

Výroba tvarových vložek vstříkovací formy pomocí technologie aditivní výroby

Bc. Jan Voborník

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan Voborník
Osobní číslo:	T19853
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Studijní obor:	Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Výroba tvarových vložek vstřikovací formy pomocí technologie aditivní výroby

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše s pomocí odborných zdrojů.
2. Návrh tvarových vložek vstřikovací formy.
3. Návrh technologických podmínek pro technologii aditivní výroby.
4. Výroba tvarových vložek vstřikovací formy.
5. Vyhodnocení dosažených výsledků.

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

Seznam doporučené literatury:

1. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
2. SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. a VLK M. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
3. YANG, Weimin a Ranran JIAN. Research on intelligent manufacturing of 3D printing/copying of polymer. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* [online]. 2019, 2(2), 88-90 [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.1016/j.aiepr.2019.03.001. ISSN 25425048.
4. BOROS, R., P. KANNAN RAJAMANI a J. G. KOVACS. Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting. *Express Polymer Letters* [online]. 2019, 13(10), 889-897 [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2019.77. ISSN 1788618X.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Mañas, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

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 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 zaměřuje na návrh a výrobu tvarových vložek vstřikovací formy pomocí aditivní technologie. V teoretické části diplomové práce je rozebrána problematika využití aditivních technologií včetně jejich rozdělení, principu výroby a porovnání s konvenčními technologiemi obrábění. Dále je blíže popsána metoda stereolitografie, která je využita v praktické části práce. Praktická část je zaměřena na tvorbu návrhu a výrobu tvarových vložek, dle předpokladů pro jejich využití při vstřikování. Práce obsahuje také analýzy spojené s použitím tvarových vložek, návrh vstřikovací formy a určení vhodných procesních podmínek pro vstřikování. Nakonec je srovnána ekonomická a časová náročnost navrženého řešení, vůči konvenčnímu postupu.

Klíčová slova: rychlé prototypování, aditivní výroba, 3D tisk, stereolitografie, vstřikování, vstřikování

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the design and production of injection mold inserts using additive technology. The theoretical part of the thesis deals with the use of additive technologies, including their types, the principle of production and comparison with conventional machining technologies. Furthermore, the method of stereolithography, which is used in the practical part of the work, is discussed in more detail. The practical part is focused on the design and production of mould inserts, according to the assumptions for their use in injection molding. The work also contains analyses associated with the use of mould inserts, design of injection mold and determination of process conditions for injection molding. Finally, economic and time complexity of the proposed solution is compared against the conventional procedure.

Keywords: rapid prototyping, additive manufacturing, 3D printing, stereolithography, injection moulding

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a čas, který mi věnoval pro zdárné dokončení této práce. Také bych rád poděkoval rodině a blízkým, za trpělivost a podporu při studiu na této škole.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ADITIVNÍ VÝROBA	12
1.1 PRINCIP VÝROBY	13
1.2 ROZDĚLENÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ DLE POUŽITÍ.....	14
1.2.1 Rapid prototyping.....	14
1.2.2 Rapid tooling	15
1.3 ROZDĚLENÍ SYSTÉMŮ ADITIVNÍ VÝROBY PODLE TYPU POUŽITÉHO MATERIÁLU	15
1.3.1 Procesy využívající roztavené materiály	16
1.3.2 Procesy využívající materiály s oddělenými částicemi.....	16
1.3.3 Procesy využívající kapalně materiály	16
1.4 OBECNÁ STRUKTURA ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK.....	17
1.5 VÝHODY VŮČI KONVENČNÍM TECHNOLOGIÍM.....	18
1.6 KRITÉRIA VÝBĚRU VHODNÉ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	19
1.6.1 Geometrické parametry	20
1.6.2 Geometrické omezení 3D tisku	21
1.6.3 Tloušťka vrstev	22
1.6.5 Teplota.....	24
2 STEREOLITOGRAFIE	26
2.1 ZAŘÍZENÍ.....	26
2.2 JAKOST TISKU.....	28
2.3 RYCHLOST TISKU	32
2.4 CENA.....	34
2.5 PEVNOST VÝROBKU.....	35
2.6 MATERIÁLY	35
2.7 APLIKACE.....	37
2.7.1 Selhání forem vyrobených stereolitografií.....	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
3 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	40
4 POUŽITÝ SOFTWARE	41
4.1 AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2021	41
4.2 AUTODESK MOLDFLOW 2016 SYNERGY	41
4.3 PRUSASLICER 2.3	41
4.4 PREFORM	41
4.5 NX 12	42

5	NÁVRH VÝROBKU	43
5.1	ÚPRAVA GEOMETRIE VÝROBKU PRO VSTŘIKOVÁNÍ	44
5.2	ANALÝZA VHODNOSTI UMÍSTĚNÍ VTKOVÉHO ÚSTÍ	44
5.3	NÁVRH TVAROVÝCH VLOŽEK	45
5.3.1	Vtokový systém.....	46
5.3.2	Vyhazovací a chladicí systém	46
5.3.3	Odvzdušnění formy	47
5.3.4	Materiál vložek.....	47
5.4	ANALÝZA VLIVU PŮSOBENÍ UZAVÍRACÍ SÍLY NA TVAROVÉ VLOŽKY	48
5.5	TVAROVÉ DESKY	49
5.5.1	Měření rozměrů tvarových vložek	50
5.6	RÁM VSTŘIKOVACÍ FORMY	51
5.7	VÝROBA TVAROVÝCH DESEK	53
5.7.1	Obráběcí centrum DMU 50.....	53
5.7.2	Návrh výrobního procesu	54
5.7.3	Zarovnání ploch	55
5.7.4	Obrábění kapsy na tvarovou vložku.....	56
5.7.5	Vrtání a zahloubení otvorů.....	57
5.7.6	Ostatní operace.....	58
5.7.7	Výrobní časy	59
5.8	ANALÝZA VÝROBY TVAROVÝCH DESEK	61
5.9	ODHAD ČASOVÝCH A EKONOMICKÝCH NÁKLADŮ VÝROBY TVAROVÝCH DESEK.....	63
6	PŘÍPRAVA FDM PROTOTYPŮ	64
6.1	FDM 3D TISKÁRNA.....	64
6.2	NASTAVENÍ TISKU	65
6.3	VÝROBA FDM PROTOTYPŮ	66
6.4	FINANČNÍ NÁKLADY NA VÝROBU FDM PROTOTYPŮ	68
6.4.1	Materiálové náklady FDM tisku	68
6.4.2	Energetické náklady FDM tisku.....	68
6.4.3	Pracovní náklady FDM tisku	69
6.4.5	Celkové náklady FDM tisku	70
7	VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK	71
7.1	ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU TVAROVÝCH VLOŽEK.....	71
7.2	PŘÍPRAVA VÝROBY TVAROVÝCH VLOŽEK	72
7.3	OMYTÍ PŘEBYTEČNÉ PRYSKYŘICE A ODSTRANĚNÍ PODPĚR	73
7.4	VYTVRZOVÁNÍ	74
7.5	VÝPOČET NÁKLADŮ PRO VÝROBU SLA TVAROVÝCH VLOŽEK.....	75
7.5.1	Materiálové náklady SLA tisku	75

7.5.2	Energetické náklady SLA tisku.....	75
7.5.3	Pracovní náklady SLA tisku.....	76
7.5.4	Výrobní režie SLA tisku	76
7.5.5	Náklady na výměnu kádě na pryskyřici	76
7.5.6	Náklady na očištění v isopropylalkohové lázni	77
7.5.7	Náklady na vytvrzení	77
7.5.8	Celkové náklady SLA tisku	78
7.6	MĚŘENÍ ROZMĚRŮ TVAROVÝCH VLOŽEK.....	78
8	ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ V PROGRAMU AUTODESK MOLDFOW.....	81
8.1	NASTAVENÍ ANALÝZY	81
8.2	VSTŘIKOVANÝ MATERIÁL	82
8.3	NASTAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK.....	83
8.4	VÝSLEDKY ANALÝZY	83
8.4.1	Analýza plnicího času	83
8.4.2	Rychlost vstřiku	84
8.4.3	Uzavírací síla.....	85
8.4.4	Vstřikovací tlak	85
8.4.5	Tlak v bodě přepnutí	86
8.4.6	Studené spoje	86
8.4.7	Vzduchové kapsy	87
8.4.8	Objemové smrštění při vyhození	88
8.5	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	89
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM TABULEK.....	103
	SEZNAM PŘÍLOH.....	105

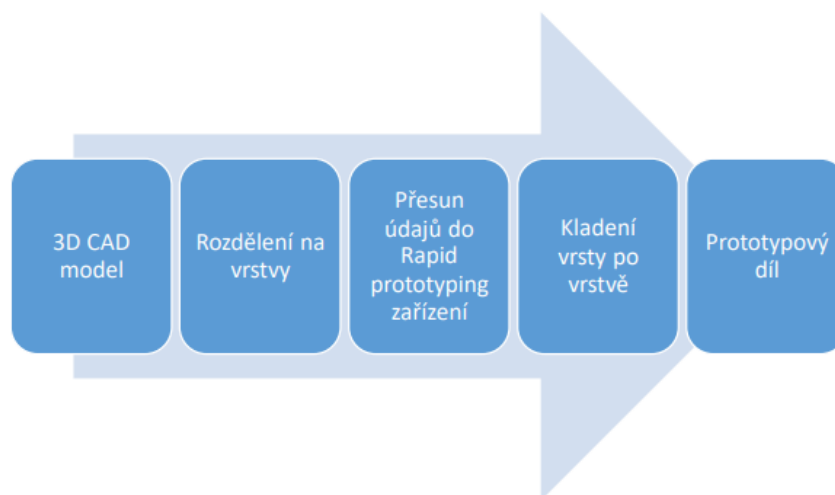
ÚVOD

Zpracováním polymerů se zabývá velmi výrazná část výrobního průmyslu. Polymerní materiály nachází využití ve všech průmyslových odvětvích a každý se s nimi setkává denně. Vstřikování je jednou z nejpoužívanějších zpracovatelských technologií polymerních materiálů. Vzhledem k charakteru této technologie je nutné pro každý výrobek navrhnout unikátní formu, která určuje výsledný tvar výrobku a umožňuje provedení velkého počtu výrobních cyklů. Návrh vstřikovací formy je velmi složitý proces, u kterého je nutné zvážit mnoho faktorů, přímo ovlivňujících její použití. Funkce vstřikovacích forem bývá nejprve analyzována pomocí speciálního softwaru, od kterého ovšem nelze čekat absolutní přesnost. Proto musí vstřikovací formy, a především jejich tvarové desky často podléhat následným úpravám. Výroba tvarových desek formy je současně velmi nákladným procesem, kvůli požadavkům na přesnost, jakost použitého materiálu a jeho povrchovou úpravu. Konvenční technologie ovšem na rozdíl od aditivních často potřebné úpravy neumožňují a musí být přistoupeno k výrobě nových tvarových desek. Za účelem minimalizace nákladů a času potřebného pro výrobu, či testování vstřikovací formy, je možné vyrobít prototypovou formu pomocí aditivních technologií. Použití polymerních materiálů ve vstřikovací formě s sebou nese ovšem i řadu omezení, především nelze očekávat výrobu velkých sérií, při zvýšeném tlaku a za vysoké teploty zvládne většina materiálů sloužit danému účelu pouze po několik desítek cyklů. Úkolem této práce je shrnout problematiku aplikace aditivních technologií při výrobě tvarových vložek vstřikovací formy a navrhnout řešení a výrobu tvarových vložek pro konkrétní výrobek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ADITIVNÍ VÝROBA

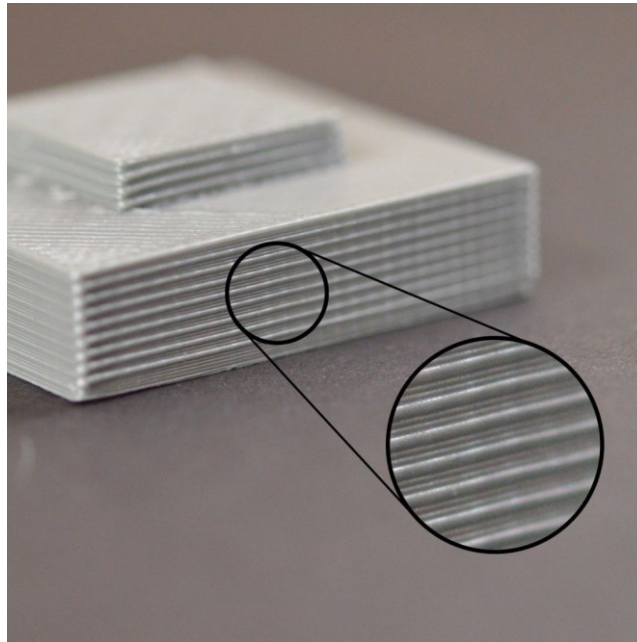
Vývoj nových výrobků v automobilovém, leteckém, elektrotechnickém a spotřebním průmyslu je nerozlučně spjat s termínem 3D tisku, neboli metodami Rapid Prototyping (dále jen RP). Cílem technologií RP je vytvoření fyzického modelu jednotlivých součástí, nebo sestav z počítačových dat, v co možná nejkratším čase oproti konvenčním technologiím. Není to však vždy možné, jelikož je i u jednoduchých modelů nutné vytvářet celý objem od základu, při použití konvenční technologie však může stačit odebrání malé části materiálu. Zkrácení výrobních časů také může přinést značnou finanční úsporu při výrobě prototypů. Proces vývoje nového výrobku je použitím technologií RP značně zrychlený, velkou výhodou je možnost ověření funkce, designu a ergonomie výrobku už ve vývojové etapě. Technologie mohou být použity i k výrobě finálních výrobků o malém počtu kusů, nebo při výrobě součástí klasickými metodami nevyrobitelnými. Technologie RP umožňují výrobu libovolně tvarově složitých součástí v relativně krátkém čase. Volba technologie a materiálu určuje mechanické vlastnosti prototypu, který lze testovat, měřit a porovnávat naměřená data s 3D modelem. Počítačové modelování prototypů umožňuje sdílení dat v rámci sítě (LAN – Intranet/Internet), díky tomu je poskytnuta větší flexibilita výroby a možnost provádět změny bez nutnosti tvorby nové výkresové dokumentace. [1, 2, 3]



Obr. 1 Proces aditivní výroby [1]

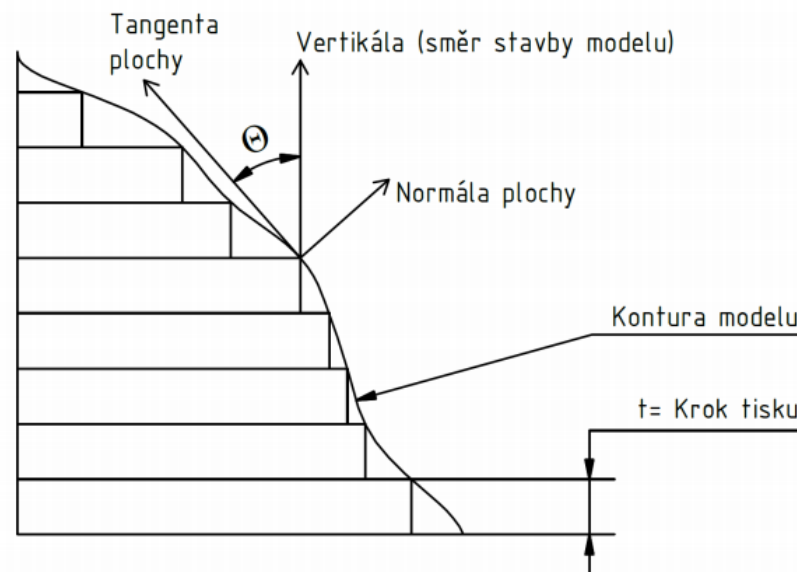
1.1 Princip výroby

Všechny výrobky aditivní výroby jsou vyráběny spojením jednotlivých vrstev konstantní tloušťky. Vrstvy jsou tvarovány dvourozměrně, a to v rovinách X a Y. Třetí rozměr plyne z toho, že jsou jednotlivé vrstvy uspořádány na sobě. Díky řízení stroje v rovinách X a Y lze dosáhnout vyšší přesnosti. Při nanášení vrstev v ose Z dochází na vnějších plochách výrobku ke tvorbě schodů. [2]



Obr. 2 Schodový krok [4]

Schodový krok je typický u výrobků, které byly vytvořeny aditivními technologiemi. Je možná redukce schodového kroku, ale nikdy nelze úplně odstranit. Redukce schodového kroku v ose Z se typicky provádí snížením velikosti kroku, čímž je výrobek tvarově přesnější. Díky počítačem vytvořenému CAD modelu dochází ke generování informací o vrstvách. Tento model je virtuálně řezán do vrstev o stejné tloušťce pomocí matematické metody. Informace o vrstvě se dále používají k vytvoření fyzické vrstvy pomocí 3D tiskárny a celkový součet jednotlivých vrstev tvoří finální model. Dokončený model může být buď prototypem nebo hotovým produktem. [2]



Obr. 3 Schodový krok [17]

Z obrázku 3 je patrné, že drsnost povrchu je ovlivněna úhlem mezi tangentou plochy a směru stavby modelu a drsnost povrchu bude při konstantní výšce kroku růst s rostoucím úhlem. [17]

1.2 Rozdělení aditivních technologií dle použití

Aditivní výroba (Rapid Manufacturing) je podle použití rozdělena do dvou hlavních úrovní:

- Rapid Prototyping (rychlé prototypování).
- Rapid Tooling (rychlá výroba nástrojů, měřidel atd.).

Přičemž je rapid prototyping zaměřeno na výrobu modelů, funkčních prototypů a malých sérií výrobků přímo z dat poskytnutých počítačem ve formě CAD souborů. Rapid tooling se naproti tomu zaměřuje na výrobu forem a nástrojů. Cílem rapid prototyping a rapid tooling je snížení časové náročnosti potřebné k uvedení produktu na trh a tím zvyšují konkurenceschopnost. [5]

1.2.1 Rapid prototyping

Už z názvu technologie je patrné, že se jedná o rychlou výrobu prototypů. V rámci této úrovně aditivní výroby se vytváří různé modely a makety, které se nejčastěji využívají pouze jako napodobenina finálního produktu. Takto vytvořený prototypový model je

testován za účelem urychlení a zkvalitnění vývoje. Hlavním cílem při návrhu dané součásti je, aby byla právě její výroba co nejlevnější a nejrychlejší, ale byla zároveň dostatečně kvalitní pro provedení testů. Nelze tedy prototypové výrobky použít jako finální výrobky, protože se většinou liší od finálního produktu. [13]

Podle účelu daného prototypu se dělí na:

- Koncepční prototypy – Takové slouží pouze k vytvoření vizualizace.
- Funkční prototypy – Slouží k testování z hlediska funkčních parametrů. [1]

1.2.2 Rapid tooling

Při technologickém pokroku aditivní výroby se zlepšila přesnost, cena a materiálové vlastnosti do takové míry, že se stalo výhodným používat aditivní technologie pro výrobu nástrojů. Techniky RT lze rozdělit do dvou kategorií: nepřímé a přímé. Nepřímé přístupy používají postupy aditivní výroby k výrobě forem nebo matric. Existuje mnoho procesů, z nichž nejběžnější, jsou techniky „soft tooling“, které využívají silikonových forem na plastové díly a pro „lití na ztracenou formu“ pro odlévání kovů. Přímé přístupy produkují běžně použitelné tvarové vložky formy a jádra. Silnou stránkou procesu je jeho schopnost vyrábět nástroje, které disponují jinak nevyrobitelnou geometrií. Například výrobu chladících kanálů ve formě, které následují konturu dutiny formy, touto metodou lze zkrátit chlazení až o 66 %. [5, 6]

1.3 Rozdělení systémů aditivní výroby podle typu použitého materiálu

Aditivní výrobu je možné rozdělit podle řady kritérií, podle stavu materiálu při spojování součástí, lze rozdělit aditivní výrobu do pěti skupin. Konkrétně jsou to potom technologie využívající:

- Roztavený materiál.
- Oddělené částice materiálu (prášek).
- Kapalný materiál.
- Vrstvy pevného materiálu.
- Elektrody – Galvanoplastika.[5]

1.3.1 Procesy využívající roztavené materiály

Existuje šest procesů, které jako stavební látku využívají roztavený materiál, z toho všechny, kromě jediné materiál aplikují pouze na určité místo, kdežto technologie SDM vytváří najednou celé vrstvy. Těmito technologie jsou:

- FDM – Fused deposition modeling,
- BPM – Ballistic particle manufacture,
- MJM – Multi jet modeling,
- 3DW – Three-dimensional welding,
- PDM – Precision droplet-based net-form manufacturing,
- SDM – Shape deposition manufacturing. [5]

1.3.2 Procesy využívající materiály s oddělenými částicemi

U těchto procesů dochází buď ke spojování částic prášku teplem, které může být dodáno laserovým nebo elektronovým paprskem, nebo pomocí pojiva. Do této kategorie se řadí:

- SLS – Selective laser sintering,
- DPS – Direct photo shaping,
- 3DP – Three-dimensional printing,
- GPD – Gas phase deposition,
- LENS – Laser engineered net shaping. [1, 5]

1.3.3 Procesy využívající kapalně materiály

Technologie, které zpracovávají materiál v tekuté formě. Při procesu je tekutina vytvrzována pomocí laserového paprsku nebo UV záření, čímž vzniká požadovaný výrobek. Nejčastěji používané materiály jsou fotopolymery v tekuté formě, využívá se viskózních monomerů s malým nebo žádným zesíťováním. Technologie využívající tekuté materiály jsou:

- SL – Stereolithography,
- LTP – Liquid thermal polymerization,
- HIS – Holographic interference solidification,

- SGC – Solid ground curing,
- Objet Quadra process,
- RMPD – Rapid micro product development. [2, 5]

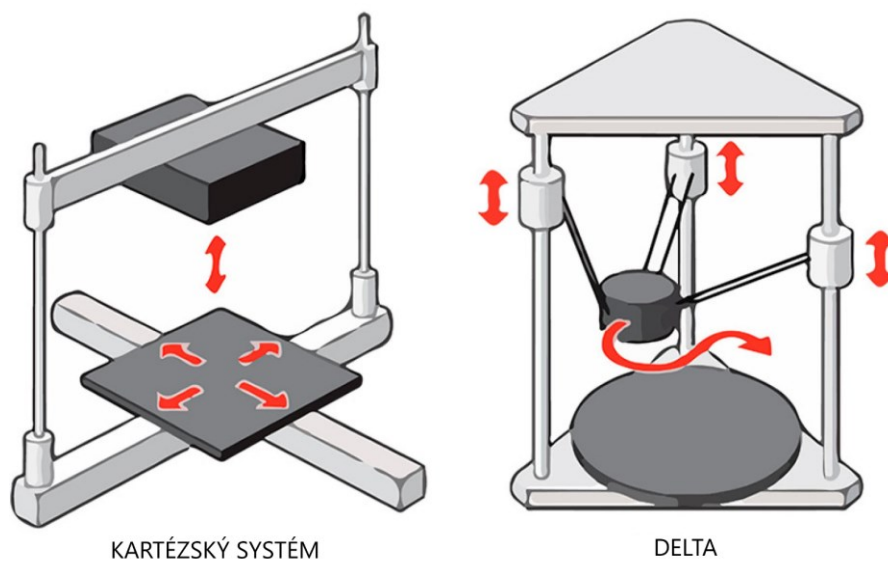
1.3.4 Procesy využívající vrstvy pevného materiálu

Existují tři různé procesy, které jako stavební materiál využívají tenké vrstvy pevných materiálů konkrétně se jedná o:

- LOM – Laminated object manufacturing,
- PLT – Paper lamination technology,
- SFP – Solid foil polymerization. [5]

1.4 Obecná struktura zařízení pro 3D tisk

Všechny 3D tiskárny disponují určitými systémy, které musí obsahovat. V první řadě je nutné, aby se extrudér, nebo zdroj záření, který zajišťuje vytvrzování materiálu mohl pohybovat minimálně ve 2 osách. U technologií, které využívají zdroj záření bývá pohyb zajištěn pomocí optických prvků. U systémů s extrudérem se pro tento účel se nejvíce využívají dvě struktury řídicích systémů, konkrétně kartézská a delta (viz. obr. 4), existují však i jiné řešení, jako je například variace kartézského systému CoreXY, nebo systém Polar. Dle srovnávací studie disponují výrobky systému delta zhruba o 0,5 % lepší rozměrovou přesností, ale čas výroby je zhruba o 10 procent větší. [53, 54]



Obr. 4 Kartézská a DELTA struktura zařízení [53]

Následně každé zařízení disponuje základovou pracovní deskou pro tisk výrobku, v některých případech bývá temperovaná a má speciální povrchovou úpravu. Dále každé zařízení obsahuje zásobník materiálu, dle druhu použitého materiálu je uložen buď v kádi (práškové a kapalně materiály), nebo navinutý na cívce (pevné materiály). [53]

1.5 Výhody vůči konvenčním technologiím

V experimentu, který provedl Ben Redwood pro 3dhubs.com byly srovnány technologie vstřikování do formy vyrobené konvenčními technologiemi, vstřikování do formy s tvarovými vložkami vyrobenými pomocí stereolitografie a výrobky přímo vyrobené technologií FDM. Předmětem zakázky by v tomto případě měla být výroba dvaceti pěti kusů kování motoru vyrobeného z ABS, vymodelovaná součástka je k nahlédnutí v obrázku 5. Dalšími požadavky výroby byla vysoká rozměrová přesnost, černá barva výrobku, váha 5 g, a průměr 40 mm. [47]



Obr. 5 Kování motoru [47]

Pro FDM tisk byly použity ABS filamenty, samotný FDM tisk splnil požadavky vzhledem k velké rozměrové přesnosti a opakovatelnosti procesu. Jedním z problémů je anizotropní chování výrobku, mechanické vlastnosti výrobku jsou v jenom směru oslabeny. Tisk byl proveden na zařízení Fortus 250 MC od firmy Stratasys a bylo využito 20% výplně. Pro vstřikování do tvarových vložek vyrobených pomocí SLA bylo využito miniaturního

vstřikovacího lisu a tvarové vložky byly usazeny do hliníkových univerzálních rámu. Konvenční technologie poskytují nejvyšší přesnost, jakost povrchu tvarových vložek a nejvyšší množství provedených cyklů, ovšem za cenu vysokých pořizovacích nákladů. Srovnání cen je uvedeno v tabulce 1. [47]

Tab. 1 Náklady [47]

	Přímá výroba FDM	Vstřikování do SLA tvarových vložek	Vstřikování do konvenčních tvarových vložek
Cena formy	-	1 554 Kč	36 428 Kč
Cena jednoho výrobku	81 Kč	1 Kč	41 Kč
Celková cena	2 025 Kč	1 582 Kč	37 530 Kč
Čas výroby	4 dny	2 dny	8 dní

Ze srovnání cen je jasně patrné, že při malých sériích nemůže konvenční technologie z hlediska nákladů aditivním technologiím konkurovat a investice na výrobu vstřikovací formy konvenční technologií je pro malou sérii výrobků příliš velká. Oproti technologii FDM bylo vstřikování na miniaturním lisu levnější a rychlejší, ale životnost formy se pohybuje pouze v desítkách cyklů.

1.6 Kritéria výběru vhodné aditivní technologie

Při výrobě tvarových vložek vstřikovací formy je nutno dbát na skupinu kritérií, které vstřikovací proces přímo ovlivňují. Pro úspěšné provedení vstřikovacího procesu je nutno zajistit, aby vlastnosti materiálu tvarových vložek a vlastnosti vstřikovaného materiálu korespondovaly. Především nelze pro výrobu tvarových vložek použít materiál, který bude mít teplotní odolnost nižší nebo podobnou jako je teplota tavení vstřikovaného polymeru. Dále je nutné uvážit prostorové deformace které se s aditivní výrobou vážou. Od všech aditivních technologií nelze očekávat přesnost a „dokonale hladký“ povrch, kterého lze dosáhnout konvenčními metodami obrábění. Na druhou stranu, navrhované tvarové vložky formy nejsou určeny pro sériovou výrobu, nýbrž pouze jako prototyp. Životnost polymerních materiálů ve formě bývá řádově v desítkách cyklů, proto je nevyhovující pro velkosériovou výrobu. Pro srovnání, při použití tvarových vložek z hliníku lze při správné údržbě docílit životnosti formy na dva tisíce cyklů, při použití oceli lze docílit i padesáti tisíc cyklů. Navíc je zřejmé, že vstřikovací cyklus se značně prodlouží při použití polymerních tvarových vložek, kvůli nižší tepelné vodivosti. [7, 8]

1.6.1 Geometrické parametry

Pro výrobu tvarových vložek ve formě jsou na kvalitu povrchu kladeny vysoké nároky kvůli správnému odformování a jakosti výsledného výrobku. Při hrubé struktuře povrchu tvarové vložky může dojít ke vzniku deformací a může být narušen optimální tok polymeru ve formě. Srovnání základních charakteristických parametrů vybraných aditivních technologií je provedeno v tabulce 2. [7]

Tab. 2 Srovnání parametrů aditivních technologií [14]

Název technologie	Stereolitografie	Fused deposition modeling	Selective Laser Sintering	Direct Metal Laser Sintering	Multijet printing
Zkratka	SLA	FDM	SLS	DMLS	MM, MJM
Typ materiálu	Kapalina (Fotopolymer)	Pevný (Filamenty)	Prášek (Polymerní)	Prášek (Železný)	Kapalina
Materiály	Termoplasty (Elastomery)	Termoplasty jako např. ABS, Polykarbonát, PPSU, Elastomery	Termoplasty jako např. Nylon, Polyamid, Polystyren; Elastomery; Kompozity	Železné slitiny, Nerezová ocel, Nástrojové oceli; Neželezné kovy jako např. Hliník, Bronz, Kobalt, Chrom, Titan; Keramika	Termoplasty, např. polyester
Maximální velikost výrobku [cm]	150x 75 x 50	90 x 60 x 90	55 x 55 x 75	25 x 25 x 22	30 x 15 x 15
Minimální tloušťka vrstvy [mm]	0.025	0.15	0.1	0.025	0.001
Tolerance [mm]	±0.1	±0.1	±0.025	±0.25	±0.025
Povrch výrobku	Jemný	Hrubý	Průměrný	Průměrný	Velmi jemný
Rychlost tisku	Průměrná	Pomalá	Rychlá	Rychlá	Pomalá

Z tabulky je tedy patrné že technologie FDM je z hlediska výroby tvarových vložek nevyhovující, kvůli hrubému povrchu, bez následných operací. Pro výrobky technologie FDM bývá pro zlepšení kvality povrchu využíváno broušení a tryskání jemným pískem, či ocelovými broky. Z hlediska rychlosti tisku nejhorší výsledky vykazují technologie FDM a Inkjet printing. Použití inkjet printing nadále komplikuje nutnost použití podpůrného materiálu a nepřislušnost aplikace ve vysoké teplotě. Technologie SLS, SLA a DMLS splňují ve všechny potřebné geometrické parametry pro aplikaci vstřikovací formě. Možné aplikace pro konkrétní technologie jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Aplikace aditivních technologií [14]

Název technologie	Stereolitografie	Fused deposition modeling	Selective Laser Sintering	Direct Metal Laser Sintering	Inkjet printing
Možnosti aplikace	Testování tvaru, Testování funkce, Velmi detailní součástky, Modely pro prezentace, Aplikace při vysoké teplotě	Testování uložení / odformování, Testování funkce, Malé detailní výrobky, Modely pro prezentace, Spotřebitelská aplikace, Aplikace při vysoké teplotě	Testování uložení / odformování, Testování funkce, Méně detailní součástky, Zavírací výrobky se zobáčky a panty, Aplikace při vysoké teplotě	Testování uložení / odformování, Testování funkce, Výroba nástrojů, Aplikace při vysoké teplotě, Lékařské implantáty, Výrobky pro aerokosmonautiku	Testování uložení / odformování, Velmi detailní součástky, Šperky a drobné předměty, Lékařské pomůcky

1.6.2 Geometrické omezení 3D tisku

Pro úspěšný tisk výrobku je nutné držet se několika základních pravidel a je nutno chápat, že není možné vyrobit všechny tvary, které lze vymodelovat v CAD softwaru. Z pravidla je vhodné vyvarovat se tloušťkám stěn nižším než 2 mm, i když se přesná minimální tloušťka stěny liší u všech technologií. Dalším omezením je maximální velikost výrobku. Srovnání minimálních tlouštěk vrstvy i maximální velikosti výrobku, je uvedeno v tabulce 2. Každý 3D model určený pro výrobu aditivní technologií by měl být kompletně uzavřený. Při využití aditivní výroby může být totiž neuzavřený výrobek chybně interpretován softwarem zařízení a může dojít ke vzniku nekonzistentních vrstev, děr, nebo jiných chyb. Pro zajištění hladkého povrchu výrobku je nutné, aby jeho povrch popisovalo adekvátní množství polygonů. Pokud povrch 3D modelu bude reprezentovat malé množství

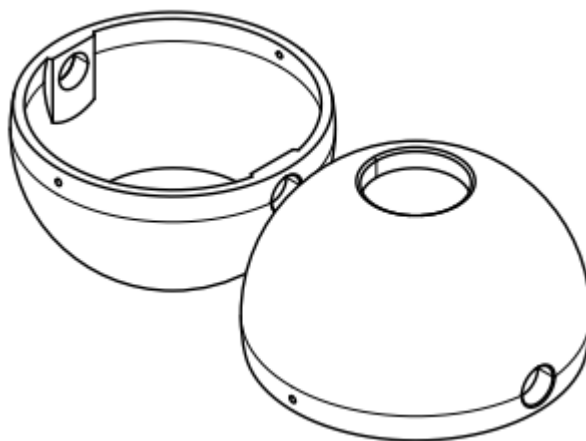
polygonů budou často viditelné, na druhou stranu, pokud bude povrch reprezentovat příliš vysoké množství polygonů, velikost souboru bude příliš velká, bude těžké s ním nakládat a nebude to mít vliv na jakost finálního výrobku.

1.6.3 Tloušťka vrstev

Tloušťka vrstev podle technologie a potřeb výroby se nejčastěji pohybuje mezi hodnotami 0,3 a 0,05 mm. U strojů pro výrobu makroskopických výrobků je minimální tloušťka 0,016 mm a u mikroskopické výrobky do rozsahu 5 μm . Pro zkrácení výrobní doby se využívá tloušťka až 0,2 mm, za cenu snižování přesnosti výrobku. [2]

1.6.4 Životnost forem

V experimentu provedeném S. Van den Broeckem byly za účelem výroby obalu oka kamery vstřikováním srovnány tvarové vložky forem vyrobené pomocí technologií multijet a stereolitografie. Požadovaný výrobek je zobrazen na obrázku 6. [50]



Obr. 6 Rám oka kamery [50]

V první fázi práce byl model výrobku upraven, byl odstraněn podkos, zrovnoměněna tloušťka vrstvy a byly odstraněny díry na šrouby. Podle upraveného modelu výrobku byly navrženy tvarové vložky a byla provedena analýza toku polymeru v dutině. Výroba probíhala pro několik verzí návrhu, při kterých byly využity jiné technologie a materiály. V první verzi formy docházelo k vyosení tvarových vložek a museli být k sobě pevněji upnuty. Největší změnou ve třetí verzi bylo zesílení tvárníku, jelikož v předchozí verzi došlo k jeho prasknutí. Také došlo k použití pryskyřice FormLabs High Temp, která má podle dat uváděných výrobcem vysokou teplotní odolnost, měla by odolat teplotám 289 °C při tlaku 0,45 MPa a měla by být pevnější než standartní pryskyřice. Pro tisk třetí verze

byla využita tiskárna Formlabs Form 2 protože starší model nedokázal tisknout specializované pryskyřice. Při testech se ovšem ukázalo, že její odolnost vůči tlaku je nižší než u standardní pryskyřice. Nedochovalo sice k odlupování povrchu, ale forma po pěti cyklech praskla. Testování bylo opakováno pro stejnou geometrii formy, jediným rozdílem bylo použití jiného plniva, bylo dosaženo ještě horšího výsledku. Forma sice byla schopná odformovat bezchybný výrobek, ale při prvním použití praskla. Ve čtvrté verzi formy došlo k minimálním změnám v konstrukci. Bylo využito technologie polyjet a zařízení Objet 750 od firmy Stratasys. Tyto testy měli lepší výsledky, ale je nutno podotknout že jak cena zařízení, tak cena tisku je podstatně vyšší a tím je nedostupná pro běžné uživatele. [50]

Tab. 4 Výsledky experimentu [50]

	Verze 1	Verze 2	Verze 3A	Verze 3B	Verze 4A	Verze 4B
Tiskárna	FormLabs Form 1+	FormLabs Form 1+	FormLabs Form 2	FormLabs Form 2	Stratasys Objet J750	Stratasys Objet J750
Materiál tisku	FormLabs Clear V2	FormLabs Clear V2	FormLabs High Temp	FormLabs High Temp	Stratasys Verowhite	Digitální ABS
Plnivo	F160/Alu	F160/Alu	Epoxid	F160/Alu	F160/Alu	F160/Alu
Tloušťka vrstvy [mm]	0,025	0,025	0,025	0,025	0,016	0,016
Odhad ceny materiálu	391 Kč	574 Kč	782 Kč	782 Kč	3 911 Kč	6 517 Kč
Počet cyklů	9	9	5	1	15	25+
Poruchy formy	Žádné, ale výrobky nebyly správně odformované	Odlupování povrchu a prasknutí	Prasknutí	Prasknutí	Odlomení části formy	Žádné
Počet správných cyklů	0	5	5	1	10	25+

V tabulce 4 jsou k nahlédnutí výsledky experimentu. Je z nich zřejmé, že technologie polyjet poskytuje z hlediska životnosti formy lepší výsledky než stereolitografie. Tiskárna Stratasys Objet 750 je ale už plnohodnotné průmyslové zařízení. Naproti tomu Formlabs Form 2 je stolní zařízení. Z toho plyne velký rozdíl v cenách zařízení i materiálů. A je nutno podotknout výroby forem z High Temp pryskyřice prokazovaly až do prasknutí skvělé povrchové vlastnosti i rozměrovou přesnost. Pro vstřikování byl využit stolní vstřikovací lis Travin mini moulder, který můžete vidět na obrázku 7. Skrze jednotlivé verze byly dodržovány stejné parametry pro vstřikování, sice teplota 220 °C a tlak 0,275 MPa.

V případě srovnání geometrických tolerancí lze také pozorovat, že drahá průmyslová zařízení poskytují daleko větší přesnost než běžná stolní zařízení. Rozměrová přesnost tiskárny Stratasys Objet J750 je podobná jako na běžném CNC obráběcím centru. Geometrické tolerance jsou uvedeny v tabulce 5. [50]

Tab. 5 Geometrické tolerance tvarových vložek [50]

Zařízení	Formlabs Form 1+	Formlabs Form 2	Stratasys Objet J750	Stratasys Objet J750	CNC obráběcí centrum
Materiál	Formlabs Clear V2	Formlabs High Temp	VeroWhite	Digitální ABS	Hliník
Průměrná tolerance [mm]	0,312	0,249	0,039	0,041	0,031

TP1 Moulding Machine



Obr. 7 Travin TP1 [51]

1.6.5 Teplota

Pro zachování funkce formy po větší počet cyklů, je nutné, aby tvarové vložky měly nižší teplotu tavení než vstřikovaný polymer. Technologie DMLS, která jako stavební materiál používá kovů, které mají daleko vyšší teplotou tavení. Takže se jich teplotní omezení pro běžné vstřikování netýká. Přehled vstřikovaných materiálů, včetně orientačních teplot tavení a teplot formy je uveden v tabulce 6. [14]

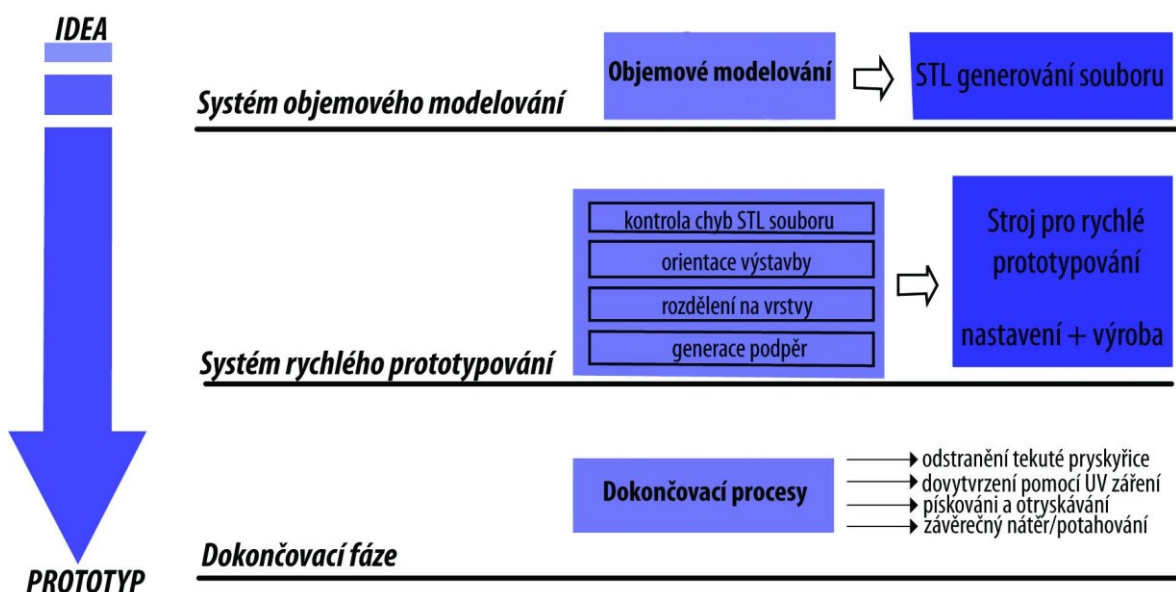
Tab. 6 Přehled materiálu pro vstřikování [10]

Materiál	Teplota tavení (°C)	Doporučená teplota formy (°C)
ABS	190-270	40-80
ABS/PC	245-265	40-80
POM	180-210	50-120
HDPE	210-270	20-60
LDPE	180-240	20-60
NYLON 6	230-290	40-90
NYLON 6/6	270-300	40-90
NYLON 11	220-250	40-110
NYLON 12	190-200	40-110
PEEK	350-390	120-160
PC	280-320	85-120
PBT	240-275	60-90
PET (Semikrystalický)	260-280	20-30
PET (Amorfní)	260-280	20-30
POLYPROPYLENE (kopolymer)	200-280	30-80
PS	170-280	30-60
PVC P	170-190	20-40
PVC U	160-210	20-60
SAN	200-260	50-85
TPE	260-320	40-70

2 STEREOLITOGRAFIE

Tato technologie posloužila jako základ pro vznik 3D tisku, první komerční systém byl vytvořen už v roce 1988. Stejně jako u ostatních metod, je výrobek budován po vrstvách. Materiálem bývá fotosenzitivní pryskyřice, která je vytvrzována fotopolymerizací díky vystavení UV záření. Zdrojem záření může být Hélium-kadmiový laser, v případě starších zařízení, nebo Nd:YVO₄ laser, v případě moderních zařízení. Celý proces výroby lze rozdělit do tří fází, konkrétně předzpracování, proces výstavby a post processing. [18]

Ve fázi předzpracování je výrobek v CAD aplikaci vytvořen jako objemový, či plošný model a dále převeden do STL formátu, který využívá většina programů. Během fáze předzpracování, je třeba učinit řadu rozhodnutí, která definují dobu výstavby a náklady na produkt. Je nutné rozhodnout například o orientaci výrobku během stavby, pro zkrácení doby výstavby a generování podpěr nutných pro výrobu přesahů a podříznutí. Soubor STL je poté upraven tak, aby zahrnoval podpěry a je rozdělen na určitý počet vrstev. Tyto informace se ukládají do CLI souborů, což je běžný formát pro vstup do stereolitografických strojů. Rozdělení procesu je vyobrazeno na obrázek 8. [18]



Obr. 8 Kroky při využití stereolitografie [18]

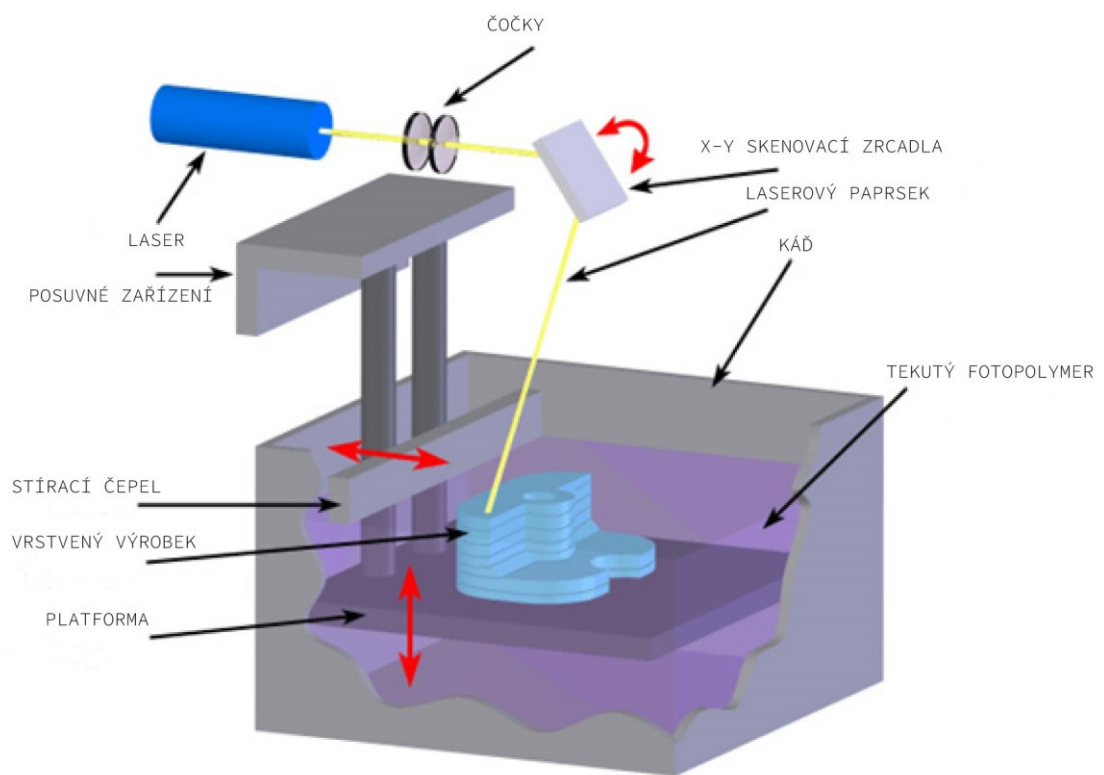
2.1 Zařízení

Zařízení stereografické tiskárny se skládá z několika subsystémů. Konkrétně se jedná o:

- Odnímatelnou kád', která obsahuje fotosenzitivní polymer.

- Posuvnou platformu, na které je výrobek budován, včetně rámu, na kterém je přesně kontrolován vertikální pohyb platformy.
- Zařízení pro automatické snímání úrovně pryskyřice.
- Stírací čepel se zařízením zastávajícím horizontální pohyb, pro zajištění rovnoměrné tloušťky vrstvy.
- Zdroj UV záření a potřebné optické vybavení. [19]

Schéma zařízení je k nahlédnutí na obrázku 9 a příklad moderního designu zařízení na obrázku 10.



Obr. 9 Schéma zařízení stereolitografické tiskárny [19]

Během fotopolymerizace mohou být uvolňovány výpary, proto bývá celý systém zastaven v komoře. Stavba výrobku začíná nastavením platformy pod hladinu fotopolymeru, aby mohlo začít vytvrzování první vrstvy, která odpovídá průřezu výrobku. V případě konvenční stereolitografie je nejprve laserem vytvrzen obvod vrstvy a poté se křížovým šrafováním vytvrzuje zbytek průřezu. V případě projekční stereolitografie je celá geometrie vrstvy vytvrzována současně. Po vytvrzení celé vrstvy

je platforma posunuta o směrem dolů o vzdálenost odpovídající tloušťce vrstvy a stírací čepel vyrovná a zrovnoměrní fotopolymer přes předchozí, již vytvrzenou vrstvu. Následně jsou stejným způsobem vytvrzeny další vrstvy fotopolymeru odpovídající všem průřezům dílu tak, že je vytvořena celá struktura modelu CAD.

Postprocesní fáze operace probíhá, jakmile je díl odstraněn ze základní desky. Tato operace začíná očištěním výrobku, aby se odstranil přebytečný fotopolymer připojená k povrchu dílu. V mnoha případech je nutné zařadit jako další krok vyplachování ethylalkoholem a následně se podpěry odpojí. Obecně platí, že fotopolymer během procesu stereolitografie nepodléhá úplnému vytvrzení. Obvykle je fotopolymer vytvrzen z 65–90 %. Pro úplné vytvrzení výrobku je nutné jej umístit do UV vytvrzovacího zařízení. Nedostatečná polymerace může vést k deformacím v důsledku relaxace, difúze, nebo odpařování nízkomolekulárních složek a následného smrštění. V mnoha případech je součást pískovaná, leštěná a potahovaná nebo natřená, v závislosti na požadované aplikaci. [18, 20]



Obr. 10 Formlabs form 3B [21]

2.2 Jakost tisku

Stereolitografie je velice přesně kontrolovatelný proces, jelikož je možné přesně nastavit více než patnáct parametrů. Z toho vyplývá, že jakost výrobku je závislá na více parametrech. Při určování kvality výrobků stereolitografie jsou zvažovány dva hlavní faktory, konkrétně povrchová drsnost a rozměrová přesnost. Oba faktory závisí na použitém stroji a procesních parametrech. Jednotlivé parametry jsou uvedeny v tabulce 7. [22]

Tab. 7 Procesní parametry stereolitografické tiskárny [22]

Parametr	Definice
Výkon laseru	Výkon laseru
Hloubka zaostření	Poloha ohniska s ohledem k povrch bez pryskyřice
Průměr zaostření	Průměr zaostřovacího bodu pro řízení šířky vytvrzené linie pryskyřice
Rychlost skenování	Rychlost laserového trasování
Tloušťka vrstev	Daná tloušťka mezi řezy modelu v ose Z
Čas následného vytvrzování	Čas, po který je výrobek ponechán v UV peci pro úplné vytvrzení
Rozteč šrafování	Vzdálenost mezi každým vektorem šrafy
Styl šrafování	Styl šrafování
Hloubka převytvrzení	Hloubka, po kterou laser fotopolymer vytvrzuje přes požadovanou tloušťku vrstvy
Faktor kompenzace šířky čáry	Aplikováno na okrajích dílu pro zlepšení přesnosti rozměrů
Orientace	Pozice ve vaně s materiálem
Perioda stírání	Definuje rychlost stíracího nože pro vyrovnání vrstvy
Počet stěrů na vrstvu	Definuje počet přejezdů stíracího nože pro každou vrstvu
Vrstvicí čas	Čas potřebný k usazení fotopolymeru po setření
Čas po vytvrzování	Čas, který výrobek musí být pod UV zářením pro finální polymeraci (obvykle v PCA)

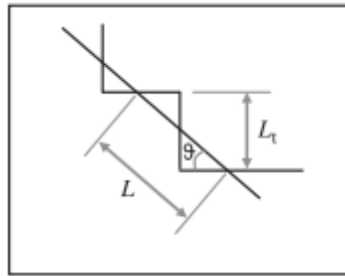
2.2.1 Povrchová drsnost

Experimentální průzkumy prokázaly, že faktory, které nejvíce ovlivňují povrchovou drsnost jsou:

- Orientace výrobku na platformě,
- tloušťka vrstvy,
- vlastnosti materiálu,
- způsob výstavby.

Přesný odhad povrchové drsnosti je cennou informací, která dopomůže k určení optimální orientace stavby. Současně dosažení nižší povrchové drsnosti snižuje rozsah, tím i čas, potřebných postprocesingových operací. Z těchto důvodů byla pro predikci drsnosti povrchu navržena řada analytických modelů. [23, 24]

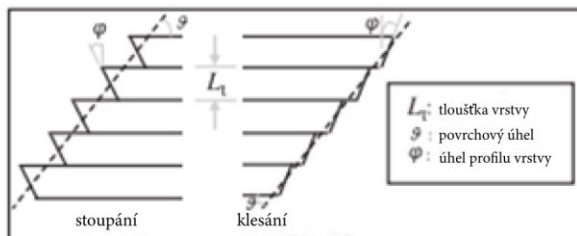
Odhad průměrné drsnosti povrchu lze stanovit jako funkci tloušťky vrstvy a úhlu nakloněné plochy. Díky této funkci je možné stanovit drsnost povrchu pro konkrétní úhel, který lze při výrobě předvídat. Nicméně tyto výsledky nejsou experimentálně ověřené. [25]



$$R_a = D_p \cdot \ln \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{w_0 v_s E_c} \frac{\sin \vartheta}{4 \tan \vartheta} \right] - OC \frac{\sin \vartheta}{4 \tan \vartheta}$$

Obr. 11 Příklad výpočtu povrchové drsnosti 1. [25]

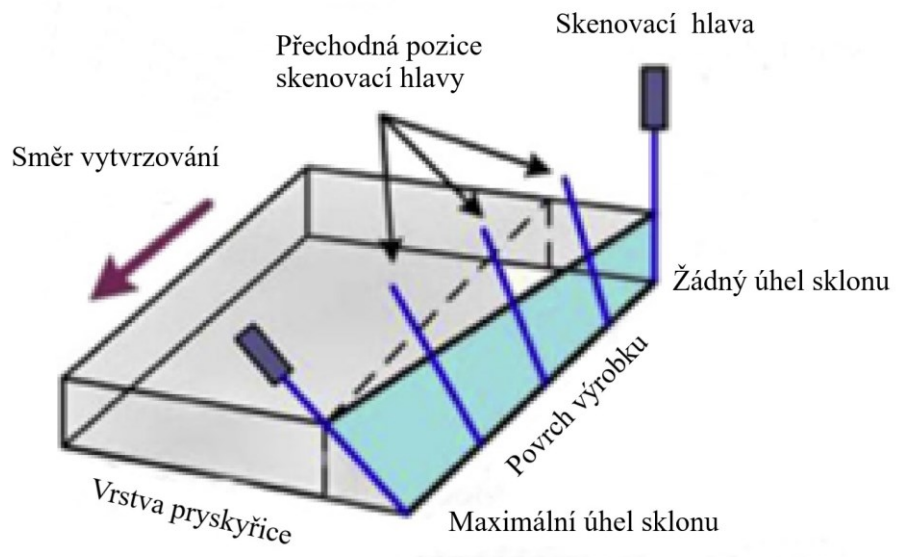
Na obrázku 10 je vyobrazen další matematický model pro odhad drsnosti povrchu, který zohledňuje profil vrstvy i rovinu výstavby směřující nahoru, či dolů. Tento model vykazoval při experimentech korelaci s daty pro povrch úhly až 100°. Experimentální data dále odhalily, že drsnost povrchu je u klesání či stoupání mezi úhly 90° a 145° minimalizována. [7]



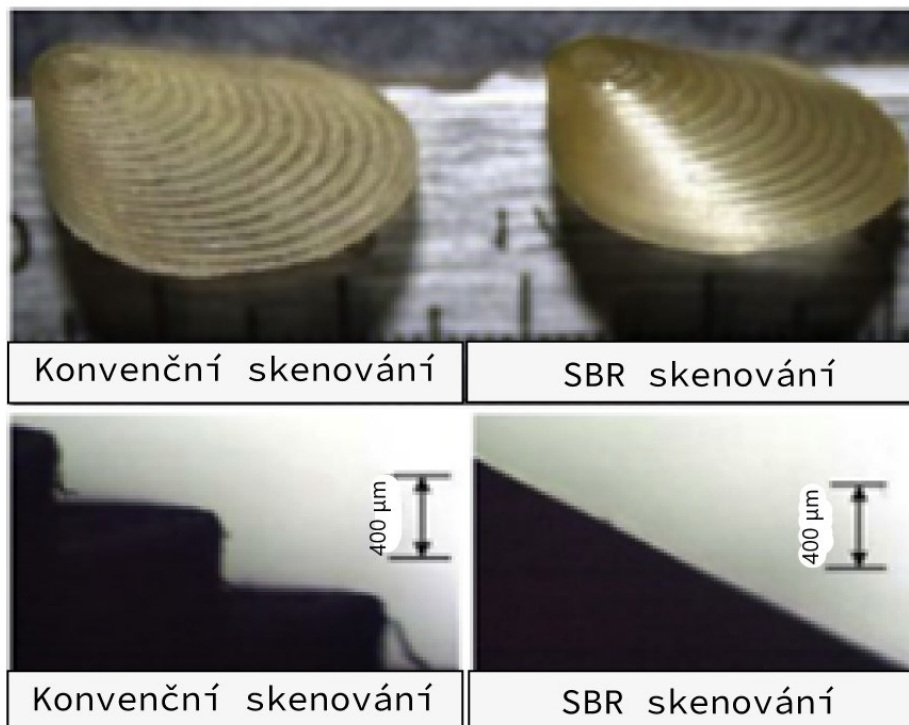
$$R_a = \frac{L_t (\tan \varphi \cdot \sin \theta + \cos \theta)}{4} + K$$

Obr. 12 Příklad výpočtu povrchové drsnosti 2.[26]

Pro eliminaci schodového efektu byla vyvinuta skenovací technika SBR (Rotační skenování pod sklonem), při které nakloněný paprsek laseru vytvrzuje šikmé hrany jednotlivých vrstev. Z tohoto důvodu byl systém vedení skenovací hlavy opatřen dalším stupněm volnosti, za účelem rotace paprsku uvnitř fotopolymeru o 360°. Aplikace této techniky je z hlediska zlepšení povrchové drsnosti velmi nadějná. Princip a rozdíl mezi SBR a konvenční technologií je uveden v obrázcích 13 a 14. [27]



Obr. 13 Schéma SBR skenování [27]



Obr. 14 Detail porovnání výrobků pro různé technologie skenování [27]

2.2.2 Rozměrová přesnost

Dle experimentálních studií byly vyvinuty semiempirické modely, založené na metodě statického designu experimentů a procesu analytické hierarchie, které poukazují na vliv určitých parametrů procesu na kvalitu výrobku stereolitografického výrobku. Dalším přístupem je modelace procesu pomocí genetického algoritmu, za účelem stanovení optimálních parametrů. Takový algoritmus hledá optimální parametry procesu pro určené podmínky k minimalizaci chyb sestavení součástí. Závěrem těchto studií je, že parametry, které nevíce ovlivňují rozměrovou přesnost výrobku jsou:

- Tloušťka vrstvy,
- rozteč šrafování paprsku,
- orientace výrobku na platformě,
- převytvrcení horní vrstvy,
- mezera mezi stíracím nožem a vrstvou. [29, 30, 31]

Dalšími experimentálně ověřenými faktory ovlivňujícími rozměrovou přesnost podle teoretického modelu na měření rozměrové přesnosti jsou:

- Fyzikální vlastnosti fotopolymeru,
- kompenzace laserového paprsku,
- dovytvrzování,
- další dokončovací procesy,
- celková přesnost tiskárny. [28]

Hlavním zdrojem chyb v rozměrové přesnosti je efekt objemového smrštění, kterému fotopolymery při procesu stereolitografie vždy podléhají. Tento efekt je způsoben asymetrickým vytvrzováním pryskyřice vzhledem ke střední rovině vytvrzovaným vláknům, vrstvám a výrobku. K objemovému smršťování dochází ve třech po sobě jdoucích fázích výroby, včetně stavby, odstraňování podpěr a následného vytvrzování. Předpokládá se, že rychlejší vytvrzení fotopolymeru má za následek nižší celkové hodnoty smrštění. [30]

2.3 Rychlost tisku

Za účelem optimalizace parametrů procesu, například tloušťky vrstvy a orientace, je užitečné, přesně odhadnout čas potřebný k vytvoření modelu. Tato informace dále

dopomůže ke správnému stanovení ceny výrobku. Do tohoto času je nutné zahrnout všechny fáze procesu, tedy nejen samotnou fázi výroby, ale i předzpracování a postprocessing. [18]

2.3.1 Preprocessing

Fáze předzpracování se týká přípravy CAD souboru uzpůsobeného pro výrobu na stereolitografickém stroji. Tento proces zahrnuje kroky jako určení orientace části, generování podpěr a drah laseru a rozdělení CAD modelu na vrstvy. Doba trvání přípravy výroby závisí nejen na použitém programu, ale také na velikosti STL souboru, do které se promítá fyzická velikost výrobku, jeho geometrická náročnost a požadovaná přesnost výstavby. Analyticky je prakticky nemožné přesně vypočítat čas těchto operací.

2.3.2 Fáze výstavby

Skutečná doba fáze výstavby modelu je závislá kromě geometrických faktorů především na velkém množství procesních parametrů, které je nutné znát dopředu. Nejdominantnějším parametrem je doba vytvrzování. Ta je zjištěna z STL souboru podle celkové vzdálenosti uražené paprskem laseru při vytvrzování a rychlosti pohybu paprsku. Celková vzdálenost je při tom funkcí parametrů stylu výstavby, jako je orientace, tloušťka vrstvy, rozteč mezi šrafy, šrafovací vzor atd. Všechny geometrické vlastnosti části jsou popsány v STL souboru, či CLI souboru rozděleném na vrstvy. Je evidentní, že data poskytnuté CLI souborem poskytují přesnější data, jelikož všechny informace, jako je například dráha paprsku, jsou přesně definované pro každou vrstvu. Největší výhodou těchto souborů je, že veškeré změny v procesu se do nich okamžitě reflektují. Naopak největším nedostatkem je, že jsou dostupné až v posledních fázích předzpracování, zatímco by byli užitečné již v prvotních fázích kvůli přesnému určení optimálních parametrů procesu nebo určení ceny modelu. [32, 33]

Rychlost posunu laseru je primárně závislá na výkonu laseru, který zase závisí na fyzikálních vlastnostech fotopolymeru. Tato rychlost není během výrobního procesu konstantní, protože laserový zdroj ve většině případů nemůže poskytnout konstantní výkon. Proto je před vytvořením každé vrstvy detekován výkon laseru a průměr paprsku, následně PLC ovladač determinuje optimální rychlost vytvrzování. Teoreticky lze počítat s průměrnou rychlostí pohybu laserového paprsku. [32]

Ovšem práce laseru není jedinou operací, která při výstavbě probíhá, ostatními operacemi jsou:

- Vyrovnávání fotopolymery,
- ponoření platformy,
- vysouvání platformy,
- stírání,
- posun na vrstvu,
- „Z-level wait“ – čekání, než se vrstva fotopolymery ustálí po posunu,
- vytvrzování kontury. [18]

Všechny tyto kroky vyžadují určitý čas. Jejich odhad je však relativně jednoduchý, protože čas každého z nich je konstantní pro konkrétní nastavení stroje a většina z těchto hodnot je předem určena uživatelem. Variabilním faktorem poté bývá počet řezů. [32]

2.3.3 Postprocessing

Fáze postprocesingu zahrnuje odebrání výrobku, čištění výrobku, dodatečné vytvrzování a dokončovací procesy.

Pro odstranění podpory existuje požadavek na minimální dobu po zpracování, což záleží složitosti výrobku. Čas požadovaný k dosažení dodatečného vytvrzení je závislý na velikosti dílu. Dále se požadovaný čas na dokončení výrobku odvíjí od požadované kvality povrchu a následné aplikace výrobku. Je tedy zřejmé, že nemůže existovat žádná analytická metoda předpovídání doby postprocesingu. [18]

2.4 Cena

Cena produktu se obecně skládá z výrobních nákladů, oběžných nákladů, daně a zisku. Výrobní náklady ve fázi výstavby mohou tvořit i přes 75 %, z celkových výrobních nákladů. V případě stereolitografie se výrobní náklady odvíjí od různých faktorů, jako je velikost výrobku, geometrická náročnost, objem, požadovaná rozměrová přesnost a požadované dokončovací procesy. Při stanovení reálné ceny je samozřejmě nutné počítat i s faktory životnosti a údržby stroje, lidské práce, využitého prostoru, ceny softwaru atd. [35]

Při výpočtu ceny nezáleží pouze na ceně materiálu za litr, ale je nutné dbát i na hustotu materiálu po tisku a vytvrzování. Tento údaj lze najít v materiálovém listu. [34]

Kalkulace rychlosti tisku u stereolitografie je komplexnějším procesem než například u technologie FDM, jelikož se nejedná o metodu s konstantní rychlostí ukládání materiálu. Namísto toho je nutné určit výšku ve směru Z vytisknutou za hodinu na určitém stroji. V podstatě se jedná o údaj, který určuje počet vrstev s určitou tloušťkou vybudovaných za hodinu. U některých zařízení se můžeme setkat i nutností zahřát pryskyřici na určitou teplotu. Tento čas lze samozřejmě efektivně využít pro přípravu softwaru a nahrání CLI souboru. [34, 35]

2.5 Pevnost výrobku

Jedním z největších omezení všech procesů aditivní výroby, včetně stereolitografie, je skutečnost, že výrobek musí být schopen snést mechanické namáhání spojené s reálnou aplikací. Obecně jsou výrobky křehké a vykazují ortotropní mechanické vlastnosti. Pevnost výrobku odpovídá pevnosti v tahu, rázu a ohybu dílu a je primárně ovlivněna fyzikálními charakteristikami fotosenzitivního polymeru. Pevnost výrobku lze ovlivnit i hlavními parametry procesu, které zahrnují tloušťku vrstvy, orientaci výstavby, výkon laseru, hloubku vytvrzení a dobu dodatečného vytvrzení. Studie mimo jiné prokázaly, že mezi těmito parametry je nejvlivnějším faktorem tloušťka vrstvy, jelikož při nižší tloušťce vrstvy je pevnost dílu zvýšena. To je důsledkem menších hodnot zbytkového napětí a rychlosti odlehčení při růstu tloušťky vrstvy. Další studie prokázali, že poloha ve vaně nemá na pevnost ani pružnost výrobku žádný vliv. Ovšem byl dokázán staticky významný účinek orientace části ve vaně, protože výrobky nevykazují vlastnosti izotropního materiálu. [20], [37, 38]

2.6 Materiály

Při výrobě pomocí stereolitografie lze využít mnoho druhů fotosenzitivních pryskyřic. Druh využití pryskyřice lze volit podle aplikace, požadavků na pevnost, či teplotu, nebo i podle estetických vlastností. Největšími skupinami, do kterých se fotosenzitivní pryskyřice dělí jsou:

- Standardní pryskyřice,
- technické pryskyřice,
- zubařské a lékařské pryskyřice,
- pryskyřice pro odlévání.

Všechny mají ovšem i společné vlastnosti typické pro SLA. Mívají velmi dobré povrchové vlastnosti. Povrch bývá jemný, podobný vstříkovaným výrobkům, a detailní. Navíc bývají velmi pevné oproti ostatním 3D tisknutelným materiálům. Na druhou stranu, bývají relativně křehké a nehodí se na venkovní použití kvůli náchylnosti na UV záření. Stručný přehled vlastností jednotlivých skupin pryskyřic je uveden v tabulce 8. [39, 40]

Tab. 8 Srovnání mechanických vlastností různých druhů fotosenzitivních pryskyřic [40]

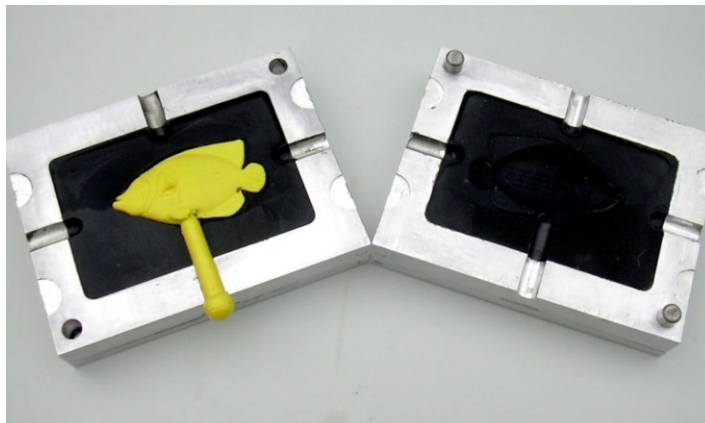
	Standardní a čiré	Tuhé	Odolné	Žárovzdorné	Vyztužené keramikou
IZOD rázová houževnatost [J/m]	25	38	109	14	N/A
Prodloužení při přerušení [%]	6,2	24,0	49,0	2,0	5,6
Pevnost v tahu [MPa]	65,0	55,7	31,8	51,1	75,2
Modul pružnosti v tahu [GPa]	2,80	2,80	1,26	3,60	4,10
Modul pevnosti v ohybu [GPa]	2,2	1,6	0,82	3,3	3,7
Teplotní odolnost při 0.45 MPa [°C]	73	48	43	289	88

Standardní pryskyřice má vysokou pevnost v tahu, ale je velmi křehká (velmi malé prodloužení při přerušení), takže není vhodná pro funkční součásti. Schopnost tvorby velmi malých prvků je ideální pro vizuální prototypy a umělecké modely. Odolná pryskyřice má ve srovnání s ostatními materiály SLA nejvyšší rázovou houževnatost a prodloužení při přerušení. Výborně se hodí pro prototypování dílů s pohyblivými prvky, nebo s pružnými spojovacími systémy. Postrádá pevnost, kterou mají termoplastické materiály pro 3D tisk, jako je například nylon. Tuhá pryskyřice je kompromisem mezi materiálovými vlastnostmi odolné a standardní pryskyřice. Žárovzdorná pryskyřice vydrží teploty nad 200 ° C, ale má špatnou rázovou pevnost a je křehčí než standardní pryskyřice. Keramikou vyztužená pryskyřice má nejvyšší pevnost v tahu a modul v ohybu, ale je velmi křehká. Je vhodné ji využít u výrobků s jemnými prvky, které vyžadují vysokou pevnost. [39, 40]

2.7 Aplikace

Vhodnost možné aplikace je především otázkou charakteristiky materiálů. Cílem je, aby materiál pro dané využití co nejvíce připomínal fyzikální vlastnosti tradičně využívaného materiálu. I přes značný pokrok v posledních letech je dostupných druhů fotosenzitivních pryskyřic daleko méně než například polymerů, které lze vstříkovat. Stereolitografie však stále nachází uplatnění v široké škále průmyslových odvětví, jako například v letectví, automobilu, lékařství, šperkařství atd. [13]

Při výrobě vstřikovacích forem je stereolitografie a ostatních metod rychlého prototypování užíváno především kvůli potřebě produkovat formy co nejrychleji a při co nejnižších nákladech. Kvůli limitované pevnosti, výdrži a teplotní odolnosti se používají především pro výrobu v malých sériích a současně při použití materiálů s nízkou teplotou tání. Kvůli nízké výdrži při aplikaci pod vysokým tlakem se také nazývají „měkké formy“. Další významnou výhodou při výrobě vstřikovacích forem je možnost výroby velmi náročných tvarů forem. [41, 43]



Obr. 15 Příklad „měkké formy“ [43]

2.7.1 Selhání forem vyrobených stereolitografií

Stereolitografie lze využít i pro výrobu vstřikovacích forem mimo nižší životnosti kvůli operacím blízko teploty skelného přechodu použitých materiálů, navíc tvarová vložka kvůli špatné tepelné vodivosti na zvýšené teplotě zůstává déle. Při výrobě vstřikovacích forem se lze setkat i s jinými úskalími. Při výrobě úkosů roste schodový krok, kromě vzniklých rozměrových nepřesností a zvýšené drsnosti povrchu dochází i k nárůstu vyhazovacích sil, které mohou zavinit zvýšené namáhání konečného výrobku. [41]

Během vstřikování může tok taveniny spolu se zvýšenou teplotou také způsobit deformace, či zničení tvarových vložek, zvláště pak, pokud jde o několikátý po sobě jdoucí vstřik. Proto se běžně provádějí testy pomocí metody konečných prvků. Metoda konečných prvků je používána i pro výpočet vyhadzovacích sil, jelikož má výrobek při chlazení tendenci se smrskávat okolo tvárníku. Proto je geometrie schodového kroku formy vždy modelována tak, aby se dala teoreticky určit. Oba faktory jsou využívány pro výpočet vyhadzovacích sil. Experimentální výzkum dokázal, že při vstřikování se zvyšuje míra vytvrzení formy, tento fakt je ovlivněn i předchozím vytvrzováním formy, jelikož u forem vytvrzených pouze UV zářením, a ne zvýšenou teplotou, dochází při vstřikovacím procesu k radikálnějšímu vytvrzení. Studie také prokázali, že se zvětšením míry vytvrzení formy dochází ke snížení vyhadzovací síly. Doporučuje se formu vytvrzovat UV zářením po dobu jedné hodiny a termálně na 150 °C po dobu 30 minut, za účelem zvýšení životnosti formy a snížení vyhadzovacích sil. [41, 42]

2.8 Výhody a nevýhody

Mezi výhody této technologie můžeme zařadit menší nároky na energii a prostor než u technologie SLS. Pomocí této technologie je možno vytvářet i modely i milimetrovými otvory a miniaturními prvky a velmi jemnou povrchovou úpravou. Při použití pasty jako stavebního polotovaru vzniká možnost vmíchání kovového nebo keramického prášku, který slouží jako výztuž a poté může být i polymer odstraněn tak, že nám zůstane pouze kovová nebo keramická struktura. Další výhodou je izotropie, oproti technologii FDM, která je anizotropním chováním známá je komponent vytvrzován po jednotlivých vrstvách, které jsou spojeny napůl vytvrzenými vrstvami. Tyto vlastnosti se také pojí s vodotěsností výrobků, které umožňují aplikace například v medicíně. Nespornou výhodou je také velmi široké množství aplikací ve výrobním průmyslu, dentálním průmyslu, klenotnictví atd.

Nevýhodou této metody je omezení na materiály, které jsou citlivé na světlo. Pryskyřice mají také tendenci být křehčí než většina polymerních materiálů, které využívají ostatní technologie. Dále také nutnost stavby podpůrného systému kvůli možnému zhroucení modelu již při výrobě. Jako nevýhodu, můžeme chápat také to, že materiál musí zaplnit celý zásobník stroje, přičemž dochází k velké spotřebě materiálu, tudíž k prodražení výrobku. Tento problém se, ale dá řešit znovupoužitím nespotřebované pryskyřice k výrobě dalšího modelu. I přes nízkou spotřebu energie zůstává tato technologie cenově nedostupná pro běžné uživatele. [44, 45, 46, 52]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Pro diplomovou práci byly stanoveny tyto cíle:

- Návrh tvarových vložek vstřikovací formy.
- Návrh technologických podmínek pro technologii aditivní výroby.
- Výroba tvarových vložek vstřikovací formy.
- Vyhodnocení dosažených výsledků.

Bude tedy navržena metodika a postup pro výrobu prototypu tvarových vložek formy, pomocí technologie 3D tisku, včetně tvarových desek, do kterých budou vložky vsazeny. Těchto desek lze využívat při testování dalších prototypových vložek, podobných rozměrů. V návrhu bude zohledněna i ekonomická a časová náročnost. Dále bude testována výroba konečných součástí na vstřikovací stroji a srovnání výrobků s metodou rychlého prototypování.

4 POUŽITÝ SOFTWARE

4.1 Autodesk Inventor Professional 2021

Autodesk Inventor Professional 2021, dále jen „Inventor“, je profesionální 3D CAD software od společnosti Autodesk, určený pro tvorbu 3D konstrukčních návrhů a technické dokumentace. Tento software také poskytuje možnost vytváření sestav, vytváření analýz a mnoho dalších, jako například návrh vstřikovacích forem.

4.2 Autodesk Moldflow 2016 Synergy

Autodesk Moldflow 2016 Synergy, dále jen „Moldflow“, je simulační software společnosti Autodesk zaměřený na vstřikování polymerů. Umožňuje výrobcům a konstruktérům navrhovat a optimalizovat jak polymerní výrobky, tak vstřikovací formy a jejich vstřikovací proces. Tím dopomáhá možným úsporám a úpravám, jelikož je možné odhalit možnosti vznikajících vad a problémů již ve fázi návrhu. Software umožňuje kromě simulace umístění vtokového ústí například simulaci toku taveniny a plnění tvarové dutiny. Je možné simulovat účinek temperačního systému vstřikovací formy, pro zjištění jeho účinnosti a případné optimalizace. Výsledky jsou velmi přehledné díky automaticky vygenerované barevné škále a stupnici. Software lze použít i pro simulaci nestandardních vstřikovacích procesů, např. více komponentní vstřikování či vstřikování za podpory plynu.

4.3 PrusaSlicer 2.3

PrusaSlicer je slicovací software od českého výrobce FDM a SLA tiskáren Prusa. Tento software se pyšní uživatelskou jednoduchostí. I přes nízké požadavky na nastavení tisku dovoluje i pokročilé nastavení skrze adaptivní tloušťky vrstev, obrysů a výplně. Podporuje i zařízení ostatních výrobců a lze do něj importovat široké spektrum formátů modelů, např. STL, OBJ, nebo AMF. [55]

4.4 PreForm

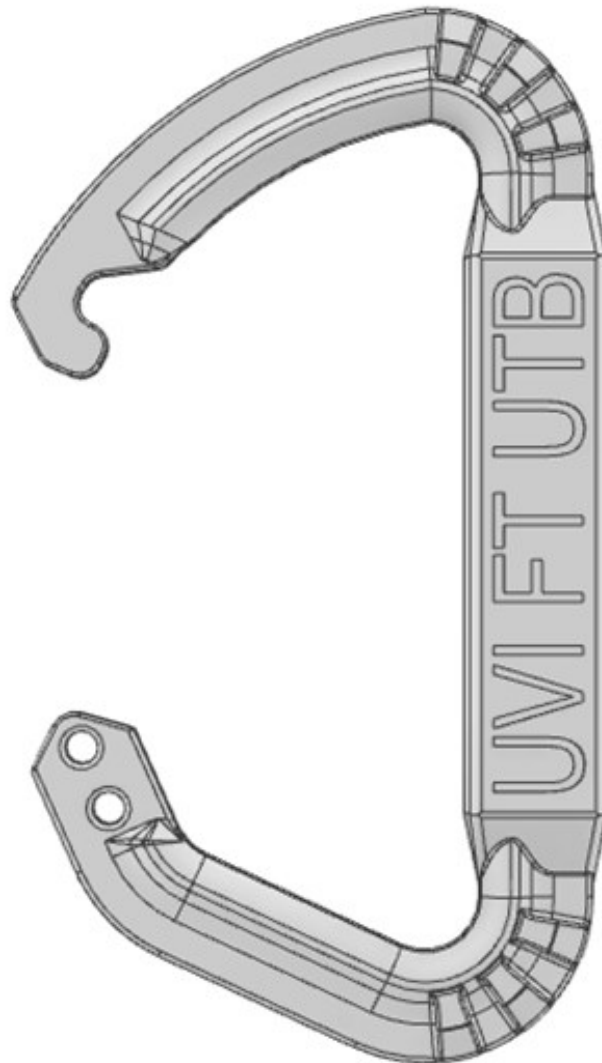
PreForm je slicovací software od firmy Formlabs, který je určen pro přípravu aditivní výroby na zařízeních od firmy Formlabs. Využívá STL nebo OBJ formátů modelů výrobků. Mezi jeho funkce patří nastavení procesních parametrů tisku, generace podpěr, určení rozložení výrobků. Poskytuje i možnost automatického zpracování modelů dle nadefinovaných algoritmů. Mimo to lze přes něj i stroj vzdáleně ovládat a plánovat výrobu.

4.5 NX 12

NX 12 je komplexní CAD/CAM software od společnosti Siemens. Program NX umožňuje kromě vytváření objemových modelů také tvorbu plošných modelů, 2D drátovou geometrii. Systém umožňuje také vytvářet obráběcí simulace, v tomto prostředí je možné si plně předdefinovat nástroje a využívat nástroje pro automatickou tvorbu dráhy nástroje. Integrace do CAD/CAM systému NX zabezpečuje asociativitu obrobeneho modelu vzhledem ke geometrickým i technologickým změnám.

5 NÁVRH VÝROBKU

Vstřikovaným výrobkem bude polymerní karabina, která může být využita jako reklamní předmět, nebo na držení výstroje, nikoliv však jako jisticí karabina, která musí zvládat vysoké rázové namáhání. Návrh výrobku byl vytvořen v softwaru Inventor. Největší rozměry výrobku jsou - 95 x 55 x 11 mm. Pro tento výrobek bude vytvořen návrh jednonásobné vstřikovací formy se studeným vtokovým ústrojím, kvůli zjednodušení při aplikaci prototypu. Cílem je, aby prototypové vložky byly co nejjednodušší a testování výroby nebo výroba malých sérií byly provedeny s co nejmenšími finančními a časovými požadavky.



Obr. 16 Model výrobku

5.1 Úprava geometrie výrobku pro vstřikování

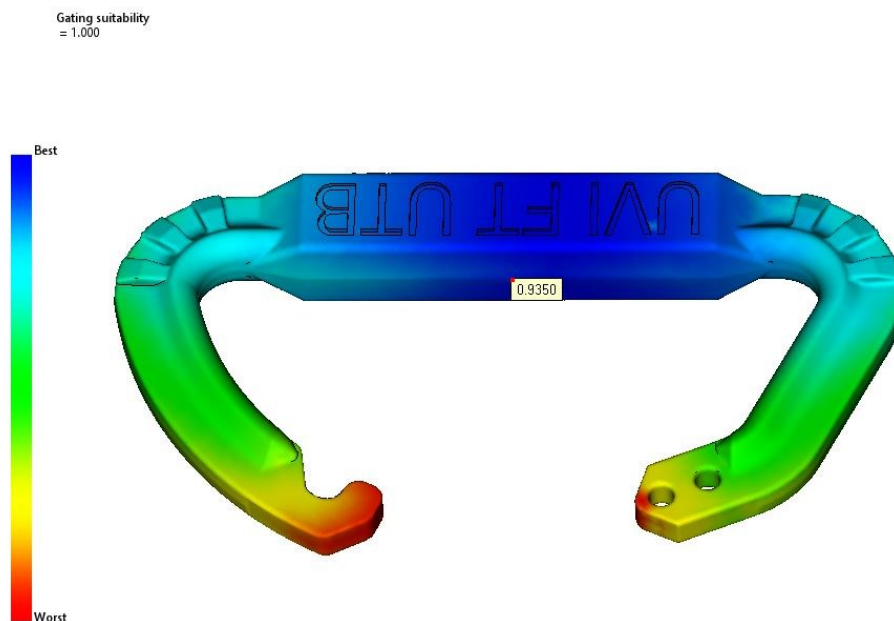
Pro účely vstřikování byl výrobek upraven v několika ohledech, konkrétně:

- Přidání 5° úkosů k dělicí rovině,
- zaoblení hran,
- zrovnoměnění žebrování.

Poloha dělicí roviny pro návrh tvarových vložek byla stanovena na polovinu tloušťky karabiny.

5.2 Analýza vhodnosti umístění vtokového ústí

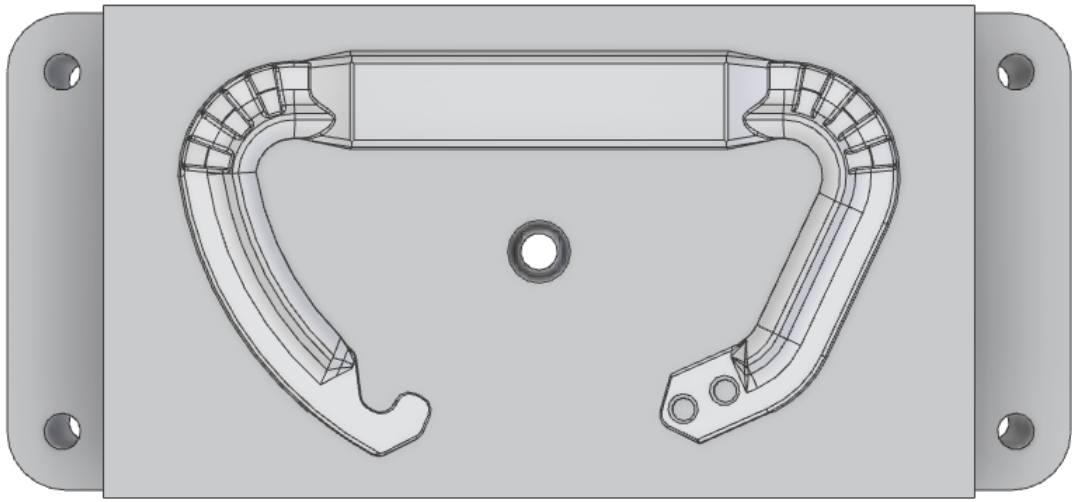
V analýze, provedené v programu Moldflow, která je vyobrazena na obrázku 17, je barevnou škálou znázorněna vhodnost umístění vtokového ústí. Modrá barva znamená nejlepší umístění, naopak červená značí nejméně vhodnou variantu. Simulace vlastně říká, které místo je nejvýhodnější z pohledu nejmenšího odporu proti toku taveniny. Odpor proti toku taveniny se dá definovat například poměrem délky toku taveniny ku tloušťce stěny výstřiku podél tokové dráhy. Z analýzy je patrné, že absolutně nejvhodnější variantou umístění vtoku je umístění z vnitřní strany, poblíž středové roviny. Pro tuto variantu umístění vtoku je vhodnost rovna 93,5 %, tato hodnota je pro úspěšné vstřikování dostačující.



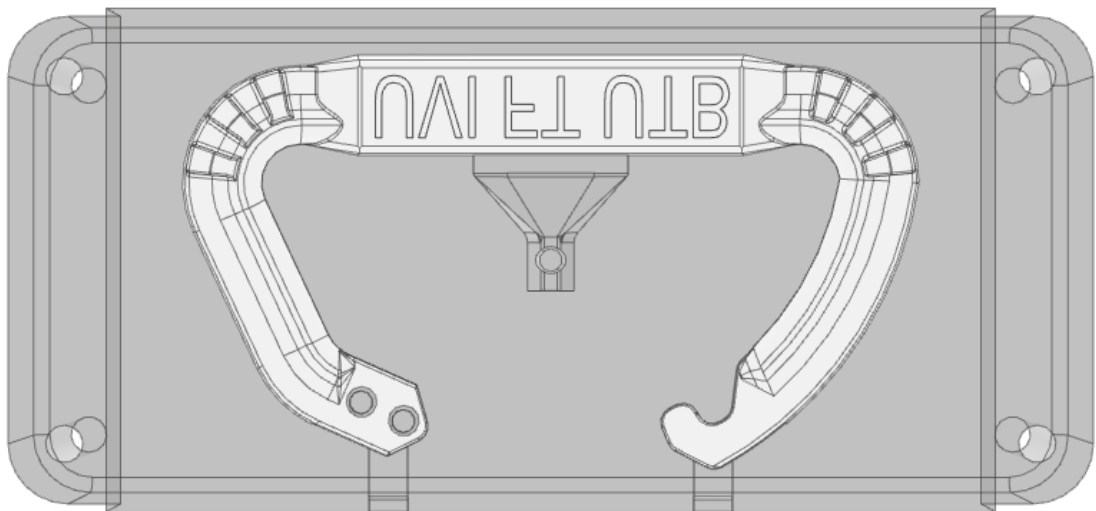
Obr. 17 Vhodnost umístění vtoku

5.3 Návrh tvarových vložek

Tvarové vložky byly navrženy s ohledem na využití aditivní výroby, konkrétně stereolitografie. Tvarové vložky budou vsazeny do tvarových desek formy vyrobených z oceli, které budou obstarávat pohybovou funkci a ukotvení ve formě. Vložky budou v rámu držet nerezové šrouby M5x35 s válcovou hlavou DIN 912. Maximální rozměry vložek jsou - 145 x 65 x 40 mm.



Obr. 18 Pravá tvarová vložka



Obr. 19 Levá tvarová vložka

5.3.1 Vtokový systém

Pro tuto formu byl zvolen studený vtok. Průměr vtokového kanálu je 4–8 mm a délka vtokového kanálu je 89 mm. Současně byl zvolen filmový vtok, který se nejčastěji používá pro vstřikování semikrystalických a plněných polymerů. Filmový vtok je nejčastěji používaným z bočních vtoků. Jeho nevýhodami je nerovnoměrné vedení taveniny do jednotlivých míst formy a pokles tlaku s rostoucí vzdáleností rozváděcího kanálu.



Obr. 20 Vtokový systém

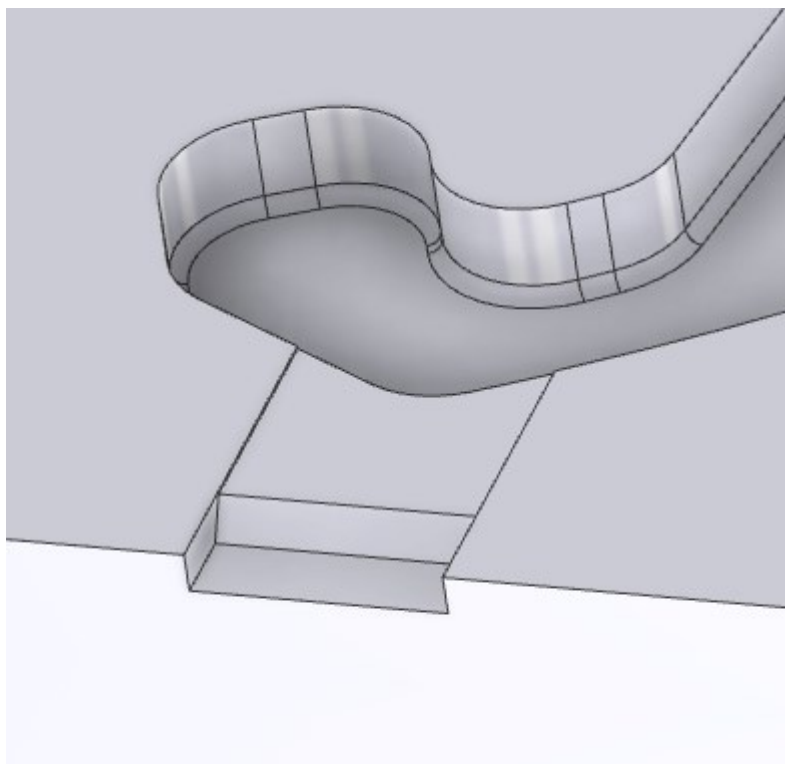
5.3.2 Vyhazovací a chladicí systém

Vyhazovací a chladicí systém není v návrhu tvarových vložek zahrnut kvůli charakteru navržených vložek pro výrobu pomocí stereolitografie. I když aditivní technologie poskytují možnost značného zkrácení výrobního procesu použitím konformního chlazení, užití fotosenzitivní pryskyřice tento efekt jednak minimalizuje, kvůli nižší teplotní vodivosti oproti kovovým materiálům a při výrobě malých sérií se na celkovém výrobním čase zrychlené chlazení promítne minimálně. Vyhazovací systém nebyl zahrnut ze stejných důvodů, tedy při výrobě malé série není nutné zrychlení vyhazovacího procesu. Proto bude vyhazování výstřiků prováděno ručně.

5.3.3 Odvzdušnění formy

V programu Moldflow byla provedena analýza vzniku studených spojů a uzavírání vzduchu v dutině formy, jelikož forma postrádala vyhazovací systém, který by mohl odvzdušnění formy zajišťovat. Analýza vzniku studených spojů je uvedena na Obr. 57 a analýza uzavírání vzduchových bublin je zobrazena na Obr. 59.

Jelikož je z analýz patrné, že dochází k uzavírání vzduchu a tvorbě studených spojů kromě žebrování hlavně v nejbližších částech formy od vtoku, byly do těchto míst přidány odvzdušňovací kanály. Jejich rozměry byly navrženy pro vstřikování LDPE, od toho se odvíjí tloušťka štěrbin, konkrétně 0,03 mm. Takovou rozměrovou přesnost nelze od SLA tiskárny očekávat proto se počítá s měřením a případně následnou obráběcí operací. Detail odvzdušňovacího kanálu je zobrazen na obrázku 21. [56]



Obr. 21 Detail odvzdušňovacího kanálu

5.3.4 Materiál vložek

Jako materiál pro výrobu vložek bude použita žáruvzdorná fotosenzitivní pryskyřice od firmy Formlabs, High Temp V2. Tento materiál se používá pro výrobu teplotně namáhaných částí, převážně vložek forem a vedení horkého vzduchu a kapalin. Oproti předchozí verzi této pryskyřice byla snížena teplotní rezistivita ze 289 °C při tlaku 0,45 MPa

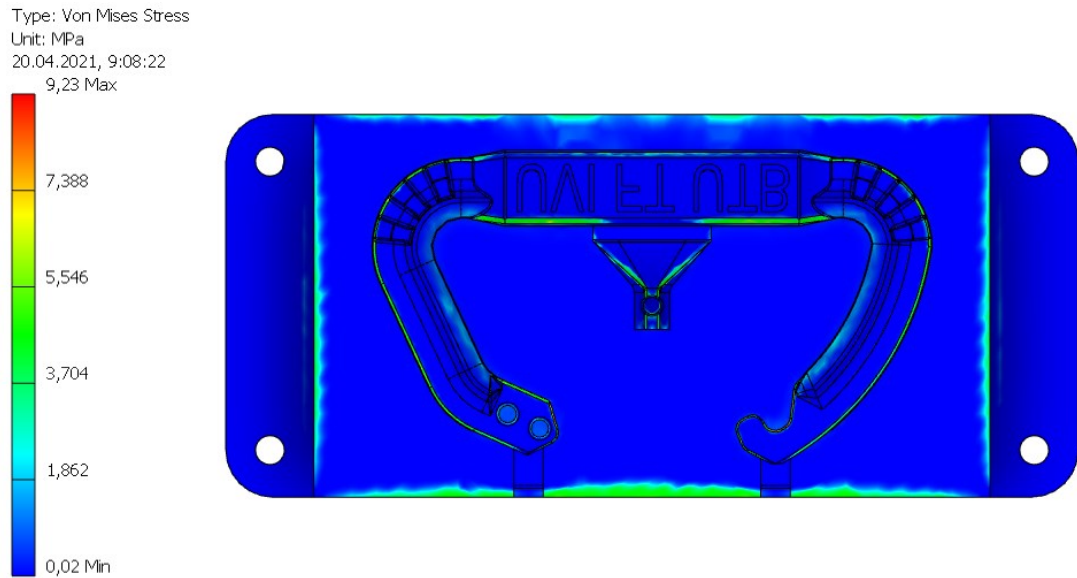
na 238 °C při tlaku 0,45 MPa. Toto snížení teplotní rezistivity kompenzuje zvýšení poměrného prodloužení při porušení ze 2 % na 2,4 %. Vybrané materiálové vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 9 a kompletní materiálový list od výrobce je uveden v příloze 1.

Tab. 9 Materiálové vlastnosti Formlabs High Temp V2

	Formlabs High Temp V2		
	nevytvrzená	UV vytvrzená	UV + termálně vytvrzená
Pevnost v tahu [Mpa]	20,9	58,3	51,1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	0,75	2,75	2,9
Prodloužení [%]	1,4	3,3	2,4
Modul pevnosti v ohybu [GPa]	0,69	2,62	2,62
Rázová houževnatost IZOD [$\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$]	32,8	18,2	24,2
Teplota tepelného průhybu při 1,8 mPa [°C]	43,6	99,2	101
Teplota tepelného průhybu při 0,45 mPa [°C]	49,3	142	238

5.4 Analýza vlivu působení uzavírací síly na tvarové vložky

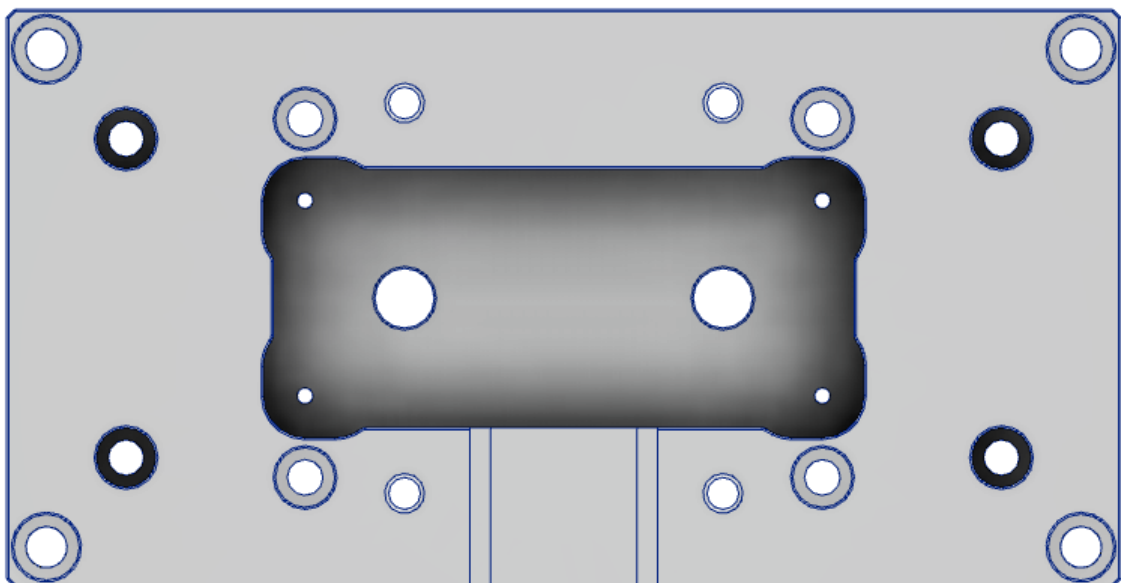
Dle analýzy provedené v programu MoldFlow je pro správné provedení vstřikovacího procesu nutné působení uzavírací síly okolo 1,5 tuny, viz Obr. 54. Proto byla v programu Inventor vytvořena pevnostní analýza. Síla působící na styčný povrch vložky byla nastavena na hodnotu 15 kN. Boční, i spodní strany vložky byly opatřeny fixními vazbami pro simulaci zamezení pohybu tvarovou deskou. Dále byly do programu nahrány materiálové vlastnosti pryskyřice Formlabs High Temp V2 (viz. tab. 9) a tyto vlastnosti byly přiřazeny tvarovým vložkám. Výsledek analýzy je zobrazen na obrázku 22. Z analýzy je zřejmé, že maximální zatížení při působení uzavírací síly rovné 15 kN je 9,23 MPa. Takové zatížení by pro integritu materiálu nemělo znamenat dle dat poskytnutých výrobcem problém.



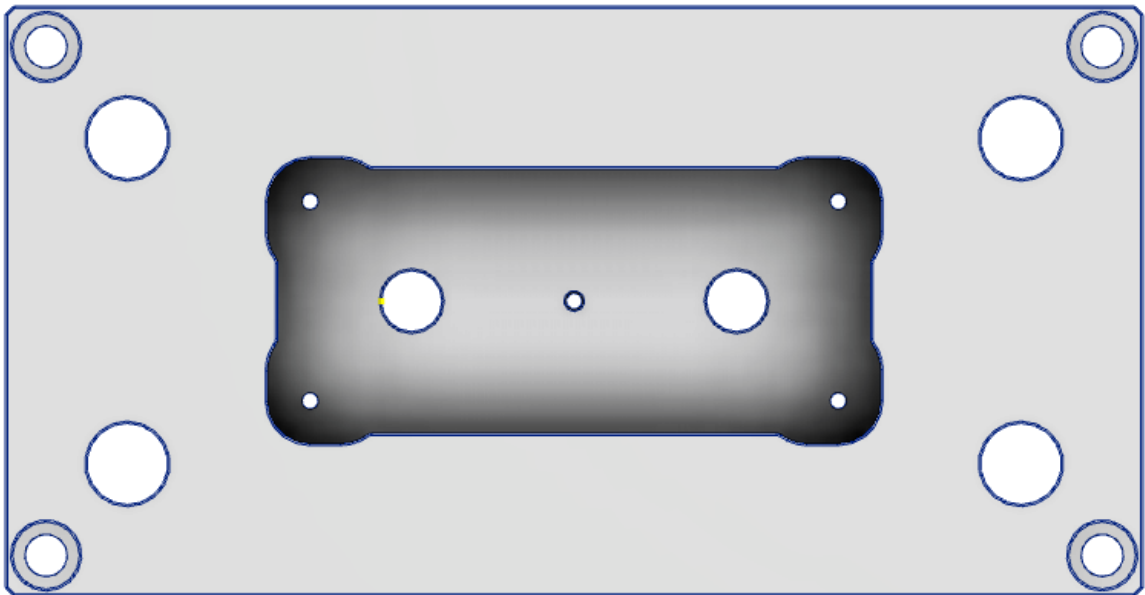
Obr. 22 Zatížení Von Mises pro levou tvarovou vložku

5.5 Tvarové desky

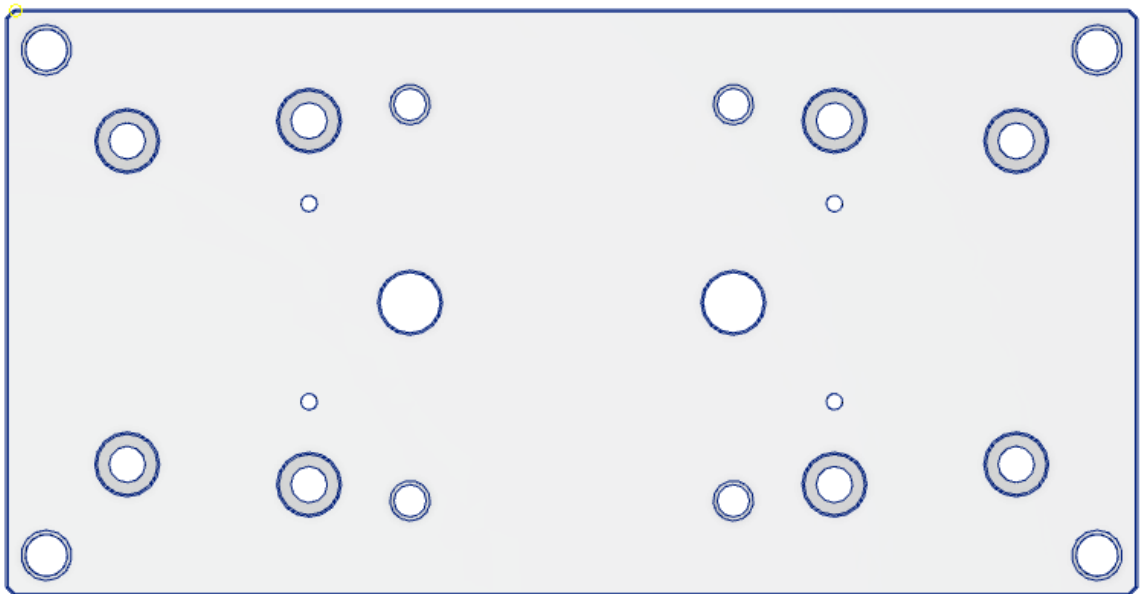
Pro tvarové vložky byly navrženy v programu Inventor také tvarové desky, do kterých byly tvarové vložky usazeny. Desky byly navrženy dle univerzálního rámu využívaného na univerzitním pracovišti. Při výrobě tvarových desek je zapotřebí vysoké rozměrové přesnosti děr pro čepy a šrouby, proto byla výroba provedena na CNC obráběcím centru. Největší rozměry tvarové desky jsou - 280 x 145 x 55 mm. Do dna kapes tvarových desek byly přidány díry o průměry 15 mm, pro snazší vyjmutí tvarových vložek.



Obr. 23 Levá tvarová deska



Obr. 24 Pravá tvarová deska



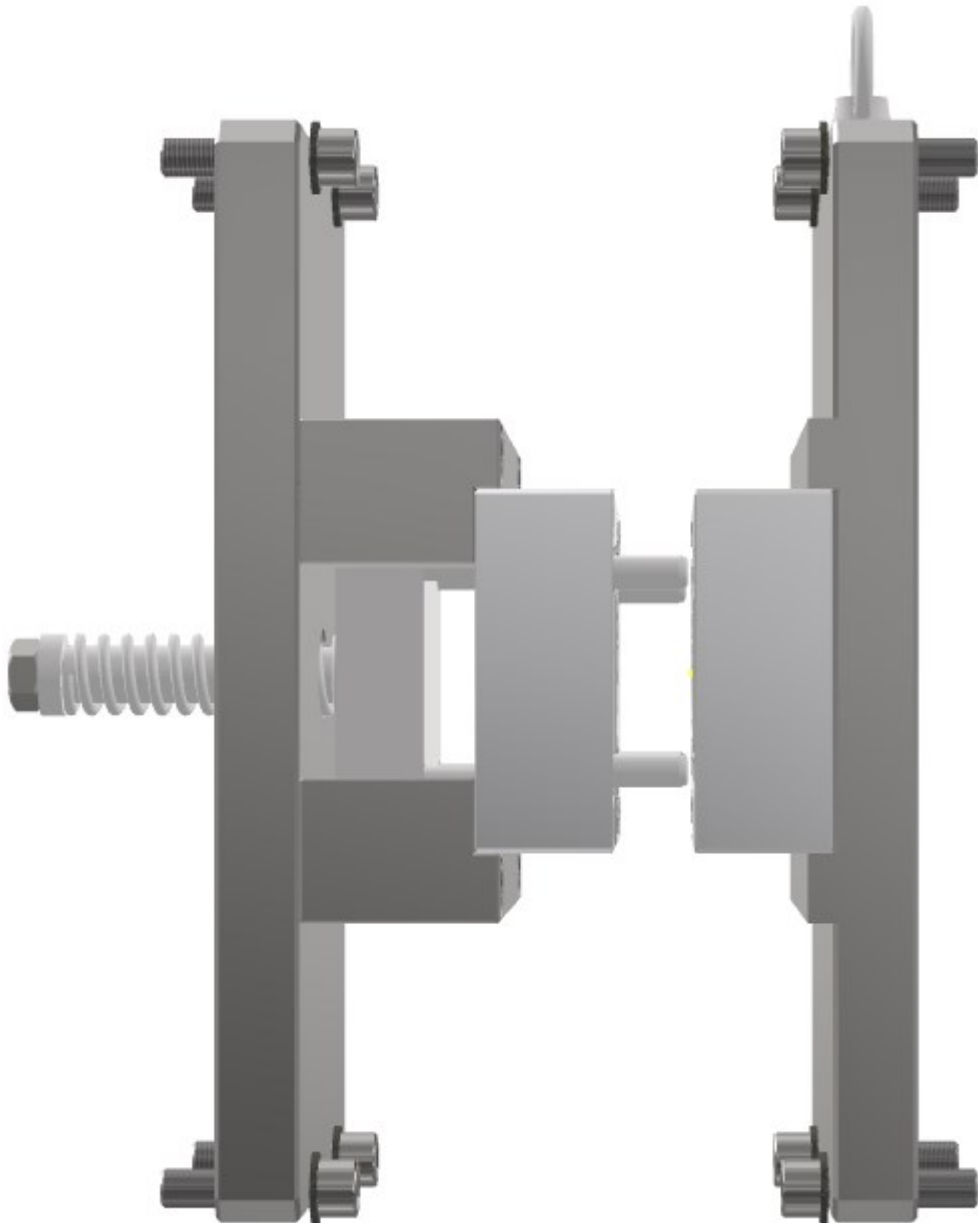
Obr. 25 Zadní pohled na levou tvarovou desku

5.5.1 Měření rozměrů tvarových vložek

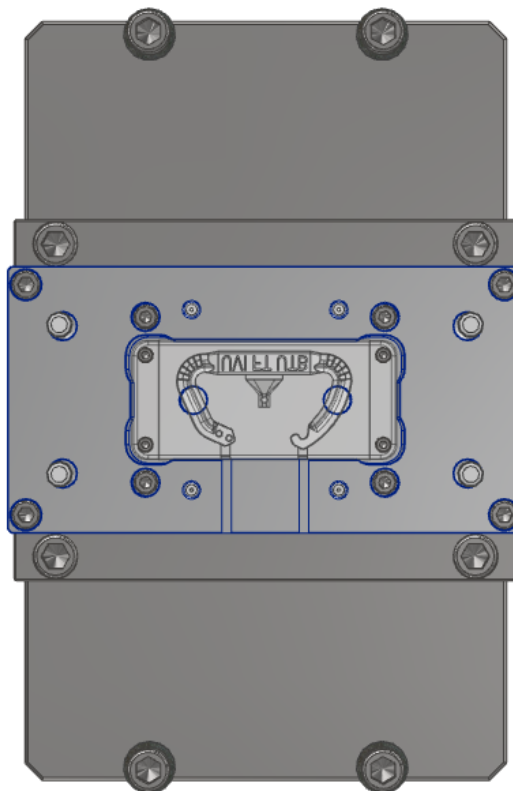
Za účelem zajištění optimálního lícování tvarových vložek v kapsách, bylo zapotřebí nejprve provést jejich měření. Tento krok je nutný kvůli zjištění hodnoty objemového smrštění u SLA vložek. Zároveň není možné, aby přesně nelícovali samotné vložky v dělicí rovině formy.

5.6 Rám vstříkovací formy

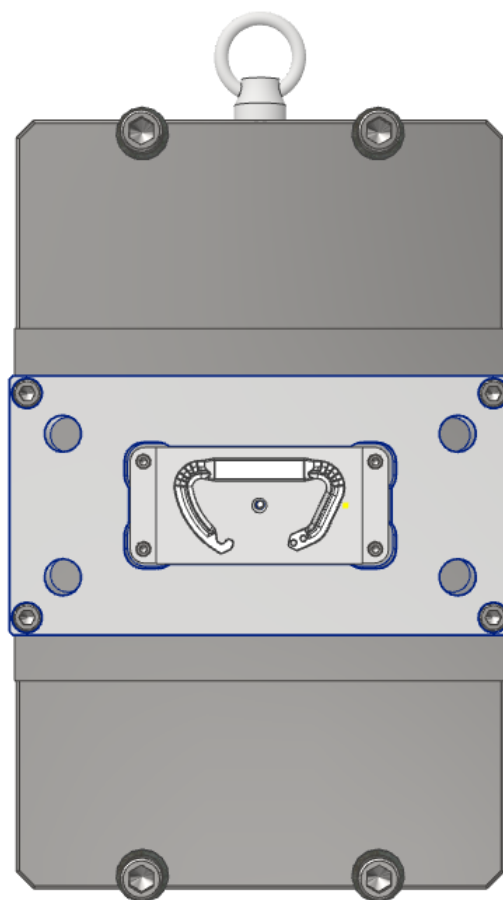
Rám vstříkovací formy byl sestaven z desek, které jsou uvedeny v obrázku 26. Největší rozměry upínacích desek jsou - 441 x 280 x 34 mm.



Obr. 26 Rám vstříkovací formy



Obr. 27 Pohled na levou stranu formy



Obr. 28 Pohled na pravou stranu formy

5.7 Výroba tvarových desek

Postup pro výrobu tvarových desek byl navržen a simulován v programu NX. Postup obrábění byl navržen pro výrobu z oceli 1.2343. Ocel 1.2343 je středně legovaná nástrojová ocel pro použití při zvýšených teplotách. Vyznačuje se velmi dobrou houževnatostí a odolností proti opotřebení za tepla, vysokou pevností za tepla a velmi nízkou rozměrovou deformací při tepelném zpracování, standardně je dodávána v žíhaném stavu, ve kterém je dobře obrobitelná. Používá se pro nástroje na tváření a stříhání kovů za tepla, nástroje pro kovací stroje a například i na výrobu forem pro tlakové lití neželezných kovů. Rozměry použitých polotovarů byly - 285 x 150 x 60 mm.

5.7.1 Obráběcí centrum DMU 50

Výroba součásti byla provedena na obráběcím centru DMU 50 3rd Generation od společnosti DMG MORI. Obráběcí centrum DMU 50 je univerzální obráběcí centrum pro pětiosé simultánní obrábění, centrum využívá řídicí systém Siemens Sinumerik 840 d sl / CELOS. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 10. [60]



Obr. 29 Obráběcí centrum DMU 50 3rd Generation [59]

Tab. 10 – Parametry DMU 50 [59]

Technické parametry stroje	
Max. pojezd v ose X [mm]	650
Max. pojezd v ose Y [mm]	520
Max. pojezd v ose Z [mm]	475
Max. zatížení stolu [kg]	300
Průměr stolu [mm]	630
Zásobník nástrojů [počet pozic]	30
Parametry vřetena	
Plynule programovatelné otáčky [1/min]	20 - 15000
Otáčky v seřizovacím provozu [1/min]	20 - 800
Max. točivý moment [Nm]	111
Jmenovitý točivý moment [Nm]	85
Max. hnací výkon [kW]	21
Jmenovitý výkon [kW]	16
Parametry pohonu posuvů	
Střídavé servomotory pro osy	X, Y, Z
Rychlost posuvů v osách X, Y, Z [mm/min]	až 42 000
Rychlost posuvů v osách X, Y, Z v rychlém chodu [m/min]	42

5.7.2 Návrh výrobního procesu

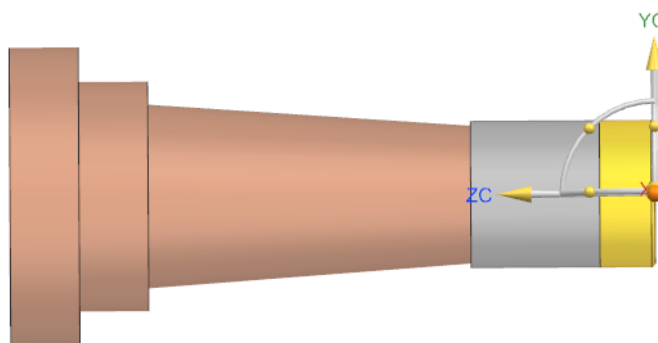
Obráběcí proces byl naprogramován v programu NX 12. Operace programu lze rozdělit do několika skupin. Z konstrukce dílu a přídatku na polotovaru je jasné, že bude nutné obrábění provést při dvou upnutích. Pro první upnutí bylo navrženo zarovnání desek tříbřitou frézou s vyměnitelnými břitovými destičkami. Zarovnání horní stěny polotovaru bylo rozděleno na hrubovací a dokončovací operaci. Zarovnání bočních stěn bylo navrženo bez hrubování do poloviny výšky polotovaru. Dále bylo navrženo hrubování a dokončování kapsy destičkovou a monolitní válcovou frézou. Následně bylo navrženo vrtání a zahloubení otvorů pomocí monolitních vrtáků a válcových fréz různých rozměrů. V případě levé tvarové desky bylo pro toto upnutí navrženo ještě obrábění drážek pro odvodušňovací kanály monolitní válcovou frézou a pro pravou tvarovou vložku, vrtání vtokového kanálu a jeho následné dokončení kulovou frézou. Poté došlo na sražení hran pod úhlem 45° a otočení výrobku. Zarovnání při druhém upnutí bylo navrženo stejně jako při prvním upnutí. Dalšími operacemi při druhém upnutí je navrtání otvorů, zahloubení děr a sražení hran pod úhlem 45°. Závitování děr bude provedeno ručně. Výrobní výkresy tvarových desek jsou obsaženy v příloze.

5.7.3 Zarovnání ploch

Pro hrubovací i dokončovací operace při zarovnání ploch byla použita tříbřitá fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami od firmy SECO s označením R217.21-1632.RE-LP09.3A. Simulovaná fréza je zobrazena na obrázku 30. Řezné rychlosti nástrojů při všech operacích, byly stanoveny podle katalogu výrobce.

Tab. 11 Parametry frézy SECO R217.21-1632.RE-LP09.3A

(D) průměr [mm]	32,00
(R1) spodní radius [mm]	0,80
(B) úhel kužele [°]	0,00
(A) úhel špičky [°]	0,00
(L) délka [mm]	40,00
(FL) řezná délka [mm]	12,00
počet břitů [-]	3



Obr. 30 Příklad vymodelovaného nástroje – fréza D32

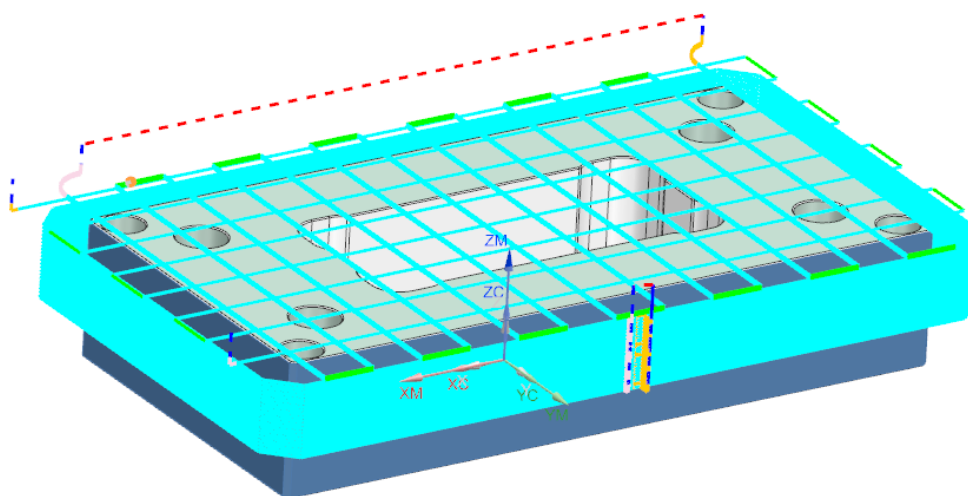
Pro návrh zarovnání byly v NX 12 použity funkce cavity mill, floor facing a wall floring. Dráha nástroje pro kompletní zarovnání je zobrazena na obrázku 31. Hodnoty přejezdu nástroje u obrábění horní stěny byly nastaveny na 70 %. Řezné parametry jsou uvedeny v tabulkách 12 a 13. Tyto procesy jsou nastaveny stejně pro obě upnutí obou tvarových desek.

Tab. 12 Řezné parametry pro obrábění horní stěny

Zarovnání horních stěn výrobku		
	hrubování	dokončování
(v_c) řezná rychlost [m/min]	125	170
(f_z) posuv na zub [mm/zub]	0,11	0,08
(n) otáčky [-]	632	860
přídavek [mm]	0,5	0
(a_{pmax}) hloubka řezu [mm]	1,5	0,5

Tab. 13 – Řezné parametry pro obrábění bočních stěn

Zarovnání bočních stěn výrobku	
(v_c) řezná rychlost [m/min]	251
(f_z) posuv na zub [mm/zub]	0,25
(n) otáčky [-]	2500
přídavek [mm]	0
(a_{pmax}) hloubka řezu [mm]	1,5



Obr. 31 Dráha nástroje pro zarovnání při prvním upnutí

5.7.4 Obrábění kapsy na tvarovou vložku

Po zarovnání tvarových desek, z horní strany proběhne hrubování a následné dokončování kapsy na tvarové vložky. Hrubování bylo navrženo pro použití dvoubřité frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami od firmy SECO s označením R217.69-1020.RE-10-2A. Dokončení stěn a dna bude provedeno monolitní válcovou frézou D10. Parametry nástrojů jsou uvedeny v tabulce 14.

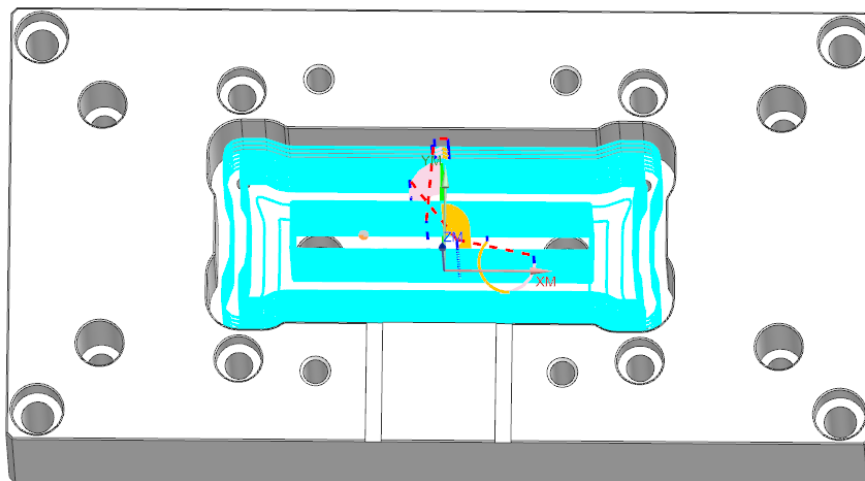
Tab. 14 – Parametry nástrojů pro obrábění kapes na tvarové vložky

	hrubování	dokončování
(D) průměr [mm]	20,00	10,00
(R1) spodní rádius [mm]	0,80	0,00
(B) úhel kužele [°]	0,00	0,00
(A) úhel špičky [°]	0,00	0,00
(L) délka [mm]	40,00	85,00
(FL) řezná délka [mm]	9,00	40,00
počet břitů [-]	2,00	4,00

Procesy hrubování a dokončování kapes tvarových desek byly v NX 12 vytvořeny pomocí funkcí cavity mill a rest milling. Procesní parametry obou operací jsou uvedeny v tab. 15. a dráhy nástroje pro hrubovací i dokončovací operaci jsou zobrazeny na obrázku 32.

Tab. 15 Procesní parametry pro obrábění kapes na tvarové vložky

parametry	hrubování	dokončování
(v_c) řezná rychlost [m/min]	201	109
(f_z) posuv na zub [mm/zub]	0,1	0,05
(n) otáčky [-]	3200	3470
přídavek [mm]	0,5	0
(a_{pmax}) hloubka řezu [mm]	3	5



Obr. 32 Dráhy nástrojů pro výrobu kapes pro tvarové vložky

5.7.5 Vrtání a zahloubení otvorů

Vrtání a zahloubení otvorů bylo navrženo pro sadu vrtáků a monolitních válcových fréz, bylo využito také výhrubníku 20H7 a ručního závitníku M5. Seznam všech použitých vrtáků, včetně jejich parametrů je uveden v tabulce 16. Seznam vrtacích operací je v tabulce 17 a procesní parametry pro dané vrtáky jsou obsaženy v tabulce 18.

Tab. 16 Parametry použitých vrtáků

(D) průměr [mm]	10,5	19,0	4,2	15,0	8,0	9,0	4,0
(A) úhel špičky [°]	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0	140,0
(L) délka [mm]	141,0	153,0	74,0	115,0	148,0	139,0	74,0
(FL) řezná délka [mm]	72,0	77,0	29,0	45,0	98,0	80,0	29,0
počet břítů [-]	2	2	2	2	2	2	2

Tab. 17 Seznam vrtacích operací pro obě desky

Vrták	Operace
Ø10,5	Vrtání průchozích děr 8xØ10,5.
Ø19,0	Předvrtání děr 4xØ20H7, které budou následně hrubovány.
Ø4,2	Předvrtání průchozích děr pro výrobu závitů 8x M5.
Ø15,0	Vrtání průchozích děr 4xØ15 na dně kapes, pro snazší vyjmutí tvarových vložek.
Ø8,0	Vrtání průchozích děr 4xØ8.
Ø9,0	Vrtání průchozích děr 8xØ9, které budou nadále zahloubeny.
Ø4,0	Předvrtání vtoku.

Tab. 18 Procesní parametry vrtacích operací

Vrták	D10,5	D19	D4,2	D15	D8	D9	D4
(v_c) řezná rychlost [m/min]	42	65	55	70	46	50	55
(f_z) posuv na zub [mm/zub]	0,1	0,13	0,045	0,11	0,075	0,08	0,043
(n) otáčky [-]	1273	1089	4168	1485	1830	1768	4377

Zahloubení budou vyrobena válcovými monolitními frézami, pomocí metody šroubové interpolace. Krátká zahloubení děr Ø10,5 a Ø9 mm budou vyrobena frézou o průměru 8 mm. Hluboká zahloubení Ø15H7, budou vyrobena frézou průměru 12 mm.

5.7.6 Ostatní operace

Po výrobě děr a zahloubení, bylo pro každé upnutí desky provedeno sražení hran. U levé tvarové desky byly při prvním upnutí vyrobeny také odvodušňovací kanály a u pravé tvarové desky byl při prvním upnutí vyroben vtokový kanál. Pro sražení hran byly v NX 12 použity funkce modeled champfering a champfer milling. Sražení hran bylo provedeno čtyřbřitou monolitní frézou na sražení hran pod úhlem 45° o průměru 8 mm, ostatní parametry jsou uvedeny v tabulce 19.

Tab. 19 Parametry frézy na sražení hran

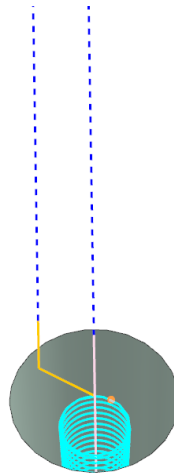
(D) průměr [mm]	8,00
(R1) spodní rádius [mm]	0,00
(B) úhel kužele [°]	0,00
(A) úhel špičky [°]	45,00
(L) délka [mm]	38,00
(FL) řezná délka [mm]	3,20
počet břitů [-]	2

5.7.6.1 Výroba vtokového kanálu

Předvrtaný vtokový kanál, na $\varnothing 4$ mm byl dokončen pomocí funkce mill contour, tvrdokovovou kulovou frézou od firmy SECO s označením JS532030D1B.0Z2-NXT. Kompletní parametry nástroje jsou uvedeny v tab. 20.

Tab. 20 Parametry kulové frézy

(D) průměr [mm]	3,00
(R1) spodní rádius [mm]	1,50
(B) úhel kužele [°]	0,00
(A) úhel špičky [°]	0,00
(L) délka [mm]	38,00
(FL) řezná délka [mm]	6,00
počet břitů [-]	2



Obr. 33 Detail dráhy nástroje při dokončení vtokového kanálu

5.7.7 Výrobní časy

Výrobní časy byly určeny dle nastavených řezných parametrů programem NX. Výsledné výrobní časy jsou uvedeny v tab. 21 a 22. Dle programu NX by měla výroba pravé tvarové desky trvat 1 hodinu 27 minut a 26 sekund, výroba levé tvarové desky 1 hodinu 27 minut a 45 sekund. Výrobní časy desek jsou tedy téměř identické.

Tab. 21 Výrobní časy pro pravou tvarovou desku

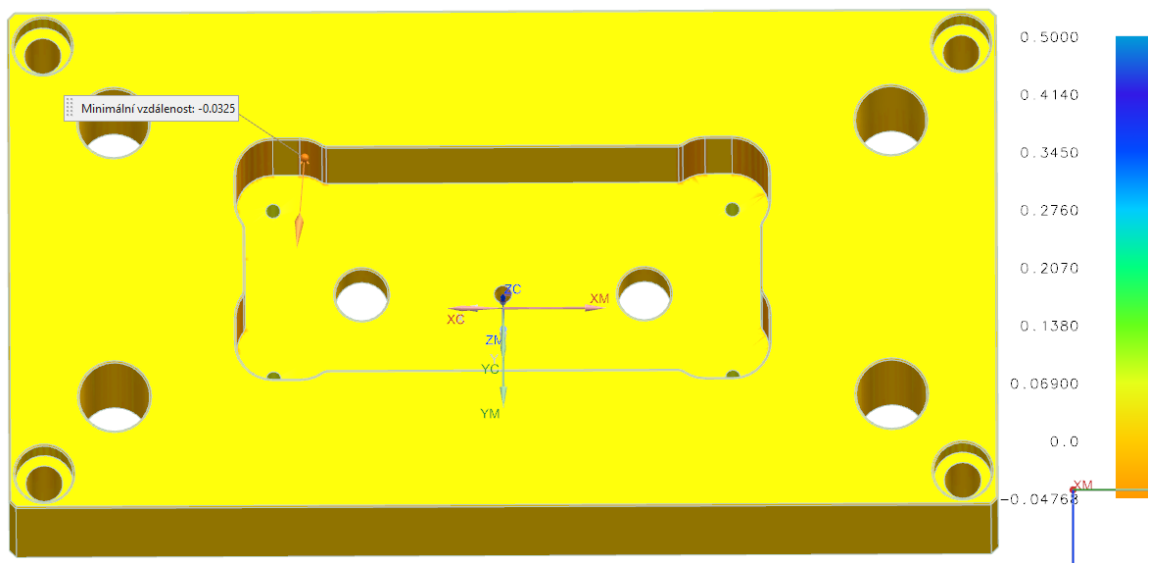
Operace	Nástroj	Výrobní čas
Upnutí polotovaru		
Zarovnění horní strany	Destičková fréza D32	0:04:34
Zarovnění bočních stran - 1/2 výšky		0:11:01
Hrubování kapsy	Destičková fréza D20	0:14:12
Dokončování kapsy	Monolitní fréza D10	0:06:44
Vrtání děr	Vrtáky různých průměrů	0:02:09
Zahloubení otvorů	Monolitní fréza D8	0:05:38
Sražení hran	Fréza kuželová D8 45°	0:05:40
Dokončení vtoku	Kulová fréza D3	0:11:12
Otočení polotovaru - 180°		
Zarovnění horní strany	Destičková fréza D32	0:04:34
Zarovnění bočních stran - 1/2 výšky		0:11:01
Vrtání děr - M5	Vrták D4,3	0:00:23
Zahloubení otvorů	Monolitní fréza D8	0:05:31
Sražení hran	Fréza kuželová D8 45°	0:04:47
Ukončení výroby		
Celkový výrobní čas		1:27:26

Tab. 22 Výrobní časy pro levou tvarovou desku

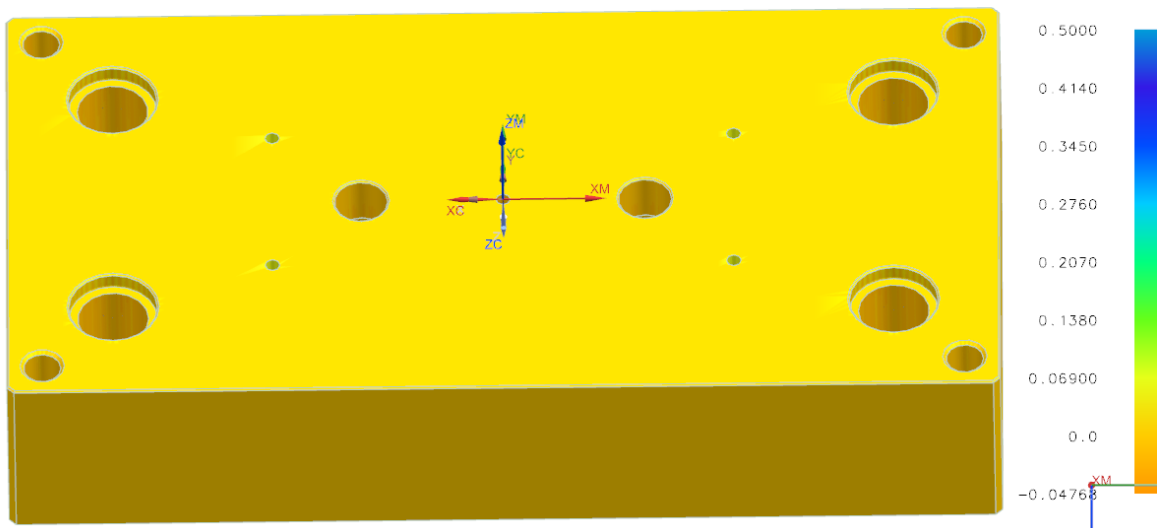
Operace	Nástroj	Výrobní čas
Upnutí polotovaru		
Zarovnění horní strany	Destičková fréza D32	0:04:34
Zarovnění bočních stran - 1/2 výšky		0:11:01
Hrubování kapsy	Destičková fréza D20	0:14:12
Dokončování kapsy	Monolitní fréza D10	0:06:44
Vrtání děr	Vrtáky různých průměrů	0:03:43
Zahloubení otvorů	Monolitní frézy D8 a D10	0:14:13
Sražení hran	Fréza kuželová D8 45°	0:07:59
Otočení polotovaru - 180°		
Zarovnění horní strany	Destičková fréza D32	0:04:34
Zarovnění bočních stran - 1/2 výšky		0:11:01
Vrtání děr - M5	Vrták D4,3	0:00:23
Zahloubení otvorů	Monolitní fréza D8	0:03:28
Sražení hran	Fréza kuželová D8 45°	0:05:53
Ukončení výroby		
Celkový výrobní čas		1:27:45

5.8 Analýza výroby tvarových desek

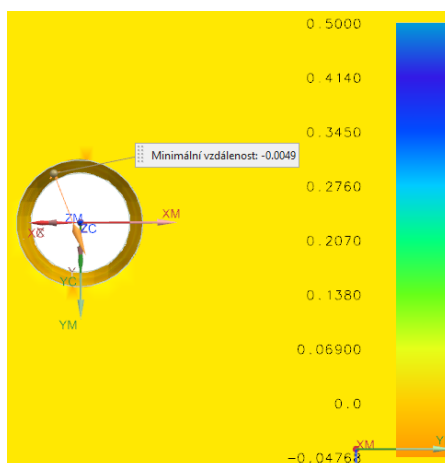
V programu NX 12 je možné provést analýzu zbytkového materiálu na hotovém výrobku. Analýza levé tvarové desky je zobrazena na obr. 34-36. Z obrázků je patrné, že při obrábění kapes pro tvarové vložky dochází k mírnému podříznutí v místech odlehčení rohů. Maximálně však do hodnoty 0,04768 mm. Takové podříznutí je v místě, které není funkční a nevztahují se na něj toleranční meze naprosto irelevantní. V případě levé patrné vložky, jsou z výsledků analýz (obr. 37 a 38) patrné stejné jevy, tedy dochází k mírnému podříznutí v odlehčení rohů.



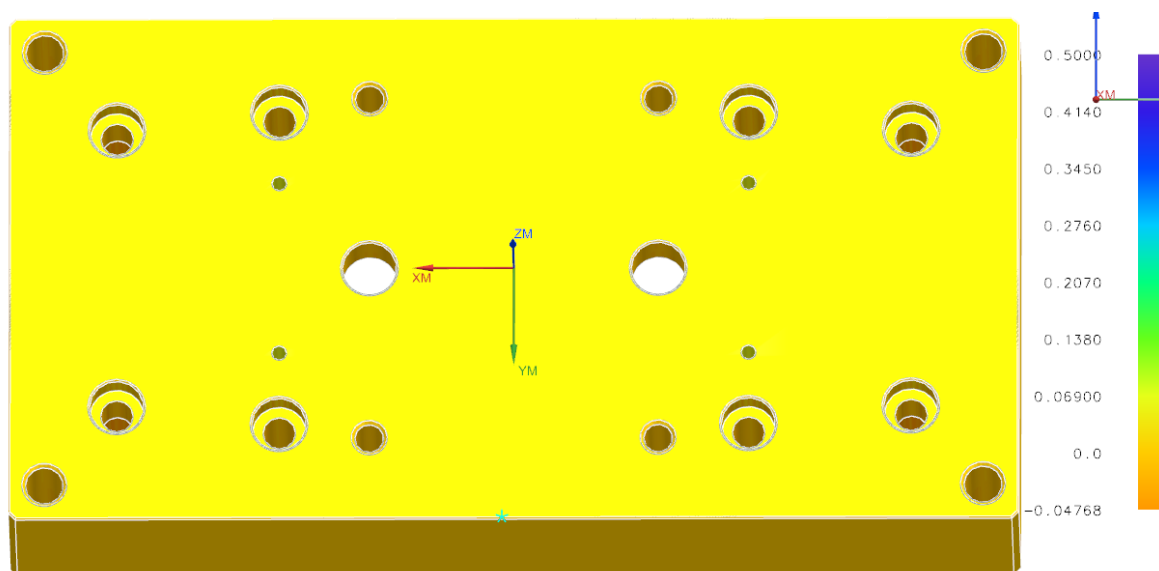
Obr. 34 Analýza pravé tvarové desky



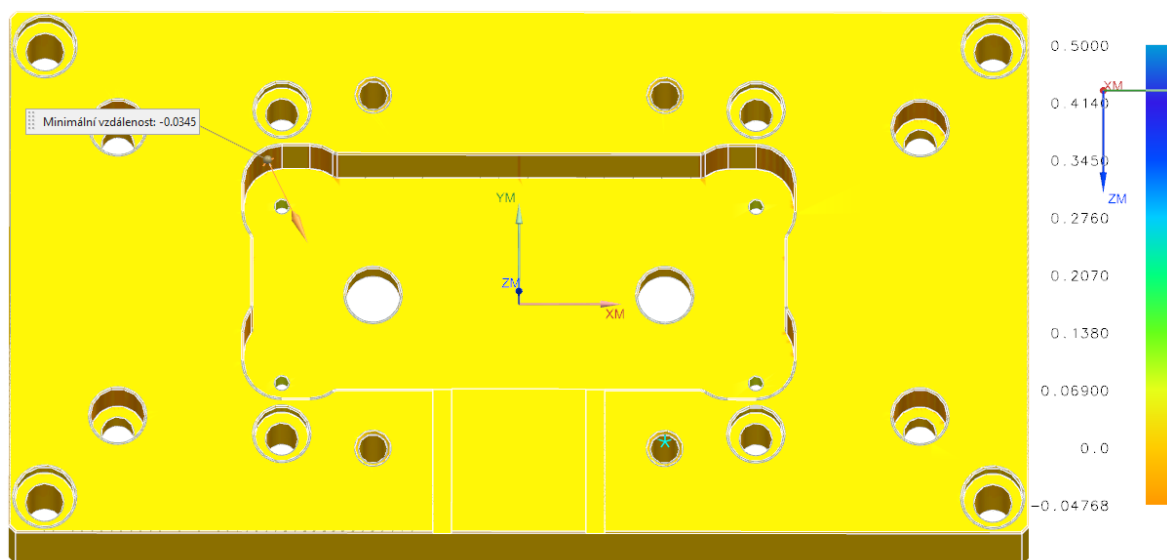
Obr. 35 Analýza pravé tvarové desky – zadní pohled



Obr. 36 Detail přesnosti vtokového kanálu



Obr. 37 Analýza levé tvarové desky



Obr. 38 Analýza levé tvarové desky – zadní pohled

5.9 Odhad časových a ekonomických nákladů výroby tvarových desek

Odhad nákladů byl vytvořen dle metody hodinové sazby. Základem pro určení hodinové sazby výroby stroje byla data společnosti ABNER a.s. pro českou asociaci pro finanční řízení. Cena výroby na CNC stroji se skládá z několika dílčích nákladů a marže. Jako dílčí náklady lze počítat náklady na polotovar, náklady na obrábění výrobku a náklady potřebné na vytvoření výrobního programu a uvedení do provozu, či pořízení speciálního zařízení na výrobu dané součásti. Cena polotovarů desek byla 1930 Kč/kus. Doprava materiálu stála 250 Kč/kus. Hodinová režié stroje byla stanovena na 1300 Kč/hod, zahrnuje náklady na nákup a přeoštění nástrojů, energetické náklady a práci operátora. Výrobní čas jedné desky byl kvůli upínání polotovaru a dalším úkonům zaokrouhlen na 2 hodiny. Pro výrobu tvarových desek také nebyl nutný nákup speciálních nástrojů a nebylo nutné optimalizovat výrobní proces pro větší série, jelikož se jednalo o kusovou výrobu. Pracovní fond programátora taktéž nelze přesně určit. Náklady na výrobu jedné tvarové desky se tedy pohybují okolo 4980 Kč bez marže a DPH. [60]

6 PŘÍPRAVA FDM PROTOTYPŮ

Za účelem výroby prototypů byl původní návrh výrobku (bez úkosů k dělicí rovině) importován ve formátu STL do programu PrusaSlicer. Bylo rozhodnuto, že tisk bude proveden z materiálů PETG a ABS. Tyto materiály byly vybrány kvůli jejich dostupnosti a fyzikálních vlastností.

6.1 FDM 3D tiskárna

Tisk byl proveden na zařízení Prusa I3 MK3S+ (obr. 39). Toto zařízení je vybaveno senzorem filamentu a teplotní sondou umožňující funkci Mesh Bed Leveling, která se stará o vyhlazení nerovností tiskové plochy. Mimo jiné, si tiskárna dovede poradit s úplnou ztrátou napájení, po obnovení zdroje energie pokračuje v činnosti. Dodává se se třemi tiskovými pláty o různé drsnosti povrchu, každý z nich se hodí pro tisk specifických materiálů. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 23.



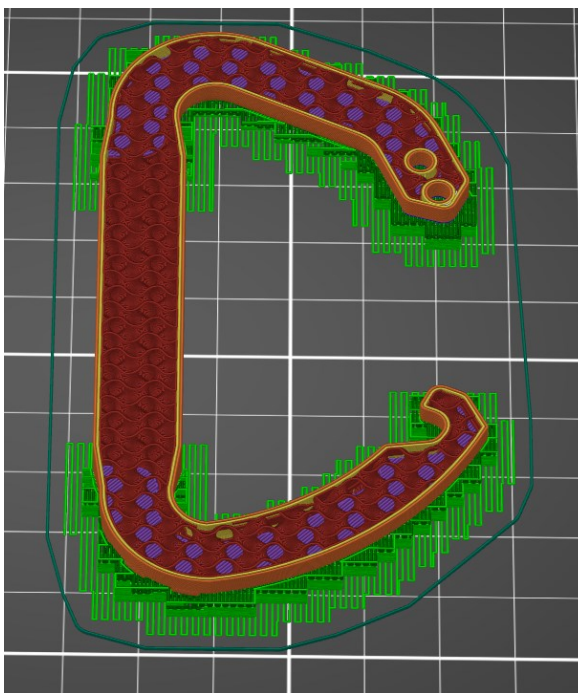
Obr. 39 Prusa I3 MK3S+

Tab. 23 Parametry Prusa I3 MK3S+

Parametry Prusa I3 MK3S+	
Technologie	FDM
Maximální rozměr výrobků	210x210x250 [mm]
Tloušťka vrstvy	50-350 [μm]
Průměr základní trysky	0,4 [mm]
Maximální rychlost posuvu	200 [mm.s-1]
Maximální teplota trysky	300 [°C]
Maximální teplota podložky	120 [°C]
Podporované formáty dat	G-kód
Přenos dat	WiFi, LAN, USB, SD karta

6.2 Nastavení tisku

Pro tisk prototypů byly zvoleny 2 druhy výplně, konkrétně 100 % přímočará výplň a 20 % gyroid výplň. Pro reálnou výrobu není použití 100% výplně praktické a téměř se nepoužívá, ale poskytne lepší srovnání vůči vstříkovanému výrobku. Kdežto gyroid výplň ve srovnání představuje moderní směr 3D strukturovaných výplní, orientace tisknutého výrobku a detail výplně gyroid je zobrazen na obrázcích 40 a 41.



Obr. 40 Pohled na vrstvu navrženého prototypu a navržené podpěry



Obr. 41 Detail výplně gyroid

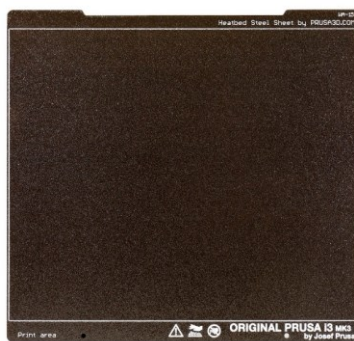
Tab. 24 Parametry tisku FDM prototypů

Materiál	PETG		ABS	
Výplň	Přímočará	Gyroid	Přímočará	Gyroid
Hustota výplně [%]	100	20	100	20
Výška vrstvy [μm]	150			
Teplota trysky [$^{\circ}\text{C}$]	250		255	
Teplota podložky [$^{\circ}\text{C}$]	90		110	
Spotřeba filamentu [g]	19,75	12,62	16,79	10,73
Předpokládaný čas tisku [min]	117	94	116	93

Po nastavení výrobních parametrů v programu parametrů byly pomocí programu PrusaSlicer vyexportovány G kódy pro výrobu.

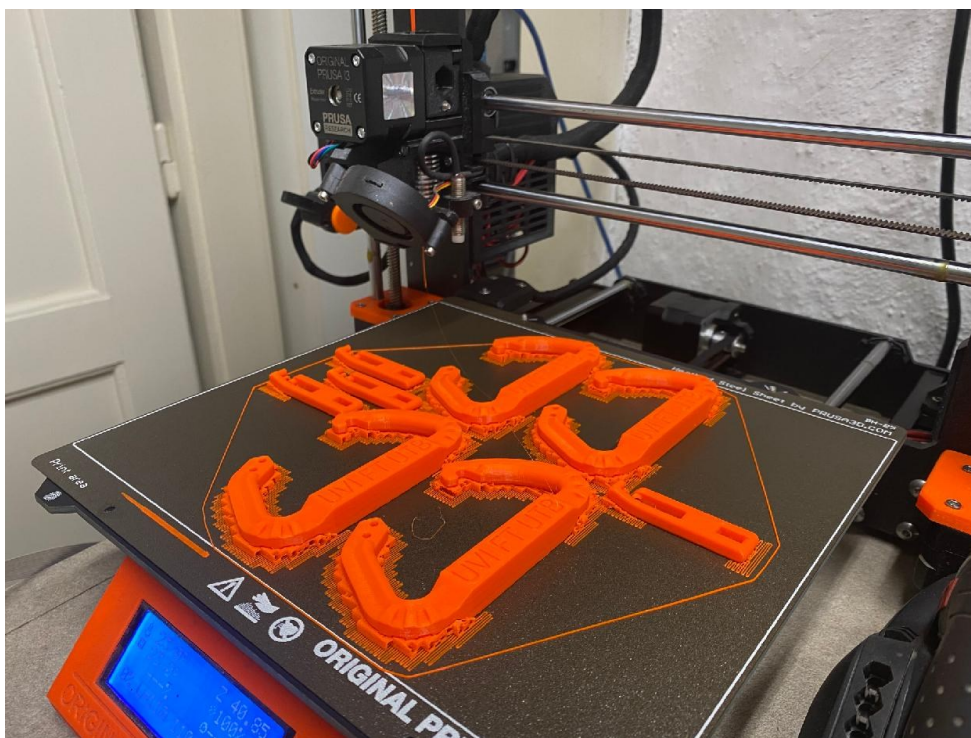
6.3 Výroba FDM prototypů

Pro tisk byla použita podložka s práškovým PEI povrchem (obr. 42), která byla před každým výrobním procesem očištěna a odmaštěna 90 % roztokem isopropylalkoholu (IPA).



Obr. 42 Podložka s práškovým povrchem

Po vložení příslušného materiálu a kalibraci byl do tiskárny přes SD kartu nahrán G kód požadovaného výrobního procesu. Výrobní proces byl poté spuštěn. Stroj jako první provedl Mesh Bed Leveling a poté pokračoval ve výrobě podpěr a samotného výrobku. Dokončené výrobky na podložce, jsou k nahlédnutí na obrázku 43. Poté byly výrobky z podložky sejmuty a podpěry byly ručně odstraněny. Finální výrobek z materiálu PETG je zobrazen na obrázku 44.



Obr. 43 Karabiny vyrobené pomocí technologie FDM



Obr. 44 Karabina vyrobená FDM technologií

6.4 Finanční náklady na výrobu FDM prototypů

Cena výrobku byla vypočtena, podle doporučených kalkulací vydaných společností Prusa. Výpočet ceny zvažuje cenu materiálu, elektřiny, práce a návratnost investice do zařízení tiskárny. Pro provedení výpočtu byly stanoveny hodnoty procesních nákladů, se kterými je třeba počítat. Přehled těchto proměnných je uveden v tabulce 25. [58]

Tab. 25 Proměnné při výpočtu ceny FDM tisku

Kompenzace v případě selhání tisku [%]	20
Cena elektrické energie [Kč/kWh]	4,3
Spotřeba elektrické energie [W]	100
Cena lidské práce [Kč/h]	180
Cena zařízení tiskárny [Kč]	26 990
Předpokládaná návratnost investice	2 roky
Marže pro údržbu zařízení [%]	5

6.4.1 Materiálové náklady FDM tisku

Pro výpočet ceny materiálu byla zvažena cena konkrétního materiálu, množství spotřebovaného materiálu a kompenzace pro případ selhání tisku. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 26.

Tab. 26 Materiálové náklady při FDM tisku

Cena materiálu				
Materiál	PETG		ABS	
Výplň	Přímočará	Gyroid	Přímočará	Gyroid
Hmotnost filamentu [g]	19,75	12,62	16,79	10,73
Cena filamentu [Kč/kg]	699		599	
Kompenzace v případě selhání tisku [%]	20			
Výsledné materiálové náklady na výrobek [Kč]	16,57	10,59	12,07	7,71

Z tabulky je patrné, že v závislosti na zvoleném materiálu a použité výplni se cena jednoho výrobku pohybuje mezi 16,57 a 7,71 korunami.

6.4.2 Energetické náklady FDM tisku

Energetické náklady se odvíjí od výrobního času, množství elektrické energie spotřebovaném spotřebované strojem za hodinu provozu a ceny elektrické energie. Oproti ostatním výrobním nákladům je cena elektrické energie téměř zanedbatelná, výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 27.

Tab. 27 Energetické náklady při FDM tisku

Cena elektrické energie				
Materiál	PETG		ABS	
Výplň	Přímočará	Gyroid	Přímočará	Gyroid
Hodinová spotřeba elektrické energie [W/hod]	100			
Cena elektrické energie [Kč]	4,3			
Výrobní čas [min]	117	94	116	93
Celkové energetické náklady na výrobek [Kč]	0,84	0,67	0,83	0,67

6.4.3 Pracovní náklady FDM tisku

Na rozdíl od ostatních nákladů se dají náklady na lidskou práci ovlivnit počtem výrobků, vyrobených při jednom cyklu. Při jednom výrobním cyklu lze na zařízení Prusa I3 MK3S+ vyrobit až 8 karabin. To by znamenalo. Prodloužení dokončovací operace, jelikož je nutné odstranit podpěry ze všech výrobků, ale doba přípravy tisku by zůstala stejná.

Tab. 28 Náklady na práci spojenou s FDM tiskem

Cena práce	Pro výrobu 1 kusu	Pro výrobu 8 kusů
Čas přípravy tisku [min]	15	15
Čas dokončovacích operací [min]	5	40
Hodinová mzda pracovníka [Kč/hod]	180	
Pracovní náklady na jeden výrobní cyklus [Kč]	60	30

6.4.4 Výrobní režie FDM tisku

Výrobní režie je závislá na ceně použitého zařízení, nákladech na údržbu, předpokládané provozní době zařízení a výrobním časem pro jeden výrobek. Výpočet byl proveden s hodnotami uvedenými v tabulce 29.

Tab. 29 Výrobní režie FDM tiskárny

Výrobní režie stroje				
Materiál	PETG		ABS	
Výplň	Přímočará	Gyroid	Přímočará	Gyroid
Nákupní cena zařízení tiskárny [Kč]	22 306			
Předpokládaná návratnost investice [rok]	2			
Předpokládaný denní provoz stroje [hod]	8			
Předpokládaná cena údržby zařízení [%]	5			
Výrobní čas [min]	117	94	116	93
Výsledná režie stroje [Kč]	7,82	6,28	7,75	6,22

6.4.5 Celkové náklady FDM tisku

Součtem všech jednotlivých druhů nákladů bylo dosaženo výsledné ceny jednoho výrobku, tato cena by dále podléhala zdanění a marži výrobce. Finální náklady jsou uvedeny v tabulce 30.

Tab. 30 Výsledné náklady FDM tisku

Výsledné náklady				
Materiál	PETG		ABS	
Výplň	Přímočará	Gyroid	Přímočará	Gyroid
Výsledné náklady [Kč]	85,23	77,54	80,65	74,60
Výsledné náklady pro optimalizovaný výrobní proces [Kč]	55,23	47,54	50,65	44,60

7 VÝROBA TVAROVÝCH VLOŽEK

7.1 Zařízení pro výrobu tvarových vložek

Tisk tvarových vložek byl proveden na zařízení Formlabs Form 2 (Obr. 45). Jedná se o druhou generaci desktopových SLA tiskáren od amerického výrobce Formlabs. Parametry stroje jsou uvedeny níže, v Tab. 31.



Obr. 45 Formlabs Form 2 a příslušenství [21]

Tab. 31 Parametry Formlabs Form 2

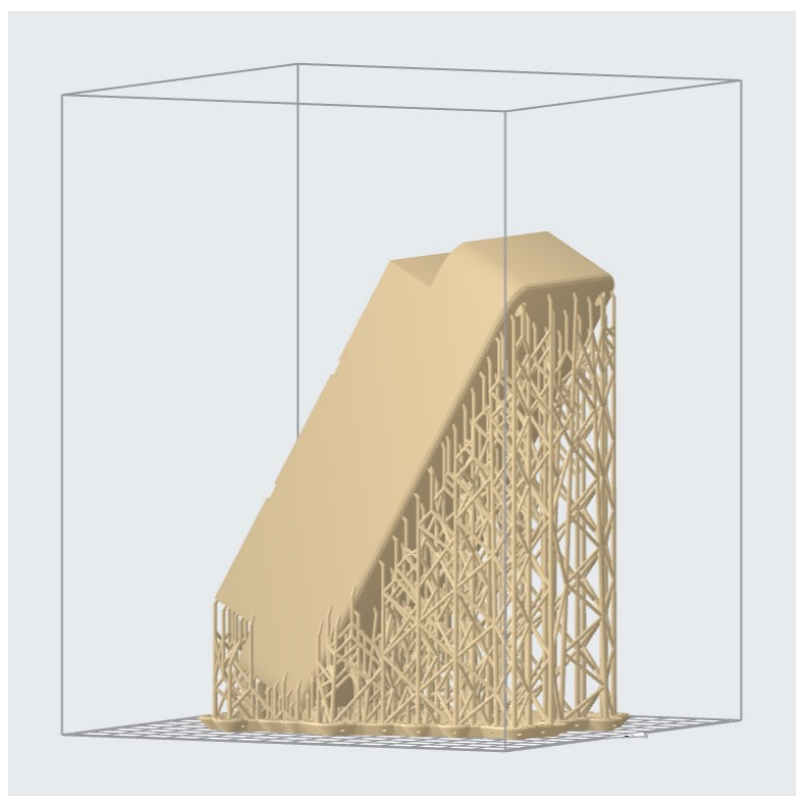
Parametry Formlabs Form 2	
Technologie	SLA
Maximální rozměr výrobků	145x145x175 [mm]
Tloušťka vrstvy	25-300 [μm]
Průměr vytvrzovaného bodu	140 [μm]
Výkon laseru	250 [mW]
Ovládání	dotykový displej
Podporované platformy	Windows (7 a vyšší), macOS X (10.6.8 a vyšší)
Podporované formáty dat	STL, OBJ
Přenos dat	WiFi, LAN, USB
Rozměry zařízení	350x330x520 [mm]

7.2 Příprava výroby tvarových vložek

Modely tvarových vložek byly importovány do softwaru PreForm ve formátu STL. Výrobek byl ve virtuálním pracovním prostoru otočen na výšku. Následně byly podél osy Y natočeny o 30°, kvůli zabránění nutnosti tvorby podpěr ve funkčních částech vložky. Následně byly nastaveny parametry pro automatické vygenerování podpěr, viz. tabulka 32. Vygenerované podpěry jsou také zobrazeny na obrázku 46. Následně bylo nastaveno umístění výrobku v pracovním prostoru tiskárny.

Tab. 32 Nastavení generátoru podpěr

Hustota sítě podpěr	0,90
Velikost styčného bodu	0,6 mm
Multiplikátor sklonu	0,9
Tloušťka podložky	5,00 mm
Výška výrobku nad podložkou	2 mm



Obr. 46 Vygenerované podpěry

Po nastavení byl pomocí programu PreForm vypočítaný předpokládaný čas tisku, počet vrstev, a objem spotřebovaného materiálu. Srovnání údajů pro nastavení tloušťek vrstvy na 0,05 mm nebo 0,025 mm je uvedeno v tabulce 33.

Tab. 33 Srovnání výrobních parametrů pro různé tloušťky vrstvy

	Levá tvarová vložka		Pravá tvarová vložka	
	50	25	50	25
Tloušťka vrstvy [μm]	50	25	50	25
Čas tisku [hod:min]	36:32	76:12	36:13	75:35
Počet vrstev [-]	2812	5569	2818	5584
Objem spotřebovaného materiálu [ml]	373,05	371,06	376,02	374,93

Z výsledků je zřejmé, že snížením tloušťky vrstvy na minimum, které je stroj schopen vyrobit, je více než dvojnásobně zvýšen výrobní čas. Změny objemu spotřebovaného materiálu v závislosti na tloušťce vrstvy jsou zanedbatelné. Po zvážení těchto variant bylo rozhodnuto, že bude tisk kvůli časové úspoře proveden při tloušťce vrstvy 50 μm .

Program byl přímo ze softwaru PreForm importován do zařízení skrz bezdrátovou síť Wi-Fi a byl spuštěn výrobní proces. Po úspěšném průběhu tisku, byl výrobek na platformě vyjmut z tiskárny Formlabs Form 2 na tiskové platformě, hotový výrobek je zobrazen na obrázku 47.



Obr. 47 Pravá tvarová vložka na tiskové platformě

7.3 Omytí přebytečné pryskyřice a odstranění podpěr

Prvním krokem po vyjmutí výrobku z tiskárny, bylo odejmutí z platformy a následně byly odstraněny podpěry. Výrobky byly umývány od přebytečné pryskyřice ve stroji Formlabs Form Wash (obr. 48) po dobu šesti minut ponořené ve 100 % isopropylalkoholu.

Je možné umývat výrobek, který je stále uchycený na platformě, ale síť podpěr byla rozsáhlá a přebytečná pryskyřice by mohla znamenat zbytečné znečišťování isopropilalkoholové lázně. Výrobce nedoporučuje vymývat pryskyřici High Temp V2 déle než deset minut, jelikož by začala absorbovat isopropylalkohol. Výrobky byly poté vyjmuty z lázně, očištěny od posledních zbytků pryskyřice a vysušeny ofukovací pistolí.



Obr. 48 Formlabs Form Wash 5 [21]

7.4 Vytvrzování

Vytvrzování bylo provedeno na zařízení Formlabs Form Cure (obr. 49). Dle doporučení výrobce byl vytisknutý výrobek vytvrzován při teplotě 80 °C po dobu 120 minut. Takto vytvrzená pryskyřice by měla vykazovat maximální mechanické vlastnosti při minimalizaci vytvrzovacího času.



Obr. 49 Formlabs Form Cure [21]

7.5 Výpočet nákladů pro výrobu SLA tvarových vložek

Náklady pro výrobu tvarových vložek byly vypočítány stejným postupem, jako u FDM prototypů, s tím rozdílem, že u výroby pomocí stereolitografie je nutné do výrobního procesu zahrnout více dokončovacích operací, včetně vytvrzování a očištění výrobku.

7.5.1 Materiálové náklady SLA tisku

Pro výpočet materiálových nákladů byla použita cena materiálu Formlabs High Temp V2. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 34. Lze podotknout že materiálové náklady jsou u SLA tisku na rozdíl od FDM tisku jednoznačně největší položkou. Pro případ selhání tisku by se v reálné výrobě mohlo počítat s kompenzací ve výši 20 % na výrobek.

Tab. 34 Materiálové náklady SLA tisku

Cena materiálu		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Tloušťka vrstvy [μm]	50	50
Objem spotřebovaného materiálu [ml]	373,05	376,02
Cena materiálu [Kč/l]	5 415	
Kompenzace v případě selhání tisku [%]	20	
Výsledné materiálové náklady na výrobek [Kč]	2424,08	2443,38

7.5.2 Energetické náklady SLA tisku

Výrobce tiskáren Formlabs Form 2 uvádí, že jejich hodinová spotřeba elektrické energie je rovna 65 W. SLA tisk je časově daleko náročnější než FDM tisk, proto je cena energie vyšší, ale přesto téměř zanedbatelná vzhledem k ceně materiálu. Přesné energetické náklady jsou uvedeny v tabulce 35.

Tab. 35 Energetické náklady SLA tisku

Cena elektrické energie		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Hodinová spotřeba elektrické energie [W/hod]	65	
Cena elektrické energie [Kč]	4,3	
Výrobní čas [hod]	36,53	36,22
Celkové energetické náklady na výrobek [Kč]	10,21	10,12

7.5.3 Pracovní náklady SLA tisku

Oproti FDM tisku, je k výrobě pomocí SLA zapotřebí větší množství lidské práce. Kromě odstranění podpěr, je zapotřebí výrobek očistit, provést vytvrzovací operace a případně následné broušení za účelem zbavení se zbytků podpěr.

Tab. 36 Pracovní náklady SLA tisku

Cena práce	
Čas přípravy tisku [min]	30
Čas lidské práce při dokončovacích operacích [min]	30
Hodinová mzda pracovníka [Kč/hod]	180
Pracovní náklady na jeden výrobní cyklus [Kč]	180

7.5.4 Výrobní režie SLA tisku

Výrobní režie u SLA tiskárny Formlabs Form 2 je kvůli její pořizovací ceně a větším výrobním časům podstatně vyšší, oproti FDM tiskárně. Režijní náklady SLA tisku jsou uvedeny v tabulce 37.

Tab. 37 Výrobní režie SLA tisku

Výrobní režie stroje		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Nákupní cena zařízení tiskárny [Kč]	70 000	
Předpokládaná návratnost investice [rok]	2	
Předpokládaný denní provoz stroje [hod]	8	
Předpokládaná cena údržby zařízení [%]	5	
Výrobní čas [hod]	36,53	36,22
Výsledná režie stroje	437,99	434,28

7.5.5 Náklady na výměnu kádě na pryskyřici

Výrobce tiskáren dodává pro model Form 2 dva druhy kádí na pryskyřici, tedy standartní a model s větší životností, který je současně doporučen pro tisk pryskyřic pro inženýrské využití a pro tisk některých materiálů je dokonce nezbytný. Právě model se zvýšenou životností byl pro tisk použit při výrobě tvarových vložek. Dle dat výrobce by kád' na pryskyřici Form 2 Resin Tank LT měla vydržet vystavení pryskyřici po dobu 35 týdnů, nebo tisk 5 litrů vytisknutého materiálu.

Tab. 38 Náklady na výměnu kádě na pryskyřici

Náklady na výměnu kádě na pryskyřici		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Cena nové kádě [Kč]	1683	
Množství materiálu vytisknutelného v kádi [l]	5	
Objem spotřebovaného materiálu [ml]	373,05	376,02
Procentuální opotřebení kádě [%]	13,40	13,30
Výše kompenzace opotřebení tanku na 1 výrobek [Kč]	225,57	223,79

7.5.6 Náklady na očištění v isopropylalkohové lázni

Kromě samotného režie stroje při mytí výrobků ve stroji Formlabs Form Wash je nutné počítat se znečištěním isopropylalkoholové lázně a s nutností lázeň vyměnit po omytí sedmdesáti výrobků. Cena elektrické energie za provoz stroje po dobu šesti minut, je naprosto zanedbatelná. Kompletní náklady na omytí výrobku jsou uvedeny v tabulce 39.

Tab. 39 Náklady na omytí od přebytečné pryskyřice

Náklady na omytí od přebytečné pryskyřice		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Nákupní cena zařízení [Kč]	10 195	
Předpokládaná návratnost investice [rok]	2	
Předpokládaný denní provoz stroje [min]	30	
Čas potřebný k omytí pryskyřice [min]	6	6
Výsledná režie stroje [Kč]	2,80	2,80
Kapacita tanku na isopropylalkohol [l]	8,6	
Cena isopropylalkoholu [Kč/l]	91	
Cena výměny isopropylalkoholu na 1 výrobek [Kč]	11,18	
Celkové náklady na omytí výrobku [Kč]	13,98	13,98

7.5.7 Náklady na vytvrzení

Vytvrzení bylo provedeno v zařízení Formlabs Form Cure, vytvrzovací čas byl pro oba výrobky nastaven dle doporučení výrobce materiálu na 120 minut při teplotě 80 °C. Čas potřebný pro vyhřátí zařízení na požadovanou teplotu se pohyboval okolo 60 minut. Mezi výrobou jednotlivých vložek byl přitom velký časový rozestup, proto bylo vyhřívání na požadovanou teplotu potřebné provést pro oba vytvrzovací cykly.

Tab. 40 Náklady na vytvrzení tvarových vložek

Náklady na vytvrzení tvarových vložek		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Nákupní cena zařízení [Kč]	11 880	
Přepokládaná návratnost investice [rok]	2	
Předpokládaný denní provoz stroje [hod]	4	
Čas potřebný k přehřevu stroje [hod]	1	
Vytvrzovací čas [hod]	2	
Výsledná režie stroje [Kč]	12,21	12,21
Hodinová spotřeba elektrické energie [W/hod]	144	
Cena elektrické energie [Kč/kWh]	4,3	
Celkové energetické náklady na výrobek [Kč]	1,86	1,86
Celkové náklady na vytvrzení výrobku [Kč]	14,07	14,07

7.5.8 Celkové náklady SLA tisku

Celkové náklady byly určeny součtem všech dílčích nákladů na výrobu tvarových vložek pomocí stereolitografie, výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 41. Je zřejmé že z jednotlivých nákladů, je největší položkou právě použitý materiál.

Tab. 41 Výsledné náklady tisku SLA tvarových vložek

Výsledné náklady		
	Levá tvarová vložka	Pravá tvarová vložka
Výsledné náklady pro výrobu jednoho kusu [Kč]	3305,91	3139,62

7.6 Měření rozměrů tvarových vložek

Měření rozměrů tvarových vložek bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřidla TESA Cal IP67, které je zobrazeno na Obr. 50. Měřidlo disponuje rozlišitelností 0,01 mm, rozsahem 150 mm a lze na něm provádět měření s opakovatelností 10 μ m. Tento krok byl nutný kvůli učení správné velikosti kapsy tvarových desek za účelem dosažení optimálního lícování. Pro každý z největších rozměrů tvarových vložek bylo provedeno 10 měření. Naměřené hodnoty v jednotlivých osách jsou uvedeny v tabulkách 42–44.

Tab. 42 Rozměry tvarových vložek v ose X

Rozměry v ose x				
Rozměry	Navržené [mm]		Reálné [mm]	
	Levá vložka	Pravá vložka	Levá vložka	Pravá vložka
1	145		145,34	145,46
2			145,51	145,57
3			145,54	145,53
4			145,46	145,52
5			145,44	145,57
6			145,46	145,52
7			145,36	145,58
8			145,41	145,44
9			145,39	145,51
10			145,36	145,58
Průměr	-		145,427	145,528

Tab. 43 Rozměry tvarových vložek v ose Y

Rozměry v ose y				
Rozměry	Navržené [mm]		Reálné [mm]	
	Levá vložka	Pravá vložka	Levá vložka	Pravá vložka
1	65		64,52	64,46
2			64,58	64,51
3			64,51	64,77
4			64,56	64,52
5			64,64	64,66
6			64,66	64,72
7			64,59	64,54
8			64,63	64,53
9			64,51	64,47
10			64,65	64,54
Průměr	-		64,585	64,572

Tab. 44 Rozměry tvarových vložek v ose Z

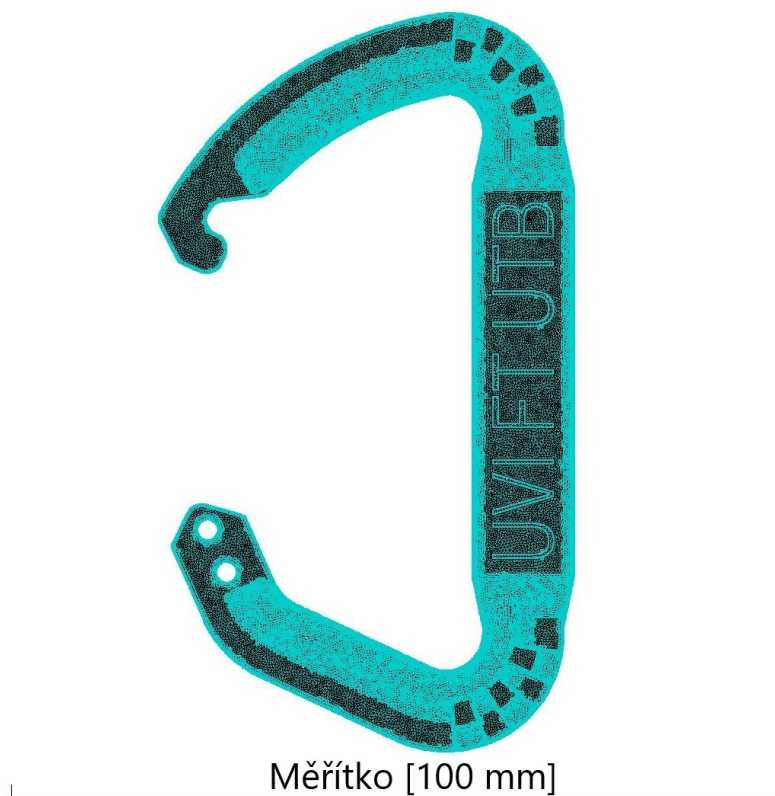
Rozměry v ose z				
Rozměry	Navržené [mm]		Reálné [mm]	
	Levá vložka	Pravá vložka	Levá vložka	Pravá vložka
1	40		39,83	39,81
2			39,88	39,73
3			39,92	39,86
4			39,98	39,95
5			39,92	39,83
6			39,97	39,96
7			39,91	39,78
8			39,87	39,91
9			39,93	39,95
10			39,99	39,91
Průměr	-		39,920	39,869

Naměřené hodnoty prokázali nízké rozměrové smrštění v osách Y a Z. Naopak rozměry v ose Z, která byla při tisku orientovaná ve svislém směru a byla natočená o 30° vzhledem k podložce vykazují mírné prodloužení vzhledem k navržené hodnotě 145 mm. Na základě navržených hodnot byly určeny rozměry kapsy ve tvarových vložkách na hodnotu 146x65x39,5 mm.

8 ANALÝZA VSŘIKOVÁNÍ V PROGRAMU AUTODESK MOLDFLOW

8.1 Nastavení analýzy

Prvním krokem při nastavení analýzy bylo nahrání výrobku do programu Moldflow. Upravený model výrobku v *.stp formátu byl importován do sítě Dual – Domain s následným vysítováním. Sítování Dual – Domain je využíváno pro sítování trojrozměrných modelů, a to za pomoci rovnostranných trojúhelníků. Vysítovaný výrobek je zobrazen na obrázku 50.



Obr. 50 Vysítovaný výrobek

Po vysítování je nutné provést kontrolu pomocí funkce Mesh Statistics a zvážit následnou manuální úpravu sítě, statistika sítě je uvedena v obrázku 51. Aspect Ratio je poměr základny trojúhelníku k jeho výšce. Tvorba sítě je úspěšná, jestliže je hodnota Maximum Aspect Ratio nižší než 15, přitom čím nižší je hodnota, tím je síť přesnější. Dále je nutné, aby síť neobsahovala žádné volné hrany, nerovné hrany, neorientované elementy a průniky ani přesahy elementů. Posledním důležitým údajem je procento shody, které musí

být pro provedení kompletní analýzy, vyšší než 85 %. Pokud je hodnota shody nižší, jako například v tomto případě, lze vytvořit pouze analýzu, která neobsahuje výsledky temperací. Když jsou všechny hodnoty v pořádku, přistupuje se k nastavení násobnosti formy a importování vymodelovaného vtoku. Dále bývá importován chladicí okruh, tento krok byl ale přeskočen kvůli charakteru prototypové formy, nakonec byly zvoleny rozměry formy a umístění výrobku ve formě.

```

Triangles
-----
Entity counts:
  Triangles           59258
  Connected nodes    29627
  Connectivity regions 1

  Invisible triangles           0

Area:
(Mold blocks and cooling channels are not
included)
  Surface Area:          65.5761 cm^2

Volume by element types:
  Triangle:             13.7604 cm^3

Aspect Ratio:
  Maximum   Average   Minimum
    13.63     1.58     1.16

Edge details:
  Free edges           0
  Manifold edges      88887
  Non-manifold edges   0

Orientation details:
  Elements not oriented 0

Intersection details:
  Element intersections 0
  Fully overlapping elements 0

Match percentage:
  Match percentage      71.4%
  Reciprocal percentage 70.6%

```

Obr. 51 Statistika sítě

Rozměry bloku formy byly nastaveny na 115 x 80 x 60 mm a výrobek byl umístěn do středu dutiny formy, dle návrhu.

8.2 Vstřikovaný materiál

Zvolený materiál je obecný SABIC LDPE 1965T (Neplněný nízkohustotní polyetylen). Tento materiál vyniká rychlým tokem ve formě, je výborný pro flexibilní výrobky, které

nejdou kriticky mechanicky zatěžované. Má malou tendenci, se po vstřiku prohýbat. Základní parametry materiálu jsou vypsány v tabulce 45.

Tab. 45 Vstřikovaný materiál

Parametr	Hodnota
Materiál	SABIC LDPE 1965T
Doporučená teplota formy	52 °C
Doporučená teplota taveniny	230 °C
Doporučená teplota při vyhazování	84 °C
Vstřikovací čas	0,35 s
Doba otevření formy	20 s
Přepnutí na dotlak při % objemového zaplnění	99 %

8.3 Nastavení Procesních podmínek

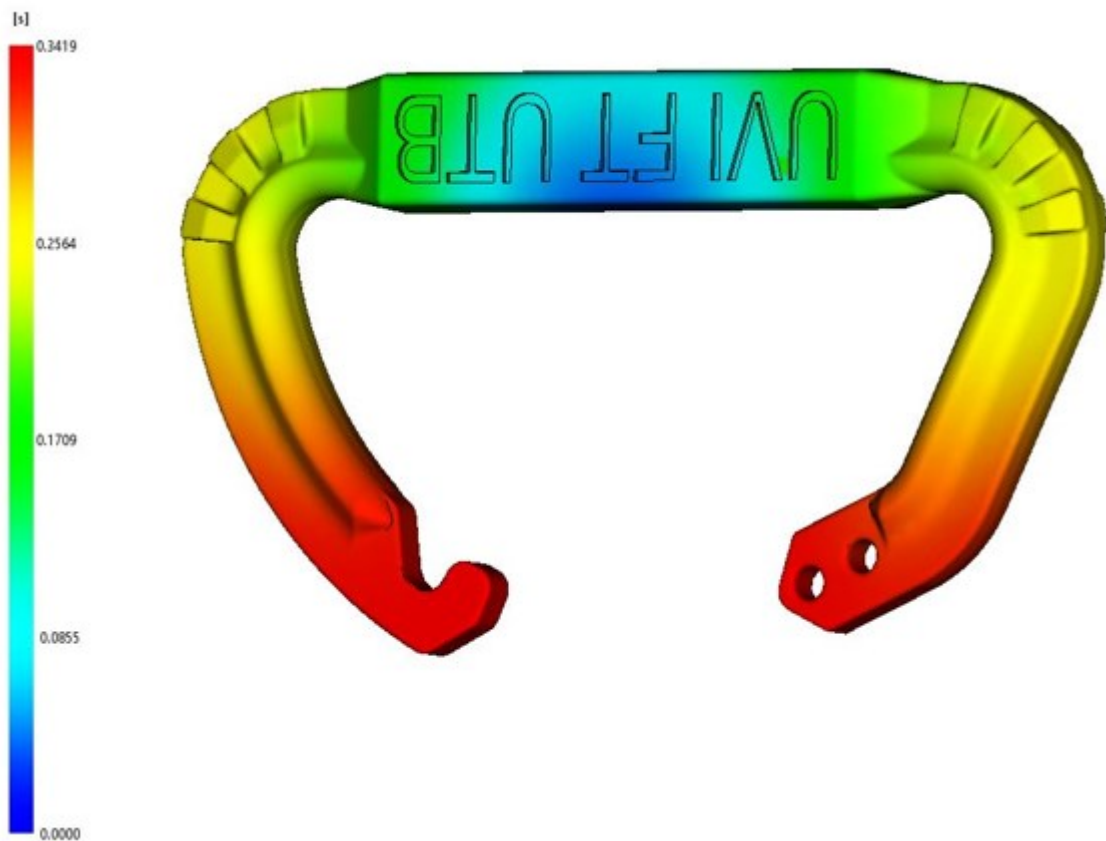
Volba procesních podmínek byla provedena dle doporučené defaultně nastavené analýzy pro daný materiál, aby bylo dosaženo co nejoptimálnějšího procesu vstřikování. Nastavení procesních parametrů bylo provedeno v Process Settings Wizard. Teplota povrchu formy byla nastavena na 52 °C a teplota vstřikovaného materiálu na 230°C. Dále byl nastaven čas plnění a přepnutí na dotlak při 99 % objemového zaplnění formy.

8.4 Výsledky analýzy

Pro výpočet analýzy bylo vybráno nastavení (Fill + Pack + Warp). Program Autodesk Moldflow po ukončení analýz nabízí řadu výsledků. Takto nastavená analýza poskytne výsledky analýz plnění, dotlaku, smrštění a deformace.

8.4.1 Analýza plnicího času

Jedná se o grafické i početní vyjádření doby, která je potřebná pro úplné zaplnění dutiny formy. Dle této analýzy lze zvážit, je-li nastavení správné, tavenina by totiž měla dorazit ke krajním místům výrobku za stejnou dobu, tzn., že plnění dutiny vstřikovaným materiálem musí být vyváženo.

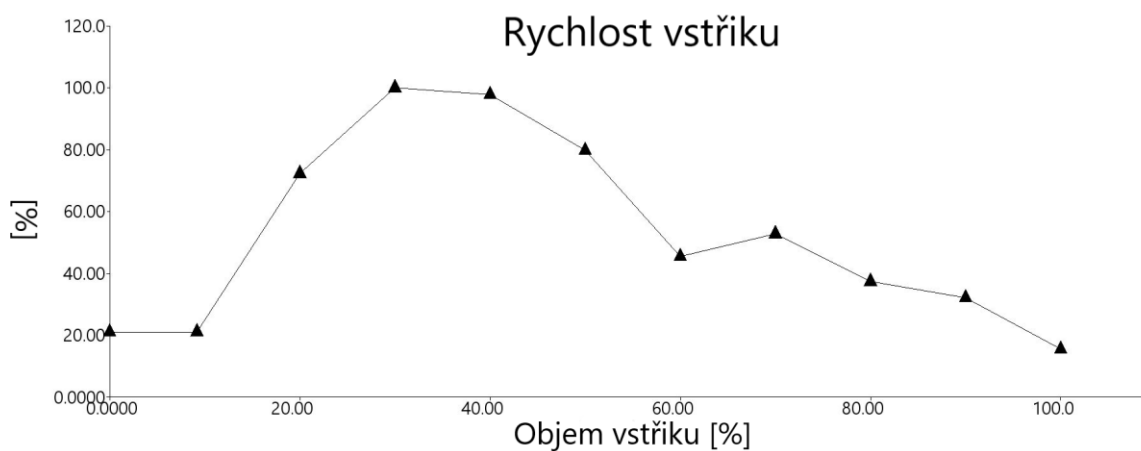


Obr. 52 Analýza plnicího času

Podle analýzy plnicího času (obr. 52), by mělo zaplnění dutiny formy taveninou trvat 0,342 sekundy.

8.4.2 Rychlost vstřiku

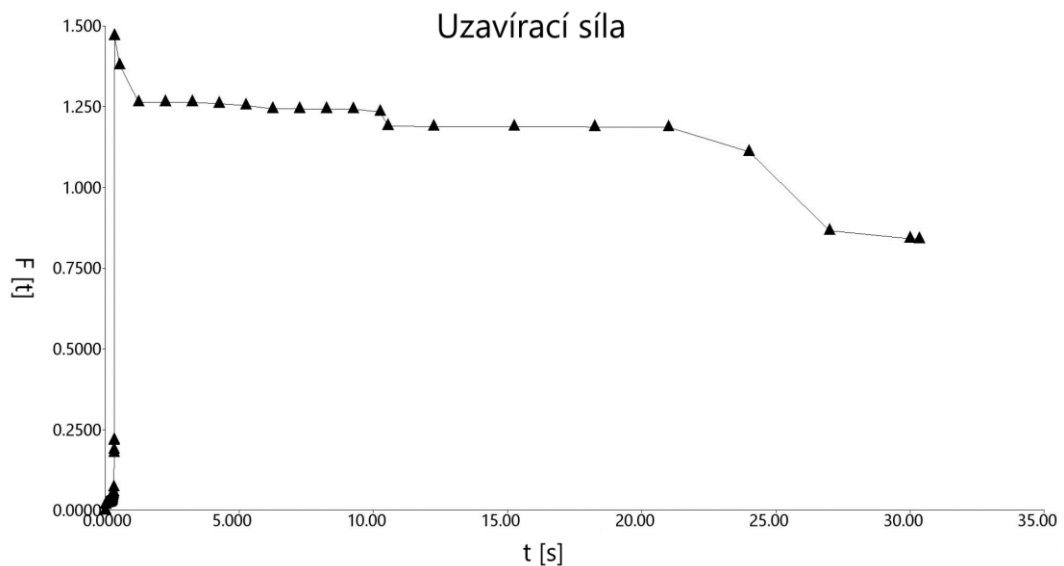
Tato analýza popisuje křivku zaplnění formy, v závislosti na prostupu materiálu skrz vstřikovací jednotku, výsledek je zobrazen v obrázku 53.



Obr. 53 Analýza vstřikovací rychlosti

8.4.3 Uzavírací síla

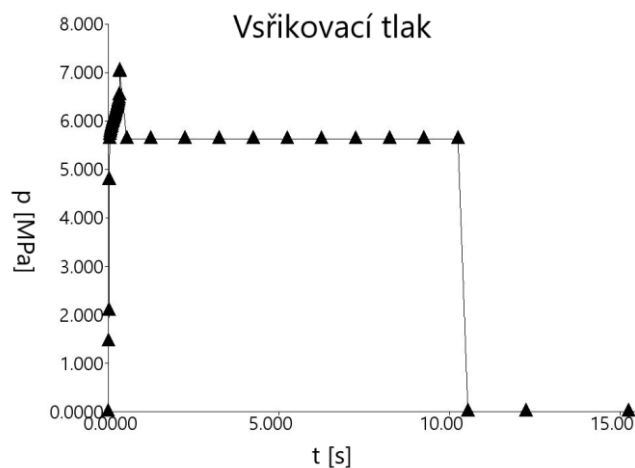
Velikost uzavírací síly je základním parametrem potřebným pro správnou volbu vstřikovacího stroje, jelikož výsledná velikost uzavírací síly nesmí překročit maximální uzavírací sílu vstřikovacího stroje. Velikost navržené uzavírací síly je pouhých 1,5 tun, proto je zvolený vstřikovací stroj s maximální uzavírací silou 180 tun vyhovující.



Obr. 54 Analýza uzavírací síly

8.4.4 Vstřikovací tlak

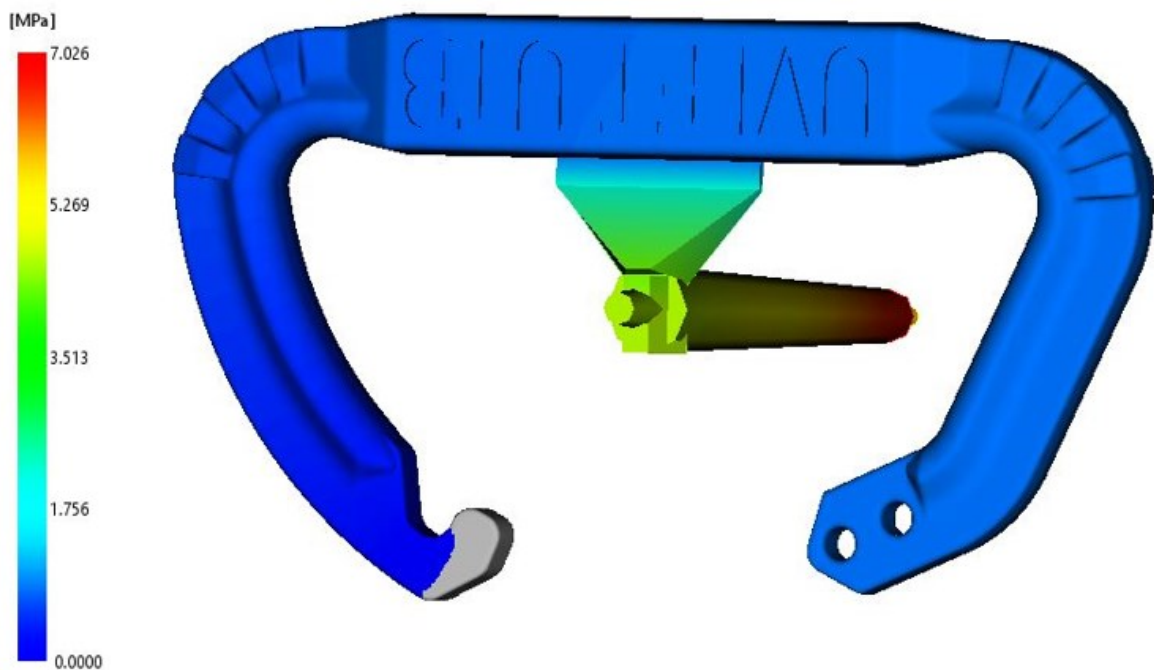
Na obrázku 55 je vyobrazen doporučený průběh vstřikovacího tlaku v místě vtoku. V čase 0 – 0,35 sekund lze pozorovat prudký nárůst tlaku, způsobený zahájením vstřikovaného procesu a vstříknutím polymeru do dutiny formy. Následně tlak klesne na 5,5 MPa a setrvá na této hodnotě do času 10 sekund, tato část grafu popisuje fázi dotlaku.



Obr. 55 Analýza průběhu vstřikovacího tlaku

8.4.5 Tlak v bodě přepnutí

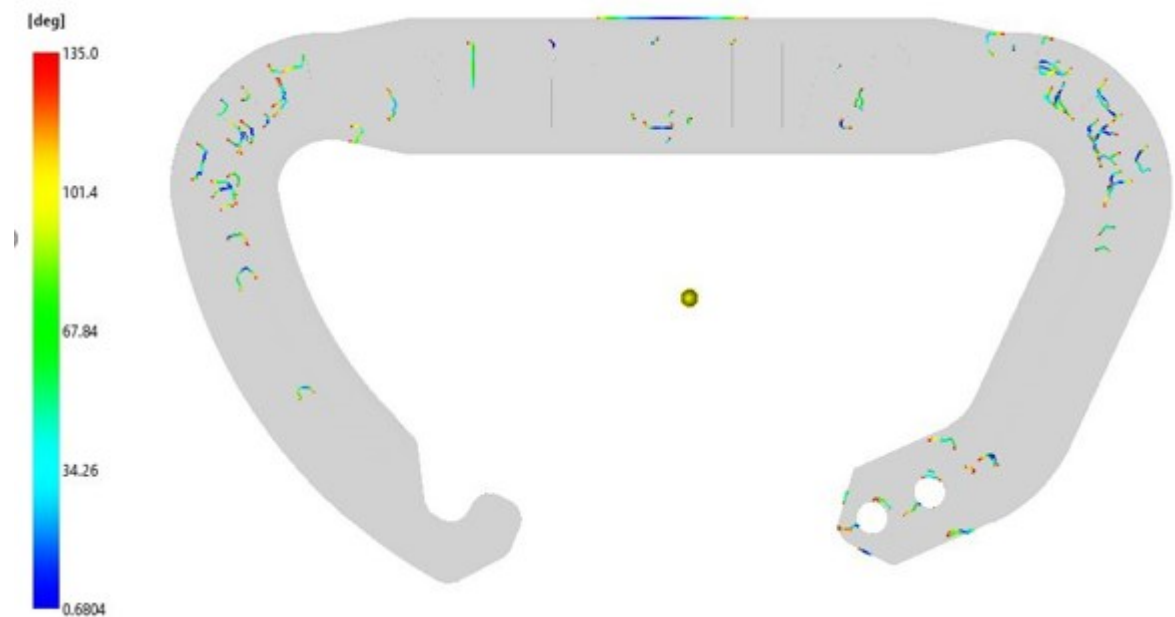
Jako bod přepnutí je označován bod, ve kterém se vstřikovací tlak změní na dotlak. Ve výsledku této analýzy je barevně znázorněna velikost tlaku uvnitř dutiny formy právě během okamžiku přepnutí na dotlak. Šedá místa znázorňují nezaplňené prostory dutiny formy. Při přepnutí na dotlak, by objem vstříknutého polymeru měl odpovídat 95–99 % objemu dutiny. Z obrázku 56 je současně patrné, že pravá část dutiny bude vyplněna dříve než levá.



Obr. 56 Tlak v bodě přepnutí

8.4.6 Studené spoje

Ke vzniku studených spojů dochází při střetu dvou proudů taveniny při plnění formy. V těchto místech dochází ke zhoršení pohledových a mechanických vlastností výrobku, proto je tento jev nežádoucí. Příčinami vzniku studených spojů může být nízká teplota formy, nízká teplota vstřikovaného materiálu, malá rychlost vstřikovaného materiálu, příliš dlouhá dráha toku taveniny, nebo nevhodné odvzdušnění. Je důležité, aby studené spoje nevznikali v mechanicky namáhaných částech výroku. Na obrázku 58 lze vidět programem predikované studené spoje. Lze předpokládat, že rychlost vstřikovaného materiálu ani délka dráhy taveniny nebudou při tvorbě studených spojů v tomto případě kritickým faktorem. Byla provedena i analýza teploty vstřikovaného materiálu, která je zobrazena na obrázku 59, z ní vyplývá, že při zaplnění dutiny formy taveninou nedochází k výraznému poklesu její teploty. Proto bylo navrženo efektivnější odvzdušnění formy.



Obr. 57 Studené spoje

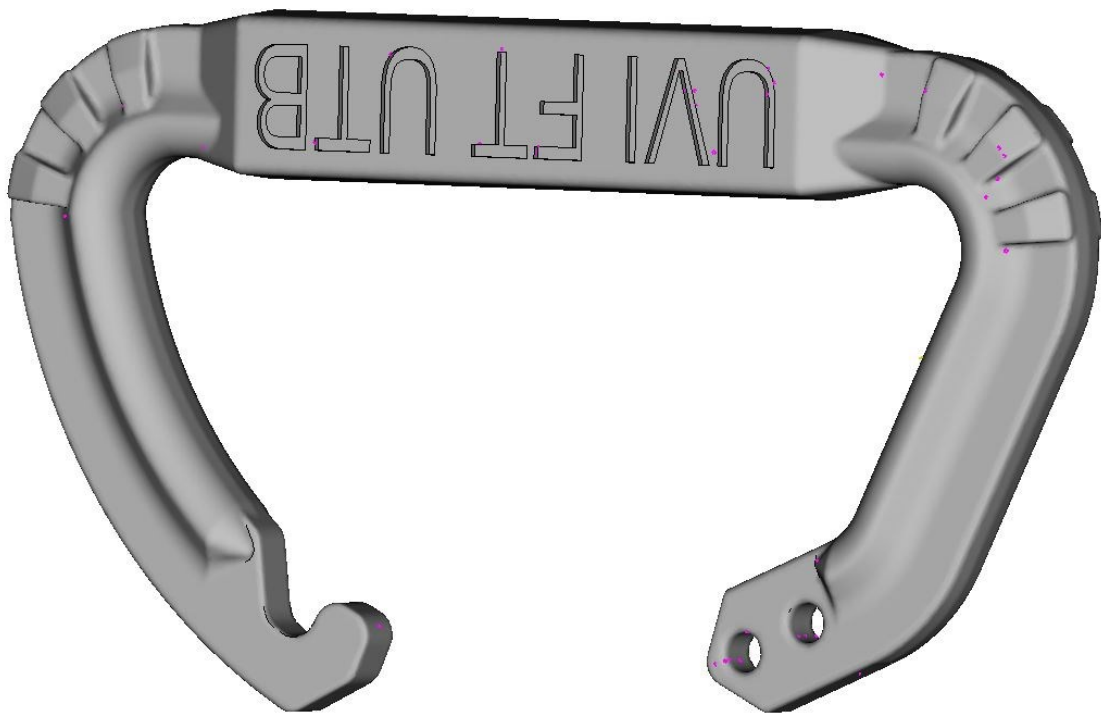


Obr. 58 Teplota vstřikovaného materiálu

8.4.7 Vzduchové kapsy

V místech, kde dochází ke spojení čel proudů tavenin, se mohou vyskytovat vzduchové kapsy. V těchto místech je nutné řešit problematiku odvzdušnění formy, například vůlemi mezi vyhazovači nebo přidáním odvzdušňovacích kanálů. Problém lze v

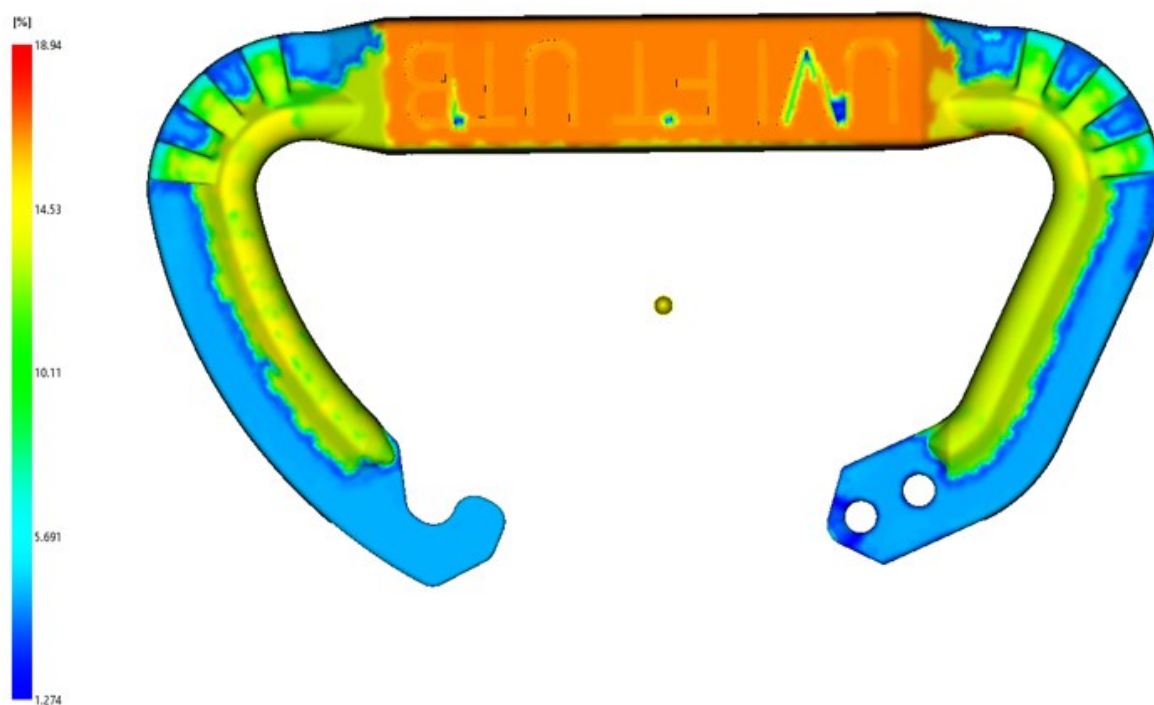
některých případech také řešit zvýšením vstřikovacího tlaku nebo úpravou vstřikovací rychlosti. Na obrázku 60 jsou růžovou barvou vyobrazeny vzduchové kapsy, které mohou vzniknout při plnění dutiny formy taveninou. Při zvyšování plnicí rychlosti je nutné zajistit efektivnější odvzdušnění formy. Tato analýza byla dalším důvodem pro přidání odvzdušňovacích kanálů do návrhu formy.



Obr. 59 Vzduchové kapsy

8.4.8 Objemové smrštění při vyhození

Po zaplnění tvarové dutiny formy taveninou a následném dotlaku se začne projevovat objemové smrštění na výrobku. Smrštění se dělí na výrobní (90 % celkového smrštění) a dodatečné (10 % celkového smrštění). Smrštění není ve všech směrech stejné, záleží na směru proudění taveniny, polymeru, plnivu, tvaru vstřikovaného výrobku a teplotě. Na výrobku (obr. 61) je barevně znázorněna hodnota procentuálního smrštění. Je zřejmé, že k největšímu smrštění dochází v místech, kde jsou stěny nejtlustší. Díky této analýze lze určit poměr velikosti navržené dutiny a finálního výrobku. Nastavením dotlaku lze míru smrštění výrazně ovlivnit.



Obr. 60 Objemové smrštění při vyhození

8.5 Vstřikovací stroj

Forma je navržena na vstřikovací Mitsubishi 180 MEt III. Základní parametry vstřikovacího stroje jsou uvedeny níže, v tab. 46.



Obr. 61 Vstřikovací stroj Mitsubishi 180 MEt III [57]

Tab. 46 Parametry vstřikovacího stroje [57]

Parametry stroje	
Uzavírací síla	2100 [kN]
Maximální výška formy	500 [mm]
Minimální výška formy	200 [mm]
Vstřikovací objem	69 - 475 [cm ³]
Vstřikovací rychlost	185 - 499 [cm ³ /s]
Vzdálenost mezi vodícími sloupky	560 x 560 [mm]
Celkový elektrický příkon	27 - 43 [kVA]
Průměrná spotřeba energie	4,1 - 5,4 [kWh]

ZÁVĚR

Teoretická část se zabývala tématem rapid prototyping, je zaměřena na popis a srovnání jednotlivých metod a podrobněji se zabývá stereolitografií. Která je v práci dále využita.

V praktické části byl navržen výrobek, pro který byla navržena vstříkovací forma dle rozměrů univerzálního rámu používaného na fakultním pracovišti. Byly navrženy tvarové desky formy, pro uložení tvarových vložek o rozměrech 146x65x39,5 mm, včetně výrobního postupu a jeho simulace v programu NX 12. Návrh tvarových desek neobsahuje temperační a vyhazovací systém, kvůli charakteru navržených SLA tvarových vložek. Temperačního systému není zapotřebí, protože cílem prototypové výroby tvarových vložek není výroba velkých sérií, ale testování vhodné geometrie formy. Vyhazovací systém nebyl zahrnut ze stejných důvodů, navíc se počítá s dalším použitím tvarových desek a jiné výrobky by nejspíše vyžadovali jiné umístění vyhazovačů. Výroba jedné tvarové desky stála 4980 Kč, bez DPH a marže.

Technologií FDM byly vyrobeny prototypové výrobky z ABS a PETG filamentů. Byly použity dva druhy výplní, tedy plná a gyroid. Cena jedné karabiny by se při optimalizované výrobě pro 8 karabin současně pohybovala od 44,60 po 55,23 Kč. Při kusové výrobě by cena vzrostla na 74,60 až 85,23 Kč.

Podle geometrie navrženého výrobku, byly také navrženy tvarové vložky a parametry pro jejich výrobu pomocí technologie SLA, konkrétně na stroji Formlabs Form 2. Použitým materiálem byla pryskyřice Formlabs High Temp V2, kterou výrobce doporučuje i pro výrobu prototypových forem. Cena levé tvarové vložky byla odhadnuta na 3305,91 Kč a cena pravé tvarové vložky na 3139,62 Kč.

V poslední části práce byla provedena analýza v programu Moldflow. V tomto kroku bylo zkoumáno optimální nastavení parametrů a vhodnost tvarových vložek pro výrobu na vstříkovacím stroji Mitsubishi 180 MEt III.

V experimentu, který provedl Ben Redwood pro 3dhubs.com bylo pro výrobu pomocí technologie FDM také využito ABS. Výrobky měli deklarovanou váhu 5 gramů a cena jednoho kusu byla 81 Kč, přičemž bylo využito 20 % výplně. Cena mnou vyrobených výrobků z ABS při 20 % výplni a váze filamentu 10,73 gramů byla 44,60 Kč. Nevíme ovšem jaký byl použit v daném experimentu kalkulační systém a jestli byla zahrnuta marže. Ceny

SLA tvarových vložek byly ovšem o více než polovinu nižší. Proto lze předpokládat, že vložky použité pro tento experiment měly menší rozměry.

Hlavní výhodou tvarových vložek je jednoduchost výroby a aplikace. Cena tvarových vložek je sice poměrně vysoká vzhledem ke konvenční výrobě tvarových desek z nástrojové oceli. Ale dovoluje nám vytvářet složité geometrie, které by byly pomocí konvenčních technologií nevyrobitelné. Navíc jsou technologie aditivní výroby velmi progresivní, neustále probíhá výzkum a výroba nových materiálů, s lepšími vlastnostmi a nižší cenou. Proto má dle mého názoru v oblasti výroby prototypových forem velké uplatnění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BENIAK, Juraj. Systémy Rapid Prototyping. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 9788022742870.
- [2] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing [online]. Munich: Hanser Publishers, 2016 [cit. 2021-03-08]. ISBN 978-1-56990-583-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEGPROF13/additivemanufacturing/additive-manufacturing>
- [3] KILLI, Steinar. Additive Manufacturing: Design, Methods, and Processes [online]. Pan Stanford Publishing Pte., 2017 [cit. 2021-03-08]. ISBN 978-1-315-19658-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAMDMP001/additivemanufacturing/additive-manufacturing>
- [4] Lines on the Side of Print. Simplify3d.com [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/lines-on-the-side-of-print/>
- [5] PHAM, D T a S S DIMOV. Rapid prototyping and rapid tooling—the key enablers for rapid manufacturing. Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science [online]. 217(1), 1-23 [cit. 2021-03-10]. ISSN 00000000. Dostupné z: doi:10.1243/095440603762554578
- [6] PINKERTON, A.J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance. Advances in Laser Materials Processing [online]. Elsevier, 2010, 2010, s. 461-491 [cit. 2021-03-10]. ISBN 9781845694746. Dostupné z: doi:10.1533/9781845699819.6.461
- [7] Injection Mold Tooling Materials: Aluminum vs. Steel. Medium.com [online]. Jaycon systems, 2017 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://medium.com/jaycon-systems/injection-mold-tooling-materials-aluminum-vs-steel-7b5f64ee1112>
- [8] Mold Design and Tooling for Injection Molding. Designworldonline.com [online]. 2013 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/mold-design-tooling-for-injection-molding/>
- [9] MENDIBLE, Gabriel Antonio, Jack A. RULANDER a Stephen P. JOHNSTON. Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding. Rapid

Prototyping Journal [online]. 2017, 23(2), 344-352 [cit. 2021-03-14]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-01-2016-0013

[10] Plastic Material Melt And Mould Temperatures. Plastikcity.co.uk [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.plastikcity.co.uk/useful-stuff/material-melt-mould-temperatures>

[11] High Temp Resin: A Strong And Temperature Resistant Material For Vulcanized Rubber Molding. Formlabs.com [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/materials/jewelry/#high-temp-resin>

[12] Aditivní technologie: Metody Rapid Prototyping [online]. Brno [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf VUT v Brně.

[13] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Li, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications, 3. EDICE.; WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO., 2006. ISBN: 9812778985

[14] Rapid prototyping process selector. Custompartnet.com [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/rapid-process-selector>

[15] BOURNIAS-VAROTSIS, Alkaios. Introduction to SLS 3D printing. 3dhubs.com [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>

[16] Přehled technologií 3D tisku. Dkmp.cz [online]. 2018 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>

[17] THRIMURTHULU, K, Pulak M PANDEY a N VENKATA REDDY. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 2004, 44(6), 585-594 [cit. 2021-03-08]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004

[18] JACOBS, Paul F. a David T. REID. Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers in cooperation with the Computer and Automated Systems Association of SME, c1992. ISBN 0-87-263-425-6.

[19] Stereolithography. Custompartnet [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>

- [20] HOPKINSON, N., R. J. M. HAGUE a P. M. DICKENS. Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age. Chichester, England: John Wiley, c2006. ISBN 0-470-01613-2.
- [21] Formlabs [online]. [cit. 2021-3-12]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/>
- [22] König, W.; Celi, I.; Noken, S. Stereolithography Process Technology. In Proceedings of the 3rd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 1992. ISBN: 0-9519759-2-7
- [23] ZHOU, Jack G., Daniel HERSCOVICI a Calvin C. CHEN. Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 2000, 40(3), 363-379 [cit. 2021-03-07]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(99)00068-1
- [24] WEHEBA, Gamal a Adolfo SANCHEZ-MARSA. Using response surface methodology to optimize the stereolithography process. Rapid Prototyping Journal [online]. 2006, 12(2), 72-77 [cit. 2021-03-07]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540610652401
- [25] BIKAS, H., P. STAVROPOULOS a G. CHRYSSOLOURIS. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2016, 83(1-4), 389-405 [cit. 2021-03-07]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7576-2
- [26] Reeves, P. E.; Cobb, R. C. Surface Roughness Investigation of Stereolithography ACES Components. In Proceedings of the Second National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research, 1997; pp 17–26;
- [27] ARIF, Khalid Mahmood a Tamotsu MURAKAMI. Slant beam rotation UV scanning to eliminate stair-steps in stereolithography fabrications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2009, 41(5-6), 527-537 [cit. 2021-03-07]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-008-1501-x
- [28] Chryssolouris G, Kechagias JD, Kotselis JL, Mourtzis DA, Zannis SG Surface roughness modelling of the Helisys laminated object manufacturing (LOM) Process. 8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham, pp 141–152
- [29] CAMPANELLI, S.L., G. CARDANO, R. GIANNOCCARO, A.D. LUDOVICO a E.L.J. BOHEZ. Statistical analysis of the stereolithographic process to improve the accuracy. Computer-Aided Design [online]. 2007, 39(1), 80-86 [cit. 2021-03-07]. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2006.10.003

- [30] CHO, H.S., W.S. PARK, B.W. CHOI a M.C. LEU. Determining optimal parameters for stereolithography processes via genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2000, 19(1), 18-27 [cit. 2021-03-07]. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/S0278-6125(00)88887-1
- [31] SCHAUB, Diane A., Kou-Rey CHU a Douglas C. MONTGOMERY. Optimizing stereolithography throughput. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 1997, 16(4), 290-303 [cit. 2021-03-07]. ISSN 02786125. Dostupné z: doi:10.1016/S0278-6125(97)89099-1
- [32] CHEN, Calvin C. a Paul A. SULLIVAN. Predicting total build-time and the resultant cure depth of the 3D stereolithography process. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 1996, 2(4), 27-40 [cit. 2021-03-07]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552549610153389
- [33] Kechagias, J.; Anagnostopoulos, V.; Zervos, S.; Chryssolouris, G. Estimation of Build Times in Rapid Prototyping Processes. In *Proceedings of the 6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 1997. https://www.researchgate.net/publication/261870572_Estimation_of_build_times_in_Rapid_Prototyping_processes
- [34] How to accurately price for stereolithography (SLA) 3D printing projects. *3dprintingindustry.com* [online]. 2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/how-to-accurately-price-for-stereolithography-sla-3d-printing-projects-171977/>
- [35] LAN, Hongbo a Yucheng DING. Price quotation methodology for stereolithography parts based on STL model. *Computers & Industrial Engineering* [online]. 2007, 52(2), 241-256 [cit. 2021-03-07]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/j.cie.2006.12.005
- [36] CHOCKALINGAM, K., N. JAWAHAR, U. CHANDRASEKAR a K.N. RAMANATHAN. Establishment of process model for part strength in stereolithography. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2008, 208(1-3), 348-365 [cit. 2021-03-07]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.144
- [37] CHOCKALINGAM, K., N. JAWAHAR a U. CHANDRASEKHAR. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2006, 12(2), 106-113 [cit. 2021-03-07]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540610652456

- [38] QUINTANA, Rolando, Jae-Won CHOI, Karina PUEBLA a Ryan WICKER. Effects of build orientation on tensile strength for stereolithography-manufactured ASTM D-638 type I specimens. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, 46(1-4), 201-215 [cit. 2021-03-07]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-009-2066-z
- [39] VON ÜBEL, Max. 3D printing materials guide. *All3dp.com* [online]. 2020 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>
- [40] LATOUCHE, Maeli. SLA 3D printing materials compared. *3dhubs.com* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: www.3dhubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared/
- [41] COLTON, J.S., J. CRAWFORD, G. PHAM, V. RODET a K.K. WANG. Failure of Rapid Prototype Molds during Injection Molding. *CIRP Annals* [online]. 2001, 50(1), 129-132 [cit. 2021-03-09]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)62087-3
- [42] COLTON, Jonathan S. a Yann LEBAUT. Thermal effects on stereolithography injection mold inserts. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2000, 40(6), 1360-1368 [cit. 2021-03-09]. ISSN 0032-3888. Dostupné z: doi:10.1002/pen.11265
- [43] Soft vs. Hard Tooling for Injection Molding. *3erp.com* [online]. 2020 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.3erp.com/blog/soft-vs-hard-tooling-for-injection-molding/>
- [44] BENIAK, Juraj. Systémy Rapid Prototyping. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [45] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [46] Informace o technologiích 3D tisku. *Easycnc.cz* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- [47] REDWOOD, Ben. 3D printing low-run injection molds. *3dhubs.com* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-low-run-injection-molds/#case-study>
- [48] BROCKOTTER, Robin. 3D printing geometry restrictions. *3dhubs.com* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-geometry-restrictions/#physical-size>

- [49] Basics of 3D Printing Geometry. msd-makerspaces.gitbook.io [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://msd-makerspaces.gitbook.io/the-fablab/3d-printing/introduction/general-file-set-up/basics-of-a-3d-printable-model>
- [50] VAN DEN BROECK, Senne. Guidelines on the design and implementation of stereolithographic 3D printed moulds for low volume injection moulding. Lib.ugent.be [online]. 2017 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:002367439>
- [51] TRAVIN MINI MOULDER TP1. Www.travin.co.uk [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <http://www.travin.co.uk/tp1.html>
- [52] Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Formlabs.com [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#Isotropy>
- [53] SCHMITT, Betina Madeira, Christiano Fraga ZIRBES, Cassiano BONIN, Daniel LOHMANN, Diovani Castoldi LENCINA a Aurélio da Costa Sabino NETTO. A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts. Materials Research [online]. 2017, 20(suppl 2), 883-886 [cit. 2021-04-02]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:10.1590/1980-5373-mr-2016-1039
- [54] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? Svethardware.cz [online]. 21.2.2019 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-4>
- [55] PrusaSlicer. Prusa3d.com [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>
- [56] Vstříkovací formy pro zpracování termoplastů [online]. [cit. 2021-04-11]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>
- [57] MITSUBISHI 180 MET3. Kms-pt.sk [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://kms-pt.sk/vstrekovacie-stroje/elektricke/mitsubishi-180-met3/>
- [58] 3D Printing Price Calculator. Blog.prusaprinters.org [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/3d-printing-price-calculator_38905/
- [59] DMU 50. Https://dmgmori.com [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50/>

[60] DOLEŽEL, Petr. KALKULACE NÁKLADŮ A VÝKONŮ VE FIRMĚ ABNER A.S. [online]. 18.4.2013 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://news.cafin.cz/clanek/kalkulace-nakladu-a-vykonu-ve-firme-abner-as---cast-i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný
3D	Dvojrzměrný
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective laser sintering
DMLS	Direct metal laser sintering
FDM	Fused deposition modeling
CNC	Číslicové řízení počítačem
RP	Rapid prototyping
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
LDPE	Nízkohustotní Polyethylen
PETG	Polyethylentereftalát s přídavkem glykolu
UV	Ultrafialové (záření)
Ra	Povrchová drsnost.
PLC	Programovatelný logický kontroler
CAD	Počítačem podporované navrhování
CAM	Počítačem řízená výroba

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Proces aditivní výroby [1]	12
Obr. 2 Schodový krok [4]	13
Obr. 3 Schodový krok [17]	14
Obr. 4 Kartézská a DELTA struktura zařízení [53].....	17
Obr. 5 Kování motoru [47]	18
Obr. 6 Rám oka kamery [50]	22
Obr. 7 Travin TP1 [51]	24
Obr. 8 Kroky při využití stereolitografie [18].....	26
Obr. 9 Schéma zařízení stereolitografické tiskárny [19]	27
Obr. 10 Formlabs form 3B [21]	28
Obr. 11 Příklad výpočtu povrchové drsnosti 1. [25].....	30
Obr. 12 Příklad výpočtu povrchové drsnosti 2.[26].....	30
Obr. 13 Schéma SBR skenování [27]	31
Obr. 14 Detail porovnání výrobků pro různé technologie skenování [27]	31
Obr. 15 Příklad „měkké formy“ [43]	37
Obr. 16 Model výrobku	43
Obr. 17 Vhodnost umístění vtoku.....	44
Obr. 18 Pravá tvarová vložka	45
Obr. 19 Levá tvarová vložka.....	45
Obr. 20 Vtokový systém	46
Obr. 21 Detail odvodušňovacího kanálu	47
Obr. 22 Zatížení Von Mises pro levou tvarovou vložku	49
Obr. 23 Levá tvarová deska	49
Obr. 24 Pravá tvarová deska	50
Obr. 25 Zadní pohled na levou tvarovou desku.....	50
Obr. 26 Rám vstřikovací formy	51
Obr. 27 Pohled na levou stranu formy	52
Obr. 28 Pohled na pravou stranu formy.....	52
Obr. 29 Obráběcí centrum DMU 50 3rd Generation [59]	53
Obr. 30 Příklad vymodelovaného nástroje – fréza D32.....	55
Obr. 31 Dráha nástroje pro zarovnání při prvním upnutí	56
Obr. 32 Dráhy nástrojů pro výrobu kapes pro tvarové vložky	57
Obr. 33 Detail dráhy nástroje při dokončení vtokového kanálu	59
Obr. 34 Analýza pravé tvarové desky.....	61

Obr. 35 Analýza pravé tvarové desky – zadní pohled	61
Obr. 36 Detail přesnosti vtokového kanálu	62
Obr. 37 Analýza levé tvarové desky	62
Obr. 38 Analýza levé tvarové desky – zadní pohled	62
Obr. 39 Prusa I3 MK3S+	64
Obr. 40 Pohled na vrstvu navrženého prototypu a navržené podpěry	65
Obr. 41 Detail výplně gyroid	66
Obr. 42 Podložka s práškovým povrchem	66
Obr. 43 Karabiny vyrobené pomocí technologie FDM	67
Obr. 44 Karabina vyrobená FDM technologií	67
Obr. 45 Formlabs Form 2 a příslušenství [21]	71
Obr. 46 Vygenerované podpěry	72
Obr. 47 Pravá tvarová vložka na tiskové platformě	73
Obr. 48 Formlabs Form Wash 5 [21]	74
Obr. 49 Formlabs Form Cure [21]	74
Obr. 50 Vysíťovaný výrobek	81
Obr. 51 Statistika sítě	82
Obr. 52 Analýza plnicího času	84
Obr. 53 Analýza vstřikovací rychlosti	84
Obr. 54 Analýza uzavírací síly	85
Obr. 55 Analýza průběhu vstřikovacího tlaku	85
Obr. 56 Tlak v bodě přepnutí	86
Obr. 57 Studené spoje	87
Obr. 58 Teplota vstřikovaného materiálu	87
Obr. 59 Vzduchové kapsy	88
Obr. 60 Objemové smrštění při vyhození	89
Obr. 61 Vstřikovací stroj Mitsubishi 180 MEt III [57]	89

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Náklady [47]	19
Tab. 2 Srovnání parametrů aditivních technologií [14]	20
Tab. 3 Aplikace aditivních technologií [14]	21
Tab. 4 Výsledky experimentu [50]	23
Tab. 5 Geometrické tolerance tvarových vložek [50]	24
Tab. 6 Přehled materiálu pro vstřikování [10]	25
Tab. 7 Procesní parametry stereolitografické tiskárny [22]	29
Tab. 8 Srovnání mechanických vlastností různých druhů fotosenzitivních pryskyřic [40]	36
Tab. 9 Materiálové vlastnosti Formlabs High Temp V2	48
Tab. 10 – Parametry DMU 50 [59]	54
Tab. 11 Parametry frézy SECO R217.21-1632.RE-LP09.3A	55
Tab. 12 Řezné parametry pro obrábění horní stěny	55
Tab. 13 – Řezné parametry pro obrábění bočních stěn	56
Tab. 14 – Parametry nástrojů pro obrábění kapes na tvarové vložky	56
Tab. 15 Procesní parametry pro obrábění kapes na tvarové vložky	57
Tab. 16 Parametry použitých vrtáků	57
Tab. 17 Seznam vrtacích operací pro obě desky	58
Tab. 18 Procesní parametry vrtacích operací	58
Tab. 19 Parametry frézy na sražení hran	58
Tab. 20 Parametry kulové frézy	59
Tab. 21 Výrobní časy pro pravou tvarovou desku	60
Tab. 22 Výrobní časy pro levou tvarovou desku	60
Tab. 23 Parametry Prusa I3 MK3S+	65
Tab. 24 Parametry tisku FDM prototypů	66
Tab. 25 Proměnné při výpočtu ceny FDM tisku	68
Tab. 26 Materiálové náklady při FDM tisku	68
Tab. 27 Energetické náklady při FDM tisku	69
Tab. 28 Náklady na práci spojenou s FDM tiskem	69
Tab. 29 Výrobní režie FDM tiskárny	69
Tab. 30 Výsledné náklady FDM tisku	70
Tab. 31 Parametry Formlabs Form 2	71
Tab. 32 Nastavení generátoru podpěr	72
Tab. 33 Srovnání výrobních parametrů pro různé tloušťky vrstvy	73
Tab. 34 Materiálové náklady SLA tisku	75

Tab. 35 Energetické náklady SLA tisku	75
Tab. 36 Pracovní náklady SLA tisku	76
Tab. 37 Výrobní režie SLA tisku	76
Tab. 38 Náklady na výměnu kádě na pryskyřici	77
Tab. 39 Náklady na omytí od přebytečné pryskyřice	77
Tab. 40 Náklady na vytvrzení tvarových vložek	78
Tab. 41 Výsledné náklady tisku SLA tvarových vložek	78
Tab. 42 Rozměry tvarových vložek v ose X.....	79
Tab. 43 Rozměry tvarových vložek v ose Y.....	79
Tab. 44 Rozměry tvarových vložek v ose Z	80
Tab. 45 Vstříkovaný materiál	83
Tab. 46 Parametry vstříkovacího stroje [57]	90

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: Materiálový list pro Formlabs HighTemp V2

PŘÍLOHA P II: Výrobní dokumentace tvarových desek

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PRO FORMLABS HIGHTEMP V2

MATERIAL DATA SHEET

High Temp

High Temp Resin for Heat Resistance

\$199 / L

High Temp Resin offers a heat deflection temperature (HDT) of 238 °C @ 0.45 MPa, the highest among Formlabs resins. Use it to print detailed, precise prototypes with high temperature resistance.

Hot air, gas, and fluid flow

Molds and inserts

Heat resistant mounts, housings, and fixtures



FLHTAM02

formlabs 

Prepared 09 . 15 . 2016
Rev 02 12 . 05 . 2018

To the best of our knowledge the information contained herein is accurate. However, Formlabs, Inc. makes no warranty, expressed or implied, regarding the accuracy of these results to be obtained from the use thereof.

Material Properties Data Metric

	METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴	
Thermal Properties				
Heat Deflection Temp. @ 18 MPa	43.6 °C	99.2 °C	101 °C	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	49.3 °C	142 °C	238 °C	ASTM D 648-16

	METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ⁵	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁶	
Mechanical Properties				
Ultimate Tensile Strength	20.9 MPa	58.3 MPa	51.1 MPa	ASTM D 638-14
Elongation at break	14 %	3.3 %	2.4 %	ASTM D 638-14
Tensile modulus	0.75 GPa	2.75 GPa	2.9 GPa	ASTM D 638-14
Flexural strength at break	24.1 MPa	94.5 MPa	93.8 MPa	ASTM D 790-15
Flexural modulus	0.69 GPa	2.62 GPa	2.62 GPa	ASTM D 790-15
Impact Properties				
Notched IZOD	32.8 J/m	18.2 J/m	24.2 J/m	ASTM D 256-10
Thermal Properties				
Thermal Expansion (0-150 °C)	118.1 (µm/m°C)	79.6 (µm/m°C)	74 (µm/m°C)	ASTM E 831-13

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

⁵ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁶ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 90 minutes

Material Properties Data Imperial

	IMPERIAL ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴	
Thermal Properties				
Heat Deflection Temp. @ 18 MPa	110.48 °F	210.56 °F	213.8 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	120.74 °F	287.6 °F	460.4 °F	ASTM D 648-16

	IMPERIAL ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ⁵	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁶	
Mechanical Properties				
Ultimate Tensile Strength	3031 psi	8456 psi	7411 psi	ASTM D 638-14
Elongation at break	14 %	3.3 %	2.4 %	ASTM D 638-14
Tensile modulus	109 ksi	399 ksi	421 ksi	ASTM D 638-14
Flexural strength at break	3495 psi	13706 psi	13605 psi	ASTM D 790-15
Flexural modulus	100 ksi	400 ksi	400 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties				
Notched IZOD	0.61 ft-lbf/in	0.34 ft-lbf/in	0.45 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Thermal Properties				
Thermal Expansion (0-150 °C)	65.6 µin/in/°F	44.2 µin/in/°F	41.1 µin/in/°F	41.1 µin/in/°F

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

⁵ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁶ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 90 minutes.

Solvent Compatibility

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain (%)	24 hr size gain (%)	Solvent	24 hr weight gain (%)	24 hr size gain (%)
Acetic Acid, 5 %	<1	<1	Hydrogen peroxide (3%)	<1	<1
Acetone	<1	<1	Isooctane (aka gasoline)	<1	<1
Isopropyl Alcohol	<1	<1	Mineral oil (light)	<1	<1
Bleach ~5% NaOCl	<1	<1	Mineral oil (Heavy)	<1	<1
Butyl Acetate	<1	<1	Salt Water (3.5% NaCl)	<1	<1
Diesel Fuel	<1	<1	Sodium Hydroxide solution	<1	<1
Diethyl glycol Monomethyl Ether	<1	<1	Water	<1	<1
Hydraulic Oil	<1	<1	Xylene	<1	<1
Skydrol 5	<1	<1	Strong Acid (HCl conc)	1.2	<1