující uzavírání formy a vstřikovací formou, která je v sestavě nástrojem a udává finální tvar výrobku. Poslední částí je pak řídicí a ovládací jednotka [4].

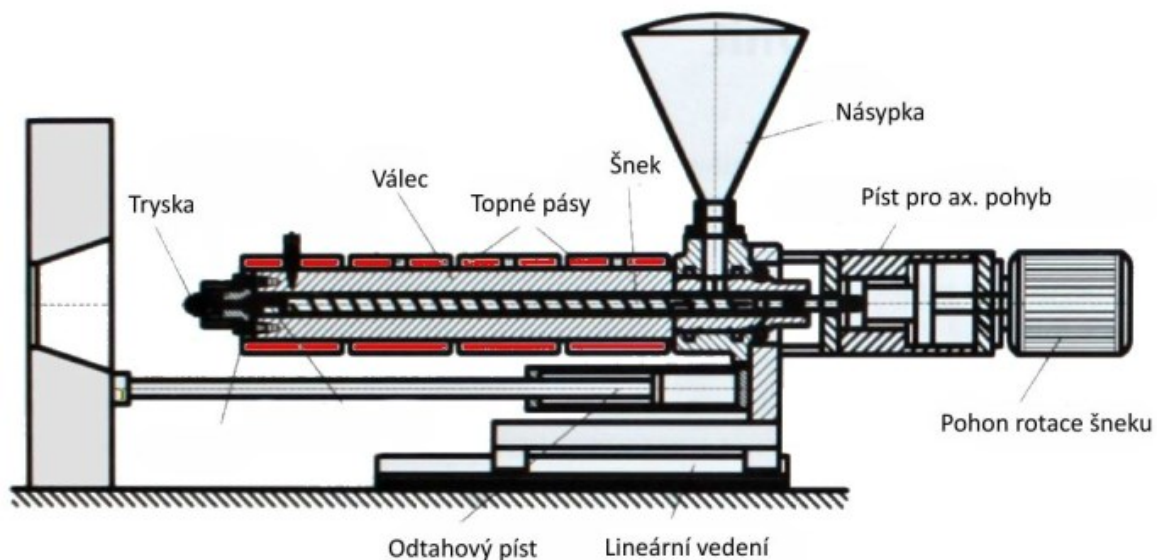
1.2.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotky (Obr. 7) jsou používány k přípravě materiálu pro vstříknutí do formy. Existuje několik druhů jednotek, které lze dělit následovně:

- bez předplastikace (plastikace v tavící komoře – vstřikování pístem nebo plastikace a vstřikování šnekem),
- s předplastikací (plastikace v tavící komoře – vstřikování pístem nebo plastikace šnekem – vstřikování pístem).

V současné době se nejčastěji používají jednotky s plastikací a se šnekem pro vstřikování. Ve vstřikovací jednotce je připravováno a dopravováno roztavené množství požadovaného materiálu do dutiny formy. Proces probíhá za vysokých vstřikovacích rychlostí a tlaků. Objem zpracovávané taveniny musí být menší, než je kapacita plastikační jednotky během jednoho zdvihu. Doporučený objem by měl být mezi 80 % a 90 % kapacity jednotky.

Princip funkce plastikační jednotky je takový, že z násypky stroje je do válce dopravován polotovar, nejčastěji ve formě granulátu, pomocí otáčivého pohybu šneku. Rychlost posuvu materiálu přes vstupní, přechodové a výstupní pásmo lze regulovat pomocí otáček. Materiál je postupně zahříván, což vede k plastikaci a homogenizaci. Natavený materiál se hromadí před špičkou šneku tvořenou jednocestným ventilem. Během procesu plastikace se šnek otáčí směrem vzad. V momentě, kdy je připravena žádaná dávka taveniny, šnek se začne otáčet opačným směrem a vzniká tlak potřebný k vyplnění formy. Polymer je vstříknut do dutiny a začíná chladnout. Celá operace trvá několik vteřin v závislosti na výstřiku [4,9].

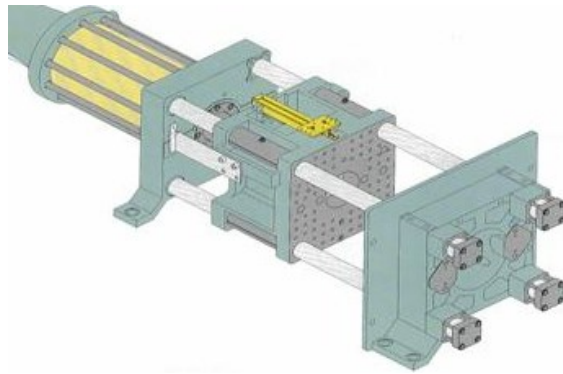


Obrázek 7. Vstříkovací jednotka [10].

1.2.2 Uzavírací jednotka

V sestavě vstříkovacího stroje plní uzavírací jednotka funkci otevírání, zavírání a uzamčení formy. Každá jednotka musí disponovat dostatečně velkou uzavírací a přisouvací silou. Uzavírací jednotky lze dělit podle typu pohonu uzavíracího systému na hydraulickomechanickou, hydraulickou (Obr. 8) a elektromechanickou.

Standardem mezi uzavíracími jednotkami je sloupcová konstrukce s pevnou a pohyblivou deskou. Na trhu se však vyskytují i typy bez sloupů, které se vyznačují snazší vyměnitelností formy. Důležitým parametrem u vstříkovacích jednotek je velikost rychlosti a síly pro uzavírání. Při uzavírání formy by nemělo docházet k nárazu a rychlost při dovírání musí být taková, aby bylo zajištěno plynulé a měkké uzavření. Sestava jednotky se skládá z několika důležitých částí, mezi které patří pevná opěrná deska, pohyblivá upínací deska, vodící sloupky, vyhazovací a uzavírací systém [4,9].



Obrázek 8. Hydraulická uzavírací jednotka [11].

1.3 Vstříkovací forma

Jedná se o nástroj vstříkovacího stroje, který slouží k vyhotovení výrobku z roztaveného polymerního materiálu. Po ochlazení je vyroben díl s požadovanými vlastnostmi, rozměry a tvarem. Vstříkovací forma je složité zařízení, které musí splňovat vysoké nároky kladené na kvalitu, spolehlivost a produktivitu. Je tvořena tvarovou dutinou, do které je vstříkovacím strojem za vysokého tlaku a teploty vstříknut materiál, kterému dutina určí finální tvar. Návrh dutiny je určen především dle funkčních, tvarových a vzhledových požadavků na vstříkovaný díl [4,13,29].

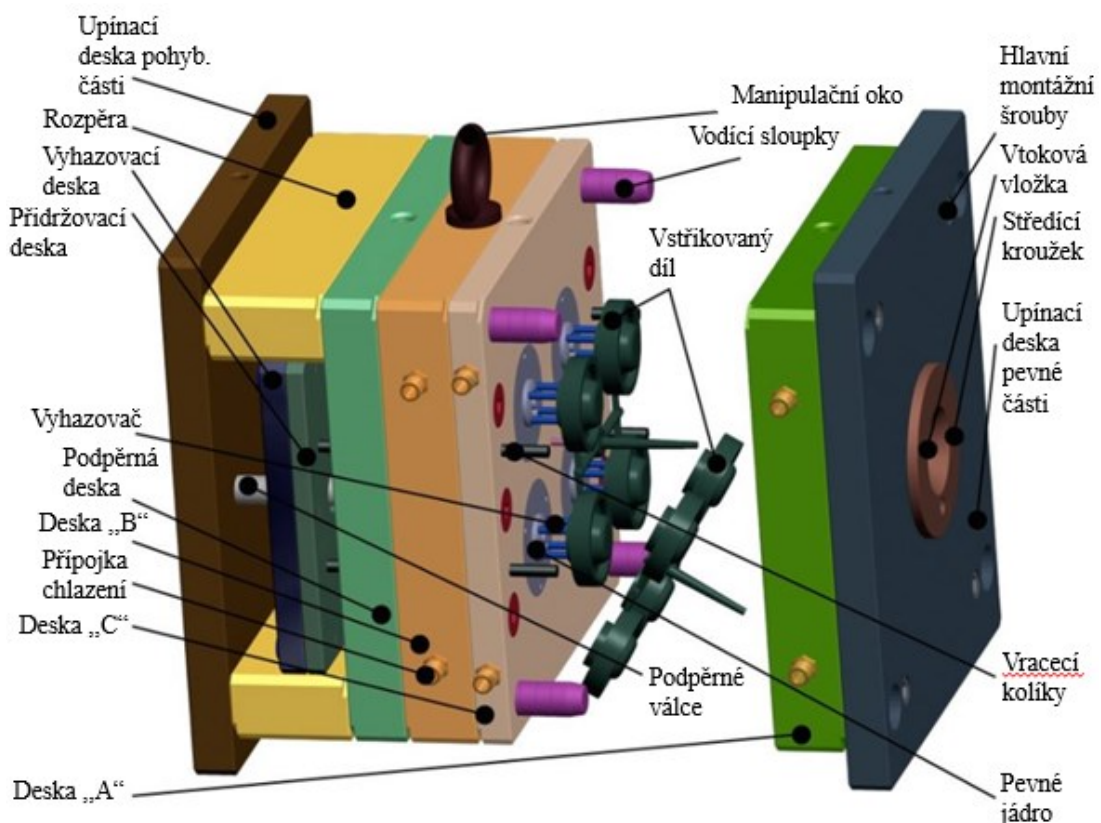
Samotná konstrukce nástroje je tvořena několika deskami, kde má každá z nich specifickou funkci a jsou navzájem spojeny šrouby (Obr. 9). Dále pak vodícími čepy, pouzdry, vtokovým a vyhazovacím systémem, chladícím okruhem apod. Dalším základním faktorem je dělení formy na dvě poloviny – pohyblivou a statickou. Požadavky a vlastnosti kladené na vstříkovací formy lze definovat několika parametry. Mezi hlavní patří nízká pořizovací cena, vysoká kvalita a přesnost výrobku, schopnost odolávat vysokým tlakům, jednoduchá a rychlá výroba s vysokou automatizací procesu, snadné vytáhnutí výstříku a minimální odpad vstříkovaného polymerního materiálu [4,13,29].

1.3.1 Konstrukce formy

Vstříkovací formy mohou být navrženy pro stejný díl různými způsoby. Na obrázku č. 9 lze vidět dvoudeskovou vstříkovací formu v otevřeném stavu s vysunutým vyhazovacím systémem, kdy dochází k vyhození výstříku. Název dvoudeskový je definován díky tomu, že pouze dvě desky přichází do styku s roztaveným materiálem. Jedná se o čtyřnásobnou formu, kde platí, že díly by měly být umístěny v dělicí rovině tak, aby bylo dostatek místa pro vtokový systém, chladící okruh a další důležité části nutné k provozu formy. Výstříky by taktéž měly být co nejbližší u sebe, aniž by však ovlivňovaly ostatní funkce formy [12].

Upínací, pevné desky (tvárnice) i pohyblivé (tvárníky) části formy slouží k upnutí ke vstřikovacímu stroji. Desky „A“, „B“, „C“ mohou tvořit přímo dutinu formy, ale také sloužit k ukotvení vložek, ve kterých je příslušná dutina vytvořena. Výhodou použití vložek s dutinou je v některých případech dosažení velké finanční úspory. Jak již bylo zmíněno výše, formy lze různě konstruovat, přičemž je nutné brát v potaz složitost, proveditelnost obráběcích prací a finanční náročnost. Proto jsou například desky „B“, „C“ navrženy každá samostatně. Pokud by se tyto desky vyrobily jako jeden kus o stejné tloušťce, znemožnilo by se použití efektivních a levných výrobních technologií [12].

Dalším nezbytným prvkem formy středící kroužek, který bývá většinou osazen na pravé nepohyblivé straně. Funkcí kroužku je zajistit přesnou polohu vstřikovací formy na vstřikovacím stroji. Upnutí formy musí být takové, aby osa trysky stroje byla s osou vtokové vložky formy souosá. Pohyblivou část tvořenou vyhazovacím mechanismem, vodícími prvky, tvarovými vložkami apod. odděluje od pevné části formy dělicí rovina. Vyhazovací systém je tvořen vyhazovači, které při vysunutí odformují vstřikovaný díl z dutiny pohyblivé části formy, kde držel vlivem třecích sil na pevném jádru. Jádra jsou obvykle tvořena vnitřními konturami výstřiku. Ke kontrole vyhazovacího mechanismu slouží vracející kolíky, které zajišťují, že při uzavírání formy jsou vyhazovače zasunuty [12].



Obrázek 9. Vstřikovací forma – otevřená [12].

1.3.2 Materiál formy

Při volbě materiálu pro formy hraje roli několik faktorů ovlivňujících jejich výběr. Mezi hlavní patří požadovaná životnost, kvalita výstřiku a pořizovací náklady. Tyto parametry jsou přímo ovlivněny výrobními podmínkami, jako je druh vstřikovaného polymeru, typ vstřikovacího stroje, přesnost dílu a podmínky vstřikování [5].

Formy jsou nejčastěji vyráběny z různých ocelí či slitin neželezných kovů, např. mědi nebo hliníku. Nejpoužívanějším materiálem je ocel, jejíž požadované mechanické vlastnosti jsou těžko nahraditelné. Pro všechny díly formy však nelze použít jeden univerzální materiál, nýbrž musí být vhodně zvolená kombinace materiálů, dle požadované funkce, ve které musí být zohledněna taktéž životnost o opotřebení. Použité materiály by měly být dostatečně mechanicky pevné, obrobitelné, brousitelné, lešitelné, odolné proti korozi a chemickým vlivům. Dále by měly mít dostatečnou kalitelnost a prokalitelnost se stálými rozměry a minimálními deformacemi při kalení [5].

K výrobě forem lze použít několik druhů jakostí ocelí, které se dělí do několika skupin. Mezi nejčastější patří uhlíkové a konstrukční oceli určené k dalšímu zušlechťování, nástrojové a legované oceli. Dalšími druhy jsou martenzitické vytvrditelné oceli s minimálními deformacemi při tepelném zpracování a velkou stálostí rozměrů, oceli určené k tváření, cementování, nitridování a oceli antikorozi [5].

1.3.3 Vtokový systém

Úkolem vtokového systému, který spojuje trysku stroje s dutinou formy, je dopravení polymerní taveniny a zaplnění dutiny v krátkém čase s minimálním odporem. Vtokový systém nejvíce ovlivňuje kvalitu a jakost výrobku. Konstrukce vtokového systému závisí na několika parametrech, jako jsou tvar výstřiku, násobnost formy či použitý vtok. U vícenásobných forem je nutné, aby všechny dutiny zaplnila tavenina ve stejný čas [4].

Hlavními zásadami dobře navrženého vtokového systému patří navržení co nejkratší dráhy toku taveniny, malé tlakové a časové ztráty a dostatečný průřez kanálu, který zajišťuje vyplnění dutiny formy. Tvar vtoku, jeho rozměry a umístění vtokového ústí má přímý vliv na vlastnosti, vzhled i rozměry vstřikovaného dílu, spotřebu materiálu i energetickou náročnost vstřikovacího cyklu. Vtokové systémy jsou děleny na dvě základní kategorie:

- studený vtokový systém (SVS),
- vyhřívaný vtokový systém (VVS).

V některých případech lze použít i jejich kombinaci nazývanou hybridní vtokový systém (SVS + VVS) [4,13,14].

1.3.4 Temperační systém

Temperační systém je tvořen soustavou chladících kanálů, kterými proudí chladicí kapalina. Hlavním úkolem systému je udržování teploty formy na stanovené hodnotě tak, aby docházelo k rovnoměrnému ochlazení vstříkovaného dílu. Při rovnoměrném chlazení jsou minimalizovány deformace výstřiku a vnitřní pnutí [5].

Při vstříkování však teplota formy není konstantní. Po vstříknutí nejprve stoupá, protože tavenina sebou nese teplo, které je předáváno do formy. Poté následně klesá díky odvodu tepla proudící kapalinou v chladícím okruhu. Z tohoto důvodu je nezbytné dosáhnout co nejlepšího chladicího procesu. Mezi faktory ovlivňující chlazení patří především rozměry a pozice kanálu, teplota temperačního média a také jeho typ [5].

Temperační prostředky umožňující formě pracovat v optimálních podmínkách dělíme na aktivní a pasivní. Zatímco aktivní působí přímo ve formě, kde přivádí nebo odvádí teplo, tak pasivní ovlivňují teplotu formy fyzikálními vlastnostmi (izolační a tepelně vodivé materiály). Základními aktivními prostředky jsou voda, olej a glykoly [5].

1.3.5 Vyhazovací systém

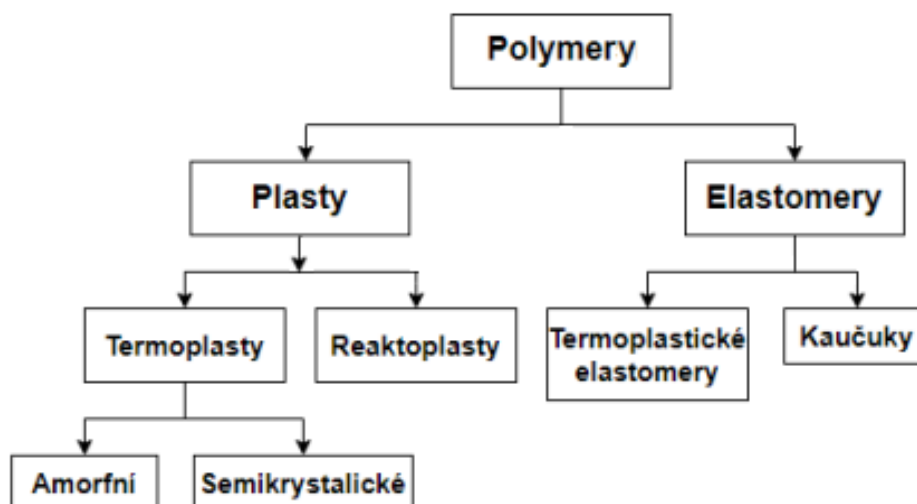
Úkolem vyhazovacího systému je vyhození vystříknutého dílu z formy, který v důsledku smrštění zůstává na tvarové části formy. K tomuto úkonu, který by se měl obejít bez poškození dílu, se používají vyhazovače. Ve většině případů probíhá vyhazování na nepohledové straně dílu. Nejčastěji se využívá mechanický způsob výhozu, existuje však i pneumatický (pro tenkostěnné výrobky) a hydraulický [5].

2 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Název polymer byl utvořen ze dvou významově různých slov – poly a mer. Zatímco poly znamená mnoho, mer je výrazem pro opakující se jednotku. Jedná se tedy o přírodní nebo syntetické makromolekulární látky, které jsou složeny z několika opakujících se jednotek. Navzájem se liší dle řetězcové struktury molekul. Vznik polymerů je zajištěn pomocí polymerizace nebo polykondenzace. Během zpracování se polymery nachází ve formě taveniny, po zchladnutí vzniká výrobek v tuhém stavu [16].

2.1 Dělení polymerů

Základem každého polymeru je monomer, který podle typu, druhu kovalentní vazby a množství merů v řetězci, udává rozdělení polymerů na dvě základní skupiny – plasty a elastomery. Tyto skupiny jsou poté děleny dle fyzikálních, chemických a zpracovatelských vlastností [16].

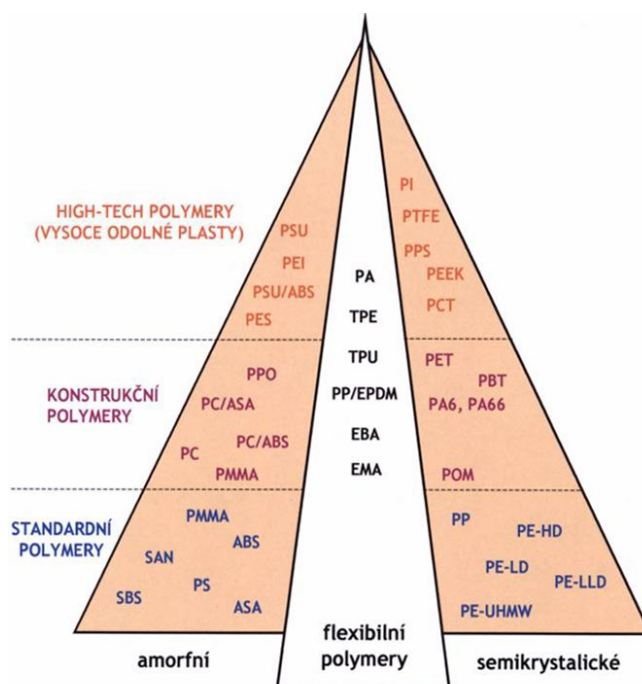


Obrázek 10. Rozdělení polymerů [15].

2.1.1 Termoplasty

Jedná se o látky, u nichž dochází vlivem působení tepla k měknutí, což umožňuje za pomoci tlaku dát látce požadovaný tvar. Následným zchlazením termoplast začíná tuhnout do výchozího stavu. Největší výhodou termoplastů je schopnost opakovaného zahřívání a zchlazování, což například u reaktoplastů není možné. U termoplastů tedy nedochází k chemické reakci, která by zapříčinila změnu struktury, změny jsou pouze fyzikální. Postupným zahříváním dochází k rozvolňování vazeb v řetězci a vzniká plastický tok.

Skupina termoplastů se na základě molekulárního uspořádání řetězců rozděluje na termoplasty amorfní a semikrystalické [17].



Obrázek 11. Dělení polymerů dle použití a struktury [18].

Amorfní termoplasty

Jedná se o plasty, které jsou ve většině případů transparentní, křehké, pevné, tvrdé a nevykazují velké smrštění. U amorfních termoplastů jsou makromolekulární řetězce nepravidelně uspořádány. Řetězce obvykle dosahují velké délky a jsou bohatě rozvětveny. Amorfní termoplasty jsou použitelné do teploty zesknutí T_g . Nejpoužívanějšími amorfními termoplasty jsou např. PMMA, PC a PS [18].

Semikrystalické termoplasty

Jedná se o plasty, které na rozdíl od amorfních nejsou transparentní, nýbrž mléčné, zakalené, či úplně neprůhledné. Hlavními vlastnostmi semikrystalických termoplastů jsou tuhost, chemická odolnost, houževnatost. V porovnání s amorfními vykazují větší smrštění a hmotnost. Makromolekulární řetězce jsou částečně uspořádány, avšak nejsou tak dlouhé a rozvětvené jako amorfní. Navíc v některých jsou navzájem seřazeny, což má za příčinu vznik krystalické oblasti. Semikrystalické termoplasty jsou použitelné do teploty tání T_m . Nejpoužívanějšími semikrystalickými termoplasty jsou např. PR, PP, PA, PTFE a POM [18].

2.1.2 Reaktoplasty

Zásadním rozdílem mezi termoplasty a reaktoplasty je fakt, že reaktoplasty nelze opakovaně tavit. Po zahřátí na danou teplotu totiž dochází k chemické reakci, která je nevratná a nazývá se vytvrzování. Reaktoplasty lze po zahřátí tvářet jen omezenou dobu. Po vytvrzení je nelze dále tepelně zpracovávat, protože by došlo k jejich degradaci. Reaktoplasty lze dále dělit na fenoplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery a polyuretany. Mezi nejznámější reaktoplasty se řadí fenoloformaldehydová či epoxidová pryskyřice. [18]

2.1.3 Termoplastické elastomery

Termoplastické elastomery tvoří skupinu materiálů, které se nachází mezi termoplasty a elastomery. Termoplastem nazýváme materiál, který má podobné vlastnosti jako pryž, avšak na rozdíl od ní může být opakovaně zpracováván. Pryž nelze dále zpracovávat z důvodu vulkanizace. Po dobu zpracovávání se TPE chovají jako termoplasty a po zchlazení získávají vlastnosti elastomeru. Nejznámější termoplastickými elastomery jsou EPDM a TPU [19].

2.1.4 Elastomery

Elastomery jsou polymery, jejichž základem je kaučuková směs. Při zahřívání směsi dochází k chemické reakci nazývané vulkanizace. Během vulkanizace dochází k prostorovému zesíťování, což způsobuje, že další tváření již není možné. Procesem vulkanizace se mění kaučuková směs v pryž. Elastomery vynikají vysokou elastickou deformací, což znamená, že po zatížení se vrací do původního stavu bez poškození. Elastomery lze dále rozdělovat na přírodní a syntetické. Příkladem elastomeru je např. isoprenový kaučuk [16].

2.2 Příprava materiálu

Plasty určené ke vstřikování se obvykle musí před samostatným procesem upravit. Každý materiál má daný technologický postup určený pro výrobu konkrétního výstřiku. Nejčastěji se jedná o nutnost vysušení granulátu, přimíchávání recyklátu obvykle kvůli snížení ceny či zabarvení zpracovávaného plastu. Zmiňovanými operacemi je polotovar připraven tak, aby se následné zpracování obešlo bez komplikací a hotový výstřik dosáhl požadované kvality, přesnosti, vlastností a vizuálního vzhledu specifikovaného před samotným zahájením výroby [4].

2.2.1 Sušení

Sušení granulátu je jedna z nejčastějších operací, která se musí provést před vstřikovacím procesem. Jelikož velké množství plastů přijímá vzdušnou vlhkost i během standardních zpracovatelských podmínek, je nutné polotovar před zpracováním vysušit. Vynecháním sušení by mohlo dojít k jeho degradaci, což má přímý vliv na výsledné vlastnosti vstřikovaného dílu a také například na horší vyhazování z formy. Materiály se suší v sušárnách, které se dělí podle typu proudění vzduchu či tlaku v sušárně. Mohou být násypkové, anebo centrální [4,11].

Pro úspěšné sušení je nutné analyzovat typ vlhkosti v materiálu. Může se jednat buď o vlhkost v celém objemu materiálu nebo jen na jeho povrchu. Polotovar lze vysušit pouze na stejnou vlhkost jaká je během sušení vlhkost vzduchu v sušárně. Po ukončení sušícího procesu je nutné zamezit kontaktu mezi materiálem a okolním prostředím tak, aby znovu neabsorboval nežádoucí vlhkost [4,11].

2.2.2 Úprava polymerů

Většinu základních polymerů nelze ihned zpracovat vstřikováním. Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností materiálu, je nezbytné sáhnout k úpravám polymeru vhodnými přísadami. Zcela běžně jsou přidávány aditiva pro lepší stabilitu taveniny v plastikační jednotce, či lepší tokové vlastnosti roztaveného polymeru. Dalšími prvky upravující polymery jsou:

- **sít'ovací činidla (vytvrzovací, vulkanizační)** – urychlovače sít'ování a vytvrzování,
- **změkčovadla** – snižují tvrdost a tuhost, zvyšují ohebnost, tažnost, houževnatost,
- **stabilizátory** (UV – zvyšují životnost, zlepšují odolnost proti atmosférickému stárnutí, termooxidační – zvyšují odolnost proti termooxidačnímu stárnutí),
- **maziva** – snižují viskozitu, zlepšují odformování výstřiku,
- **plniva** – zvyšují pevnost, houževnatost, odolnost proti oděru, teplu, korozi apod.,
- **vyztužovadla** – zpevňují polymerní výrobky
- **pigmenty** – v polymeru nerozpustné barevné prášky, udávající odstín materiálu [4].

2.3 Konstrukční transparentní polymery

Konstrukčními polymery jsou nazývané polymery, které mají výrazně kvalitnější mechanické a fyzikální parametry než běžné polymerní materiály. Mezi hlavní transparentní konstrukční polymery se řadí především polykarbonát (PC) a polymethylmethakrylát (PMMA), dále pak polystyren či styrén-akrylonitril (SAN) [21].

Při výběru vhodného materiálu pro vstřikování výrobků je nutné brát v potaz několik ukazatelů ovlivňujících konečnou volbu. Hlavními požadavky jsou vizuální a mechanické vlastnosti, správná funkce výrobku nebo finanční hledisko. Dále pak tvarová stabilita, hmotnost, životnost, zdravotní nezávadnost, požární odolnost apod. [3].

2.3.1 Polymethylmethakrylát (PMMA)

Jedná se o jeden z nejčastěji používaných transparentních konstrukčních materiálů, který se v současnosti používá takřka v každém odvětví průmyslu. Příkladem lze uvést automobilový a letecký průmysl, zdravotnictví, stavebnictví atd. PMMA je materiál charakteristický svojí tuhostí, průhledností a odolností vůči stárnutí či korozivním chemikáliím. Složení materiálu je na bázi vodíku, uhlíku a kyslíku. Výhodou materiálu je možnost pigmentování, čímž je umožněna změna transparentnosti na jakoukoliv barvu. PMMA se řadí mezi amorfni termoplasty. Řetězce mají neuspořádanou strukturu i napříč tomu jsou ale při běžné teplotě pevné. Zahříváním měknou a při teplotě skelného přechodu se stávají tvárnými [18].

Mezi výhody PMMA, mimo zmiňovanou výbornou propustnost světla (až 92 %) se řadí dobrá mechanická obrobiteľnosť, tvarová paměť, elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči vodě, kyselinám a povětrnostním vlivům. Nevýhodami pak jsou malá povrchová tvrdost a špatná odolnost proti hydroxidům a koncentrovanějším kyselinám [20].



Obrázek 12. Příklady použití PMMA [15].

2.3.2 Polykarbonát (PC)

Je dalším zástupcem nejpoužívanějších transparentních konstrukčních polymerů. Proti PMMA má trochu nižší propustnost světla (až 85 %). Zároveň se však vyznačuje dobrou odolností vůči nárazům a vyšším teplotám. U PC je důležitá molekulární hmotnost. Zatímco typy s nižší molekulární hmotností jsou vhodné ke vstřikování, tak ty s vyšší molekulární hmotností jsou zpracovávány v roztoku, což se využívá především pro výrobu fólií. Před zpracováním formou vstřikování je nutné polykarbonátový polotovar dobře vysušit, protože jinak je schopen reagovat i se stopovým množstvím vody. Vhodná teplota ke vstřikování je $280 \div 320 \text{ }^\circ\text{C}$ s přehřátou formou na $80 \text{ až } 120 \text{ }^\circ\text{C}$ [18].

Výhodami PC jsou vysoká pevnost v tahu, rázová houževnatost i při nízkých teplotách, odolnost proti UV záření a hydrolyze. Dále je nutno zmínit dobrou rozměrovou stabilitu, elektroizolační vlastnosti a nízkou absorpci vody. Nevýhodami pak jsou špatná odolnost vůči dlouhotrvajícím vlivům vroucí vody, páry, amoniaku či metanolu [18].



Obrázek 13. Příklady použití PC [15].

3 KONSTRUKCE VÝROBKU

Konstrukce plastového výstřiku je považována za jednu z nejnáročnějších částí při vývoji nového výrobku. Existuje totiž velké finanční riziko, kterému je konstruktér vystavován. Špatným či příliš složitým výrobkem se zvedá cena vstřikovací formy, která se bez problému může pohybovat ve vyšších řádech statisíců případně až nižších jednotek milionů. Se složitostí dílů, roste složitost formy a tím pádem i termín její výroby. Obvyklá doba od návrhu vstřikovacího nástroje až po první díly se pohybuje okolo pěti měsíců [6].

Výrobky ze vstřikovaných termoplastických polymerů vyžadují dodržení základních zásad. Jelikož se výroba polymerních dílů řídí odlišnými pravidly než kovové části, je nutné, aby autor konstrukčního návrhu bral v potaz všechny procesy, ke kterým dochází během vstřikování. Mezi hlavní body ke zvážení se řadí smrštění dílů, rozměrová přesnost, pevnost, vizuální vzhled, vznik vad a samotná vyrobiteľnost. Dalším důležitým aspektem v cestě za optimálním návrhem výrobku je nutná znalost chování jednotlivých polymerních materiálů a technologických principů vstřikování [4,6].

Znalost technologie vstřikování umožňuje optimalizaci procesních parametrů. Jestliže se po vyhotovení prvních výstřiků ukáže, že díly nesplňují požadované vlastnosti jako je rozměrová přesnost, tvar, vzhled či mechanické vlastnosti, je nutné provést změnu právě v parametrech vstřikování. Případně lze změnit i konstrukci dílu. S tím je však spojena i změna formy, která vede k dalším finančním nákladům [6].

3.1 Konstrukce nového výrobku

Obecným pravidlem je, že čím jednodušší je konstrukční návrh, tím levnější a jednodušší bude jeho výroba. K dosažení tohoto cíle je potřeba dodržení výrobních požadavků, které jsou popsány níže. Jde o soubor doporučených pravidel, které se vzájemně ovlivňují a v každé další etapě projektu je nutné zvažovat všechny ovlivňující faktory a možnosti, jak je vyřešit. Obecně lze říct, že konstrukce nového výrobku je vždy určitým kompromisem mezi doporučenými pravidly [1].

Souhrn pravidel, kterými by se měl řídit vývoj nového výstřiku je popsán v sumáři úkolů tak, aby by v ideálním případě mohly být provedeny:

- specifikování výrobku,
- vytvoření projektového plánu,
- vytvoření konceptu výrobku,
- volba materiálu,
- vyhotovení detailního projektu,
- vyrobení prototypu,
- testování prototypu,
- ověření návrhu s možností změny materiálu, projektu či prototypu a testování,
- ukončení návrhu a příprava projektu k výrobě [6].

3.2 Konstrukční řešení tvaru výrobku

Každý výrobek, který je vytvořen technologií vstřikování musí být navržen tak, aby bylo umožněno jeho zaformování. Tvar výrobku ovlivňuje několik faktorů. Tím prvním je funkčnost, což znamená zajistit splnění všech funkcí, které jsou od výstřiku vyžadovány. Druhým faktorem (technologickým) je splnění pravidel zajišťujících plynulé a rychlé zaplnění dutiny formy. Hlavními aspekty jsou plynulé přechody, stejné tloušťky stěn, anebo zaoblení hran. Třetím faktorem jsou estetické vlastnosti, které musí díl splňovat, aniž by byla, jakkoliv ovlivněna jeho funkčnost. Posledním hlediskem je ekonomická náročnost. Vždy je vyžadováno, aby tvar vstřikovaného dílu byl co možná nejjednodušší, protože s jednoduchostí dílu klesá cena formy [4,22].

3.3 Jakost výrobku

Během zpracování polymeru vstřikováním dochází k několika jevům, které ovlivňují finální jakost výrobku. Jedná se především o tyto vlivy:

- **Smrštění vstřikovaného materiálu během vstřikování** – pro vybraný termoplast je uveden v daném rozmezí v podélném a příčném směru. Ovlivňuje rozměry a přesnost výrobku a je závislý na vstřikovací technologii i konstrukci výstřiku.

- **Dodatečné smrštění** – obvykle je mnohonásobně menší než smrštění při zpracování a trvá delší dobu. Dodatečné smrštění obvykle začíná 24 h po vstříknutí a může trvat několik týdnů i měsíců.
- **Teplotní roztažnost** – u polymerních materiálů je teplotní roztažnost přibližně i jeden řád větší než u materiálů z kovu. Jedná se však o vratnou deformaci.
- **Navlhnutí materiálu** – jelikož určité materiály dokáží absorbovat vodu z okolního prostředí, dochází k rozměrovým změnám. Po vysušení se však rozměry vrátí na původní hodnoty.
- **Tečení (creep)** – vzniká během většího a dlouhodobého silového působení na součást. Jedná se o plastickou (nevratnou) deformaci [4,23].

3.4 Konstrukční zásady

Při konstrukci vstřikovaného dílu je nutné znát přesnou funkci výrobku. Na základě požadavků kladených na vyrobený díl se stanoví návrh výstřiku. Mezi podmínky, které je nutné před zahájením konstrukce dílu znát, je geometrie výrobku, druh zatížení, typ uložení, provozní teplota, okolní prostředí a také bezpečnost. Je třeba taktéž počítat snižující se modul pružnosti s narůstající teplotou či teplotní roztažnost materiálu [24].

Základními zásadami, které je nezbytné dodržet a brát v potaz při návrhu dílu z termoplastického materiálu, jsou:

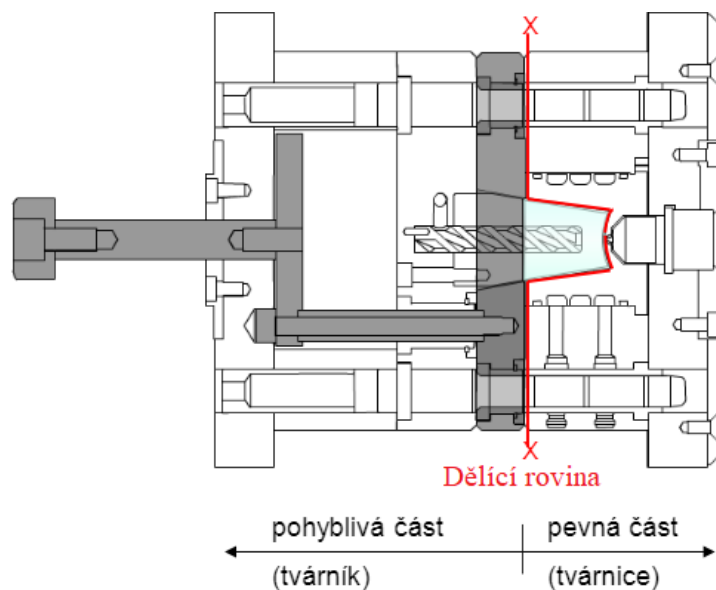
- dělicí rovina a pozice vtoku,
- pozice studeného spoje,
- tloušťka stěn,
- žebra, výztuhy a zaoblení hran,
- úkosy.

3.4.1 Dělicí rovina

Nachází se v místě, kde se dotýkají pravá a levá část vstřikovací formy. Dělicí rovina má zásadní vliv na způsob odformování dílu, a proto by měla být co nejjednodušší. Při návrhu umístění pozice dělicí roviny je nutné pamatovat na to, že zanechá na výrobku viditelnou stoupu ve formě čáry. Z tohoto důvodu by se měla rovina umísťovat na místa, kde nebude

narušovat vzhled vstříknutého dílu, ideálně do hrany výrobku a měla by mít co nejjednodušší geometrický tvar [7,12,25]

Existují dva typy dělicích rovin – hlavní a vedlejší. Hlavní dělicí rovina je umístěna kolmo ke směru uzavírání formy. Všechny další dělicí roviny jsou vedlejší a vyskytují se u dílů obsahující boční otvory, popřípadě výstupky a zápichy, které nelze odformovat v hlavním směru. Při konstrukci výrobku je velmi důležité omezit či se úplně vyhnout použití vedlejších dělicích rovin, protože každá vedlejší rovina vyžaduje svůj mechanismus odformování, což zvyšuje náročnost výroby i cenu formy. [7,12,25]



Obrázek 14. Příklad hlavní dělicí roviny [28].

3.4.2 Pozice vtoku

Pozice vtoku by měla být ideálně umístěna taktéž v nepohledové straně výstřiku nebo v oblasti, kde nebude příliš narušovat vzhled dílu. Každý vtok totiž po sobě zanechává viditelnou stoupu. Ideální pozici vtoku a s tím spojeného studeného spoje (Kap. 3.4.3) lze určit pomocí analýzy, např. za využití softwaru Moldflow.

K dosažení ideálního vstřikovacího procesu a správné funkci tlaku je doporučeno umístit vtokové ústí do nejsilnější stěny výstřiku. Díky tomuto umístění dochází ke správnému chlazení dílů, kdy nejprve tuhnou tenké stěny, během čehož roztavený polymer proudí skrz kritickou oblast výrobku v tlusté stěně. Opačná situace nastává, pokud jsou ke vstřikování použita nadouvadla. V tom případě je doporučeno umístit vtok do stěny s nejmenší tloušťkou [2,25].

3.4.3 Pozice studeného spoje

Jde o nežádoucí vady, jejichž vlivem dochází k ovlivnění vzhledových a pevnostních vlastností vstřikovaného dílu. Studené spoje se tvoří ve většině případů při aplikaci více vtokových ústí nebo vlivem žeber a tvarových výstupků ve formě. V některých případech bývá příčinou jejich vzniku také vzduch v dutině formy. Nejhorší možná varianta studeného spoje nastává při čelním spojení dvou tavenin. Roztavené proudy polymeru se mohou setkávat také bočně nebo tečně [25,26].

Vznik studeného spoje lze do jisté míry eliminovat volbou vhodného termoplastu. Například amorfní termoplasty snáší studené spoje z hlediska pevnosti hůře než semikrystalické. Při návrhu plastového dílu, který bude mechanicky namáhán je nutné zvážit, kam naplánovat pozici studeného spoje tak, aby co nejméně ovlivnil finální vlastnosti vstřikovaného dílu. Oblast vzniku studeného spoje lze ovlivnit například jiným umístěním vtoků, použitím více vtoků nebo kaskádovým vstřikováním [26].

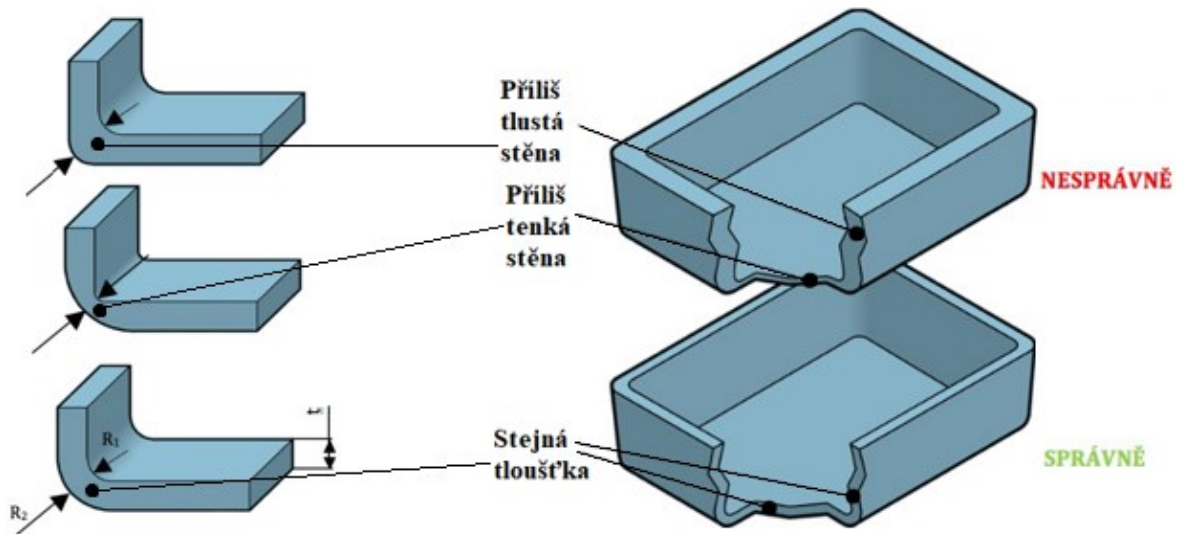


Obrázek 15. Příklad studeného spoje [27].

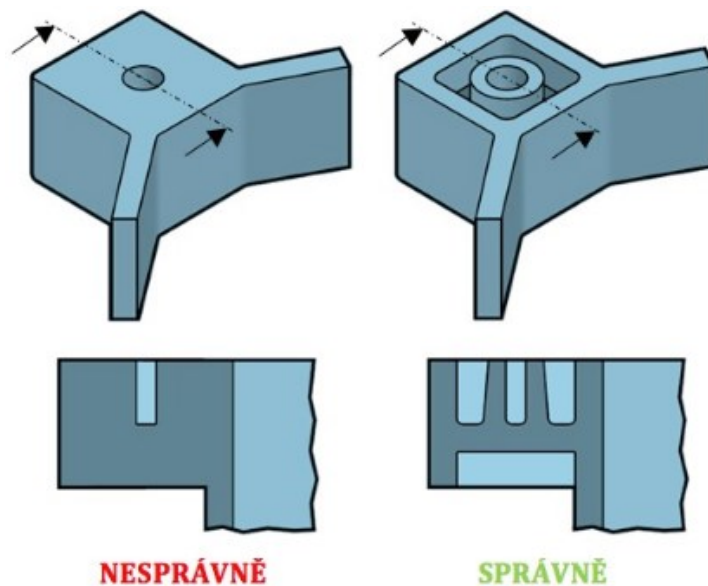
3.4.4 Tloušťka stěn

Stěny musí být vždy konstruovány tak, aby byly splněny požadavky na pevnost a tuhost výrobku. Při navrhování tloušťky stěn je nutné také brát v potaz technologické nebo ekonomické hledisko. Optimální tloušťka stěny pak bývá kompromisem mezi výše uvedenými požadavky, které bývají protikladné (např. pevnost versus hmotnost, anebo životnost vůči ceně) [12].

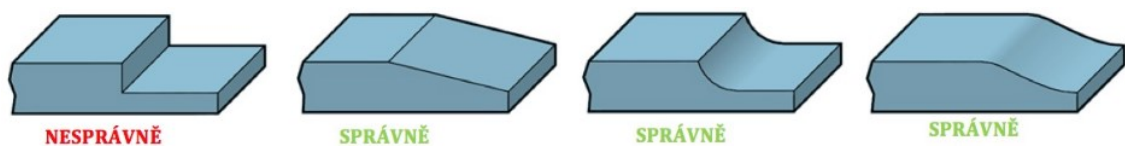
Hlavní zásadou při konstrukci stěn je použití (pokud možno) stejných tloušťek (Obr. 16), popř. nahrazení příliš tlusté stěny odlehčením (Obr. 17).



Obrázek 16. Příklad tloušťek stěn [12].



Obrázek 17. Příklady odlehčení [12].



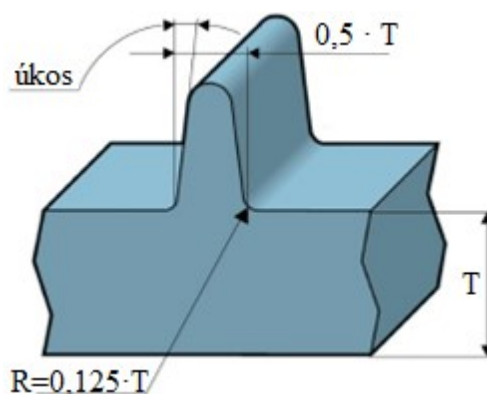
Obrázek 18. Příklad přechodů stěn [12].

3.4.5 Žebra

Žebra jsou používány především z důvodu zvýšení pevnosti a tuhosti výstřiku bez změny tloušťky stěn. Mezi další příklady použití žeber patří pozicování dílu při montáži, zajištění lícování, anebo dorazy či vedení pomocných mechanismů. Existují dva typy žeber

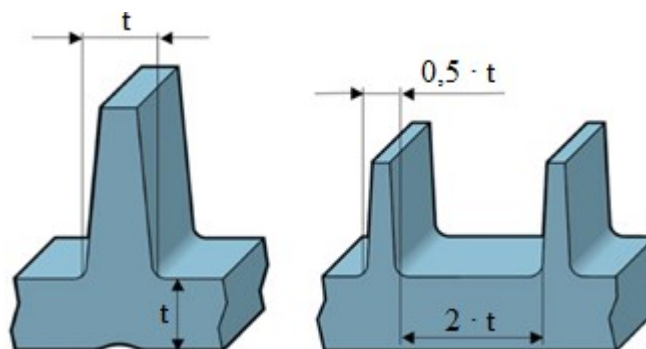
(technické a technologické). Technické zajišťují vyšší pevnost a tuhost, technologické pak optimální plnění dutiny formy a ochranu proti zborcení stěn či vzniku vad [4,12].

Pro správný návrh žebra je nutné vhodně zvolit parametry, jako jsou tloušťka, výška, umístění, počet a vyrobiteľnosť. Tloušťka žebra obvykle ovlivňuje propadliny na protilehlém povrchu dílu. Pro každý materiál tak existují doporučení, jak tlustá žebra mohou být. Například pro PC se jedná o 50 % vzhledem k tloušťce dílu. Žebra musí být navíc navržena s minimálně $0,5^\circ$ úkosem kvůli odformovatelnosti (Obr. 19) [12].



Obrázek 19. Základní rozměry žebra [12].

Aby bylo zabráněno možným problémům s plněním formy, odvzdušněním nebo odformováním, žebra by neměla přesáhnout trojnásobek jejich tloušťky u základny. Obecně platí, že vhodnějším řešením je navrhnout větší počet menších žebířků než menší počet větších (Obr. 20). Důležitou zásadou, kterou je nutno dodržet v uvedeném příkladě, je minimální vzdálenost mezi dvěma žebry ve výšce minimálně dvojnásobku tloušťky stěny [12].



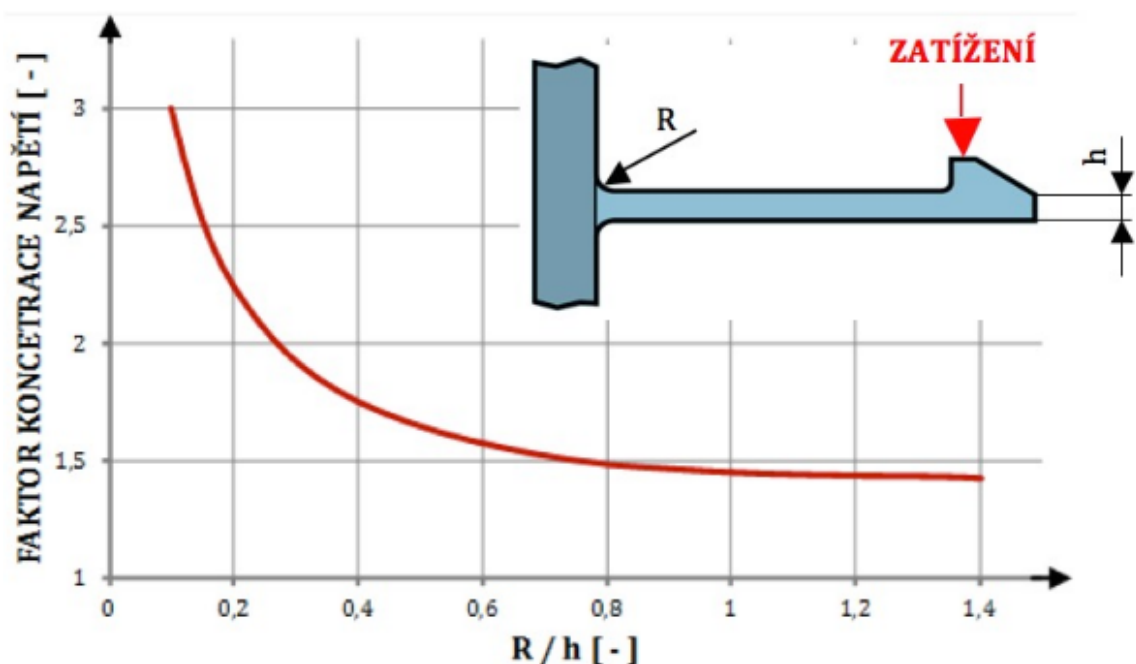
Obrázek 20. Nahrazení vysokého žebra dvěma nižšími [12].

3.4.6 Ostré hrany

Výrobek z plastu by v ideálním případě neměl mít žádné ostré hrany. Důvodem je, že v oblasti s ostrými hranami vzniká koncentrace napětí, které snižuje mechanickou odolnost

dílu. Na následujícím obrázku (Obr. 21) lze vidět vliv rádiusu na koncentraci napětí. Přidáním rádiusu ke kořenu konzole faktor koncentrace napětí prudce klesá za předpokladu, že poměr rádiusu a tloušťky stěny (R/h) přesáhne 0,2. V případě příliš velkého poměru R/h dochází ke zvětšení tloušťky stěn, což může mít za následek vznik propadlin či staženin. Ideální hodnota poměru mezi rádiusem a tloušťkou stěny je 0,15 [12].

Není doporučeno konstruovat plastový díl, kde jsou automaticky všechny hrany opatřeny rádiusem. Některé oblasti mohou být vlivem rádiusu hůře zaformovatelné, což vede k vyšším nákladům za vstřikovací formu [12].

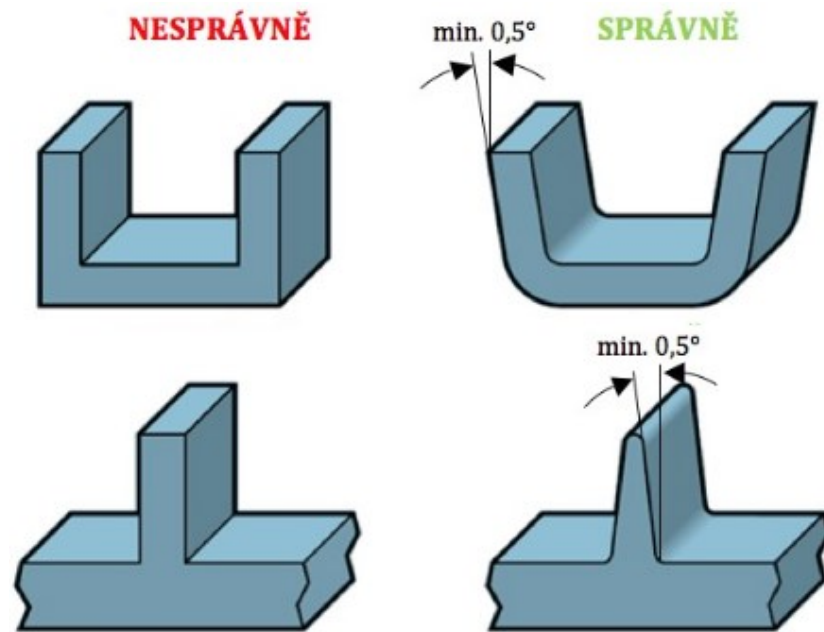


Obrázek 21. Vliv velikosti rádiusu na koncentraci napětí [12].

3.4.7 Úkosy

Úkosy jsou používány především z důvodu lepší odformovatelnosti. Používají se u bočních stěn, žeber, komínků, výztuh apod., které se zužují od základny směrem ke konci. Velikost úkosu je volena dle způsobu zaformování dílu. Úkosy by měly být použity na všech rovnoběžných površích se směrem odformování [12].

Pro většinu materiálů je minimální úkos $0,5^\circ$, avšak například plasty na bázi styren-akrylonitrilů (SAN) vyžadují minimálně $1 \div 2^\circ$. Menší úkosové úhly zvyšují možnost poškození výstřiku při odformování. K eliminaci možného vzniku poškození lze použít speciální úpravu povrchu formy, která ovšem prodlužuje délku výroby a tím zvyšuje cenu výrobku. Příklad správně navrženého úkosu lze vidět na obrázku č. 22. [12].



Obrázek 22. Příklady úkosů [12].

3.5 Využití simulačních softwarů

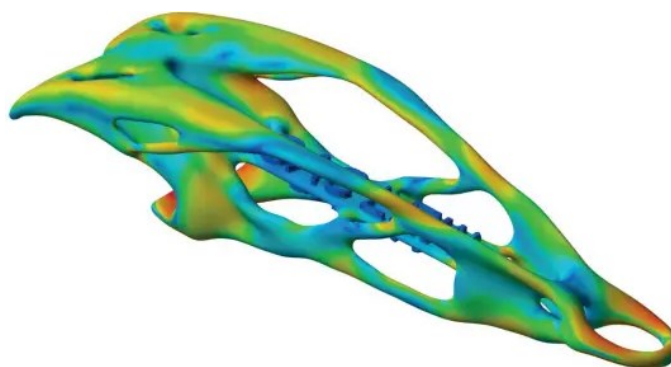
Nedílnou součástí při navrhování plastových dílů je v současnosti využití simulačních softwarů. Jejich správným použitím lze odhadnout chování výsledného dílu a tím zkrátit dobu jeho optimalizace a uvedení na trh. Podíl využití simulací v oblasti návrhu je nejvíce znatelný už ve vývoji výrobku. U mechanicky namáhaných dílů lze predikovat chování materiálu při zatížení. U vstřikovaných výrobků je zase možné predikovat široké spektrum parametrů vedoucích ke snížení celkové ceny a dosažení požadovaných vlastností [31,32].

3.5.1 Ansys Mechanical Enterprise 2023

Jedná se o simulační nástroj, který umožňuje řešit složité konstrukční problémy a dělat rychlejší a přesnější rozhodnutí při návrhu dílu. Jde o program využívající analýzu metodou konečných prvků (FEA), který lze využít pro řešení lineárních i nelineárních strukturálních úloh včetně hodnocení únavové životnosti, výpočtů vzpěrné stability, dynamické analýzy (modální, harmonické, spektrální), anebo pro analýzu přechodových dějů, dynamiky rotorů či výpočet dynamiky tuhých těles. Dalším odvětvím jsou teplotní úlohy (ustálený stav i časová oblast). Vzájemná interakce těles je zajištěna pomocí pokročilých kontaktních algoritmů. Mezi klíčové vlastnosti programu patří automatická detekce kontaktů, rychlá a přesná analýza prototypů, parametrická analýza, hodnocení únavové životnosti či topologická optimalizace [33].

Příklady využití programu v praxi:

- pevnostní analýza strojních dílů (převodovky, podvozky, ložiska),
- statické výpočty ve stavebnictví (schodiště, mosty, tunely),
- analýza vlastních tvarů (turbín, budov, rámu strojů),
- pokročilá analýza gumových dílů (plastů a kompozitů),
- zvýšení spolehlivosti (ventilů a regulátorů),
- pohyblivé mechanismy (jeřáby, roboti),
- simulace nárazů a pádových zkoušek [33].



Obrázek 23. Příklad analyzovaného dílu [33].

3.5.2 Autodesk Moldflow

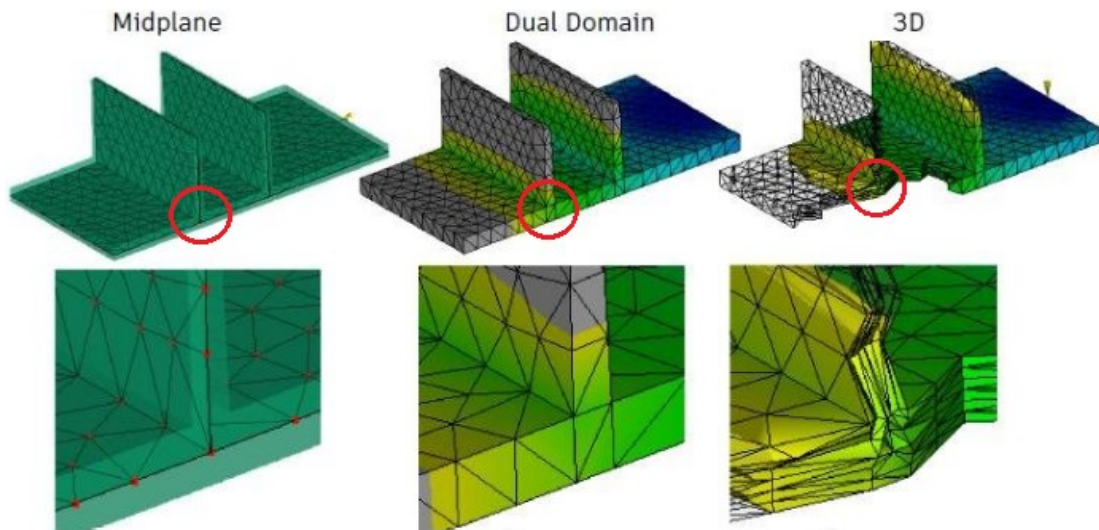
Simulační software, který napomáhá výrobcům predikovat, vyhodnotit a optimalizovat technologický design plastových dílů a vstřikovacích forem. Program je vybaven širokým spektrem simulací, jako je například simulace vtokového systému, toku tekutého plastu, chlazení formy, smrštění a deformace nebo simulace specializovaných lisovacích procesů. Program nabízí taktéž obsáhlou databázi vstřikovatelných materiálů s přesnými údaji [35].

Program dokáže pracovat se třemi druhy sítí:

- **2D síť (midplane)** – nejjednodušší způsob výpočtu. Síť je tvořena trojúhelníkovými elementy. 3D model je zde popisován jako 2D rovinná plocha vedoucí středem tloušťky tělesa. Rovině je přiřazována tloušťka tělesa. Síť se používá především pro tenkostěnné vstřikované díly [36].
- **2,5D síť (dual-domain)** – přesnější a nejčastěji používaný způsob výpočtu. Síť je tvořena na povrchu dílu trojúhelníkovými elementy. Rozdíl proti střední rovině

používané u 2D sítě je dán tím, že tloušťka stěny dílu je definována vzdáleností mezi prvky [36].

- **3D síť (tetrahedral)** – nejpřesnější a nejnáročnější způsob výpočtu. Je vytvořena pravidelná prostorová síť z prostorových elementů (čtyřstěnnů) v celém objemu dílu. 3D síť se používá pro robustní nebo tlustostěnné díly [36].



Obrázek 24. Používané sítě v Moldlow [34].

Program bývá nejčastěji využíván k celkové analýze procesu vstřikování, která se označuje zkratkou CFPW (Cool + Fill + Pack + Warp), což v překladu znamená analýza chlazení, plnění, dotlaku a deformace [36].

- **Analýza chlazení (COOL)** – vyhodnocuje účinnost chladicího systému, který zásadně ovlivňuje rozměry výstřiku, vznik deformací či povrchovou kvalitu dílu.
- **Analýza plnění (FILL)** – analýza plnění dutiny formy taveninou. Simulace umožňuje dosáhnout rovnoměrného zaplnění dutiny, což vede ke snížení počtu vadných kusů, eliminaci studených spojů či vzduchových vad.
- **Analýza dotlaku (PACK)** – analýza dokáže určit velikost optimálního dotlaku, díky čemuž lze efektivně předejít deformacím, anebo defektům na vstřikovaném díle, jako jsou např. propadliny.
- **Analýza deformací (WARP)** – analýza dokáže predikovat vznik deformací a smršťení. Znalostí výsledků lze tyto nežádoucí jevy minimalizovat a měnit, např. změnou konstrukce výrobku, chladicího okruhu nebo procesními parametry [36].

3.6 Prototypování

V dnešní době se prototypování dílů za pomoci 3D tisků těší obrovské oblibě. Od konce devadesátých let, kdy vznikla první komerční 3D tiskárna, se technologie 3D tisku rozrostla o spoustu nových tiskových metod a postupů. Díky tomu lze tisknout širokou škálu materiálů, ze kterých je možné vyrobit i velmi složité a komplexní tvary. Metoda 3D tisku zároveň umožňuje významné snížení doby trvání výroby prvního prototypu nebo ověřit změnu již vyráběného výrobku. Některé tiskové metody dokážou vyrobit prototypový díl srovnatelný s požadovaným finálním výrobkem. V jiném případě zase vytištěný 3D model slouží k výrobě silikonové formy pro vakuové lití, anebo je možné tisknout tvarové vložky do vstřikovacích forem. Běžné metody 3D tisku a vakuového lití jsou rozebírány níže [30].

Prototypování s technologií 3D tisku nabízí širokou škálu možností praktického využití v oblasti vstřikování termoplastů jako např.:

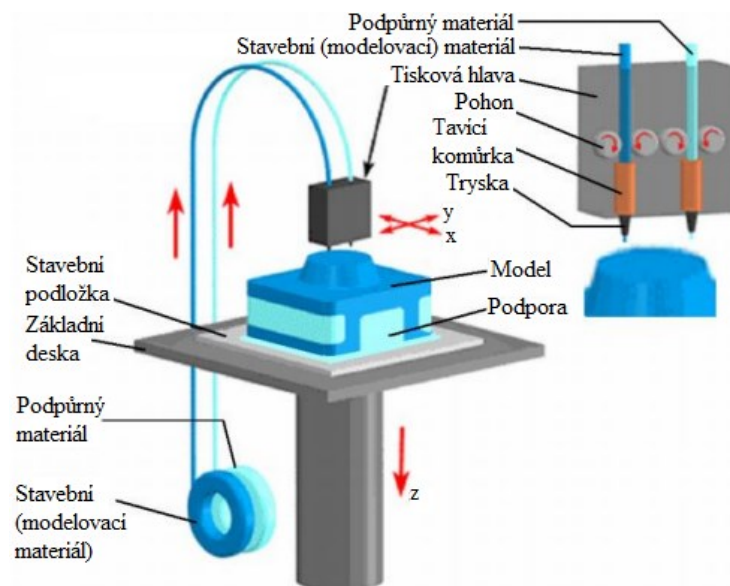
- prostorové zobrazení složitých 3D tvarů,
- ověření vyrobiteľnosti a smontovatelnosti,
- nalezení chyb designéra či konstruktéra výrobku,
- optimalizace tvaru,
- ověření vzhledových vlastností,
- výroba master 3D modelu pro výrobu odlévacích forem,
- výroba funkčních dílů pro první testování [30].

V určitých případech může být využití 3D technologií nevhodné. Pokud je například nutné ověřit mechanické vlastnosti výrobku, který má být použit v sériové výrobě a vyráběn vstřikováním, je výroba dílu 3D tiskem nevhodná. Polymerní materiály využívané v aditivních technologiích mají od vstřiku výrazně odlišnou nadmolekulární strukturu, a tudíž i výsledné vlastnosti. Proto se k výrobě prototypových vstřiků využívají různé druhy prototypových forem, které mají různá zjednodušení vedoucí ke snížení jejich ceny. Jako příklad lze uvést nahrazení mechanicky nebo hydraulicky ovládaných čelistí, jader apod., použitím ručně vkládaných tvarových dílů. Ty jsou po vstříknutí vyhozeny z formy spolu s vstřikem a po demontáži z vstřiku jsou opět vloženy do tvarové dutiny formy. Prototypové formy jsou obvykle vyráběny z hliníkových slitin [30].

3.6.1 3D tisk metodou FDM

Nejběžnější typ 3D tisku s označením FDM (Fused Deposition Modeling – modelování depozicí taveniny). Tiskárny FDM pracují na principu vrstvení materiálu. Z jednotlivých vrstev pak vzniká výsledný díl. Principem funkce je přivádění tenkého plastového vlákna do extrudéru, kde je pomocí vysoké teploty kolem 200 °C roztaven.

3D tiskárna je řízena pomocí digitálního souboru z počítače. Obvykle je CAD model požadovaného objektu převeden do univerzálního souboru *STL. Tento soubor se importuje do příslušného softwaru, který model rozdělí na vrstvy dle zadaných parametrů, jako jsou výška vrstvy, barva, rychlost tisku, maximální tisková plocha apod. Výhodou FDM tisku je široká škála použitelných materiálů v různých barvách a s různými vlastnostmi [37].



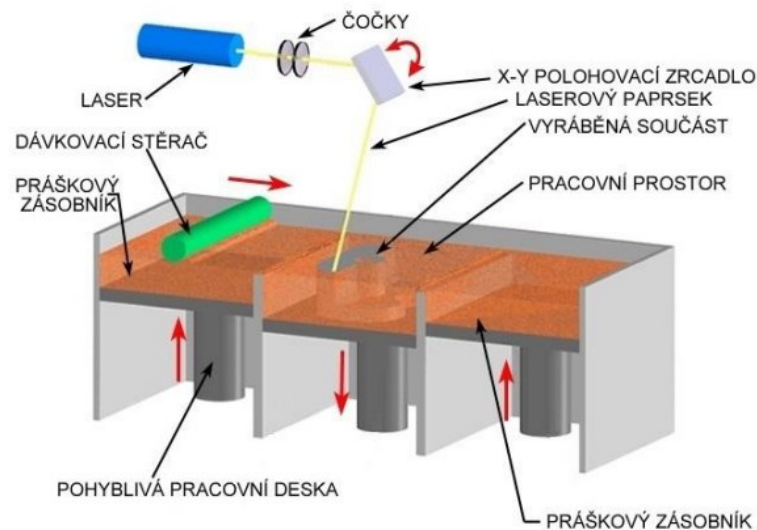
Obrázek 25. Princip metody FDM [38].

3.6.2 3D tisk metodou SLS

Technologie SLS (Selective Laser Sintering) se vyznačuje rychlou a přesnou výrobou. SLS používá k výrobě prototypů CO2 laser, který na základě 3D modelu spéká polymerní prášek do požadovaného tvaru [41].

Proces tisku probíhá ve výrobní komoře, ve které je po celé ploše postupně nanášen prášek ve vrstvách. Laser v každé vrstvě speče a vytvrdí přesně definovaná místa podle tvaru průřezu dílu. Zbývající okolní prášek, který po celou dobu slouží jako opora pro vypálený díl, zůstane v nezměněné formě a je po dokončení výrobního procesu plně recyklován. Výhodami SLS tisku je dobrý poměr ceny a kvality, dobré mechanické vlastnosti a tisk bez

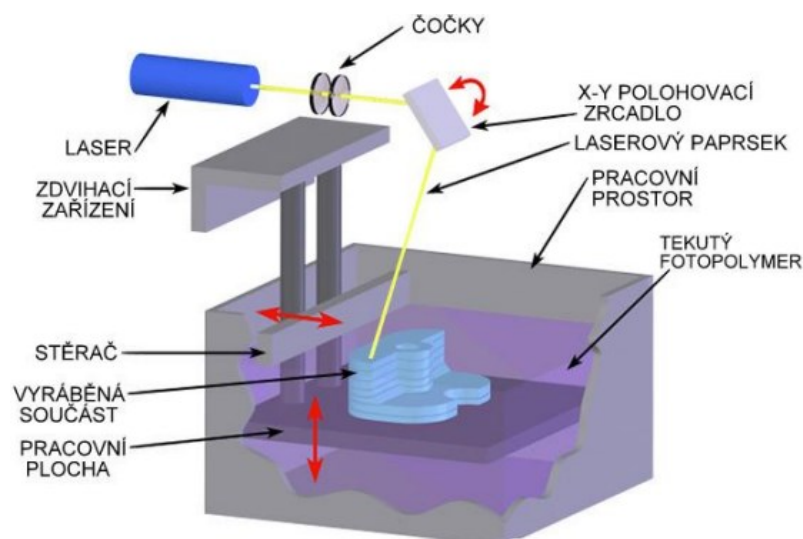
dodatečných podpor. Vhodná metoda pro malosériovou, zaváděcí i zakázkovou výrobu [41].



Obrázek 26. Princip metody SLS [39].

3.6.3 3D tisk metodou SLA

SLA neboli stereolitografie je nejrozšířenější technologií aditivní výroby. Vstupním materiálem je fotocitlivá polymerní pryskyřice (fotopolymer) v tekuté formě, která je vrstvu po vrstvě vytvrzována pomocí UV laserového paprsku. Díly vyrobené metodou SLA jsou izotropní, vodotěsné, hladké a velmi přesné. Technologie je vhodná díky vysoké míře detailů a kvalitě povrchu pro prototypování designových dílů, dále pro kusovou výrobu a extrémně rychlé prototypování. Velkou výhodou je možnost tisku transparentního materiálu, což je vhodné např. pro díly do automobilového průmyslu s optickými plochami či průhledná pouzdra světlometů [41].



Obrázek 27. Princip metody SLA [40].

3.6.4 3D tisk metodou SAF

Technologie Selective Absorption Fusion (SAF) je nová průmyslová technologie aditivní výroby, která zajišťuje výrobní kapacitu koncových dílů na úrovni sériové výroby. Využívá protiběžný rotující válec k nanášení práškových vrstev na tiskovou podložku a tryská absorpční kapalinu k vyznačení vrstev dílu. Znázorněné vrstvy jsou spojovány působením infračervené lampy v celé šíři tiskové podložky. Metoda je vhodná pro průmyslovou výrobu plastových dílů a vyznačuje se vysokou rychlostí tisku s kvalitním hladkým povrchem a přesnými rozměry [48].

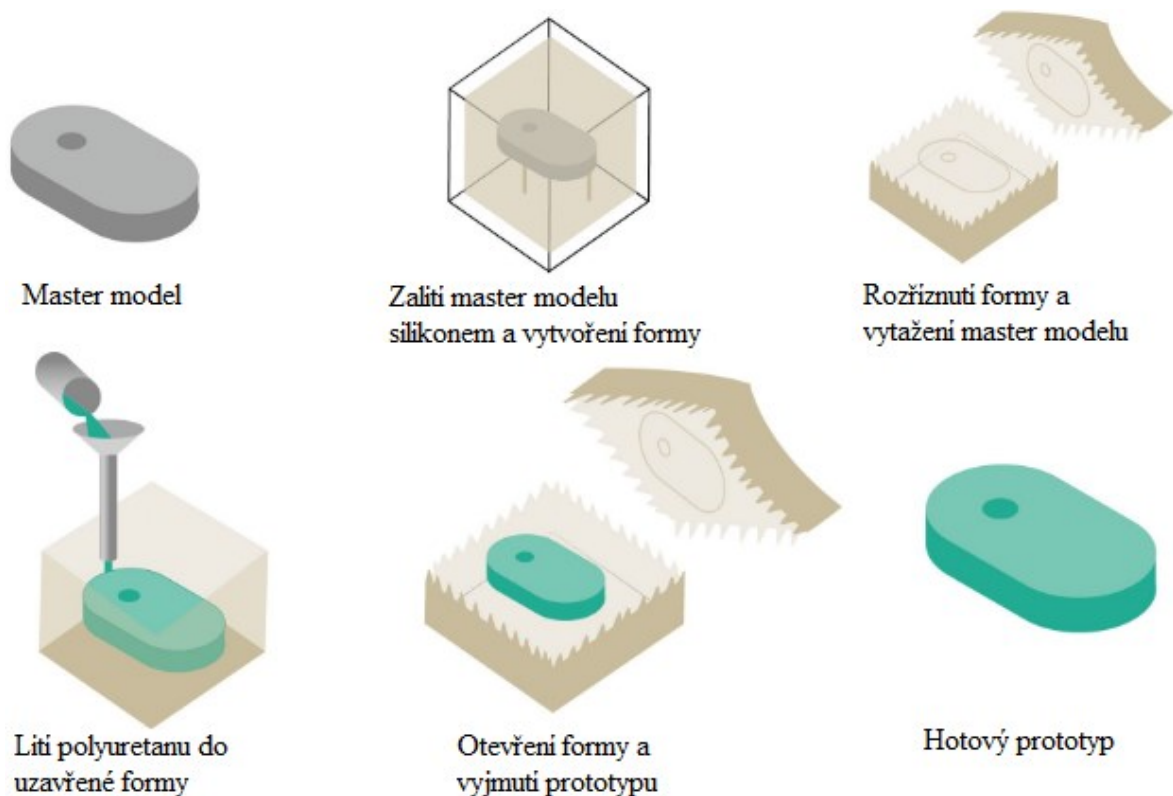


Obrázek 28. Vyrobené díly metodou SAF [48].

3.6.5 Vakuové lití

Jedná se o velmi rychlou a přesnou výrobu funkčních prototypových dílů. Technologie vakuového lití do silikonových forem byla vynalezena v šedesátých letech v NDR. Duplikování dílů pomocí vakuového lití spočívá ve výrobě master modelu na 3D tiskárnách, nebo CNC strojích. Poté je model zalit do silikonového kaučuku. Po ztuhnutí je master model ze silikonu vyříznut, čímž vznikne silikonová forma pro odlévání. Následně může být forma vložena do stroje na vakuové lití a vakuovým vstřikováním naplněna polyuretanovou směsí. Když směs ztuhne, díl je vyjmut a forma může být použita znovu [42,43].

Výhodou vakuového lití je široká škála ekvivalentních materiálů téměř všech průmyslových plastů a elastomerů. Lití dále disponuje možností výroby velmi složitých dílů, tenkostěnných modelů s negativními úkoly. Metoda se řadí mezi technologie rapid prototyping, kdy lze rychle získat funkční prototyp za nižší cenu v porovnání se vstřikováním plastů. Princip metody vakuového lití znázorňuje následující obrázek (Obr. 29) [42,43].



Obrázek 29. Princip vakuového lití [44].

3.7 Lepení plastových dílů

Jedná se o nerozebíratelný spoj dvou a více dílů, které mohou být ze stejného nebo odlišného materiálu. Aby došlo k úspěšnému vytvoření lepeného spoje, musí mít lepidlo dobrou adhezi k oběma lepeným materiálům. Pevnost lepeného spoje je ovlivňována několika faktory:

- adhezí mezi lepeným povrchem a lepidlem,
- kohezí (soudržnosti) lepidla,
- smáčivostí lepeného povrchu,
- pevností lepeného materiálu [45].

Lepení materiálů v současnosti nahrazuje např. svařování, či nýtování. Výhodou lepeného spoje vůči uvedeným technologiím je například nižší celková hmotnost, jednoduchost či možnost spojovat různé druhy materiálů [45].

Pro lepení plastových dílů lze použít celou řadu lepidel, ať už polární nebo nepolární, chemická (epoxidová), polyuretanová, silikonová, dvoukomponentní či UV lepidla apod. K lepení plastů lze použít taktéž oboustrannou lepicí pásku [47].

3.7.1 Zásady lepení

Pro vytvoření kvalitního lepeného spoje je nutné dosáhnout co nejlepší adheze mezi lepidlem a lepeným povrchem. Proto je velmi důležité plochu před nanesením lepidla důkladně očistit a odmastit. K odmašťování se používají rozpouštědla, které se po očištění odpaří. Ke zlepšení adheze lze použít i moření povrchu, kdy dojde pomocí kyselin či zásaditých chemikálií k naleptání povrchu. Vzniknou dutinky pro lepší mechanické zachycení lepidla. Dalším důležitým aspektem je smáčivost lepeného povrchu lepidlem. Polární povrch je nutné lepit polárním lepidlem a naopak. V některých případech, kdy je nízké povrchové napětí, lze použít ke zlepšení adheze povrchově aktivní látky (primery) [46].

3.7.2 Primer

Primer je nátěr zlepšující adhezi mezi lepidlem a lepeným materiálem. Je tvořen chemickými látkami rozptýlenými v rozpouštědle. Aplikace primeru probíhá pomocí štětce nebo nástřikem na očištěný a odmaštěný povrch. Po nanesení je nutné nechat látku odvětrat, aby došlo k odpaření rozpouštědla a na lepeném povrchu zůstaly jen aktivní prvky. Tyto prvky mají dvě funkce. Jednou z nich je reakce soustavy aktivních látek s povrchem a tou druhou zvyšování afinity k lepidlu [46].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je konstrukce transparentního plastového madla splňujícího celou řadu požadovaných vlastností, které jsou detailně rozebírány v kapitole 6. Stěžejním bodem práce je však navrhnutí funkčního závaku plastového madla, které bude nacvakáváno na plastovou podložku přilepenou na skleněných dveřích pomocí oboustranné, transparentní lepicí pásky. Závak musí splňovat dvě základní funkce:

1. při nacvaknutí nesmí dojít k poškození žádného dílu,
2. při vycvaknutí musí dojít k poškození madla, přičemž podložka musí zůstat na skle bez poškození.

Díl musí být kvůli pořizovací ceně vyrobitelný pomocí technologie vstřikování a připraven pro uvedení do sériové výroby.

K dosažení těchto požadavků je proto nutné provést následující kroky:

- zvolit vhodné konstrukční, transparentní materiály madla a podložky,
- navrhnout vhodnou geometrii závaku pomocí numerické simulace,
- ověřit vyrobitelnost vstřikováním,
- vyrobit prototypy, ověřit funkčnost sestavy a případně provést korekci dílů,
- vytvořit výrobní výkresy a montážní návod,
- vyrobit díl madla a podložky pro sériovou výrobu.
- cena výrobního kompletu i s aplikací nesmí přesáhnout 5 €.

Výsledkem praktické části by měl být funkční díl madla připravený pro sériovou výrobu pomocí technologie vstřikování. Podložka pro madlo bude přichystána tak, aby byla vyrobitelná vstřikováním či konvenčním obráběním. Madlo s podložkou musí tvořit funkční komplet dle zadaných parametrů. Hlavním výstupem této práce budou výrobní výkresy madla a podložky společně s montážním návodem, které budou splňovat všechna požadovaná kritéria.

5 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

V současné době je v průmyslu zabývajícím se chladicími a mrazicími boxy jednoznačný trend a tím je maximální možná transparentnost dveří tak, aby zorné pole pro prohlížení zboží zákazníkem v obchodě bylo co největší. Z uvedeného důvodu jsou v současnou chvíli na ústupu veškeré netransparentní prvky dveří jako jsou madla, distanční rámy mezi skly, lepicí tmely či potisky. Uvedené faktory jsou hlavním důvodem k výrobě nového transparentního plastového madla, které splní požadavky dle aktuálních trendů.

Na trhu existuje nespočet transparentních plastových madel, které jsou na skleněné dveře do mrazících a chladících boxů připevňovány různými způsoby. Jedná se o spoje vytvořené pomocí UV či dvoukomponentních lepidel, oboustranných lepicích pásek (transparentních i netransparentních) a v neposlední řadě také pomocí šroubových spojů skrz sklo dveří. Zaměříme-li se pouze na typ, který je založen na naklikávání transparentního plastového madla v kombinaci s transparentním lepeným spojem, nabídka takových výrobků na trhu se zúží na jednoho výrobce.

Jedná se o rakouskou firmu vyrábějící madlo z PMMA, které je vyrobené vstřikováním a nacvakáváno na skleněnou podložku přilepenou na sklo dveří pomocí UV-lepidla (Obr. 30). Z technického hlediska se jedná o velmi účinný způsob řešení lepeného spoje, jelikož spoj mezi skleněnou podložkou a sklem dveří pomocí UV-lepidla vykazuje výborné mechanické vlastnosti. Způsob tohoto řešení je však chráněn evropským patentem.



Obrázek 30. Nacvakávací madlo rakouské společnosti [49].

Jelikož je výrobek patentově chráněn, bylo potřeba vymyslet nový tvar madla, podložky, způsobu zácvaku i lepeného spoje tak, aby nedošlo k porušení patentové ochrany. Na základě výše uvedeného byl pro tento projekt proveden designerský návrh od renomované německé firmy (Obr. 31), který sloužil jako podklad pro finální návrh celého kompletu.



Obrázek 31. Návrh designerské firmy.

Tím, že se jednalo pouze o návrh designu, tak madlo muselo projít celou škálou úprav a optimalizací, jako např. změna rozměrů, vývoj zácvaků, přidání prvků pro výrobu vstřikováním, odstranění ostrých hran (které byly nahrazeny rádiusy) aj. Zachovány však musely zůstat všechny signifikantní rysy daného návrhu.

6 POPIS A FUNKCE VÝROBKU

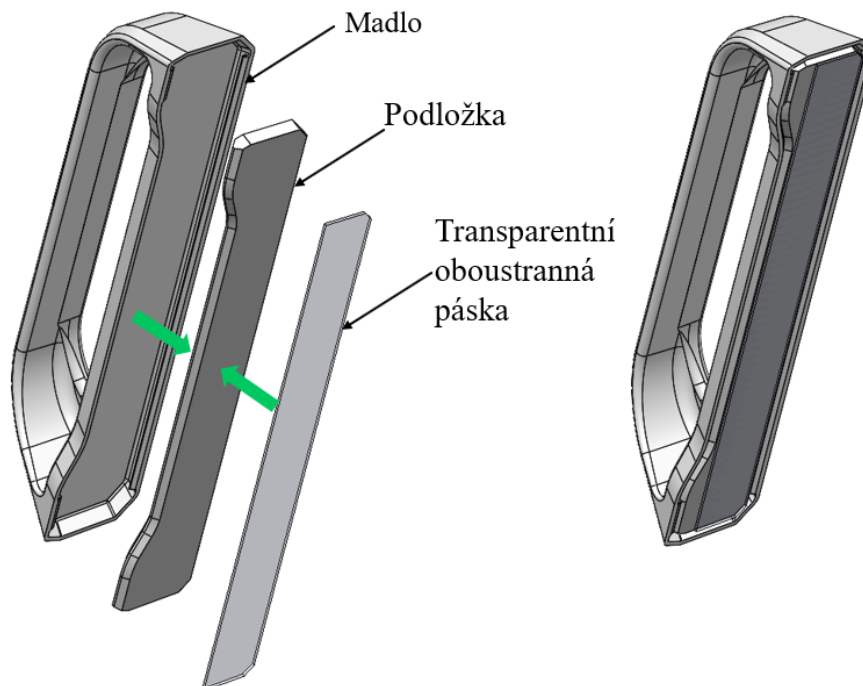
Jak již bylo uvedeno, hlavní náplní praktické části diplomové práce je konstrukce a výroba nacvakávacího plastového madla s podložkou společně s vývojem funkčního zácvaku. Madlo je určeno pro skleněné dveře na chladicí a mrazicí boxy v supermarketech, kde bude denně docházet k intenzivnímu namáhání, a proto je potřeba, aby madlo bylo mechanicky odolné, oděru vzdorné a nezůstávaly na něm otisky prstů a další nečistoty. Hlavními benefity navrhovaného řešení jsou především úspora místa při transportu dveří a snazší servis poškozených madel. Nároky na sestavu madla jsou z těchto důvodů velmi detailně a obsáhle konkretizovány.

Seznam požadavků je uveden níže a dále detailně rozebírán v kapitolách 6.1 a 6.2:

- všechny použité materiály musí být transparentní,
- madlo musí disponovat povrchovou úpravou dotykových ploch,
- madlo musí splňovat ergonomické požadavky,
- síla při nácvakování madla nesmí být vyšší jak 250 N,
- síla při výcvaku (poškození) madla nesmí být nižší jak 380 N,
- síla lepeného spoje musí být vyšší jak 550 N staticky (krátkodobě) a 30 J dynamicky,
- úspora místa při transportu,
- jednoduchá montáž a servis.

6.1 Sestava madla

Jak již bylo zmíněno, tak praktická část diplomové práce se nezaobírá pouze jedním dílem, nýbrž návrhem funkční sestavy tvořené ze třech komponent (Obr. 32). Jedná se o návrh madla a podložky a volbu vhodné transparentní oboustranné lepicí pásky spolu s primerem, která zajistí dostatečné upevnění podložky na sklo.



Obrázek 32. Sestava madla.

6.2 Požadované vlastnosti dílů a sestavy

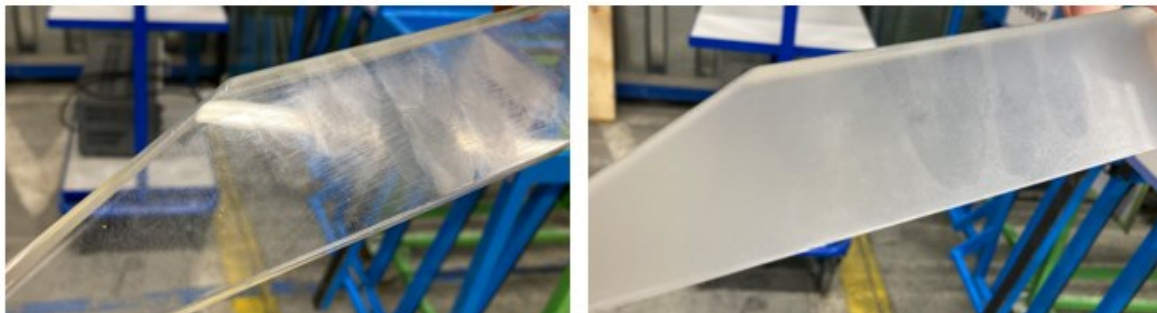
Sestava madla by měla být vyráběna ročně v řádech deseti tisíců kusů. Po uvedení do sériové výroby je v prvním roce počítáno s 20 000 kusy a v dalších letech by měly počty kusů růst. Proto je celý komplet detailně popsán a specifikován. Nutno podotknout, že všechny požadavky zadavatele byly definovány v obecné rovině a technické provedení, volba materiálu, vyrobitelnost apod. byly v gesci konstruktéra. Jednotlivé body zadání jsou popisovány v následujících podkapitolách (Kap. 6.2.1-6.2.6).

6.2.1 Transparentnost a povrchová úprava

Jelikož se jedná o pohledový díl, bylo již na začátku projektu zadáno, že celá sestava musí být vyhotovena z transparentních materiálů tak, aby splňovala aktuální trend madel ve světě, design byl nadčasový a co nejméně rušivý na skleněných transparentních dveřích. Proto bylo cílem vyrábět oba plastové díly v zrcadlovém lesku. Během vývoje výrobního kompletu však docházelo k mnoha změnám a ústupkům. Na široké škále polotovarů byla testována náchylnost k poškrábání, zachytávání nečistot, mastnoty či otisků prstů a následně vyhodnocována jejich viditelnost.

Po testování bylo zjištěno, že na zrcadlově lesklých dílech je viditelnost výše uvedených nežádoucích jevů výrazně vyšší než u dílů s povrchovou úpravou (Obr. 33). Na základě

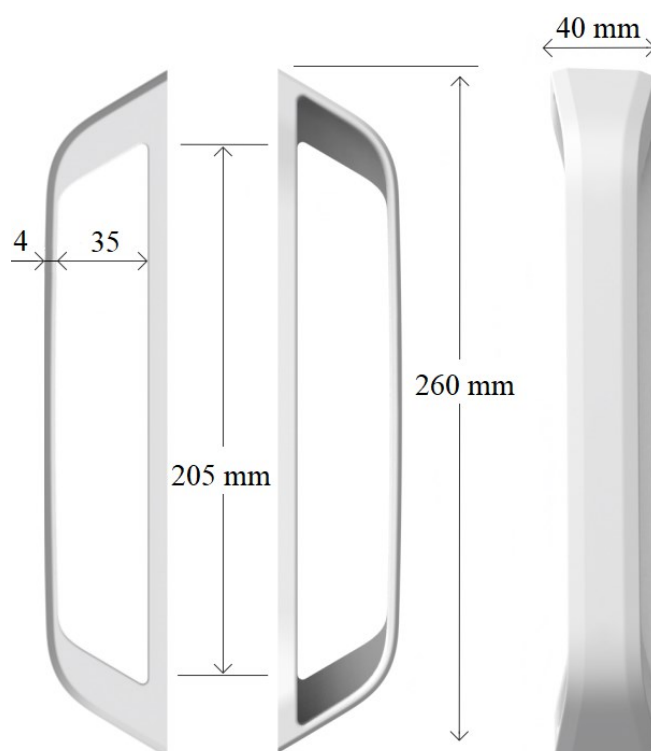
získaných výsledků proto bylo rozhodnuto o povrchové úpravě všech pohledových ploch madla. Povrchová úprava bylo zvolena dle mezinárodní normy VDI 3400 pro strukturování matných povrchů forem s konkrétním označením VDI-24.



Obrázek 33. Porovnání vzhledových vlastností.

6.2.2 Velikost madla a ergonomické požadavky

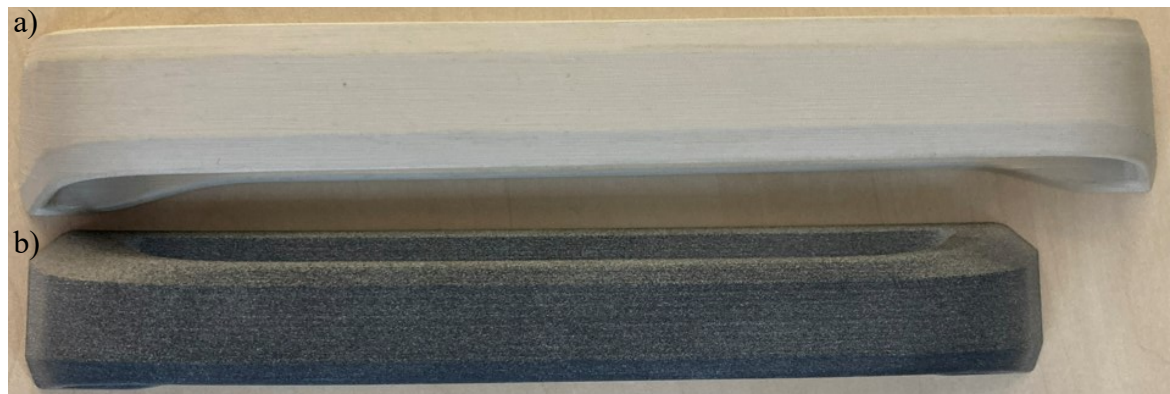
Další nezbytnou částí při návrhu madla byla jeho ergonomie a velikost. Díl, který budou zákazníci denně chytat rukou, nesmí mít žádné ostré hrany. Úchopová část musí být pevná, oblá s dostatečným prostorem pro uchopení. K ověření ergonomie byly prototypy vyrobeny pomocí 3D tisku. Po obdržení madla od návrhářské firmy bylo nutné provést hned několik zásadních změn. První z nich byla změna celkových rozměrů. Navržené madlo mělo rozměry d. x š. x v. 260 x 40 x 48 mm (Obr. 34).



Obrázek 34. Původní navržené rozměry.

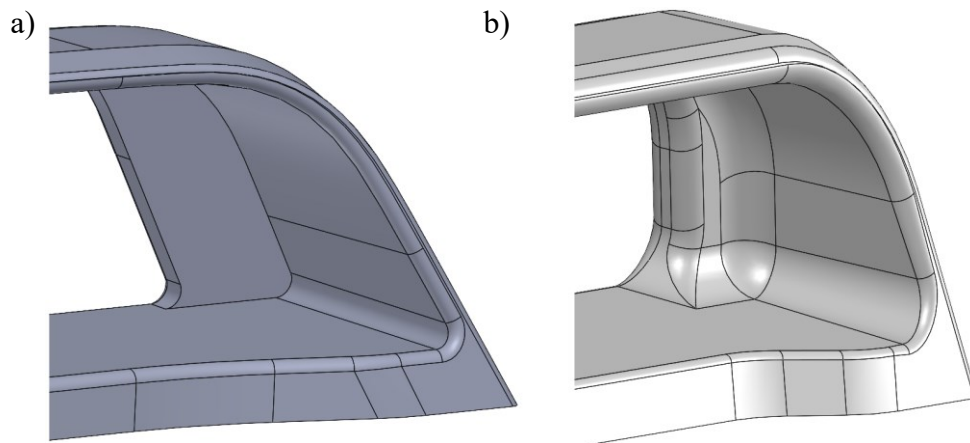
Především celková délka madla byla příliš velká. Madlo po aplikaci na dveře vypadalo robustně a zároveň úchopová část se při snaze o nacvaknutí výrazně prohýbala, což vedlo až k mechanickému poškození materiálu. Došlo tedy ke zkrácení délky o 25 mm. Výška madla se snížila o 2 mm na celkových 46 mm. Zásadní roli však hrál rozměr šířky základny. Oproti původní velikosti došlo k zúžení na 36 mm, přičemž muselo být vzato v potaz hned několik parametrů. Zásadní podmínkou bylo, aby se do základny madla vešly funkční geometrické tvary (zácvaky) tak, aby bylo možno madlo nakliknout na podložku a všechny stěny základny byly zároveň dostatečně silné. V neposlední řadě bylo nutné, aby celková velikost podložky umožnila aplikaci oboustranné lepicí pásky v minimální šířce 19 mm. Všechny podmínky se nakonec podařilo splnit, a dokonce vznikl prostor pro pásku o šířce 22 mm.

Dalším důležitým faktorem při návrhu byl tvar a pevnost úchopové části v kombinaci s dostatečným prostorem pro ruku mezi úchopem a základnou madla. Tato kritická oblast se po vytisknutí prvních prototypů ukázala jako nevhodná. Tloušťka úchopu musela být navýšena o dva milimetry na celkových 6 mm, protože původní rozměr byl příliš tenký, měkký a zároveň při stisknutí působil v ruce nepohodlně až ostře. Kromě zmiňovaného navýšení tloušťky došlo ke zvětšení rádiusů na hranách na minimálně 2 mm. Poslední rozměrovou změnou bylo navýšení prostoru mezi úchopem a základnou madla o 1,5 mm pro lepší komfort při uchopení rukou.



Obrázek 35. Design madla: a) původní návrh, b) upravený návrh.

Při návrhu madla bylo taktéž zohledněno jeho budoucí čištění. Na sériovém dílu nesměly zůstat žádné oblasti, které by byly nečistitelné. Proto byla všechna místa mezi úchopem a základnou madla navržena s dostatečně velkými rádiusy a bez ostrých hran pro pohodlné čištění (Obr. 36).

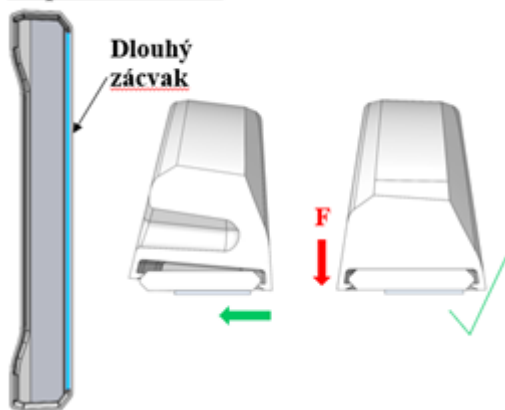


Obrázek 36. Čistitelné oblasti madla: a) původní návrh, b) upravený návrh.

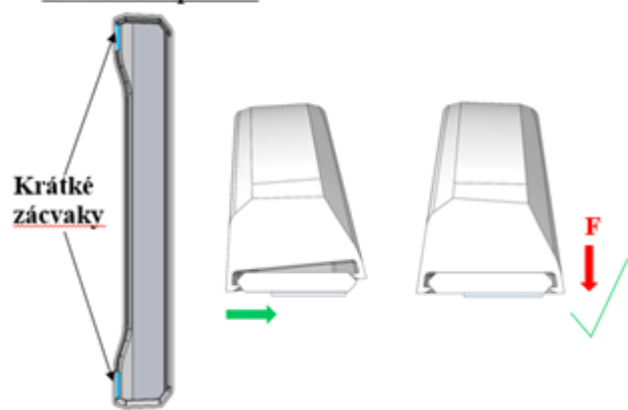
6.2.3 Požadované síly a varianty zácvaků

Požadované síly potřebné k nacvaknutí či vycvaknutí madla a varianty zácvaků jsou stěžejním bodem diplomové práce. Aby bylo dosaženo ideální funkce celého výrobního kompletu je nutné, aby madlo bylo snadno nacvaknutelné a zároveň nevycvaknutelné bez poškození materiálu. Další důležitým aspektem je nacvaknutelnost madla z obou stran, respektive jak přes dva krátké zácvaků, tak jeden dlouhý. Je to z důvodu univerzality, aby nemuselo být při montáži rozlišováno z jaké strany musí být madlo nasunuto a zacvaknuto.

- Zprava doleva:



- Zleva doprava:



Obrázek 37. Požadované varianty zácvaků.

Velikost síly, kterou bude nutno vyvinout při nacvakávání byla definována na max. 250 N. Jak již bylo zmíněno výše, při nacvaknutí madla nesmí dojít k poškození žádného dílu. Naopak při vycvaknutí musí dojít k poškození madla, nikoliv však podložky či oboustranné lepicí pásky. Důvodem proč se nesmí poškodit podložka s lepeným spojem je, aby se po vycvaknutí (zničení) madla dal jednoduše nacvaknout nový kus bez potřeby zásahu servisního technika.

Hodnota síly, které musí madlo odolat při snaze o vycvaknutí, odpovídat minimálně 380 N. Všechny požadované síly byly simulovány pomocí výpočtového programu Ansys Mechanical Enterprise 2023 a po vyrobení prototypů i kusů pro sériovou výrobu byly následně fyzicky ověřeny mechanickými zkouškami (Kap. 8).

6.2.4 Lepený spoj

Výrobce dveří standartně používá lepený spoj, který je vytvořen za využití UV-lepidla ve výrobním závodě. Limitujícím faktorem tohoto řešení je velmi složitá opravitelnost spoje v případě jeho poškození. V současnosti výrobce není schopen při jeho poškození zajistit v místě reklamace vhodnou opravu za pomoci servisního technika. Jednalo by se o velmi komplikovaný zásah za použití fotosenzitivní látky a UV lampy generující ultrafialové záření, které aktivuje chemickou reakci v lepidle a dojde k vytvrzení. Vzhledem ke složitému postupu však není toto řešení akceptovatelné.

K servisu poškozených madel je tak využíváno dvousložkové lepidlo od firmy SIKA s označením SikaFast 555. Toto rychle vytvrzující 2K lepidlo dosahuje požadované vysoké pevnosti spoje až 11 MPa. Zároveň je jednoduché k aplikaci, ale taky velmi drahé. Balení obsahující 10 ml lepidla stojí téměř 700 Kč a ve výchozí konfiguraci je určené pouze pro tři aplikace (dle počtu přibalených hrotů). Což je při servisním zásahu, kdy je použito velmi malé množství lepidla cca 0,25 ml na jedno stávající madlo, finančně velmi neefektivní. Připočteme-li ještě cenu za náklady na servisního technika, který kvůli reklamaci mnohdy cestuje stovky i tisíce kilometrů jedná se o obrovské finanční náklady. Z toho důvodu bude společně s návrhem nového madla navržena i nová koncepce lepeného spoje. Navržené řešení by mělo být ekonomicky výhodnější a vytvořený lepený spoj by měl být dostatečně pevný, snáze opravitelný a transparentní.

Síla lepeného spoje byla určena na základě interních dynamických testů za využití rázové zkoušky na Charpyho kladivu (spoj bude v reálném prostředí zatěžován převážně dynamicky nikoliv staticky). Hodnota, kterou musí vydržet lepený spoj při dynamickém zatížení, je minimálně 30 J. Spoj však bude testován i statickou zkouškou tahem na univerzálním zkušebním stroji s označením TESTOMETRIC M350-10CT, kde hodnota maximální síly, kterou je spoj schopen spoj přenést, musí být vyšší jak 550 N. O testování lepeného spoje pojednává kapitola 8.2.

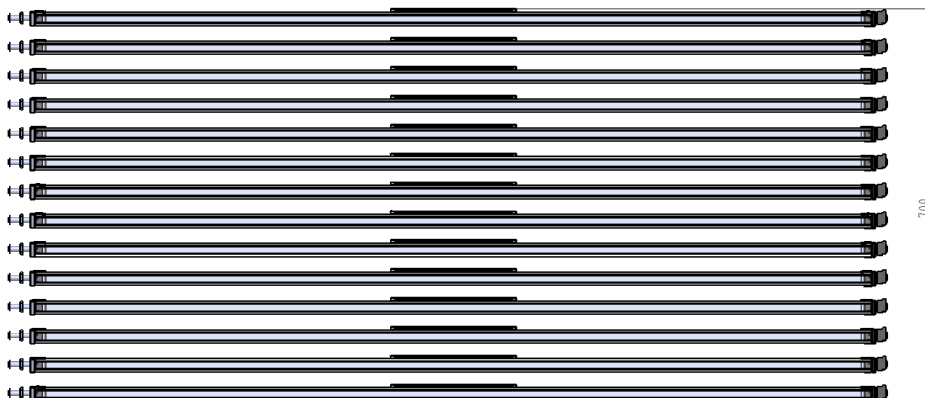
6.2.5 Úspora místa při transportu

Mezi hlavní důvody požadavku na nacvakávací madlo patří především úspora místa při transportu dveří. Výrobce dveří v současné době disponuje pouze dveřmi s nalepenými madly pomocí UV lepidla, které je aplikováno již ve výrobním závodě. Takto zkompletované dveře však mohou být distribuovány po celém světě kvůli rozměrům pouze v počtu deseti kusů v jednom balení. Toto řešení, při celkové výšce současného madla 42,5 mm, vykazuje poměrně značnou část nevyužitého prostoru v balení. Při součtu s tloušťkou dveří (26 mm) se dostáváme k zástavbové výšce v krabici pro jedny dveře s potřebnou rezervou na 70 mm (Obr. 38).



Obrázek 38. Současné balení dveří – 10 ks.

V rámci nového řešení bude na dveřích z výroby nalepená pouze podložka o výšce 5 mm na milimetr tlusté lepicí pásce, což dělá rozdíl u každých dveří 36,5 mm. Z uvedených výpočtů, po zohlednění polystyrenových proložek nutných ke transportu, plyne, že díky novému madlu a způsobu fixace bude možné do jedné krabice vložit o čtyři kusy dveří více (Obr. 39). Což při roční produkci v počtech statisíců dělá obrovskou finanční úsporu jen za transport.



Obrázek 39. Budoucí balení dveří - 14 ks.

6.2.6 Jednoduchá montáž

Snadná montáž madla se řadí k dalším požadavkům projektu. Je nutné, aby nacvaknutí madla bylo jednoduché, zvládnutelné i bez zaškoleného personálu a zároveň bylo zajištěno, že madlo bude vždy nacvaknuto stejně. Což znamená, že způsob nacvaknutí musí splňovat princip poka yoke (vyhnutí se neúmyslné chybě). Tento problém byl vyřešen nesymetrickou podložkou, která svým tvarem definuje, jak musí být madlo nasunuto a zacvaknuto. Zároveň mechanicky zabraňuje jinému způsobu montáže.

6.3 Volba materiálů

Jak již bylo zmiňováno, celá sestava madla včetně lepeného spoje musí splňovat všechny požadované vlastnosti s ohledem na způsob zatěžování a na transparentnost. Proto byly pro jednotlivé díly vyspecifikovány různé materiály, které jsou detailněji rozebírány níže, tak aby bylo dosaženo kvalitního, robustního a funkčního kompletu.

6.3.1 Madlo

Mezi základní požadavky na madlo patří transparentnost s možností budoucí pigmentace, dobrá pevnost, odolnost vůči chemikáliím a stárnutí, ale zároveň také křehkost, která při vycvaknutí madla zajistí lom materiálu. Z těchto důvodů byl k výrobě madla vybrán materiál PMMA, který splňuje všechna požadovaná kritéria. Obchodní název zvoleného materiálu je SUMIPEX LG2 od firmy Sumitomo chemical Europe.

V následující tabulce (Tab. 1) jsou shrnuty základní vlastnosti daného materiálu, které byly použity v numerických simulacích. Detailní informace o materiálu jsou dohledatelné v příloze této práce (P V).

Tabulka 1. Vlastnosti vstřikovaného materiálu SUMIPEX LG2.

Vlastnosti	Popis	Norma	Hodnota	Jednotka
Mechanické	Pevnost v tahu při přetržení	ISO 527-2	68	MPa
	Tažnost	ISO 527-2	2	%
	Pevnost v ohybu	ISO 178	110	MPa
	Modul pružnosti	ISO 178	3 000	MPa
	Mez kluzu	ISO 527-2	60	MPa
	Poissonova konstanta	–	0,30	–
Optické	Propustnost světla	ISO 13468-1	92	%
Další	Hořlavost	UL 94	-	HB

6.3.2 Podložka

Podobně jako u madla byly i v případě podložky hlavními požadavky transparentnost materiálu s možností pigmentace, odolnost proti chemikáliím a stárnutí. Jediným rozdílem byla podmínka, aby na podložce nedocházelo k žádné mechanické deformaci při vycvaknutí madla. Z tohoto důvodu byl zvolen materiál PC, který se vyznačuje velmi dobrou odolností vůči rázům a v porovnání s PMMA není tak křehký. Obchodní název zvoleného materiálu je MAKROLON RW2407 od firmy Covestro AG.

V následující tabulce (Tab. 2) jsou shrnuty vybrané vlastnosti daného materiálu, které byly zároveň použity v numerických simulacích. Detailní informace o materiálu jsou dohledatelné v příloze této práce (P VI).

Tabulka 2. Vlastnosti vstříkovaného materiálu MAKROLON RW2407.

Vlastnosti	Popis	Norma	Hodnota	Jednotka
Mechanické	Pevnost v tahu při přetržení	ISO 527-2	80	MPa
	Tažnost	ISO 527-2	50	%
	Pevnost v ohybu	ISO 178	96	MPa
	Modul pružnosti	ISO 178	2 600	MPa
	Mez kluzu	ISO 527-2	75	Mpa
	Poissonova konstanta	–	0,30	–
Optické	Propustnost světla	JIS 8722	96	%
Další	Hořlavost	UL 94	-	HB

6.3.3 Transparentní oboustranná lepicí páska + primer

Jako náhrada stávajícího lepeného spoje pomocí UV lepidla byl zvolen způsob řešení pomocí oboustranné transparentní akrylové lepicí pásky o rozměru 22 x 1 mm (Obr. 40). Páska s označením VHB 4910-F bude aplikována v kombinaci s primerem s označením 94, který zlepší adhezi mezi lepidlem a lepeným materiálem a tím zvýší pevnost spoje. Akrylová oboustranná lepicí páska se ukázala jako dobrá varianta, jelikož je vhodná pro lepení plastů i skla. Zároveň je jednoduchá k aplikaci, odolává nárazům, žloutnutí vlivem UV záření, má vysokou pevnost, dlouhou trvanlivost a nízkou pořizovací cenu.



Obrázek 40. Oboustranná páska VHB 4910-F a Primer 94.

Tloušťka pásky byla zvolena na základě vypracování toleranční analýzy, ve které byly zohledněny jak teplotní roztažnosti daných materiálů, tak i možné průhyby na dveřích. Výsledkem analýzy bylo zjištěno, že vhodná tloušťka pásky odpovídá právě hodnotě 1 mm.

V následující tabulce (Tab. 3) jsou shrnuty základní vlastnosti zvolené pásky. Detailní informace o pásce jsou dohledatelné v příloze této práce (P VII).

Tabulka 3. Vlastnosti oboustranné akrylové lepicí pásky VHB 4910-F.

Popis	Hodnota	Jednotka
Tloušťka pásky (lepidlo + nosná vrstva)	1,13	mm
Šířka pásky	22	mm
Hustota pásky	960	kg/m ³
Pevnost v tahu	69	N/cm ²
Teplotní odolnost po dobu hodin	150	°C
Teplotní odolnost po dobu dnů / týdnů	93	°C
Minimální odolnost proti UV záření	346	h

Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností lepeného spoje je třeba dodržet správný postup při aplikaci pásky a primeru. Je nezbytné očistit, odmastit a vysušit lepené povrchy. Poté se na povrch polykarbonátové podložky v celé ploše nanese tenký film primeru a krátce nechá odvětrat. Následuje aplikace pásky, v rámci které je pro dosažení požadované kvality spoje nutné vystavit pásku přítlaku (o minimální hodnotě 2 kg/cm²). V dalším kroku se plynulým pohybem odstraní snímatelná krycí vrstva a podložka se nalepí na povrch dveří. K dosažení konečné pevnosti spoje dochází po 72 hodinách.

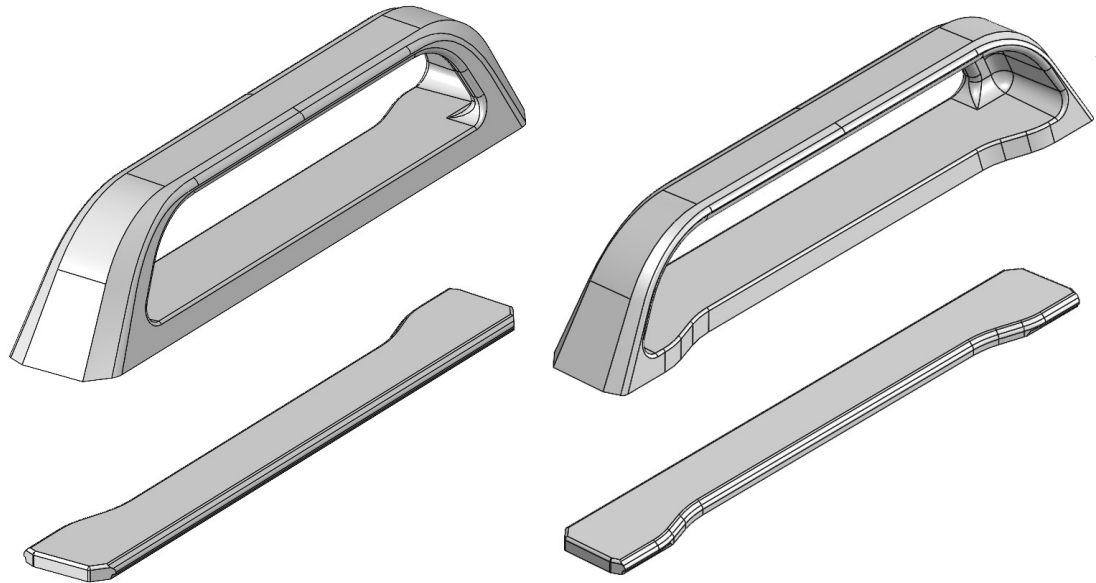
6.4 Vyhotovení 3D modelů

Vyhotovení 3D modelů v programu SOLID WORKS 2023 trvalo několik měsíců. Nejprve bylo potřeba splnit všechny požadavky kladené zadavatelem projektu jako jsou rozměry, ergonomické vlastnosti či funkční prvky pro zacvakávání a vycvakávání madla.

Počet návrhů tvaru zobáčků, které byly při jakékoliv změně vždy podrobeny novým numerickým výpočtům v programu Ansys Mechanical Enterprise 2023, se řadí mezi vyšší desítky. O systému zacvakávacího mechanismu a jednotlivých úpravách detailněji pojednává kapitola 7.

Posledním bodem, který výrazně ovlivnil tvorbu 3D modelu madla, byly požadavky od firmy vyrábějící formu. Aby byl díl odformovatelný a dobře vyrobitelný muselo se provést několik úprav, mezi které patřily technologické prvky jako úkosity, rádiusy, či umístění dělicí roviny a vtoku. Všechny tyto úpravy spojené se změnou tvaru madla vyvolaly potřebu

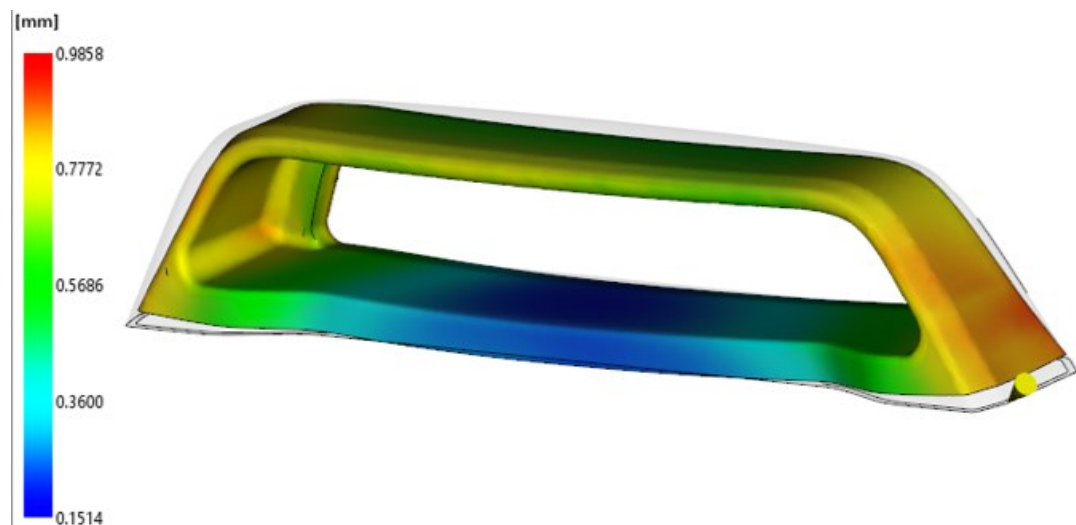
opětovných numerických výpočtů, které sloužily k ověření, zda nedošlo k ovlivnění funkce zácvaku.



Obrázek 41. Finální design madla a podložky.

6.5 Analýza vstřikovacího procesu

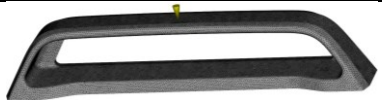

Po vyhotovení první verze madla byla provedena simulace COOL + FILL + PACK + WARP v programu Autodesk Moldflow za použití 2,5D sítě. Provést analýzu bylo nutné především z důvodu vhodného umístění vtoku, k ověření, zda dojde k zaplnění všech oblastí v dutině formy, zjištění místa studeného spoje či vzniku nežádoucích deformací. A právě výsledky analýzy predikovaly problém v oblasti obou konců madla, u kterých vznikaly deformace okolo 1 mm (Obr. 42), což vedlo k následné změně designu zobáčků a jejich umístění.



Obrázek 42. Deformace – vliv všech efektů, měřítko 5:1.

Pro lepší porovnání a vyhodnocení výsledků byly provedeny celkem dvě předběžné analýzy. První z nich zahrnovala umístění vtoku shora, druhá pak z boku. Do další fáze projektu a vyhotovení formy, byla nakonec zvolena pozice vtoku z boku, protože dané místo má nejmenší vizuální vliv na celý díl. Porovnání hodnot obou analýz lze vidět v následující tabulce (Tab. 4).

Tabulka 4. Analýza vstřikovacího procesu – porovnání pozic bodového vtoku.

Popis	Vtok – shora	Vtok – z boku	MJ
Umístění vtoku			–
Doba vstřikování	2,235	4,015	s
Teplota taveniny	240,2	241,7	°C
Doba k dosažení vyhazovací teploty	106	108,7	s
Deformace	0,81	0,99	mm

Výsledky simulací nakonec vedly ke změně pozice zácvaku. Původní zamýšlená varianta obsahovala dva dlouhé zácvaky po bocích madla (Obr. 43). Na základě výsledků z provedených analýz a taktéž reálných testů u vyrobených prototypů musela být provedena změna. Testy ukázaly, že madlo se díky volným oblastem v kapsách na jeho koncích při tahání a otevírání dveří odtahuje od skla a celé madlo tak působí nestabilně.



Obrázek 43. První varianta zácvaků.

Došlo tedy k nahrazení jednoho dlouhého zácvaku (Obr. 43) dvěma kratšími (Obr. 44), které zajistí lepší přitažení k podložce.



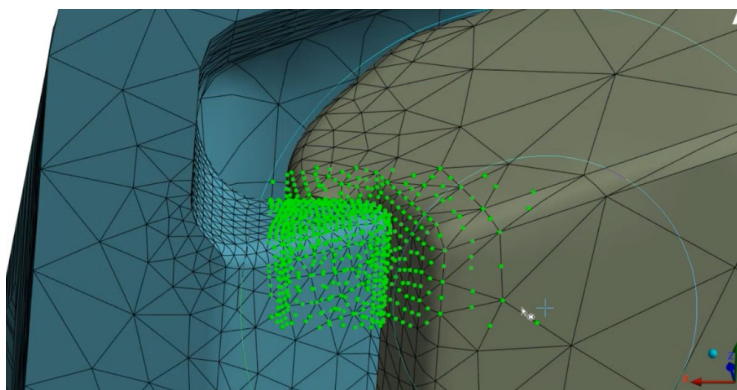
Obrázek 44. Upravená varianta zácvaků.

7 MECHANICKÉ SIMULACE

K ověření návrhu funkčního kompletu madla byl použit program Ansys Mechanical Enterprise 2023, který byl využíván především k optimalizaci geometrie zobáčků, ale i k posouzení celkové pevnosti navrhované dílu a sestavy. Každá at' už funkční či designová změna na madle nebo podložce byla vždy podrobena novému ověřujícímu numerickému výpočtu tak, aby byly splněny požadavky projektu a nevznikly žádné nežádoucí jevy, jako například oslabení materiálu, anebo příliš velké nacvakávací či vycvakávací síly. Samotné simulace byly vždy prováděny ve čtyřech variantách:

1. zacvaknutí madla přes dlouhý zácvak,
2. zacvaknutí madla přes krátké zácvaky,
3. vycvaknutí (porušení) madla přes dlouhý zácvak,
4. vycvaknutí (porušení) madla přes krátké zácvaky.

Každý výpočet pro danou variantu trval, po správném nastavení a odladění modelu pro výpočet, průměrně dvě hodiny. To znamená, že každá korekční smyčka trvala minimálně osm hodin. Při hledání vhodného tvaru pro funkční zácvak proběhlo okolo 70 výpočtů. Ke všem výpočtům byla použita 3D síť, která byla v kritických (funkčních) oblastech více zahuštěna z důvodu přesnějšího výpočtu, zatímco v oblastech, které nebyly z hlediska funkčnosti pro výpočet důležité byla síť zjemněna, jak lze vidět na obrázku č. 45.



Obrázek 45. Detail sítě a uzlových bodů.

Po nastavení hustoty obsahovala síť celkem 796 696 uzlových bodů. Během výpočtu je v každém bodě řešen jeho posun ve třech směrech X, Y, Z. Výpočtový program počítá pomocí soustavy rovnic a celkový počet řešených rovnic pro variantu na obrázku č. 45, tedy vycvak přes krátké zácvaky, byl 2 381 239. K vyřešení takto obsáhlé soustavy rovnic program využíval celkem 12 jader procesoru.

7.1 Nastavení výpočtového modelu

Nastavení materiálových vlastností, vazeb a okrajových podmínek je nejdůležitější částí z hlediska správného výpočtu (při zajištění požadované funkce výrobku). Dalším faktorem je také správná volba vazeb, okrajových podmínek a kontaktních bodů. Odladění výše uvedených bodů trvalo u tohoto projektu přibližně pět dnů.

7.1.1 Materiálové vlastnosti

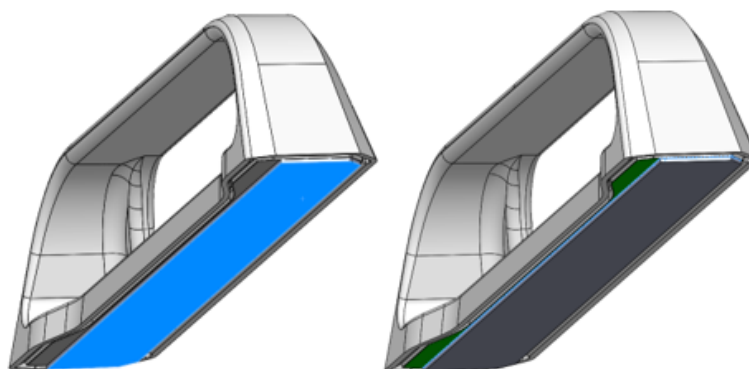
Pro výpočet v simulačním programu bylo použito několik parametrů. Mezi stěžejní se však řadí položky uvedené v následující tabulce (Tab. 5), která srovnává mechanické vlastnosti u materiálů PMMA a PC. Všechny hodnoty byly získány z materiálových listů daných materiálů uvedených v příloze (P V, VI).

Tabulka 5. Vstupní hodnoty materiálů pro výpočet.

Vlastnosti	Popis	PC	PMMA	Jednotka
Mechanické	Pevnost v tahu při přetržení	80	68	MPa
	Tažnost	50	2	%
	Pevnost v ohybu	96	110	MPa
	Modul pružnosti	2 600	3000	MPa
	Mez kluzu	75	60	Mpa
	Poissonova konstanta	0,30	0,30	–

7.1.2 Vazby

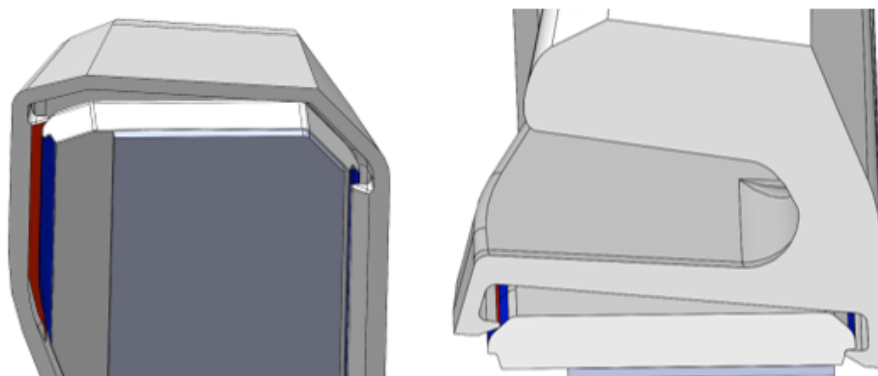
Prvními vazbami v simulované sestavě byly pevné vazby mezi oboustrannou páskou a sklem, popř. mezi páskou a podložkou (Obr. 46). Obě vazby zamezují jakémukoliv pohybu těchto dílů.



Obrázek 46. Pevné vazby v sestavě.

Dalšími použitými vazbami byly tzv. kontaktní vazby s třením (frictional). Tyto vazby jsou nejkompexnější a nejnáročnější na výpočet. Pracují jak se separací, tak s pohybem

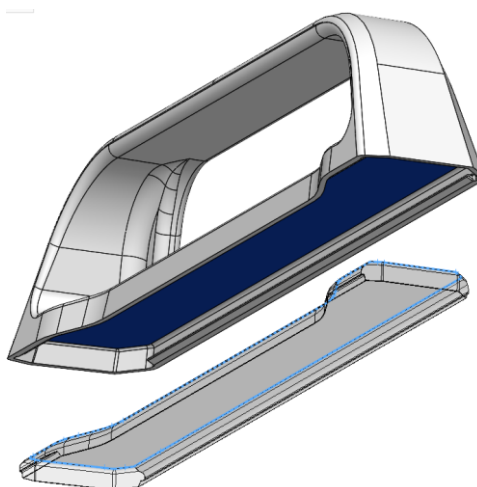
v tangenciálním směru s působením třecí síly (Obr. 47). Velikost součinitele tření byla pro kombinaci materiálu PMMA a PC zvolena 0,2.



Obrázek 47. Kontaktní vazba s třením – zácvak přes krátké zácvakky.

Obrázek 47 ilustruje princip nastavení kontaktní vazby s třením pro variantu nácvaku přes krátké zácvakky. Z obrázku je patrné, že madlo je na jedné straně vsunuto pod podložku a na druhé straně po sobě kloužou plochy zobáčků madla (červená barva) přes plochy podložky (modrá barva). Při vyvinutí dostatečné síly madlo zacvakne do cílové pozice. Na stejném principu byly aplikovány kontaktní vazby i pro nácvak přes dlouhou stranu či výcvaky u obou variant.

Poslední použitou vazbou v sestavě byla opět kontaktní vazba, zajišťující tečnost horní hrany na podložce proti ploše základny madla (Obr. 48). Tato vazba byla pomocná a neměla zásadní vliv na výpočet. Definovala místa, kde se mohou materiály navzájem opřít a zajišťovala lepší stabilitu modelu.

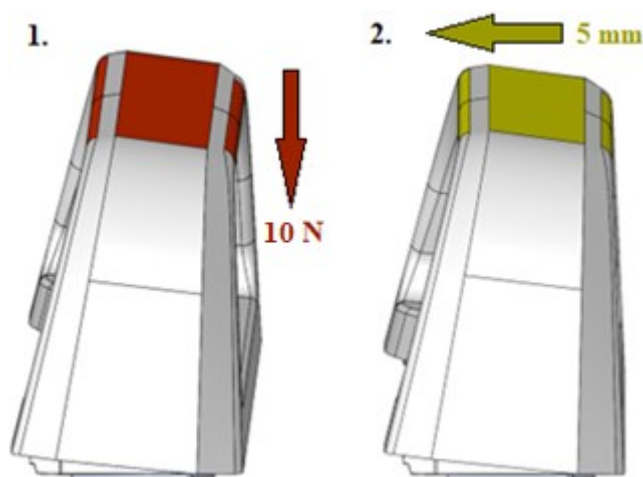


Obrázek 48. Vazba definující místa opěru.

7.1.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly nastaveny celkem tři. Ze spodní strany pásky byla opět využita pevná vazba a samotná simulace byla provedena ve dvou krocích. V prvním kroku byla aplikovaná stabilizační síla o velikosti 10 N na červené oblasti madla (Obr. 49). Tato síla působila shora na madlo (ve směru osy Y) a definovala jeho přidržení v nasunuté pozici.

Ve druhém kroku pomocí okrajové podmínky s názvem „Remote displacement“ následoval nastavený posun o 5 mm ve směru osy X. Posun si lze představit jako tlačení aplikované přes žluté plochy. Jakmile dojde k dostatečnému posunu madla přeskočí přes hranu podložky a software určí velikost potřebné síly. Na stejném principu byly simulovány všechny varianty jak pro nácvak, tak pro výcvak.



Obrázek 49. Okrajové podmínky.

7.2 Výsledky mechanických simulací a korekce

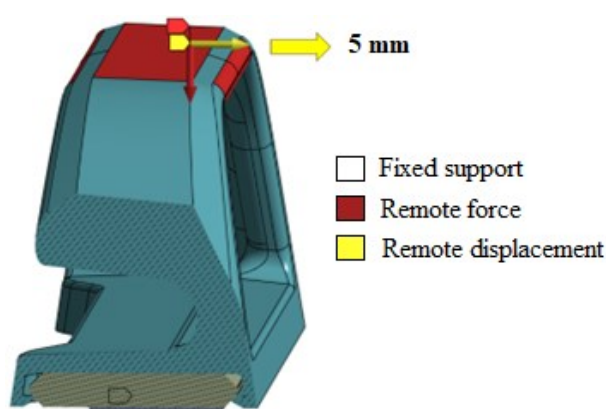
Jak již bylo zmíněno výše všechny simulace byly prováděny ve čtyřech variantách – zacvaknutí či vycvaknutí (poškození materiálu) přes dlouhý zácvak anebo dva krátké zácvaky. Výstupem každého výpočtu je graf znázorňující potřebnou sílu k nácvaku či výcvaku, popř. graf znázorňující v jakém čase dojde k povolené míře přetvoření daného materiálu.

Přetvoření (tažnost) u materiálu PMMA je dle materiálového listu 2 %. Tato hodnota definuje, že u materiálu začne docházet k deformacím, není to však hranice, kdy dojde např. k poškození materiálu. Jelikož však v zadání projektu je podmínkou zničení madla, bylo na základě testů na segmentech materiálu stanoveno, že hodnota porušení nastává při 5 %. Proto všechny výpočty byly prováděny a vyhodnocovány s touto hodnotou.

Výsledky simulací jsou v této kapitole prezentovány vždy ve formě výsledků výpočtů prvotního návrhu a porovnávány s následně provedenými korekcemi, které vedly k dosažení požadovaných hodnot.

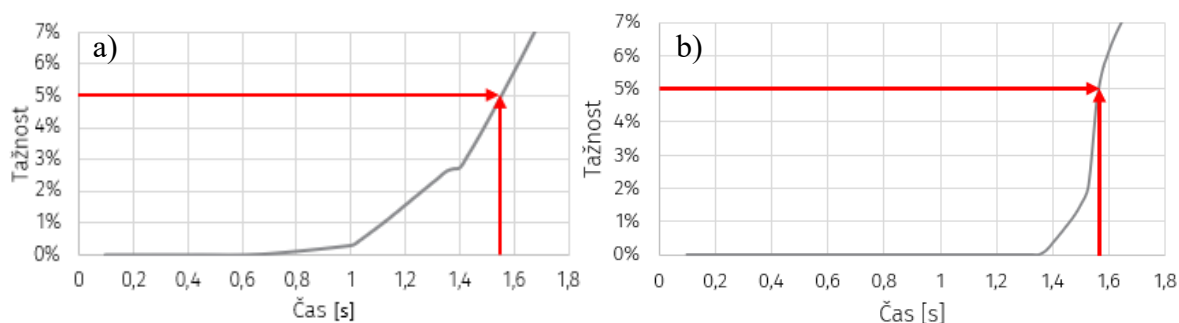
7.2.1 Nacvaknutí madla přes dlouhý zácvak

Princip nacvaknutí spočívá v nasunutí madla na podložku stranou s krátkými zácvaky, aplikováním přídržné síly 10 N shora ve směru osy Y a následným zacvaknutím pomocí 5 mm posunu madla v ose X (Obr. 50). Podložka je pevně fixována. Požadovaná síla zácvaku dle projektu nesmí přesáhnout 250 N.



Obrázek 50. Nacvak přes dlouhý zácvak.

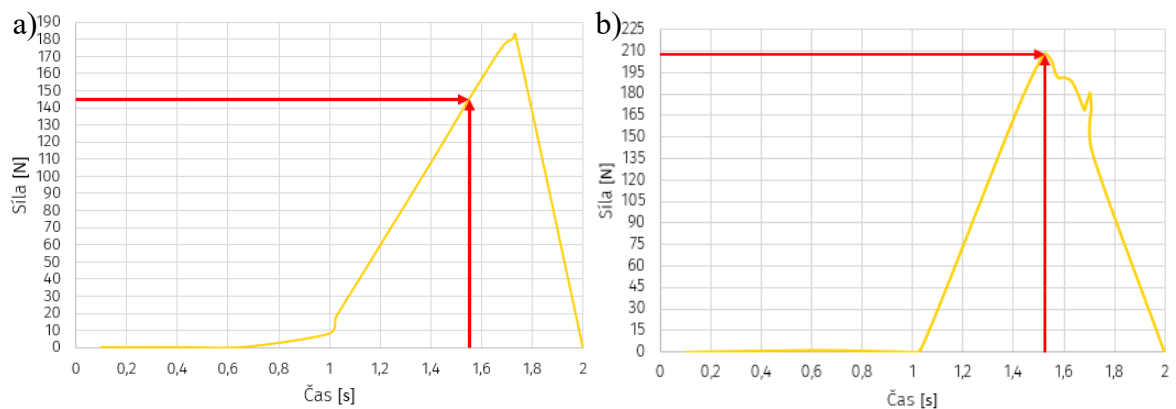
Pro stanovení velikosti síly potřebné k nacvaknutí bylo nutné nejprve stanovit v jakém čase dojde k akceptovatelnému přetvoření materiálu, které bylo stanoveno na 5 %. Této hodnoty bylo dosaženo u první varianty v čase 1,52 s a u druhé v čase 1,56 s (Obr. 51).



Obrázek 51. Nacvak přes dlouhý zácvak – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

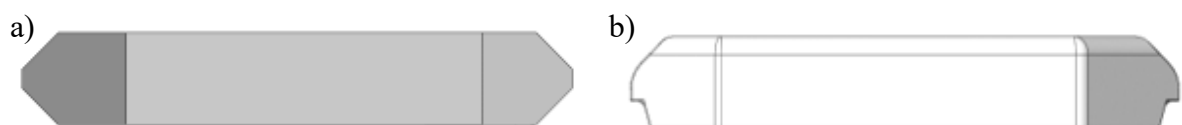
Stejný čas byl poté použit pro odečet síly potřebné k zacvaknutí (Obr. 52). Z výsledků je patrné, že přídržná síla byla aplikována v čase 0 ÷ 1 s. V čase 1 ÷ 1,8 s probíhal posun o 5

mm v ose X. Během celého časového úseku byly zaznamenávány velikosti sil. Výsledkem je, že před úpravou bylo dosaženo síly 145 N a po úpravě 208 N.



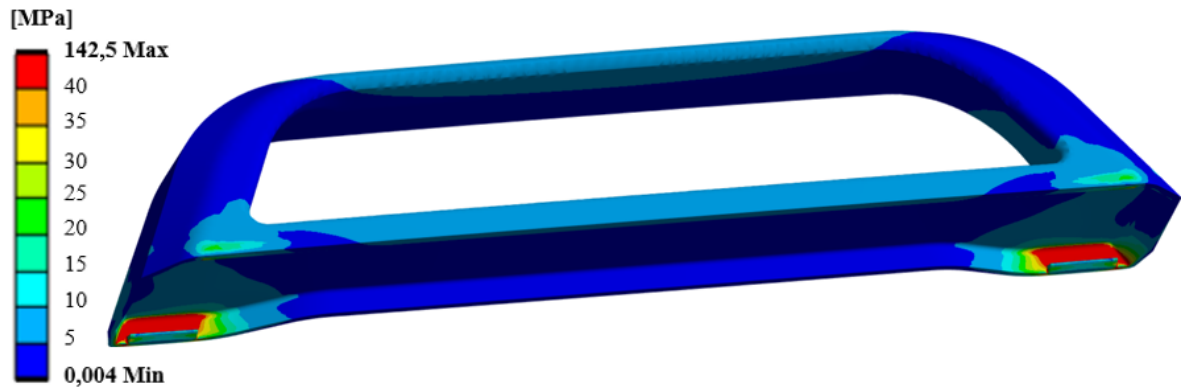
Obrázek 52. Nácvak přes dlouhý zácvak – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

U nácvaku přes dlouhý zácvak se podařilo dosáhnout požadované síly hned na první pokus. Avšak síla při výcvaku byla příliš nízká (265 N). Proto muselo být přistoupeno ke změně tvaru podložky. Původní symetrická podložka byla nahrazena nesymetrickou, která obsahovala několik změn. Tou hlavní bylo, že podložka již není použitelná symetricky, kdy nezáleželo na tom, ze které strany bude aplikovaná páska (Obr. 53a). Provedená změna však zajistila, že funkční náběhová plocha pro nácvak zůstala téměř zachována – navíc byly přidány rádiusy pro plynulý přechod přes ostré hrany (Obr. 53b). Zatímco funkční plochy při výcvaku zajistí „nevycvaknutelnost“ madla bez porušení. Tato změna provedená v rámci výcvaku, mírně ovlivnila i nácvakovou sílu, která se na základě provedených změn zvýšila na 208 N.

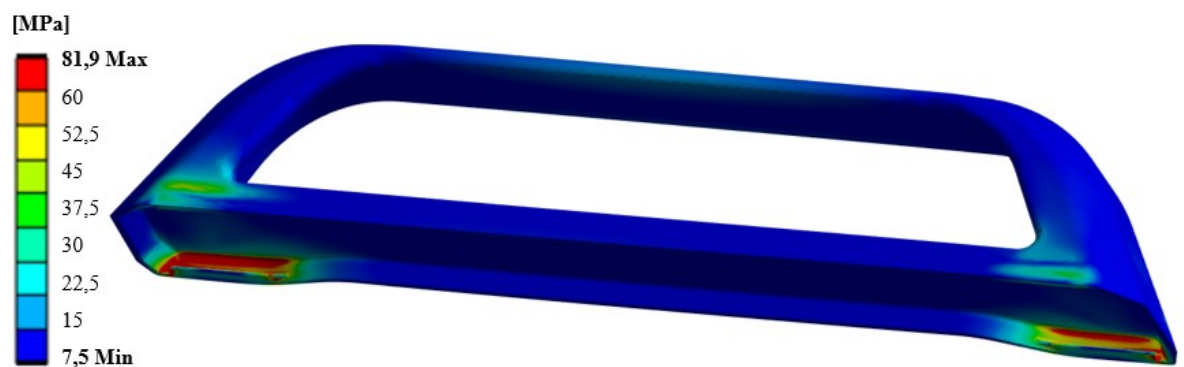


Obrázek 53. Design podložky: a) před úpravou, b) po úpravě.

Na barevné mapě znázorňující ekvivalentní (von Mises) napětí v daných oblastech lze vidět, že kritické místo nastává v oblasti krátkých zobáčků nikoliv v oblasti dlouhého, jak by se dalo očekávat. Tento jev je dán tím, že dlouhý zácvak je při své délce pevnější a silnější než zácvaky krátké a při působení nácvakávací síly jsou krátké zácvaky „přetaženy“ dlouhým zácvakem (Obr. 54, 55).



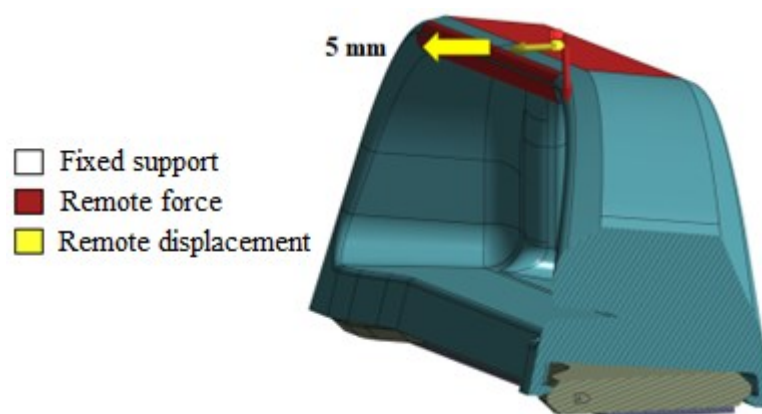
Obrázek 54. Návzak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises před úpravou.



Obrázek 55. Návzak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises po úpravě.

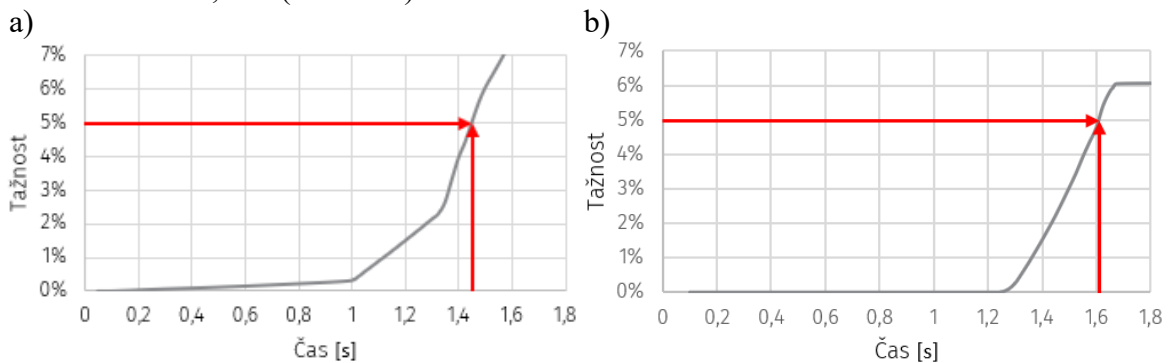
7.2.2 Nacvaknutí madla přes krátké zácvky

Princip nacvaknutí přes krátké zácvky je obdobný jako u předchozího příkladu. Madlo je nasunuto na podložku stranou s dlouhým zácvakem. Shora ve směru osy Y je aplikována přídržná síla 10 N. Následuje 5 mm posun v ose X a dochází k nacvaknutí (Obr. 57). Podložka je pevně fixována. Stále platí, že požadovaná síla zácvaku dle projektu nesmí přesáhnout 250 N.



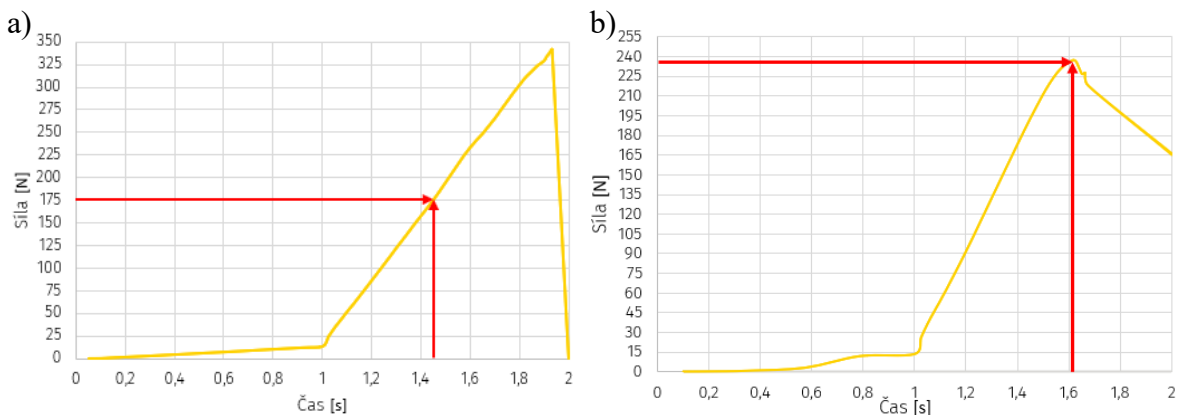
Obrázek 56. Návzak přes krátké zácvky.

Ke stanovení velikosti síly potřebné k nacvaknutí přes krátké zácvakky bylo opět nutné stanovit v jakém čase dojde k přetvoření materiálu. U krátkých zácvaků bylo této hodnoty dosaženo dříve než u zácvaku dlouhého. U první varianty to bylo v čase 1,45 s (Obr. 57a) a u druhé v čase 1,62 s (Obr. 57b).



Obrázek 57. Nacvak přes krátké zácvakky – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

Ve stejném čase byla odečtena síla k zacvaknutí (Obr. 58). Princip byl stejný jako u nacvakku přes dlouhý zácvak, tedy aplikace přídržné síly a následný posun o 5 mm v ose X. Ze zaznamenaných hodnot bylo zjištěno, že potřebná síla k nacvaknutí před úpravou činí 175 N (Obr. 58a) a po úpravě 237 N (Obr. 58b).

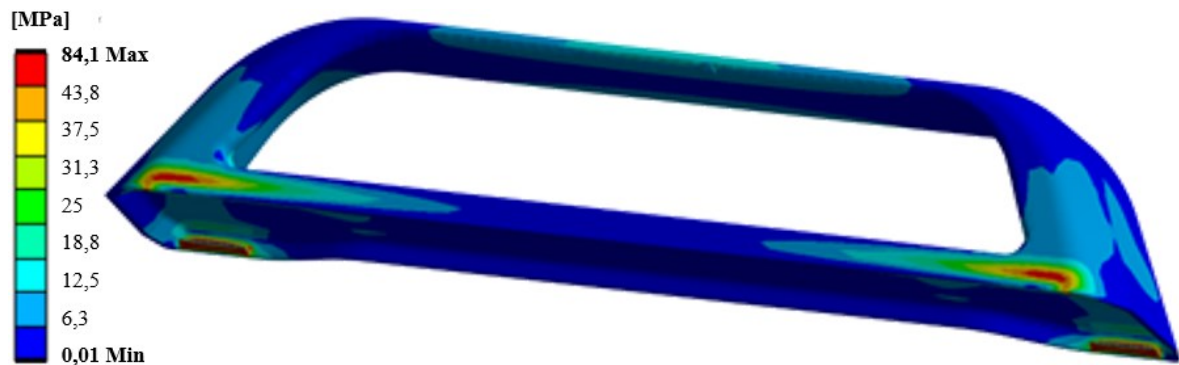


Obrázek 58. Nacvak přes krátké zácvakky – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

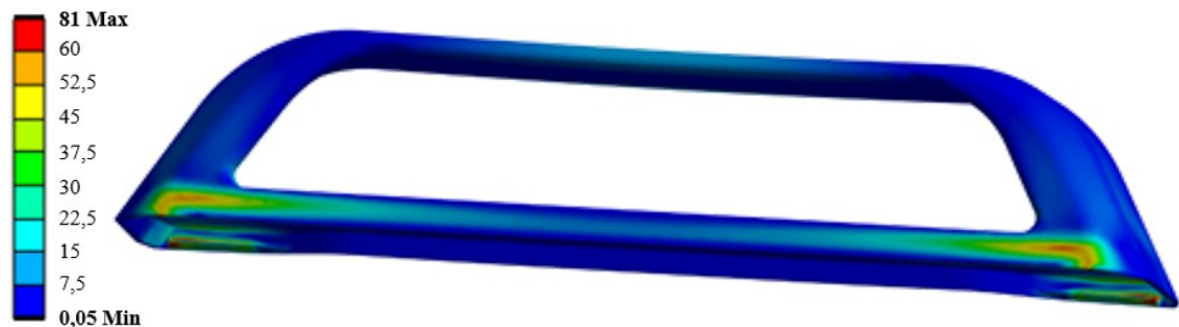
I u nacvakku přes krátké zácvakky se podařilo dosáhnout síly, která splňovala požadavky projektu. K problému však došlo, podobně jako u varianty s dlouhým zácvakem, při požadované síle pro vycvakávání. Ta dosahovala velikosti pouze 175 N. Z tohoto důvodu byl upraven, stejně jako u předchozí varianty, tvar podložky. Dále byly provedeny i geometrické změny tvaru zobáčku, které ovlivňují především sílu vycvakku. Tyto změny jsou

detailně popsány v kapitole 7.2.4. Všechny provedené úpravy však ovlivnily taktéž sílu při nácvaknutí, která se proti původní hodnotě změnila na 237 N.

Na barevné mapě znázorňující von Mises napětí v daných oblastech lze vidět, že kritické místo nastává v oblasti krátkých zobáčků (Obr. 59). U první varianty se ale objevují i v oblasti delšího zobáčku na protější straně. Tato oblast však byla díky provedeným úpravám eliminována (Obr. 60).



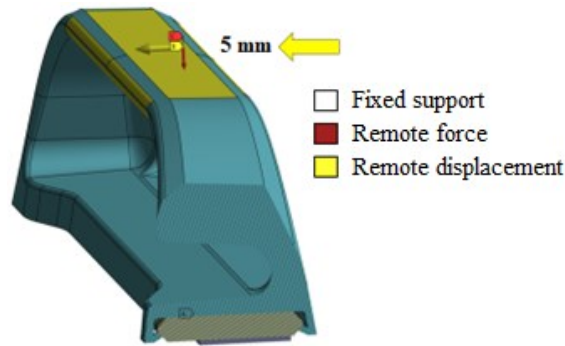
Obrázek 59. Nácvak přes krátké zácvky – oblasti s napětím von Mises před úpravou.



Obrázek 60. Nácvak přes krátké zácvky – oblasti s napětím von Mises po úpravě.

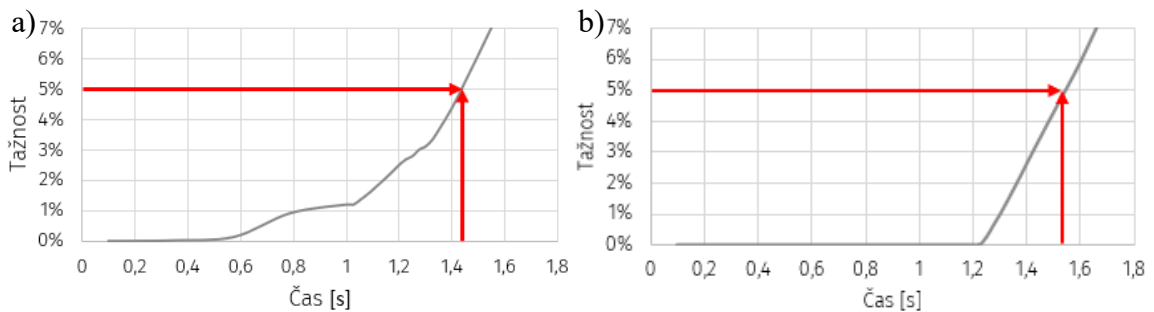
7.2.3 Vycvaknutí madla přes dlouhý zácvak

Princip vycvaknutí madla přes dlouhý zácvak spočívá v tom, že madlo je v nácvaknutém stavu na podložce. Nejprve je podobně jako u nácvakávání použita přídržná síla o velikosti 10 N shora ve směru osy Y. Poté je aplikován posun o 5 mm ve směru osy X (Obr. 61). Podložka je pevně fixována. Požadovaná síla při vycvaknutí dle zadání by neměla být nižší jak 380 N a madlo se musí při překročení definované síly mechanicky poškodit.



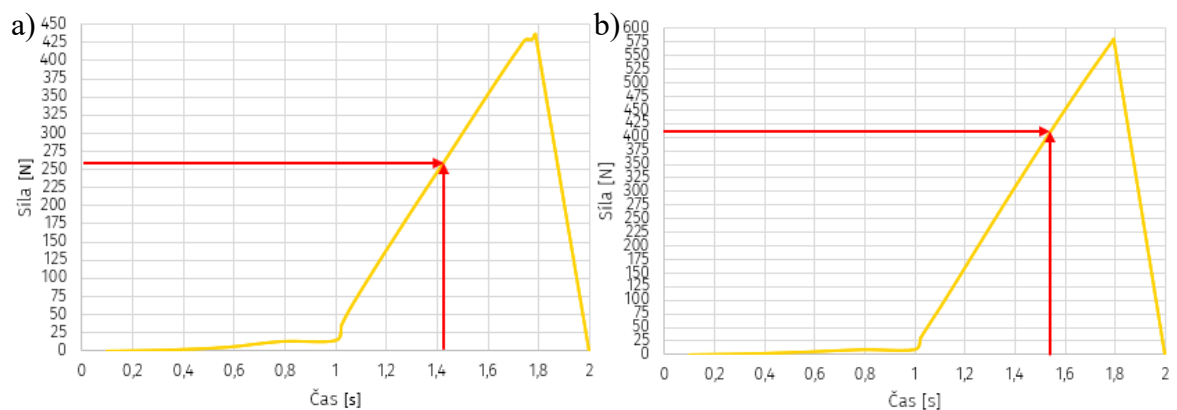
Obrázek 61. Výcvak přes dlouhý zácvak.

Pro stanovení velikosti síly potřebné k vycvaknutí bylo nutné, stejně jako v předchozích případech, stanovit v jakém čase dojde k přetvoření materiálu o velikosti 5 %. Této hodnoty bylo dosaženo u první varianty v čase 1,43 s (Obr. 62a) a u druhé v čase 1,52 s (Obr. 62b).



Obrázek 62. Výcvak přes dlouhý zácvak – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

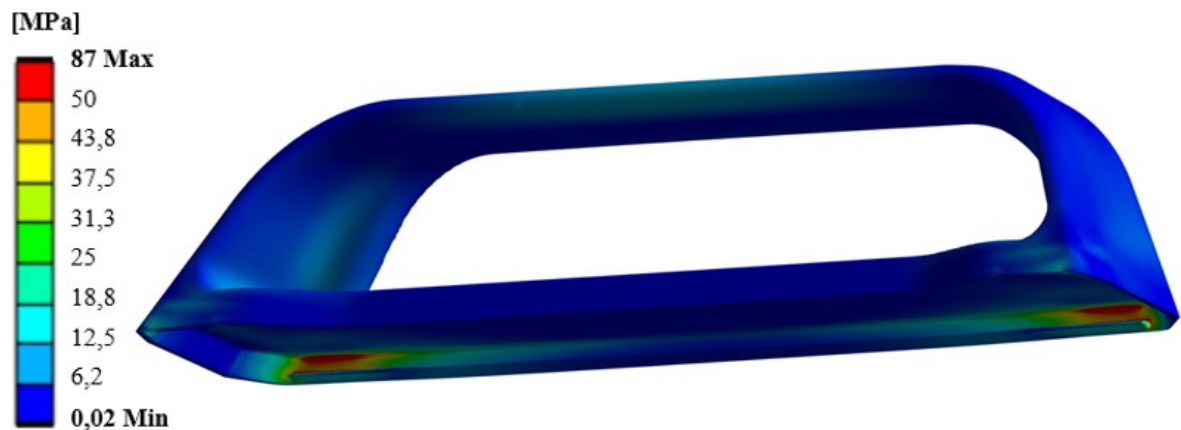
Ve stejném čase byla odečtena síla potřebná k vycvaknutí (poškození) madla (Obr. 63). Postup byl totožný jako u nácvaků, tedy aplikace přídržné síly a následný posun o 5 mm v ose X. Z grafu bylo následně zjištěno, že potřebná síla k vycvaknutí před úpravou činí 265 N (Obr. 63a) a po úpravě 410 N (Obr. 63b).



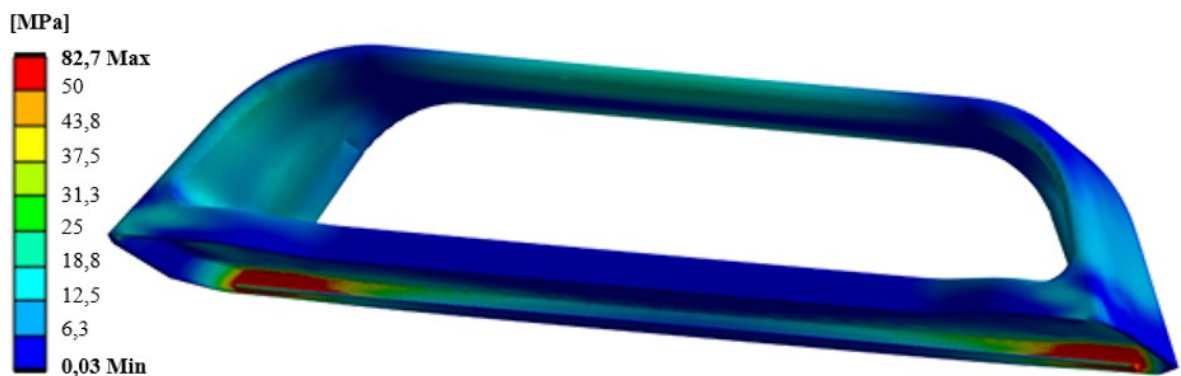
Obrázek 63. Výcvak přes dlouhý zácvak – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

Jak již bylo zmíněno v kapitolách 7.2.1 a 7.2.2 došlo z důvodu nízké výcvakové síly ke změně tvaru podložky tak, aby bylo zajištěno zvýšení této síly a mechanické poničení madla. Tento požadavek byl díky provedené změně splněn. K prasknutí madla nyní dle simulačních výpočtů dochází při vyvození síly o velikosti 410 N.

Barevná mapa zobrazující ekvivalentní napětí (von Mises) v daných oblastech ukazuje, že kritické místo v prvním návrhu nastává v oblasti boční stěny nad dlouhým zácvakem (Obr. 64). Po aplikování potřebných změn lze vidět že kritické oblasti se mírně zvětšily (Obr. 65).



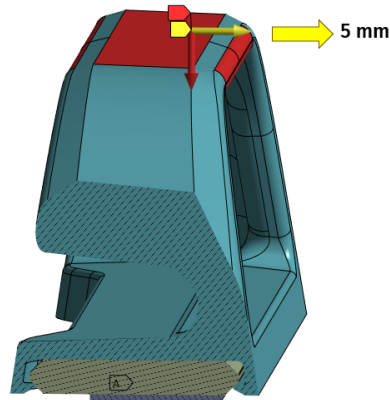
Obrázek 64. Výcvak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises před úpravou.



Obrázek 65. Výcvak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises po úpravě.

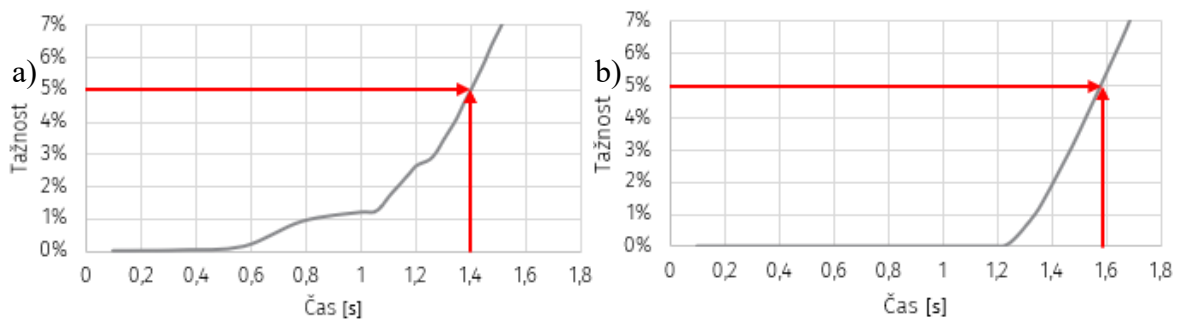
7.2.4 Vycvaknutí madla přes krátké zácvaky

Vycvaknutí madla přes krátké zácvaky je obdobné jako u výcvaku přes dlouhý zácvak. Madlo je v nacvaknutém stavu na podložce, následuje použití přídržné síly směrem shora dolů v ose Y, a posun o 5 mm ve směru osy X (Obr. 66). Podložka je pevně fixována. Požadovaná síla při výcvaku by neměla být nižší jak 380 N a při překročení této síly musí dojít k mechanickému poškození.



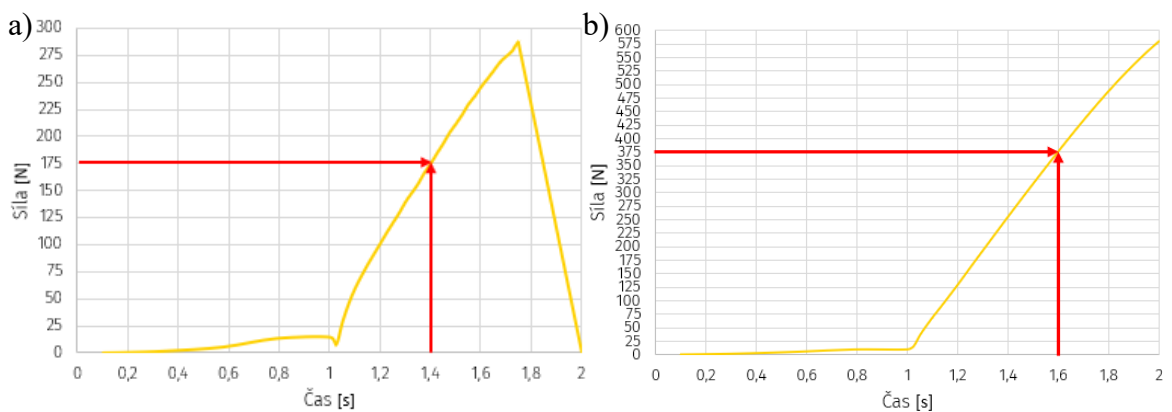
Obrázek 66. Výcvak přes krátké zácvky.

Ke stanovení velikosti síly potřebné k vycvaknutí bylo stejně jako u ostatních případů potřeba stanovit v jakém čase dojde k přetvoření materiálu o velikosti 5 %. Této hodnoty bylo dosaženo u první varianty v čase 1,4 s (Obr. 67a) a u druhé v čase 1,58 s (Obr. 67b).



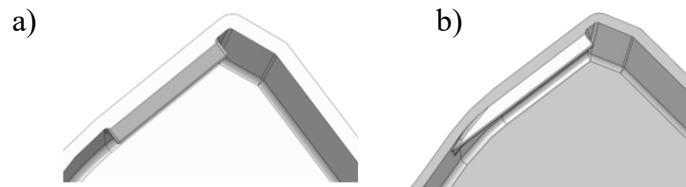
Obrázek 67. Výcvak přes krátké zácvky – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

Ve stejném čase byla odečtena síla potřebná k vycvaknutí (poškození) madla (Obr. 68). Postup byl opět totožný. Aplikace přídržné síly, posun o 5 mm v ose X. Síla potřebná k vycvaknutí činila před úpravou 175 N (Obr. 68a) a po úpravě 380 N (Obr. 68b).



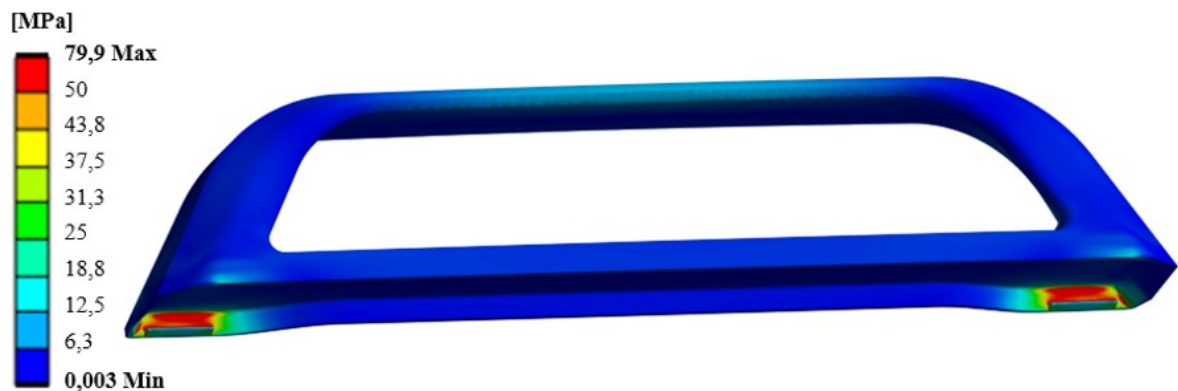
Obrázek 68. Výcvak přes krátké zácvky – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.

Velikost síly při výcvaku přes krátké zácvaky byl největším problémem a výzvou diplomové práce. Bylo to především z důvodu velmi omezeného místa, které mohlo být využito pro zácvaky. Modifikace jejich tvaru obsahovala nejvíce změn a výpočtů. Finální tvar zobáčku byl proti původnímu návrhu značně odlišný. Došlo k protažení zobáčku a následnému vetknutí do boční stěny základny madla. Zároveň byly přidány maximální možné rádiusy o velikosti 0,7 mm po obvodu zobáčku k minimalizaci vzniku koncentrátorů napětí. Všechny tyto úpravy nakonec vedly k požadované síle a následnému mech. poškození při výcvaku.



Obrázek 69. Tvar zácvaku: a) před úpravou, b) po úpravě.

Barevná mapa s ekvivalentním napětím v daných oblastech ukazuje, že kritické místo v prvním návrhu nastává v oblasti boční stěny nad krátkými zácvaky (Obr. 70). Po aplikování potřebných změn lze vidět, že kritická oblast je podobně velká ve vztahu ke krátkým zobáčkům jako u předchozí varianty (Obr. 71).



Obrázek 70. Výcvak přes krátké zácvaky – oblasti s napětím von Mises před úpravou.



Obrázek 71. Výcvak přes krátké zácvaky – oblasti s napětím von Mises po úpravě.

8 PROTOTYPOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ

Důležitou věcí, na kterou je nutné dále upozornit je, že všechny dosažené výsledky byly aplikovány na prototypové díly vyrobené pomocí vakuového lití. Tato varianta testování byla zvolena především z časových a finančních důvodů, ale také kvůli eliminaci zásadních nedostatků při testování zácvků. Zatímco výroba prototypové vstřikovací formy by zabrala min. 8 týdnů a náklady by se pohybovaly okolo 200 000,- Kč, tak forma pro vakuové lití byla vyhotovena během dvou dnů a při ceně 12 000,- Kč za formu a ceně 6 560,- Kč za master model. Každý odlitý kus pak stál 1 200,- Kč. Po odladění zásadních nedostatků na prototypových kusech následovala výroba prototypové formy, kde byly odladěny poslední detaily k dosažení požadované funkce. Až poté bude vyrobena forma pro sériové kusy.

8.1 Prototypování

Prototypování je neodmyslitelnou částí při tvorbě nových produktů. Během vývoje madla a podložky bylo použito hned několik metod sloužících k výrobě prototypových dílů. Na začátku projektu byly ve velkém používány technologie 3D tisku především z důvodu ověření rozměrových a ergonomických vlastností. Poté následovala technologie vakuového lití, která výrazně pomohla k dosažení vzhledových vlastností ale také k ověření základních mechanických vlastností daného výrobku.

Všechny metody byly použity za účelem dosáhnout co nejlepšího výrobku před zahájením výroby pomocí vstřikování. Důvodem jsou především časové a finanční náklady. Zatímco metody 3D tisku a vakuového lití se řadí mezi relativně levné technologie s kvalitním výstupním produktem, kde lze rychle aplikovat provedené změny, tak každá změna v sériové či prototypové formě pro vstřikování je finančně a časově mnohonásobně náročnější. Proto byly prototypové technologie využívány v maximální možné míře tak, aby při zahájení výroby madla v prototypové formě pomocí vstřikování, bylo nutné provádět jen minimum nutných změn.

8.1.1 Laserové řezání + frézování

Jelikož již na začátku projektu bylo rozhodnuto, že pro první série dílů se nebude pro podložku vyrábět vstřikovací forma, ale podložka musí být navržena tak, aby byla později vyrobitelná vstřikováním, bylo nutné zvolit vhodnou metodu výroby podložky. Vzhledem k přesnosti, ceně, dostupnosti polotovaru a možné rychle editaci rozměrů byla zvolena

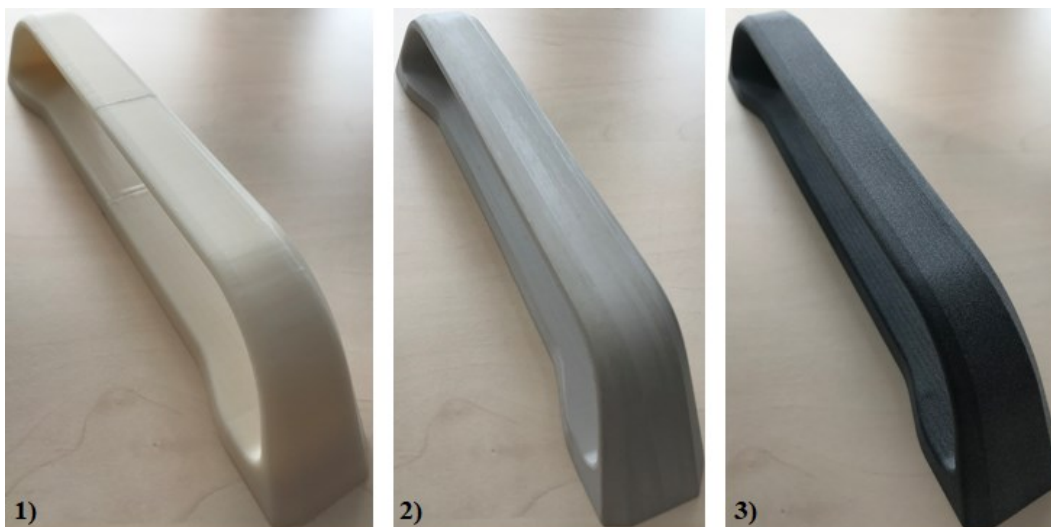
technologie laserového řezání a následného frézování funkčních ploch k zácvaku či rádiusů anebo zkosení. Vstupním polotovarem byl materiál PC o tloušťce 5 mm (Obr. 72).



Obrázek 72. Prototyp podložky z materiálu PC.

8.1.2 3D tisk – metoda FDM, SLS, SAF

Metody 3D tisku se řadí, z hlediska výroby prototypu, mezi nejjednodušší a nejlevnější. Z těchto důvodů byly využívány především ze startu projektu, kdy bylo potřeba určit rozměry, vyzkoušet ergonomii dílu, jeho čistitelnost apod. Během vývoje bylo vytisknuto nespočet různých variant madla, než se podařilo dosáhnout požadovaných vlastností. Nejčastěji byla využívána metoda FDM, která je nejlevnější a nejdostupnější. Dále pak SLS a v neposlední řadě nová technologie s názvem SAF. Tato technologie byla využívána, jelikož vytisknutý prototyp dosahuje kvalitních povrchů, vysokých přesností a zároveň i relativně dobrých mechanických vlastností. Pomocí této metody tak mohly být testovány první varianty mechanických zácvaků.



Obrázek 73. 3D tisky madel: 1) metoda FDM, 2) metoda SLS, 3) metoda SAF.

8.1.3 Vakuové lití

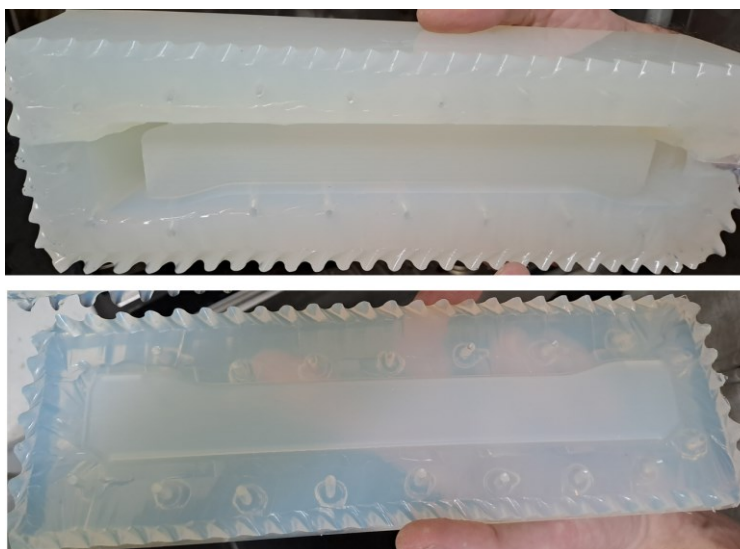
Technologie vakuového lití sehrála při vývoji madla zásadní roli. Vakuové lití totiž umožňuje vyrábět transparentní materiály, které jsou přibližným ekvivalentem skutečných plastů. Zároveň dosahují dobrých mechanických vlastností a přesností, což umožnilo testování nácvaku a výcvaku madla.

V našem případě byl jako ekvivalent materiálu PMMA zvolen průhledný dvousložkový polyuretan s označením SikaBiresin PX 523. Jedná se o vysoce průhledný materiál, který je snadno zpracovatelný a má dobrou UV stabilitu. Jeho mechanické vlastnosti jsou podobné jako u PMMA, což dokládá následující tabulka (Tab. 6).

Tabulka 6. Porovnání materiálových vlastností PX 523 a PMMA.

Popis	PX 523	PMMA	Jednotka
Pevnost v tahu	68	68	MPa
Tažnost	3,5	2	%
Pevnost v ohybu	100	110	MPa
Modul pružnosti	2 600	3 000	MPa
Rázová houževnatost	42	1,4	kJ/M ²

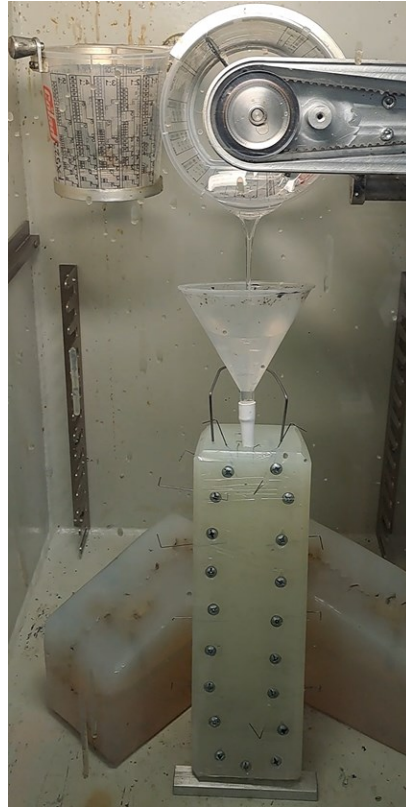
K možnosti vyrábět vakuově lité díly, bylo potřeba vyrobit silikonovou formu za pomoci master modelu madla vytištěného na 3D tiskárně. Model byl posléze zalit silikonem. Po jeho ztuhnutí byla forma rozřezána, master model vytažen, a následně připravena k odlévání dílů.



Obrázek 74. 3D Forma pro vakuové lití.

Před samotným litím bylo nutné formu předehřát na 70 °C. Poté následovalo zahřátí obou složek polyuretanu jak izokyanátu, tak polyolu na 20 °C. Lití probíhalo ve speciálním licím stroji, kdy v horním kelímku se nacházelo přesné množství izokyanátu a ve spodním mísícím

kelímku polyol. Po odplynění ve vakuu se obě látky míchaly po dobu tří minut. Následovalo odlévání do zahřáté formy (Obr. 75). Po odlití byla forma vložena do pece o teplotě 70 °C k vytvrzení. Délka vytvrzování závisí na objemu materiálu. V případě madla se jednalo o 2 hodiny.



Obrázek 75. Lití madla.

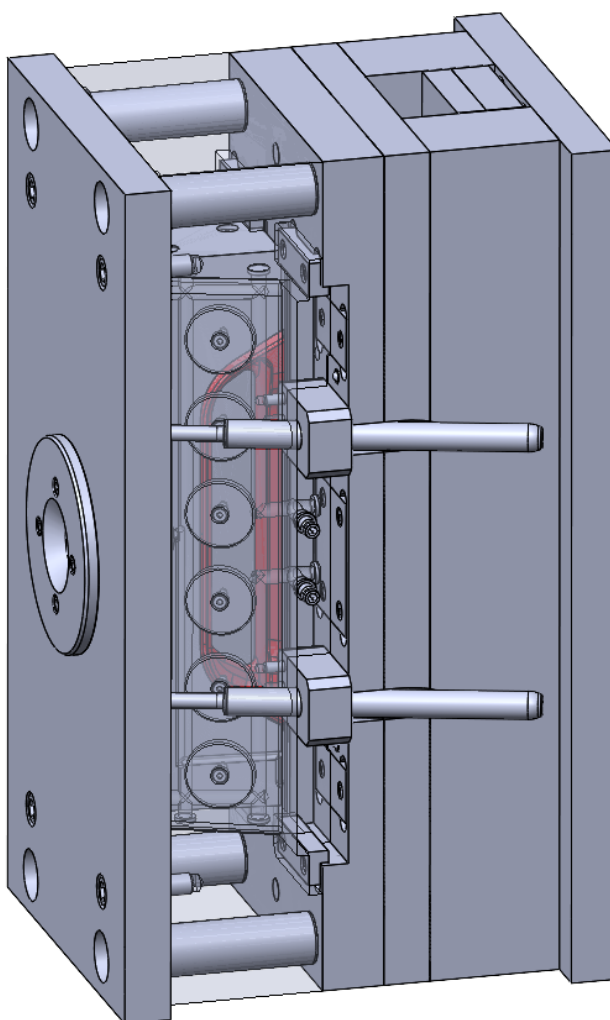
Poté byla forma vytažena z pece, otevřena, díl ochlazen stlačeným vzduchem a vyjmut z formy (Obr. 76).



Obrázek 76. Odlitek madla.

8.1.4 Prototypová forma

Prototypová vstřikovací forma (Obr. 77) byla posledním krokem před uvedením madla do sériové výroby. Sloužila k ověření funkčnosti dílu na základě dosažených poznatků z předchozích metod prototypování a zároveň umožňovala drobné zásahy při potřebných úpravách. Forma byla zároveň nachystána tak, aby byla schopna vyrábět velmi kvalitní díly, které budou moci být uvedeny na trh ještě před výrobou sériové formy. Hlavní výhodou a prioritou při výrobě prototypové formy je ověření vlastností vybraného materiálu a jeho chování po zpracování technologií vstřikování. Jak již bylo zmíněno výše, předchozí prototypování dílů probíhalo pouze na ekvivalentech materiálu PMMA, a navíc vyrobených jinou technologií.



Obrázek 77. Prototypová forma.

Po prvních vyrobených kusech bylo potřeba ve formě provést několik korekcí, mezi které se řadily například změna velikosti vtoku, nahrazení kruhových vyhadzovačů (Obr. 78a), které zanechávaly výrazné otisky v materiálu, zahlazení stop po frézování na tvarové desce či

přidání chladicího kanálu pod základnu madla. Dodatečné přidání kanálu bylo nutné, jelikož po vystříknutí a zchlazení, díly vykazovaly velký průhyb v oblasti základny, což znemožňovalo pohodlné a bezpečné nacvaknutí madla bez poškození.



Obrázek 78. Výstřik madla z formy : a) před úpravou, b) po úpravě.

8.2 Testování

Testování materiálu a celkové sestavy madla zahrnovalo několik odvětví. Fyzicky musela být otestována oboustranná páska zajišťující pevnost spoje, a dále síly potřebné k nacvaknutí a vycvaknutí madla. Testování funkce a odolnosti madla probíhalo v několika variantách. Nacvakávání a vycvakávání probíhalo buď ručně anebo přes siloměr. Pevnost sestavy byla pak testována na Charpyho kladivu či univerzálním zkušebním stroji TESTOMETRIC M350-10CT.

Při testování a ověřování zácvků na vakuově litých dílech pro následné korekce byly prováděny přepočty hodnot na základě provedených měření tak, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších hodnot chování zvoleného sériového materiálu. Což při reálných testech znamenalo, že byl vždy přesně zvolený segment madla, v našem případě část rukojeti, vyříznut v délce 12 cm a podroben pevnostní zkoušce ve svěráku za pomoci siloměru a

porovnáván se shodně velkým segmentem z materiálu PMMA (Obr. 79). Výsledné hodnoty pak byly zohledňovány při softwarových simulacích.



Obrázek 79. Test segmentu materiálu.

8.2.1 Pevnost lepeného spoje

Pevnost lepeného spoje byla testována na obdélníkových segmentech materiálů PMMA a PC pomocí Charpyho kladiva (Obr. 80). Všechny segmenty měly stejné rozměry 216 x 20 x 8 mm a oboustranná páska různých šířek a tloušťek na ně byla aplikována buď s použitím primeru nebo bez. Z naměřených hodnot byla vybrána nejlepší možná varianta splňující požadavek v zadání projektu, který byl pro dynamické zatížení spoje stanoven na 30 J. Jako vhodné řešení se ukázala kombinace transparentní pásky o rozměrech 22 x 1 mm s použitím primeru. Každé měření proběhlo na 15 vzorcích s průměrnou naměřenou hodnotou 44 J. Žádná z hodnot nebyla menší, než povolena minimální hodnota v projektu (30 J).



Obrázek 80. Test pevnosti lepeného spoje.

8.2.2 Testování zácvaku a výcvaku madla

Testování funkce nacvaknutí a vycvaknutí madla probíhalo několika různými způsoby. Prvním způsobem bylo nacvakávání madla ručně k získání představ, jak silně musí být madlo nacvakáváno či vycvakáváno a zda je daný stav vhodný k běžnému použití. Druhým typem testu bylo testování nácvaku a výcvaku pomocí siloměru, a to bodově (Obr. 81) či plošně (Obr. 82). U obou způsobů byly měřeny velikosti sil a sledovány deformace, které byly poté vyhodnocovány a používány ke korekcím nutným k dosažení funkčního systému.



Obrázek 81. Nacvaknutí a vycvaknutí madla – bodové zatížení.

Testování madla za působení bodové síly, bylo zaměřeno především na možné deformace, jako například zlomení úchopu. Aby se však měření co nejvíce blížilo ke způsobu zatěžování aplikovaném v simulačních výpočtech, a tím k ověření výsledků, bylo nutné síly působící na madlo distribuovat. K dosažení plošného zatížení tak byl použit speciální pás, který byl na jednom konci obtočen za úchopovou plochu madla a na druhé straně byl tahán siloměrem.



Obrázek 82. Nacvaknutí a vycvaknutí madla – plošné zatížení.

8.2.3 Testování na Charpyho kladivu

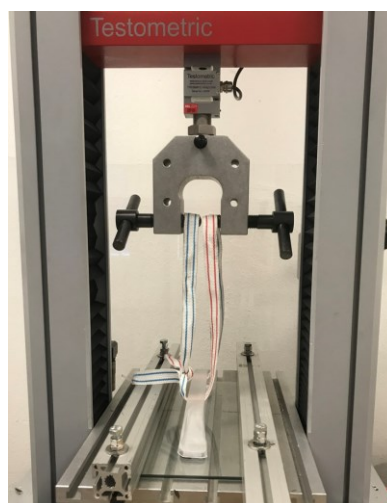
Dalším způsobem testování sestavy madla bylo Charpyho kladivo. Test spočíval v nárazu kladiva do různých oblastí madla od základny až po úchop. Byly sledovány deformace a zaznamenávány energie, při kterých dojde k poškození (uražení) madla. Test simuluje chování zákazníků v obchodech, např. při nárazu nákupního vozíku do madla.



Obrázek 83. Testování madla na Charpyho kladivu.

8.2.4 Tahová zkouška

Posledním testem byla tahová zkouška. Během testů na univerzálním zkušebním stroji bylo sledováno celkové chování sestavy, která byla nalepena na skle a pevně fixována k základně stroje.

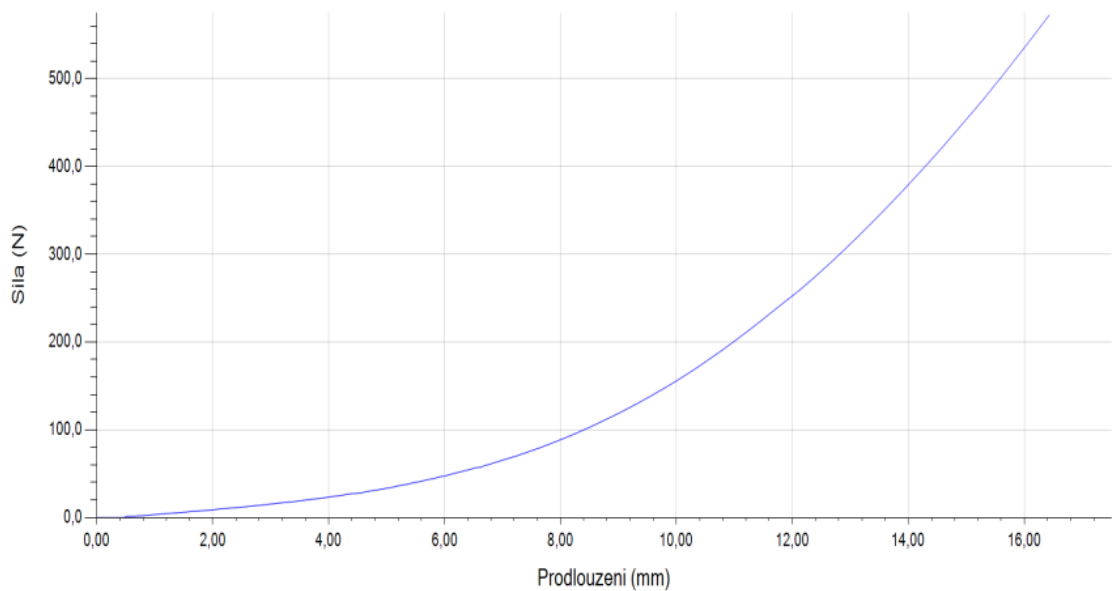


Obrázek 84. Testování madla na univerzálním zkušebním stroji.

Bylo nutné zjistit chování všech materiálů během statického působení tahu. Od chování lepeného spoje, přes pevnost zácvaku, až po samotnou pevnost madla.

Testování ukázalo, že lepený spoj je dostatečně pevný a po provedené zkoušce tahem nevykazuje žádné deformace. Síla potřebná k poškození madla dosáhla, při měření na 15 vzorcích, průměrné hodnoty 572,5 N. K dosažení maximální síly došlo po 11,65 s a prodloužení materiálu činilo 16,4 mm.

Zkouška c.	Nejvyšší pevnost (N)	Síla při přetrhu (N)	Doba pro dosažení nejvyšší hodnoty (Secs)	Napětí při 0,000 mm (N/mm ²)	Napětí v 0,000Secs (N/mm ²)	Plastická taznost při přetrhu (%)
Zkouška c. 1	572,5	572,5	11,651			-0,257



Obrázek 85. Graf průběhu tahové zkoušky.

9 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Kapitola zhodnocení výsledků experimentu se zabývá dvěma body diplomové práce. Jedná se o shrnutí stěžejního cíle práce, a to průběhu při návrhu funkčního závaku madla v kombinaci s dostatečnou pevností lepeného spoje a dále pak cenou výrobního kompletu.

9.1 Výsledky mechanických simulací a korekce

Dle zadání projektu musely být síly při nácvaknutí nižší než 250 N. Po prvním návrhu dosahovala síla pro nácvaknutí přes krátké závaky hodnoty 175 N. Problémem však při této variantě a původním tvaru podložky byla velikost síly pro výcvak. Ta dosahovala totožné velikosti tedy pouze 175 N, což však nesplňovalo podmínky v cílech této práce. Proto v dalších korekcích byly provedeny změny jak tvaru podložky, tak tvaru zobáčků. Všechny provedené změny vedly k požadovaným hodnotám. Zatímco síla pro nácvak se sice mírně zvýšila na konečných 237 N, síla pro výcvak však zaznamenala rapidní nárůst a nyní disponuje odolností proti vycvaknutí o velikosti 380 N s tím, že při aplikování této síly dojde k žádoucímu poškození materiálu.

U druhého způsobu nácvaknutí, tedy přes dlouhý závak dosahovala nácvakávací síla u první varianty velikosti 145 N. Stejně jako v předchozím případě byl problém se silou potřebnou pro vycvaknutí, která vykazovala hodnotu 265 N, což taktéž nesplňovalo požadavky projektu. Proto bylo opět nutné provést korekční smyčky, díky kterým se podařilo docílit požadovaných hodnot. Po změně tvaru podložky a dlouhého zobáčku se změnila nácvakávací síla na 208 N a vycvakávací pak na 410 N. Zde se taktéž jedná o velikost síly, kdy dojde k mechanickému poškození madla a tím i splnění cíle práce.

Posledním bodem spojeným s požadovaným funkčním závakem byl lepený spoj. Pevnost spoje by měla dle požadavků práce disponovat odolností vůči síle o velikosti min 550 N při statickém zatížení a energii 30 J při dynamickém. Jak se ukázalo během testování, navržený spoj pomocí oboustranné transparentní lepicí pásky o šířce 22 mm a tloušťce 1 mm splňuje, za použití primeru při nanášení pásky na PC podložku, zadané hodnoty s velkou rezervou.

Při statických zkouškách na trhacím stroji dosahovaly síly průměrně hodnoty 572,5 N, avšak vždy došlo k porušení materiálu madla. Lepený spoj naopak nevykazoval žádné známky poškození. Při dynamických testech na Charpyho kladivu pak byly vždy naměřeny průměrné hodnoty 44 J. I u tohoto testu byly viditelné stopy po mechanickém poškození materiálu,

avšak lepený spoj zůstal bez vady. Lze tedy konstatovat, že návrh lepeného splňuje požadované vlastnosti.

Pro lepší přehlednost požadovaných a dosažených hodnot slouží tabulka č. 7, která srovnává cíle práce s dosaženými výsledky.

Tabulka 7. Srovnání požadovaných a dosažených hodnot.

Popis	Požadované hodnoty	Dosažené hodnoty
Síla pro nacvaknutí přes krátké zácvaky	< 250 [N]	237 [N]
Síla pro nacvaknutí přes dlouhý zácvak	< 250 [N]	208 [N]
Síla pro vycvaknutí přes krátké zácvaky	> 380 [N]	380 [N]
Síla pro vycvaknutí přes dlouhý zácvak	> 380 [N]	410 [N]
Pevnost lepeného spoje staticky	> 550 [N]	572,5 [N]
Pevnost lepeného spoje dynamicky	> 30 [J]	44 [J]

9.2 Cena výrobního kompletu

Mezi další klíčový faktor v zadání projektu patřily výrobní náklady. Výrobní cena jednoho kompletu byla stanovena na max. 5 €. Tato cena musela zahrnovat výrobu dílů, cenu pásky a primeru, náklady potřebné k lepení pásky na podložku, opatření podložky primerovým nátěrem, lepení podložky na sklo dveří a nacvaknutí madla. K získání celkových nákladů bylo zapotřebí zjistit cenu vstříkovaných dílů. Dále cenu pásky a primeru a spočítat jejich výtěžnost. Posledním krokem bylo oslovení technologů a procesních inženýrů, aby spočítali výrobní časy a určili hodinovou sazbu. Ze získaných vstupů pak již bylo možné stanovit jednotlivé ceny, které jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 8). Všechny uvedené ceny a množství jsou vždy přepočítány pro jeden výrobní komplet.

Tabulka 8. Výrobní náklady.

Položka	Množství	Měrná jednotka	Cena [€]
Madlo	1	ks	1,57
Podložka	1	ks	0,79
Oboustranná lepicí páska 22 x 1 mm	226	mm	0,5
Primer	1,14	ml	0,003
Proces lepení a montáže	1	kpl	2
Cena celkem			4,86

Z výsledné tabulky lze vidět, že náklady po vyčíslení všech položek splňují požadovaná finanční kritéria.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla konstrukce transparentního plastového madla splňující několik požadavků, mezi které patřily např. použití pouze transparentních materiálů včetně lepeného spoje, splnění ergonomických požadavků, povrchová úprava dotykových ploch, limitovaná výrobní cena, vyrobiteľnosť vstřikováním a další.

Hlavním cílem však bylo na základě zadaného designu navrhnout ideální parametry pro funkční zácvak plastového madla a podložky. Funkční zácvaky byly navrženy ve 3D softwaru SOLIDWORKS a jejich chování bylo predikováno na základě mechanických simulací v programu Ansys Mechanical Enterprise. Po výrobě prototypových kusů technologií vakuového lití následovalo ověření fyzickými testy v mechanických laboratořích. Zácvaky i pevnost madla musela splňovat definované síly, které jsou detailně popisovány v kapitole 6 a zároveň ve zhodnocení experimentu.

Po absolvování všech testů na prototypových dílech, bylo rozhodnuto o výrobě prototypové vstřikovací formy, která zajistila výrobu dílů s požadovanými vlastnostmi a zároveň výstřiky disponovaly takovou kvalitou, že budou moci sloužit k pokrytí prvotních objednávek při uvedení na obchodní trh ještě před vyrobením sériové formy a sériových dílů.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že bylo dosaženo všech stanovených cílů diplomové práce a sestava madla byla vyvinuta a připravena pro sériovou výrobu. Mezi hlavní přínosy tohoto výzkumu patří vyhotovení 3D modelů, výrobních výkresů (přílohy P I, II, III) a montážního návodu (příloha P IV), podle kterých lze vyrobit a správně namontovat sestavu madla.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEAUMONT, John P.; SHERMAN, Robert a NAGEL, Robert F. *Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation*. Munich: Hanser Publications, 2002. ISBN 978-1-56990-291-2.
- [2] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [3] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [4] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů. I. díl, Vstřikování termoplastů*. 2. vydání. Brno: Uniplast Brno, 1999.
- [5] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů. II. díl, Vstřikování termoplastů*. Brno: Uniplast Brno, 1999.
- [6] OSSWALD, Tim A. a MENGES, Georg. *Material science of polymers for engineers*. 3rd edition. Hanser Publishers, 2012. ISBN 978-1-56990-514-2.
- [7] WANG, Maw-Ling; CHANG, Rong-Yeu a HSU, Chia-Hsiang (David). *Molding Simulation: Theory and Practice*. Munich: Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-620-0.
- [8] WILEY, John. *Diagram of an injection molding machine*. Online. Research gate. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Diagram-of-an-injection-molding-machine-178-reproduced-with-permission-from-John-Wiley_fig3_361045283. [cit. 2023-12-22].
- [9] MAŇAS, Miroslav; TOMIS, František a HELŠTÝN, Josef. *Výrobní stroje a zařízení: gumárenské a plastikářské stroje*. 1. Brno: Vysoké učení technické, 1990. ISBN 80-214-0213-X.
- [10] JOHANNABER, Friedrich. *Injection molding machines: a user's guide*. 4th. Munich: Hanser Publishers, 2008. ISBN 978-1-56990-418-3.
- [11] LENFELD, Petr. *Technologie II: Část II - Zpracování plastů*. Online. Technická univerzita Liberec - Fakulta strojní - Katedra stojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů. 2008. Dostupné

- z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm. [cit. 2023-12-22].
- [12] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů*. Online. 2015. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>. [cit. 2024-01-09].
- [13] KAMAL, Musa R.; ISAYEV, Avraam I. a LIU, Shih-Jung. *Injection molding : technology and fundamentals*. Munich: Hanser, 2009. ISBN 978-1-56990-434-3.
- [14] DANGEL, Rainer. *Injection Molds for Beginners*. Munich: Hanser Publications, 2020. ISBN 978-1-56990-819-8.
- [15] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Online. Publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>. [cit. 2024-01-13].
- [16] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [17] VALERO, José R. Lerma. *Plastics Injection Molding. Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices*. Munich: Hanser Publications, 2020. ISBN 978-1-56990-690-3.
- [18] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901-5704-1.
- [19] DUCHÁČEK, Vratislav. *Přírodní a syntetické kaučuky, termoplastické elastomery*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, 2006. ISBN 80-02-01784-6.
- [20] MCMURRY, John. *Organic chemistry*. 6th ed. Belmont: Thomson-Brooks/Cole, 2004. ISBN 0534390013.
- [21] *Polymery amorfni a semikrystalické z hlediska vstřikování*. Online. <https://www.mmspektrum.com/>. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani>. [cit. 2024-01-18].
- [22] KOLOUCH, Jan. *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním - Jan Kolouch*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [23] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. Online. Publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>. [cit. 2024-01-21].

- [24] MALLOY, Robert A. *Plastic part design for injection molding: an introduction*. 2nd ed. Munich: Hanser Publications, 2011. ISBN 978-1-56990-436-7.
- [25] ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů*. [Praha]: Sekurkon, [2009]. ISBN 978-80-86604-44-2.
- [26] NEUHÄUSL, Emil. *Příčiny vzniku vad a studené spoje*. Online. <https://www.mmspektrum.com/>. 2010. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje>. [cit. 2024-01-21].
- [27] CHEN, Martin. *How to avoid weld lines in injection molding*. Online. <https://guanxin-machinery.com>. 2022. Dostupné z: <https://guanxin-machinery.com/how-to-avoid-weld-lines-in-injection-molding/>. [cit. 2024-01-21].
- [28] AUSPERGER, Aleš. *Tvářené díly z kovů a plastů*. Online. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. 2016. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12331513-Tvarene-dily-z-kovu-a-plastu-tvareni-kovu-a-plastu.html>. [cit. 2024-01-25].
- [29] BRYCE, Douglas M. *Plastic injection molding*. 1. Dearborn: Society of manufacturing engineers, 1996. ISBN 0-87263-472-8.
- [30] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Online. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/vstrikovani-plastu-2-1634514/>. [cit. 2024-01-26].
- [31] HALAŠKA, Petr. *Snižování výrobních nákladů pomocí simulační analýzy*. Online. MM průmyslové spektrum. 2010. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-simulacni-analyzy>. [cit. 2024-01-27].
- [32] RAO, Natti S. a SCHUMACHER, Günter. *Design formulas for plastics engineers*. Online. 2nd ed. Munich: Hanser Publications, 2004. ISBN 1569903700. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpDFPEE007/toc>. [cit. 2024-01-27].
- [33] LÁSZLÓ, Iván. *Proč si kvalitu s Ansys Mechanical nepojistit ještě dříve, než začnete vyrábět?* Online. www.svsfem.cz. 2021. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/ansys-mechanical#licence>. [cit. 2024-01-27].
- [34] CHACHAPARA, Ridheshkumar a AALEN, Hochsule. *Influence of different process variables on the Gas-assist injection molding process using Moldflow*. Online.

- Researchgate.net. 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327833009_Influence_of_different_process_variables_on_the_Gas-assist_injection_molding_process_using_Moldflow. [cit. 2024-03-05].
- [35] Autodesk Moldflow. Online. Arkance systems. 2021. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/produkty/cad-cam-pro-strojirenstvi/autodesk-moldflow>. [cit. 2024-01-28].
- [36] *Vstřikování plastů dovedené k dokonalosti*. Online. CAD studio. 2014. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/dl/Autodesk-Simulation-Moldflow.pdf>. [cit. 2024-01-28].
- [37] KLOSKI, Liza Wallach a KLOSKI, Nick. *Začínáme s 3D tiskem*. Online. 1. Albatros Media, 2017. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=bhy2DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA8&dq=fdm+3d+tisk&ots=bw2FajWlgY&sig=3A68-IL3uJnnX4gHRMS82RBm7M8&redir_esc=y#v=onepage&q=fdm%203d%20tisk&f=false. [cit. 2024-01-29].
- [38] PROCHÁZKA, Lukáš. *FDM - Fused deposition modeling*. Online. www.sps-prosek.cz/. Dostupné z: <https://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/FDM.pdf>. [cit. 2024-01-29].
- [39] *Selective Laser Sintering*. Online. Custompart.net. 2009. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>. [cit. 2024-01-29].
- [40] *Stereolithography*. Online. Custompart.net. 2009. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>. [cit. 2024-01-29].
- [41] *Aditivní výroba*. Online. One3d.cz. Dostupné z: https://www.one3d.cz/technologie/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAtt2tBhBDEiwALZuhAHVuz3vpmmcXsZ8tvo-rUdJJNSI2ZwCoArqoX3pybEQyzzYHRU5CFhoC2NYQAvD_BwE. [cit. 2024-01-29].
- [42] *Silikonové formy a vakuové lití*. Online. www.protocast.cz. Dostupné z: <https://www.protocast.cz/cz/vakuove-liti/>. [cit. 2024-01-30].
- [43] *Silikonové formy a vakuové lití*. Online. www.protocast.cz. Dostupné z: <https://www.protocast.cz/cz/vakuove-liti/>. [cit. 2024-01-30].

- [44] LUO, Amanda. *The Advantages and Disadvantages of Vacuum casting*. Online. [www.linkedin.com/](https://www.linkedin.com/pulse/advantages-disadvantages-vacuum-casting-amanda-luo). 2021. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/advantages-disadvantages-vacuum-casting-amanda-luo>. [cit. 2024-01-30].
- [45] *Lepení plastů (plastových materiálů)*. Online. www.technicke-plasty-tribon.cz. Dostupné z: <https://www.technicke-plasty-tribon.cz/prodej-plastu/technicka-podpora/lepeni-plastovych-materialu>. [cit. 2024-01-30].
- [46] *Loctite, Worlwide Design Handbook*. 2nd ed. Mainz: Erasmusdruck, 1998. ISBN 0-9645590-0-5.
- [47] GREGOR, Miroslav. *Technologie a technika lepení - základní informace*. Online. Lepidla.cz. 2021. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/clanky/technologie-a-technika-lepeni---zakladni-informace>. [cit. 2024-01-30].
- [48] MCAE SYSTEMS, S.R.O. *Technologie SAF – další krok k sériové výrobě 3D tiskem*. Online. www.strojirenstvi.cz. 2021. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/technologie-saf-dalsi-krok-k-seriove-vyrobe-3d-tiskem/>. [cit. 2024-01-30].
- [49] *REHAU - BEHR*. Online. <https://www.rehau-behr.com/>. Dostupné z: <https://www.rehau-behr.com/group-en/showroom>. [cit. 2024-04-29].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Třídimenzionální (trojrozměrný)
Mpa	Megapascal
Pa	Pascal
°C	Stupeň Celsia
TPE	Termoplastický elastomer
pvT	pressure, volume, Temperature (tlak, objem, teplota)
p	Tlak
cm ³ /g	Centimetr krychlový / gram
SVS	Studený vtokový systém
VVS	Vyhřívaný vtokový systém
PMMA	Polymethylmethakrylát
PC	Polykarbonát
PS	Polystyrén
Tg	Teplota zesklnění
Tm	Teplota tání
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PA	Polyamid
PTFE	Polytetrafluoretylén
POM	Polyoximethylen
EPDM	Etylen-propylen-dienový kaučuk
TPU	Termoplastický polyuretan
UV	Ultraviolet (ultrafialové) záření
SAN	Styrén-akrylonitril
h	Hodina

°	stupeň
R/h	rádus/tloušťka stěny
FEA	Finite element analysis (metoda konečných prvků)
2D	dvoudimenzionální (dvourozměrný)
CFPW	Cool-fill-pack-warp
Al	Aluminium (hliník)
FDM	Fused deposition modeling (modelování depozicí taveniny)
CAD	Computer aided design (počítačově podporované projektování)
STL	Stereolitografie / standard triangle language
SLS	Selective laser sintering (selektivní spékání laserem)
CO ₂	Oxid uhličitý
SLA	Stereolitografie
SAF	Selective absorption fusion
CNC	Computer numerical control (počítačové číslicové řízení)
N	Newton
J	Joule
mm	Milimetr
2K	Dvoukomponentní
Kč	Koruna česká
ml	Mililitr
ks	kus
kpl	komplet
€	Euro
P	Příloha
%	Procento
Kg/m ³	Kilogram / metr krychlový

N/cm² Newton / cm čtvereční

s Sekunda

kJ/m² Kilojoule / metr čtvereční

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Cyklus vstřikování [4].	13
Obrázek 2. Vstřikování ideálního výrobku [6].	13
Obrázek 3. Detail fontánového toku [7].	15
Obrázek 4. Graf tlaku během plnění, dotlaku a chlazení [3].	15
Obrázek 5. Vstřikovací cyklus v pVt diagramu [3].	16
Obrázek 6. Vstřikovací stroj [8].	17
Obrázek 7. Vstřikovací jednotka [10].	18
Obrázek 8. Hydraulická uzavírací jednotka [11].	19
Obrázek 9. Vstřikovací forma – otevřená [12].	20
Obrázek 10. Rozdělení polymerů [15].	23
Obrázek 11. Dělení polymerů dle použití a struktury [18].	24
Obrázek 12. Příklady použití PMMA [15].	27
Obrázek 13. Příklady použití PC [15].	28
Obrázek 14. Příklad hlavní dělicí roviny [28].	32
Obrázek 15. Příklad studeného spoje [27].	33
Obrázek 16. Příklad tlouštěk stěn [12].	34
Obrázek 17. Příklady odlehčení [12].	34
Obrázek 18. Příklad přechodů stěn [12].	34
Obrázek 19. Základní rozměry žebra [12].	35
Obrázek 20. Nahrazení vysokého žebra dvěma nižšími [12].	35
Obrázek 21. Vliv velikosti rádiusu na koncentraci napětí [12].	36
Obrázek 22. Příklady úkosů [12].	37
Obrázek 23. Příklad analyzovaného dílu [33].	38
Obrázek 24. Používané sítě v Moldlow [34].	39
Obrázek 25. Princip metody FDM [38].	41
Obrázek 26. Princip metody SLS [39].	42
Obrázek 27. Princip metody SLA [40].	42
Obrázek 28. Vyrobené díly metodou SAF [48].	43
Obrázek 29. Princip vakuového lití [44].	44
Obrázek 30. Nacvakávací madlo rakouské společnosti [49].	48
Obrázek 31. Návrh designerské firmy.	49
Obrázek 32. Sestava madla.	51
Obrázek 33. Porovnání vzhledových vlastností.	52
Obrázek 34. Původní navržené rozměry.	52

Obrázek 35. Design madla: a) původní návrh, b) upravený návrh.	53
Obrázek 36. Čistitelné oblasti madla: a) původní návrh, b) upravený návrh.	54
Obrázek 37. Požadované varianty zácvaku.	54
Obrázek 38. Současné balení dveří – 10 ks.	56
Obrázek 39. Budoucí balení dveří - 14 ks.	56
Obrázek 40. Oboustranná páska VHB 4910-F a Primer 94.	58
Obrázek 41. Finální design madla a podložky.	60
Obrázek 42. Deformace – vliv všech efektů, měřítko 5:1.	60
Obrázek 43. První varianta zácvaků.	61
Obrázek 44. Upravená varianta zácvaků.	61
Obrázek 45. Detail sítě a uzlových bodů.	62
Obrázek 46. Pevné vazby v sestavě.	63
Obrázek 47. Kontaktní vazba s třením – zácvak přes krátké zácvaky.	64
Obrázek 48. Vazba definující místa opěru.	64
Obrázek 49. Okrajové podmínky.	65
Obrázek 50. Nácvak přes dlouhý zácvak.	66
Obrázek 51. Nácvak přes dlouhý zácvak – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.	66
Obrázek 52. Nácvak přes dlouhý zácvak – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.	67
Obrázek 53. Design podložky: a) před úpravou, b) po úpravě.	67
Obrázek 54. Nácvak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises před úpravou.	68
Obrázek 55. Nácvak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises po úpravě.	68
Obrázek 56. Nácvak přes krátké zácvaky.	68
Obrázek 57. Nácvak přes krátké zácvaky – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.	69
Obrázek 58. Nácvak přes krátké zácvaky – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.	69
Obrázek 59. Nácvak přes krátké zácvaky – oblasti s napětím von Mises před úpravou.	70
Obrázek 60. Nácvak přes krátké zácvaky – oblasti s napětím von Mises po úpravě.	70
Obrázek 61. Výcvak přes dlouhý zácvak.	71
Obrázek 62. Výcvak přes dlouhý zácvak – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.	71
Obrázek 63. Výcvak přes dlouhý zácvak – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.	71
Obrázek 64. Výcvak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises před úpravou.	72
Obrázek 65. Výcvak přes dlouhý zácvak – oblasti s napětím von Mises po úpravě.	72

Obrázek 66. Vycvak přes krátké zácvaky.....	73
Obrázek 67. Vycvak přes krátké zácvaky – přetvoření materiálu v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.....	73
Obrázek 68. Vycvak přes krátké zácvaky – graf průběhu sil v čase: a) před úpravou, b) po úpravě.....	73
Obrázek 69. Tvar zácvaku: a) před úpravou, b) po úpravě.....	74
Obrázek 70. Vycvak přes krátké zácvaky – oblasti s napětím von Mises před úpravou.	74
Obrázek 71. Vycvak přes krátké zácvaky – oblasti s napětím von Mises po úpravě.	74
Obrázek 72. Prototyp podložky z materiálu PC.	76
Obrázek 73. 3D tisky madel: 1) metoda FDM, 2) metoda SLS, 3) metoda SAF.	76
Obrázek 74. 3D Forma pro vakuové lití.	77
Obrázek 75. Lití madla.	78
Obrázek 76. Odlitek madla.	78
Obrázek 77. Prototypová forma.....	79
Obrázek 78. Výstřik madla z formy : a) před úpravou, b) po úpravě.	80
Obrázek 79. Test segmentu materiálu.....	81
Obrázek 80. Test pevnosti lepeného spoje.....	81
Obrázek 81. Nacvaknutí a vycvaknutí madla – bodové zatížení.....	82
Obrázek 82. Nacvaknutí a vycvaknutí madla – plošné zatížení.	82
Obrázek 83. Testování madla na Charpyho kladivu.....	83
Obrázek 84. Testování madla na univerzálním zkušebním stroji.....	83
Obrázek 85. Graf průběhu tahové zkoušky.	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Vlastnosti vstřikovaného materiálu SUMIPEX LG2.	57
Tabulka 2. Vlastnosti vstřikovaného materiálu MAKROLON RW2407.....	58
Tabulka 3. Vlastnosti oboustranné akrylové lepicí pásky VHB 4910-F.	59
Tabulka 4. Analýza vstřikovacího procesu – porovnání pozic bodového vtoku.....	61
Tabulka 5. Vstupní hodnoty materiálů pro výpočet.	63
Tabulka 6. Porovnání materiálových vlastností PX 523 a PMMA.....	77
Tabulka 7. Srovnání požadovaných a dosažených hodnot.	86
Tabulka 8. Výrobní náklady.	86

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výkres sestavy

Příloha P II: Výkres madla

Příloha P III: Výkres podložky

Příloha P IV: Montážní návod

Příloha P V: Materiálový list – SUMIPEX LG2

Příloha P VI: Materiálový list – MAKROLON RW2407

Příloha P VII: Materiálový list – Páska VHB 4910-F

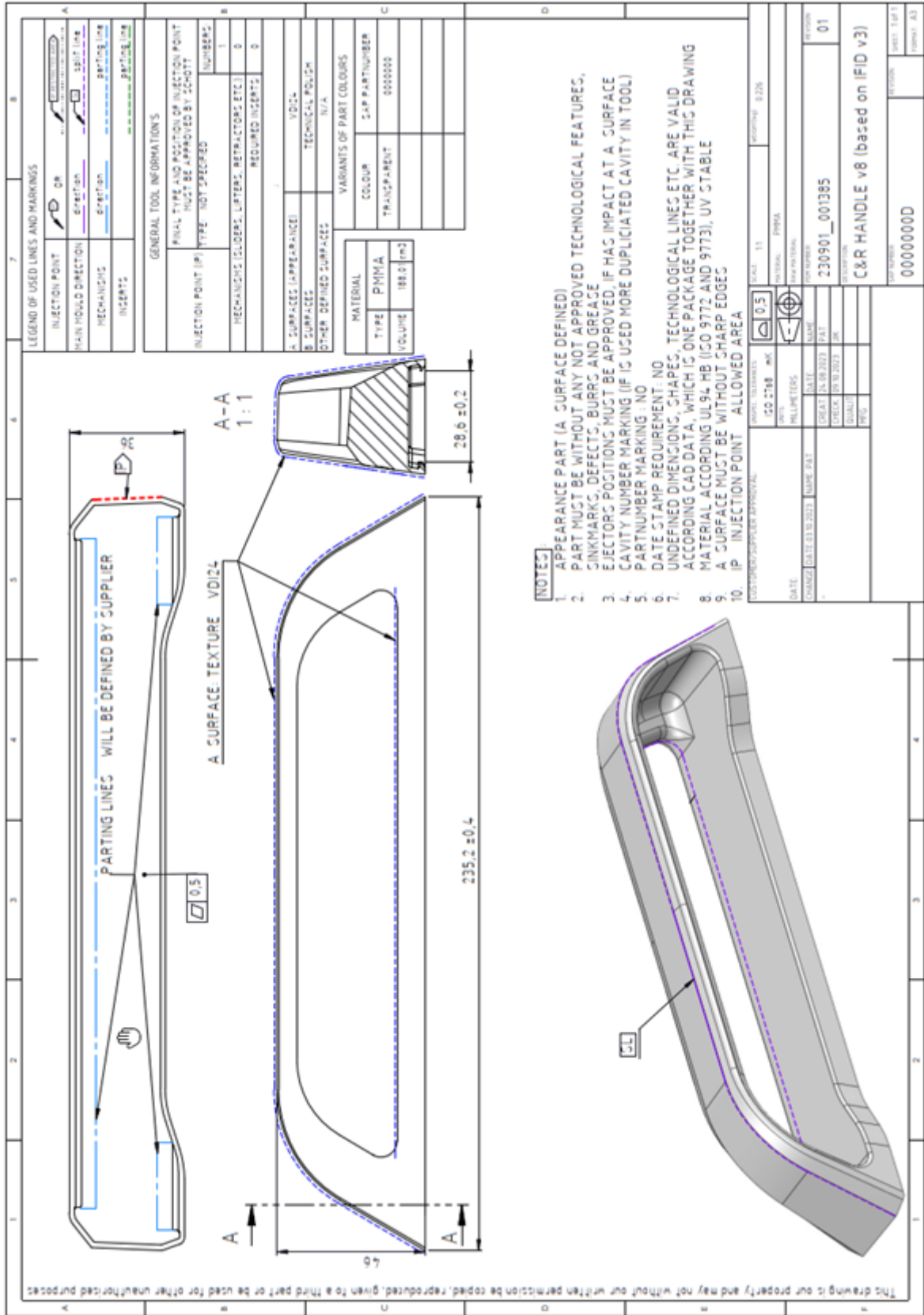
PŘÍLOHA P I: VÝKRES SESTAVY

This drawing is our property and may not without our written permission be copied, reproduced, given to a third party or be used for other unauthorized purposes.

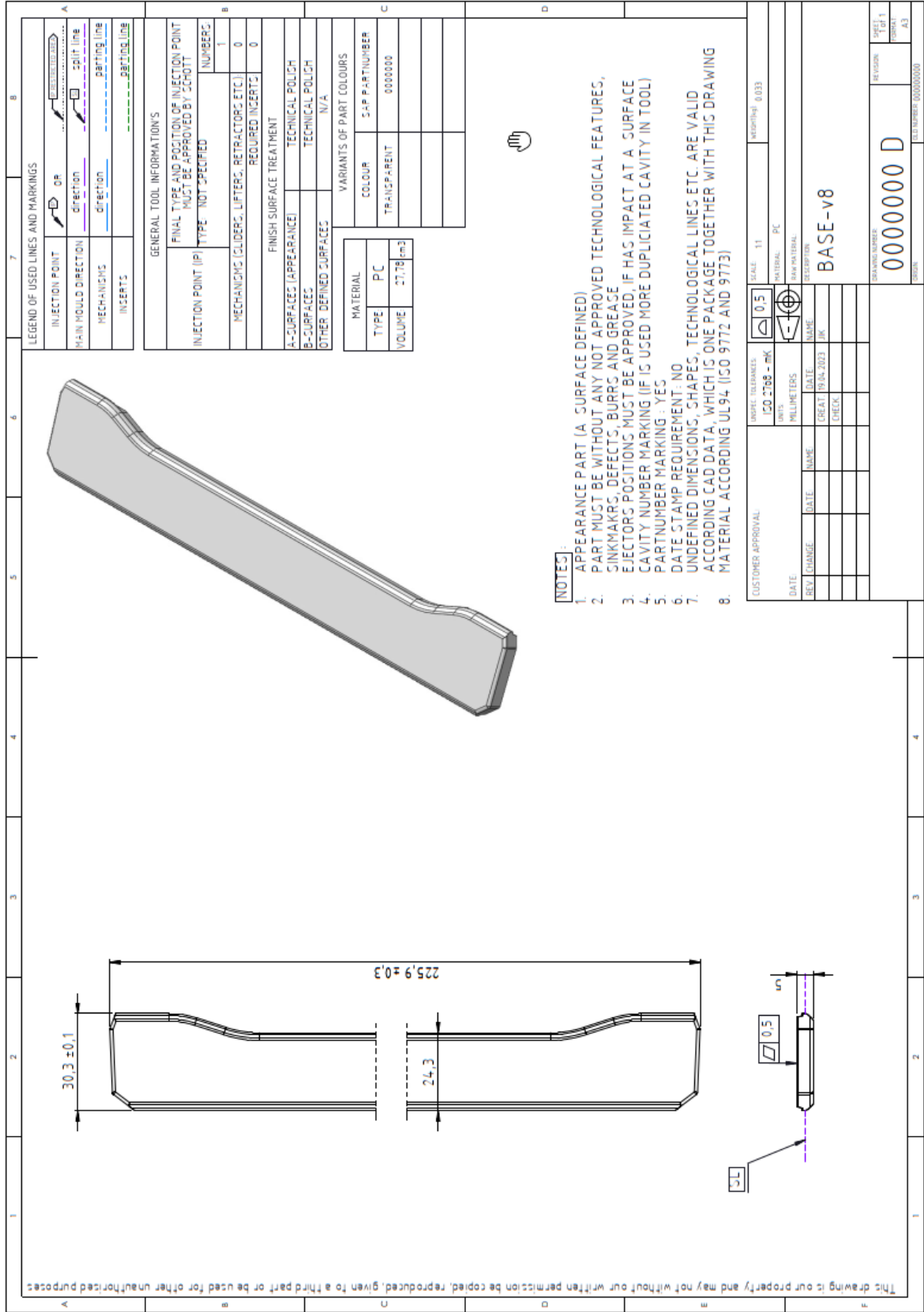
POZICE	POPIS	MNOŽ.	MATERIÁL	HMOTNOST
1	C&R HANDLE v8 (based on IFID v3)	1	PMMA	0.23
2	TAPE VHB 22x1mm	1	AKRYL	0.00
3	BASE v8	1	PC	0.03

CUSTOMER/SUPPLIER APPROVAL		UNSPEC. TOLERANCES ISO 2768 - mK		SCALE: 12	WEIGHT(kg)
DATE:		UNITS MILLIMETERS		MATERIAL:	
CHANGE	DATE	NAME		POD NUMBER	REVISION
				230901	
				DESCRIPTION C&R-HANDLE-v8	
			SAP NUMBER	SAP REVISION	SHEET: 1 of 1
			0000000D		FORMAT: A4

PŘÍLOHA P II: VÝKRES MADLA



PŘÍLOHA P III: VÝKRES PODLOŽKY



This drawing is our property and may not without our written permission be copied, reproduced, given to a third party or be used for other unauthorized purposes.

LEGEND OF USED LINES AND MARKINGS

INJECTION POINT	OR	OR
MAIN MOULD DIRECTION	direction	split line
MECHANISMS	direction	parting line
INSERTS		parting line

GENERAL TOOL INFORMATION'S
 FINAL TYPE AND POSITION OF INJECTION POINT MUST BE APPROVED BY SCHOTT

INJECTION POINT (IP)	TYPE	NOT-SPECIFIED	NUMBERS	1
MECHANISMS (SLIDERS, LIFTERS, RETRACTORS ETC.)	REQUIRED INSERTS	0		
FINISH SURFACE TREATMENT				
A-SURFACES (APPEARANCE)	TECHNICAL POLISH			
B-SURFACES	TECHNICAL POLISH			
OTHER DEFINED SURFACES	N/A			

MATERIAL		VARIANTS OF PART COLOURS	
TYPE	PC	COLOUR	SAP PART NUMBER
VOLUME	27,78 cm ³	TRANSPARENT	0000000







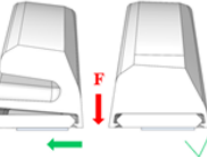
NOTES:

1. APPEARANCE PART (A SURFACE DEFINED)
2. PART MUST BE WITHOUT ANY NOT APPROVED TECHNOLOGICAL FEATURES, SINKMARKS, DEFECTS, BURRS AND GREASE
3. EJECTOR POSITIONS MUST BE APPROVED, IF HAS IMPACT AT A SURFACE
4. CAVITY NUMBER MARKING (IF IS USED MORE DUPLICATED CAVITY IN TOOL)
5. PART NUMBER MARKING : YES
6. DATE STAMP REQUIREMENT: NO
7. UNDEFINED DIMENSIONS, SHAPES, TECHNOLOGICAL LINES ETC. ARE VALID ACCORDING CAD DATA, WHICH IS ONE PACKAGE TOGETHER WITH THIS DRAWING
8. MATERIAL ACCORDING UL94 (ISO 9772 AND 9773)

CUSTOMER APPROVAL		SCALE	1:1	DESCRIPTION	BASE-v8
DATE		UNITS	MM	MATERIAL	PC
REV. CHANGE	DATE	NAME	DATE	DESCRIPTION	

ISSUE NUMBER	0000000 D	REVISION	A3
OLD NUMBER	000000000		

PŘÍLOHA P IV: MONTÁŽNÍ NÁVOD

1. Čištění povrchu	
	<ul style="list-style-type: none">• Očistěte lepený povrch od hrubých nečistot.• Odmastěte povrch pomocí vhodného čisticího prostředku a čistého ubrousku.• Vysušte lepený povrch.
2. Aplikace primeru a pásky	
	<ul style="list-style-type: none">• Aplikujte při teplotách mezi 15 a 25 °C.• Nedotýkejte se očištěného povrchu ani lepidla.• Naneste tenkou vrstvu primeru na povrch lepené plochy polykarbonátové podložky.• Nechejte 30 s odvětrat.• Aplikujte lepicí pásku bez protahování.• Vyhněte se vzniku vzduchových bublin.
3. Aktivace pásky pomocí přítlaku	
	<ul style="list-style-type: none">• Pevnost spoje závisí na velikosti vyvinutého přítlaku.• Velikost vhodného přítlaku je přibližně 2 kg/cm².• Za dostatečného přítlaku zaválečkujte nalepenou pásku.
4. Odstranění snímatelné vrstvy - lineru	
	<ul style="list-style-type: none">• Snímatelnou, krycí vrstvu sejměte plynulým pohybem.• Nedotýkejte se lepidla.
5. Spojení lepených materiálů za pomoci přítlaku	
	<ul style="list-style-type: none">• Nedotýkejte se očištěného povrchu ani lepidla.• Přiložte polykarbonátovou podložku s nanesenou páskou na definované místo.• Vyhněte se vzniku vzduchových bublin.• Za dostatečného přítlaku zaválečkujte spojené materiály.
6. Dosažení konečné pevnosti	
	<ul style="list-style-type: none">• Pevnost spoje se po aplikaci postupně zvětšuje• Při aplikační teplotě je dosaženo 50 % pevnosti spoje po 20 minutách, 90 % po 24 hodinách a 100 % po 72 hodinách.
7. Nacvaknutí madla	
	<ul style="list-style-type: none">• Madlo nasuňte zleva či zprava zácvakem pod podložku.• Dostatečnou silou směrem shora dolů zacvakněte.

PŘÍLOHA P V: MATERIÁLOVÝ LIST – SUMIPEX LG2



Technical Data Sheet

SUMIPEX® LG2 & LG2S

High Flow and General Purpose Grade

Acrylic Moulding Resin

Physical properties:				
Item		Test Method	Unit	Typical Value
OPTICAL	Refractive Index	ISO 489	-	1.49
	Total Light Transmission	ISO 13468-1	%	92
	Haze	ISO 14782	%	<0.5
THERMAL	Coefficient of Linear Expansion	ISO 11359-2	1/°C	7x10 ⁻⁵
	Vicat Softening Temperature (VST)	ISO 306	°C	95
	Deflection Temperature Under Load 1.82 Mpa (annealed)	ISO 75-2	°C	87
	Melt Flow Rate (MFR) 230 oC, 37.3N (3.8kgf)	ISO 1133	g/10min.	15
MECHANICAL	Tensile Strength at break	ISO 527-2	Mpa	68
	Tensile Strain at break	ISO 527-2	%	2
	Flexural Strength	ISO 178	Mpa	110
	Flexural Modulus	ISO 178	Mpa	3000
	Charpy Impact Strength (notched)	ISO 179-1	KJ/m ²	1.4
	Rockwell Hardness Scale M	ISO 2039-2	-	94
ELECTRICAL	Surface Resistivity	IEC 60093	Ω	>10 ¹⁵
	Volume Resistivity	IEC 60093	Ω cm	>10 ¹⁵
	Insulation Resistance	IEC 60167	Ω	>10 ¹⁵
	Dielectric Strength	IEC 60243-1	kV/mm	20
	Dielectric Constant (1MHz)	IEC 60250	-	3.1
OTHER	Specific Gravity	ISO 1183	-	1.19
	Mold Shrinkage	ISO 294-4	%	0.2 - 0.6
	Water Absorption	ISO 62	%	0.3
	Flammability	UL 94	-	HB

For additional technical, sales and order assistance

Europe:

Sumitomo Chemical Europe
 Woluweaan 57, B-1830 Machelen, Belgium
 Tel: +32 2 251 06 50
 Fax: +32 2 251 29 91
 info@sce.sumitomo-chem.be

Disclaimer

The values shown are typical values measured on representative samples and are not to be considered as guaranteed specifications; actual test results may vary. The information and data presented in this document are to the best of our knowledge true and accurate. It is the responsibility of the user to check if the material, whether used alone or in conjunction with other materials, is suitable for the intended application. Sumitomo Chemical disclaim liability whatsoever for any action taken based on this information, and/or for any loss and consequential loss or damage. Please consult the relevant safety data sheet for more detailed information.

PŘÍLOHA P VI: MATERIÁLOVÝ LIST – MAKROLON RW2407



Makrolon® RW2407

Grades / Special grades

MVR (300 °C/1.2 kg) 19 cm³/10 min; low viscosity; easy release; UV stabilized; variable content of filler for high reflectance application; injection molding

ISO Shortname

Property	Test Condition	Unit	Standard	typical Value
Rheological properties				
Melt volume-flow rate	300 °C; 1.2 kg	cm ³ /10 min	ISO 1133	19
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)				
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	2500 - 2700
Yield stress	5 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	60
Yield strain	5 mm/min	%	ISO 527-1,-2	5.5
Nominal strain at break	5 mm/min	%	ISO 527-1,-2	>50
C Stress at break	5 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	50 - 60
C Strain at break	5 mm/min	%	ISO 527-1,-2	80 - 110
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178	2500 - 2750
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178	96
Flexural strain at flexural strength	2 mm/min	%	ISO 178	6 - 6.5
Flexural stress at 3.5 % strain	2 mm/min	MPa	ISO 178	75 - 80
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	N
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 7391/b.o. ISO 180-A	15 (C)
C Puncture maximum force	23 °C	N	ISO 6603-2	4800 - 5100
C Puncture energy	23 °C	J	ISO 6603-2	43 - 50
Thermal properties				
C Vicat softening temperature	50 N; 50 °C/h	°C	ISO 306	144
C Burning behavior UL 94 (1.5 mm) [UL recognition]		Class	UL 94	V-2 (WT)
C Burning behavior UL 94 [UL recognition]	3.0 mm	Class	UL 94	HB (WT)
Burning behavior UL 94 [UL recognition]	0.75 mm	Class	UL 94	V-2 (WT)
Burning behavior UL 94 [UL recognition]	2.7 mm	Class	UL 94	HB (WT)
Relative temperature index (Tensile strength) [UL recognition]	1.5 mm	°C	UL 746B	125
Relative temperature index (Tensile impact strength) [UL recognition]	1.5 mm	°C	UL 746B	115
Relative temperature index (Electric strength) [UL recognition]	1.5 mm	°C	UL 746B	125
Glow wire test (GWFI)	0.75 mm	°C	IEC 60695-2-12	850
Glow wire test (GWFI)	3.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	960
Other properties (23 °C)				
C Density		kg/m ³	ISO 1183-1	1240 - 1340
Material specific properties				
Light reflection	4 mm	%	JIS 8722	96 - 97
Processing conditions for test specimens				
C Injection molding-Melt temperature		°C	ISO 294	280
C Injection molding-Mold temperature		°C	ISO 294	80

C These property characteristics are taken from the CAMPUS plastics data bank and are based on the international catalogue of basic data for plastics according to ISO 10350.

Impact properties: N = non-break, P = partial break, C = complete break

PŘÍLOHA P VII: MATERIÁLOVÝ LIST – PÁSKA VHB 4910-F

VHB™

4910F Akrylová pěnová páska

Údaje o výrobku

Aktualizováno: březen 1996
Nahrazuje vyd. z ledna 1995

Popis výrobku	Výrobek 4910 se speciálními vlastnostmi	Výrobek 4910 je průhledná akrylová páska VHB. Je bezbarvá, proto je ideální na lepení průhledných materiálů nebo pro aplikace, v nichž nelze akceptovat barevnou styčnou linku.	Tyto pásy mají kvůli inherentní měkkosti poněkud menší pevnost adheze, pevnost v tahu a pevnost ve smyku než většina ostatních pásek VHB.
----------------------	--	---	---

Fyzikální vlastnosti Nejsou určeny ke specifikačním účelům	Typ lepidla	Akrylové	
	Tloušťka (ASTM D-3652) Páska Nosná vrstva Celkem	1,0 mm 0,13 mm 1,13 mm	
	Hustota pásy	960 kg/m ³	
	Krycí vrstva	Červená fólie	
	Barva pásy	Bezbarvá	Tato páska je průhledná, ale NEZARUČUJE se optická čírost.
	Skladovatelnost	24 měsíců od data expedice z 3M, pokud je skladována v originální krabici při teplotě 21°C (70°F) a relativní vlhkosti 50 %	

Funkční charakteristiky Nejsou určeny ke specifikačním účelům	Adheze k oceli při stahování stahování v 90° při pokojové teplotě, výdrž 72 h, rychlost čelístí 300 mm/min	26 N/10 mm	
	Statická pevnost ve smyku zatížení po dobu 10.000 min, adheze k nerezové oceli s překrytím 1/8 in ² (3,23 cm ²)	1000 g při 22°C 500 g při 66°C 500 g při 93°C	
	Normální pevnost v tahu (tvar T) na hliníku při pokojové teplotě, 6,45 cm ² , rychlost čelístí 50 mm/min	69 N/cm ²	
	Teplotní výkonnost Max. (hodiny / minuty) Max. souvislá (dny / týdny)	150 °C 93 °C	
	Odolnost proti rozpouštědlům Testovací cyklus postřikání - 20 s ponoření - 3 cykly.	Bez zjevného snížení kvality při postřikové zkoušce s většinou rozpouštědel včetně benzínu, tryskového paliva JP-4, minerálních alkoholů, motorového oleje, čpavkového čistícího prostředku, acetonu a methyl-ethyl-ketonu. 20 sekund schnutí na vzduchu.	
	Odolnost proti ultrafialovému záření	Po 346 h působení řízeného ultrafialového záření nedošlo ke změnám průzračnosti.	