

Využití aditivních technologií při návrhu vstřikovacích forem

Bc. František Koller

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. František Koller
Osobní číslo:	T19531
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce technologických zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Využití aditivních technologií při návrhu vstřikovacích forem

Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši na dané téma.
2. Navrhněte vhodnou testovací geometrii.
3. Tvarové dutiny vytiskněte pomocí vybraných technologií a materiálů.
4. Samotné testování pomocí vstřikování termoplastu, zhodnocení experimentu.

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Munich: Hanser Publishers, [2016], xx, 591 s. ISBN 9781569905821.

CHEN, Shia-Chung a Lih-Sheng TURNG, ed. Advanced injection molding technologies. Munich: Hanser Publishers, [2019], xv, 426 s. Progress in polymer processing (PPP) series. ISBN 9781569906033.

KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, [2018], xx, 491 s. ISBN 9781569906453.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Huba, 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 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 diplomovou 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

Tato diplomová práce je zaměřena na možnosti využití aditivních technologií při návrhu vstřikovacích forem. Obsahuje dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části je rozebrána podstata aditivních technologií, historie, materiály a použití. Dále jsou popsány jednotlivé metody a výroba vstřikovacích forem pomocí 3D tisku. Praktická část se zabývá návrhem testovací geometrie a následnou výrobou aditivními technologiemi. Navržená a vytištěná testovací geometrie je potom použita na technologii vstřikování.

Klíčová slova: Rapid Prototyping, Technologie vstřikování, 3D tisk, Selective Laser Sintering, Stereolitografie, Polyjet

ABSTRACT

This master's thesis is focused on the possibilities of using additive technologies in the design of injection molds. It contains two parts - theoretical and practical. The theoretical part discusses the essence of additive technologies, history, materials and uses. Further, there are described individual methods and production of injection molds using 3D printing. The practical part deals with the design of test geometry and followed production by additive technologies. Then the designed and printed test geometry is applied to the injection molding technology.

Keywords: Rapid prototyping, Injection moulding, 3D print, Selective Laser Sintering, Stereolithography, Polyjet

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jakubu Hubovi Ph.D. za jeho volný čas, cenné připomínky, odborné rady, ochotu a pomoc, při psaní této práce. Dále musím poděkovat Ing. Vojtěchu Šenkeříkovi Ph.D. za poskytnutí cenných informací a poznatků týkajících se aditivních technologií. Velký dík také patří mojí rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POJEM ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	12
2 POPIS TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	13
2.1 HISTORIE	14
2.2 POSTUP.....	16
3 METODY	19
3.1 SLA (STEREOLITOGRAFIE).....	19
3.2 SGC(SOLID GROUND CURING) – VYTVRZOVÁNÍ NA PEVNÉM POVRCHU	22
3.3 SLS (SELECTIV LASER SINTERING) – SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SPÉKÁNÍ	24
3.4 FDM (FUSED DEPOSITION MODELING).....	26
3.5 LOM (LAMINATED OBJECT MANUFACTURING)	28
4 MATERIÁLY VYUŽÍVANÉ PRO 3D TISK	30
5 TRENDY A VÝVOJ 3D TISKU	31
5.1 VÍCEBAREVNÝ TISK.....	32
5.2 3D TISK KOVŮ	32
5.3 3D TISK ORGÁNŮ	33
5.4 VÍCEMATERIÁLOVÝ TISK.....	34
6 UPLATNĚNÍ 3D TISKU V PRAXI	36
7 VYUŽITÍ 3D TISKU PŘI VÝROBĚ VSTŘIKOVACÍCH FOREM	37
7.1 POROVNÁNÍ 3D TISKU A VSTŘIKOVÁNÍ	37
7.2 VÝROBA VSTŘIKOVACÍCH FOREM POMOCÍ 3D TISKU.....	39
7.2.1 Proces a postup.....	39
7.2.2 Materiály	40
7.2.3 Používané metody	40
7.2.4 Výhody a nevýhody	41
8 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ	43
8.1 ZKOUŠKA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TAHEM	43
8.1.1 Studený spoj	44
II PRAKTICKÁ ČÁST	45
9 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
10 POUŽITÝ SOFTWARE	47
10.1 AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2021	47
10.2 PREFORMFORMLABS.....	47

10.3	SINTERIT STUDIO 2019.....	48
10.4	SIEMENS NX	48
11	NÁVRH TESTOVACÍ GEOMETRIE TVAROVÝCH VLOŽEK	49
11.1	NÁVRH PRVNÍ TESTOVACÍ GEOMETRIE TVAROVÉ VLOŽKY	49
11.2	NÁVRH DRUHÉ TESTOVACÍ GEOMETRIE.....	53
11.3	PŘEHLED NAVRŽENÝCH TĚLES	54
12	POUŽITÉ MATERIÁLY TVAROVÝCH VLOŽEK.....	56
12.1	MATERIÁL TVAROVÝCH VLOŽEK PRO TECHNOLOGII SLA	56
12.1.1	Vysokoteplotní pryskyřice (HIGH TEMP RISIN)	56
12.1.2	Technická data	57
12.1.3	Standardní pryskyřice – černá (STD Black)	58
12.2	MATERIÁL TVAROVÝCH VLOŽEK PRO TECHNOLOGII SLS.....	58
12.2.1	Polyamid PA12 Smooth v1	58
12.3	MATERIÁL TVAROVÝCH VLOŽEK PRO TECHNOLOGII POLYJET.....	60
13	3D TISK TVAROVÝCH VLOŽEK	61
13.1	TISK TECHNOLOGIÍ SLA.....	61
13.1.1	Zařízení pro výrobu.....	62
13.1.2	Proces	63
13.2	TISK TECHNOLOGIÍ SLS	65
13.2.1	Zařízení pro výrobu.....	65
13.2.2	Proces	66
13.3.1	Zařízení pro výrobu.....	67
14	VÝROBA TVAROVÉ VLOŽKY NA CNC STROJI	68
14.1	PROCES	68
14.1.1	Hrubování spodní části.....	68
14.1.2	Zbytkové obrábění	69
14.1.3	Hrubování vrchní části	69
14.1.4	Zbytkové obrábění vrchní části.....	70
14.1.5	Frézování dutiny.....	70
14.1.6	Vrtání děr	71
14.2	POUŽITÝ MATERIÁL.....	72
14.3	POUŽITÉ NÁSTROJE.....	73
14.4	ČAS JEDNOTLIVÝCH OPERACÍ	73
14.5	ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU.....	74
15	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK TECHNOLOGIÍ VSTŘIKOVÁNÍ	76
15.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	76
15.2	PROCES	77
15.2.1	Výsledný produkt.....	79

16.1.1 Použité zařízení	80
17 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	83
ZÁVĚR	84
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	85
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	90
SEZNAM OBRÁZKŮ	92
SEZNAM TABULEK.....	95
SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

Aditivní technologie neboli 3D tisk se s postupem času stal velice populární a produktivní technologií. V současné době se mnoho 3D tiskáren stalo snadno dostupnými pro běžné (hobby) tiskaře. Podstatou 3D tisku je vytvoření 3D modelu v libovolném CAD softwaru. Z tohoto faktu plyne, že pokud chce daný uživatel vyhotovit určitý 3D produkt, musí se naučit ovládat příslušný 3D software. Je třeba počítat s tím, že některé složité modely se nepovedou na poprvé ihned vytisknout. Existuje nespočet modelů, které lze jen velmi obtížně tisknout. V ojedinělých případech se můžeme setkat s modely, které bohužel vytisknout vůbec nepůjdou. Samotný 3D tisk nalézá své hlavní uplatnění především v oblasti kusové výroby. Významnou roli hraje také v malosériové a prototypové výrobě za účelem ověření smontovatelnosti dílu, jeho designu a funkčnosti.

Technologie vstřikování je oproti 3D tisku proces, který je vhodný pro sériovou výrobu a to z důvodu vyšších nákladů na vstřikovací stroje a formy.

Cílem diplomové práce je navrhnutí vlastní testovací geometrie ve formě tvarových vložek. Tyto navržené tvarové vložky budou vytisknuty metodami 3D tisku, konkrétně se jedná o metody SLA, SLS a Polyjet. Následně se tyto vyrobené tvarové vložky využijí k technologii vstřikování, kterou se vyhotoví zkušební tělíska.

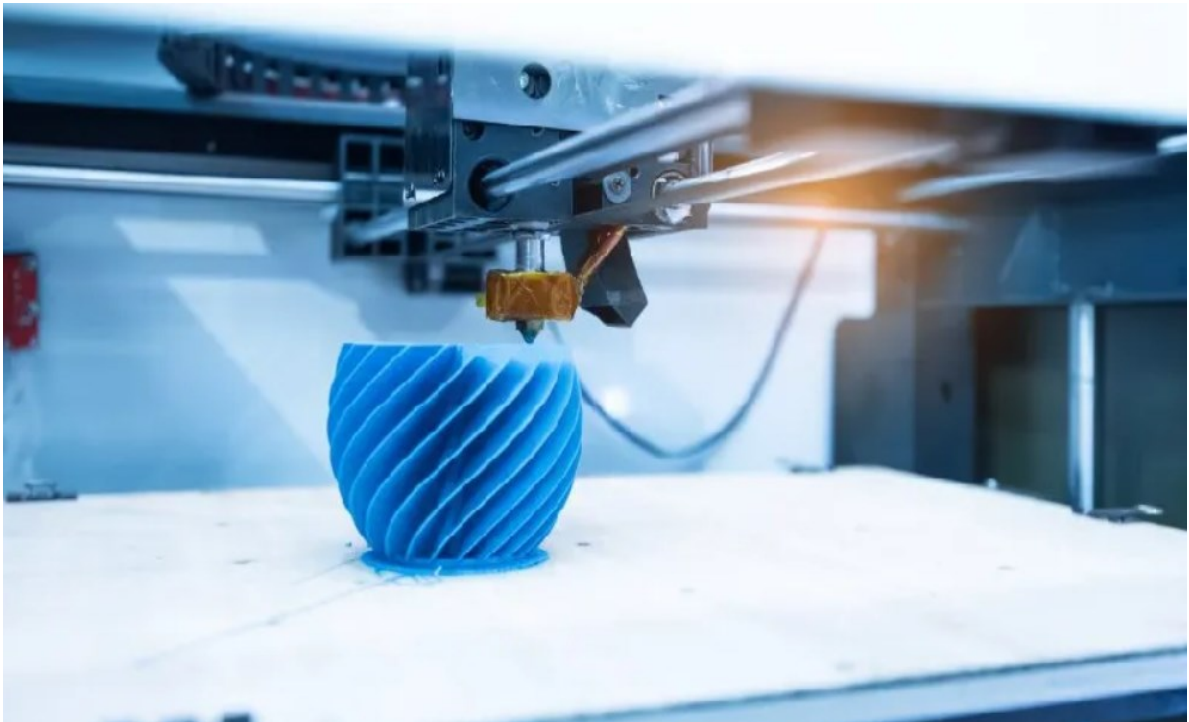
Teoretická část diplomové práce pojednává o významu a principu 3D tisku. Je zde popsán samotný postup a historie vzniku této technologie. Hlavním obsahem teoretické části je rozebrání a vysvětlení jednotlivých metod. Dále se dozvíme, kde se 3D tisk používá, jaké jsou nejvhodnější materiály a v neposlední řadě srovnání 3D tisku s technologií vstřikování.

V praktické části diplomové práce je nejprve řešeno vlastní navrhnutí testovací geometrie. Potom se seznamujeme s průběhem 3D tisku daných geometrií. Po této operaci je navrhnuté řešení použito k procesu vstřikování. Nakonec je zrealizováno mechanické testování vyrobených vzorků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POJEM ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologií se rozumí proces vytvoření součásti postupným kladením jednotlivých vrstev na sebe. Tento proces zhotovuje 3D součást dle navrhnutého 3D modelu. Pojem aditivní technologie je vlastně synonymum pro 3D tisk a rovněž se jedná o označení všech možných způsobů 3D tisku. Na rozdíl od konvenčních obráběcích metod při těchto procesech nedochází k úběru materiálu.



Obr. 1. Výroba součásti aditivní technologií (3D tiskem)[1]

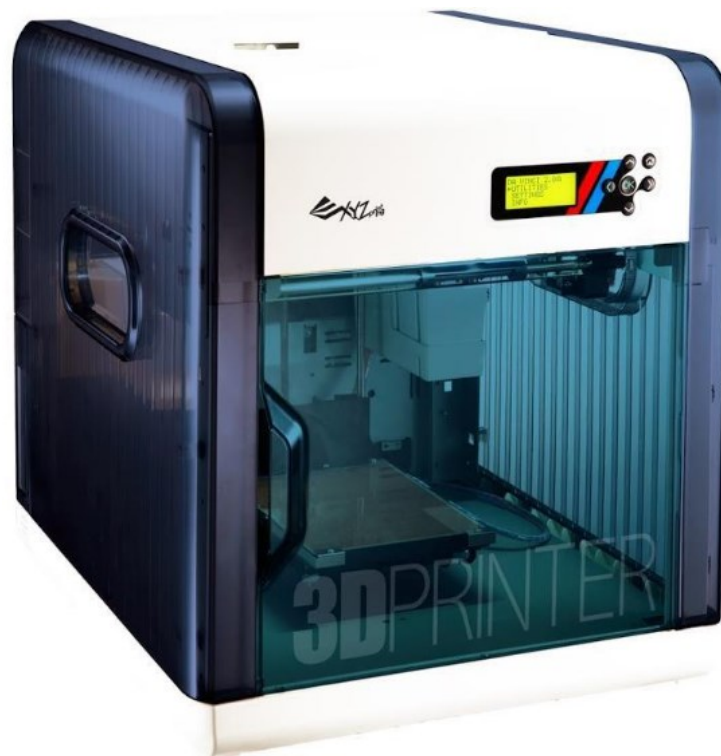
Hlavní výhodou aditivních technologií v porovnání s klasickým obráběním je možnost vytvoření složitých tvarů, které se běžnými metodami nedají vyrobit. Používá se pro různé typy kovů, plastů nebo kompozitů apod. V současné době se s využitím aditivních technologií můžeme setkat v řadě průmyslových odvětvích. Uplatňuje se především pro sériovou výrobu nebo pro vyhotovení funkčních prototypů v malé sériové výrobě.

Pod pojem aditivní technologie spadají kromě 3D tisku také procesy odlévání, spékání, nebo výroba součástí práškovou metalurgií[1].

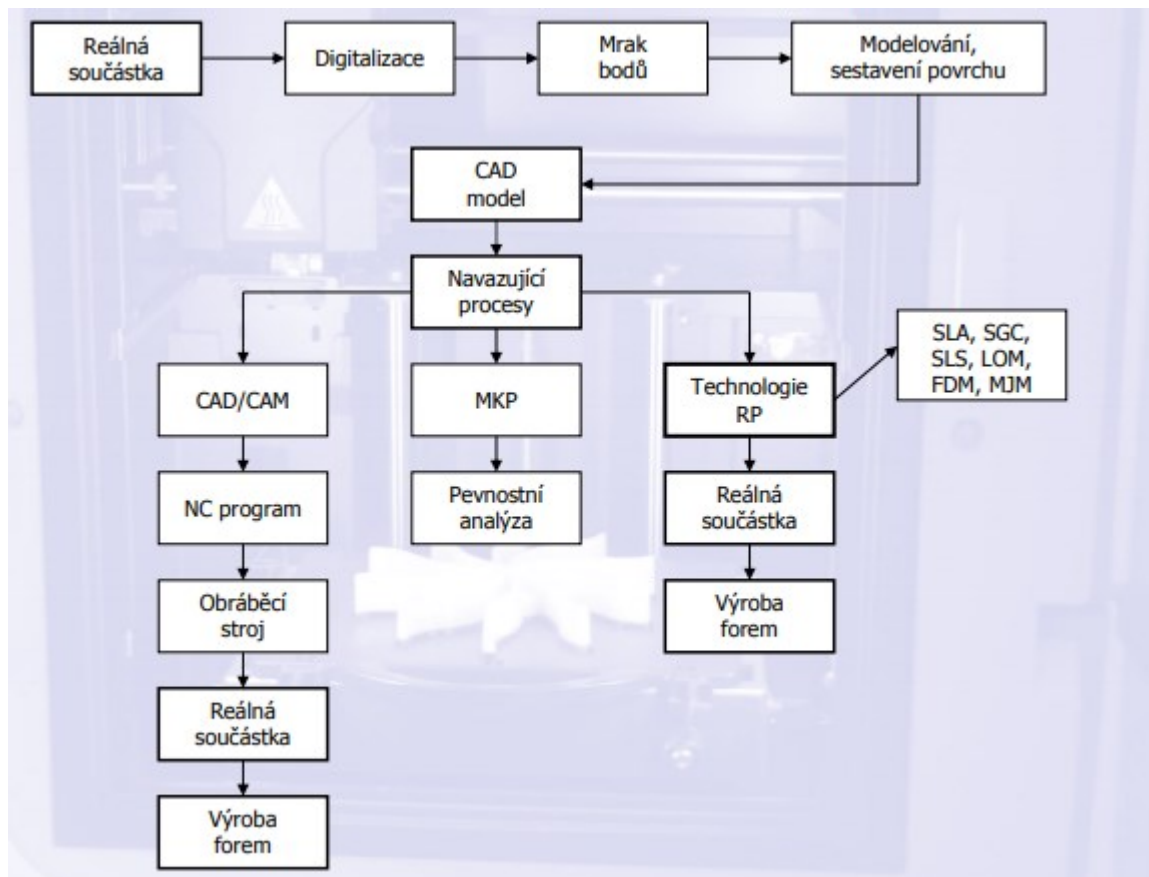
2 POPIS TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Rapid prototyping (RP) je jednou z nejpokročilejších výrobních technik, spadající do aditivních technologií. Jsou to technologie, které využívají počítačových dat. Na jejich základě je potom možno vytvořit model. Postupným nanášením jednotlivých vrstev vznikne fyzický model. Na zvolené metodě 3D tisku je závislá požadovaná tloušťka nanášených vrstev. Ta rovněž záleží na použité 3D tiskárně a také na stavebním materiálu. Samotná tloušťka vrstvy se pohybuje v řádu setin. V současné době je tato výrobní technologie velmi produktivní. Mezi hlavní přednosti patří zejména krátké výrobní procesy. Uplatňuje se jako alternativní metoda při výrobě různých typů součástí. Své zastoupení má především v inženýrských aplikacích, ale také v lékařském průmyslu. V porovnání s běžným výrobním procesem (vstřikování, vytlačování....) má ovšem horší rozměrovou přesnost, pevnost a také jakost povrchu [1].

RP zahrnuje skupinu technologií a metod pro výrobu dílů, na kterou jsou kladeny časové nároky. Vyrobene díly se velmi podobají konečnému tvaru výrobku (někdy ho mohou dokonce i nahradit) a mají dobré mechanické vlastnosti [2].



Obr. 2. Model 3D tiskárny [3].



Obr. 3. Vývoj a proces vzniku reálné součásti [4]

2.1 Historie

3D tisk se dá stále považovat za velmi mladou technologii. S objevením prvních počítačů tato technologie začala pozvolna nastupovat a pronikat do řady odvětví. Počítače totiž dokázaly vyvinout stroje. V důsledku jejich schopnosti se potom dají vymyslet a navrhnout různé typy 3D součástí a to za minimální přítomnosti člověka. Za hlavního objevitele 3D tisku je považován Charles Hull. Tomu se na počátku roku 1984 podařilo zjistit fakt, že za přítomnosti použití UV záření, které působí na tekutý polymer, začne tento polymer tuhnut a poté dojde k vytvoření pevné a zároveň tenké vrstvy stavebního materiálu. Po tomto úspěšném zjištění se rozhodl založit firmu, která nese název 3D Systems. V této firmě se následně začaly vyrábět základní modely 3D tiskáren (viz obr.4)[5].



Obr. 4. Model první 3D tiskárny typu SLA – 1, zhotovená firmou 3D Systems [5]

To vše započalo novou éru 3D tisku. Začala stále více prohlubovat globální trh. 3D tisk si od svého startu musel projít celou řadou jednotlivých vývojových etap. Dá se říct, že vývojem v podstatě neustále prochází a své místo nachází v různých oblastech průmyslu.

V současnosti je velmi náročné říct, do jakých výšin se 3D tisk bude schopen dopracovat. Zcela jistě se dá předpokládat, že objeví nové způsoby a zařízení pro výrobu 3D tisku. Tyto záležitosti s velkou pravděpodobností budou navazovat na nynější technologie případně je i do značné míry mohou nahradit.

Technologie Rapid Prototyping začala do výroby pronikat rovněž koncem 80.let. Díky ní se postupně změnila podstata vývoje nástrojů a produktů. S prosperující ekonomickou situací se mohly zavádět a vytvářet levné a rychlé modely pro nové návrhy. V posledních letech se začaly objevovat nové technologie. Například způsob „rychlé prototypování“, označovaný jako *freeformfabrication*(SFF) nebo tzv. *vrstvená výroba* (LM), která se zabývá výrobou 3D prototypů po vrstvách. Všechny procesy RP jsou založeny na podobných operacích. Nejprve se jedná o zpracování dat a následný návrh 3D modelu. Potom se vytvoří pomocí PC 3D model na jednotlivé vrstvy, které jsou nezbytné pro následující výrobu. Velmi často se také využívá vytvoření 3D objektu pomocí 3D skenování [6].

2.2 Postup

Proces 3D tisku je založen na spojování vrstev materiálu. Nejčastěji to bývá lepení, tavení apod. Za přítomnosti CAD modelu je zkonstruován tvar určeného dílu. Model se skládá z velmi tenkých vrstev a obsahuje 3D data (obvykle se jedná o formát *stl*), která jsou potřebná pro samotný 3D tisk. V porovnání s technologií obrábění nevzniká u 3D tisku odpad. V důsledku tohoto postupu má technologie 3D tisku nižší výrobní náklady než obrábění.

Velký benefit 3D tisku je ten, že rozměry produktů, jsou ovlivněny velikostí pracovního prostoru použitého stroje. Využití produktu je závislé na druhu materiálu. Má totiž značný vliv na jeho vlastnosti. Proto je důležité si před samotnou výrobou důkladně a pečlivě promyslet výběr dané metody.

Pomocí kladení jednotlivých vrstev materiálu na sebe se dají zhotovit obtížné výrobky různých tvarů za poměrně krátkou dobu, které by se jen náročně vyráběly jinými způsoby. U výrobků se složitou konstrukcí se v některých případech užívá podpůrného materiálu. Ten plní funkci tzv. „lešení“, což znamená podpěru (výztuhu) funkčních částí produktu při samotném procesu 3D tisku. Nedílnou součástí je odvod tepla. Děje se tak u oblastí, které jsou izolované a ochlazují se velice pomalu. Odstranění podpěr spolu s výrobou ovlivňuje proces výroby. Dochází k prodloužení výrobních časů a také se zvedne cena výroby.

U některých metod nelze podpůrný materiál aplikovat. To má za následek zvýšení produkce odpadu. Proto je výhodná eliminace podpěr. Jedná se například o optimálně zvolenou orientaci připraveného produktu umístěnou v pracovním prostoru stroje. Dále to může být vhodně zvolený návrh podpěry a samonosné konstrukce modelu, která nesmí negativně ovlivnit model. Tato zmiňovaná řešení musí být součástí modelu. Podpěry mohou mít širokou variaci tvarů. Patří sem například stromové struktury a různé sloupky. Ty mohou být lineární, opěrné nebo tenké. Podpůrné prvky se obvykle tvoří CAD softwarem. V případě nutnosti se dají vygenerovat manuálně. Oblasti využití 3D tisku se nejvíce uplatňují zejména v kusové výrobě. V současné době 3D tisk stále více proniká do malosériové výroby a to přednostně do výroby prototypů. Z tohoto důvodu se tato technologie nazývá Rapid Prototyping.

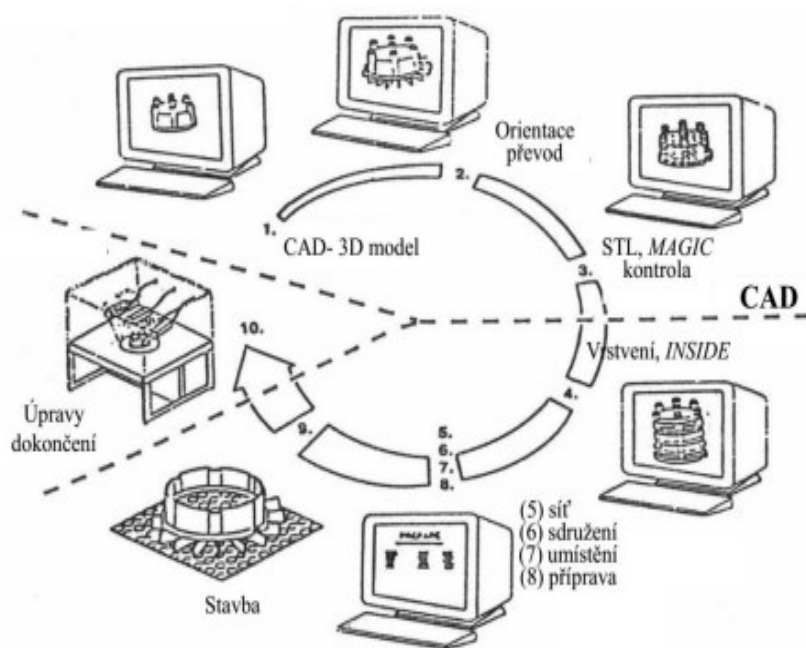
Největší zastoupení má Rapid Prototyping v technickém průmyslu. Z velké části se objevuje především v automobilovém průmyslu, kde nalézá širokou škálu použití. Konkrétně jde o kontrolu prototypu (CAD modelu) a také rychlost výroby, podle kterých

se vyhodnocuje optimalizace spolu s designem navrženého dílu. Spotřební průmysl je dalším odvětvím, kde 3D tisk nachází své opodstatnění. Jedná se o různé předměty, jako jsou hračky či dekorace. S postupem času se technologie 3D tisku dostala do zdravotnictví. Jako hlavní produkty zde nesou své uplatnění například modely implantátů, různých kloubů nebo případně i základy pro vytvoření důležitých tkání apod.

Technologie Rapid Prototyping je tedy prototypová výroba. Mezi její hlavní znaky patří poměrně velká úspora vyráběných prototypů a dílců. Dále pak nízké nároky na cenu a současně na výrobu prototypů. Oproti technologii vstřikování zde není nutnost zavedení složitých výrobních nástrojů (vstřikovací forma). Velkou předností této technologie je vysoká přesnost, flexibilita, efektivita a v neposlední řadě možnost přizpůsobit se požadavkům zákazníka. Při tisknutí produktů nepodléhají pracovní prostory velkým nárokům. 3D tisk ovšem nabízí také řadu nevýhod. Je to spojeno především s vysokými provozními náklady společně s cenou stroje a jeho příslušenstvím[6].

Na obr. 5 je znázorněn samotný postup technologie Rapid Prototyping od návrhu modelu až po finalizaci.

- **Návrh** - CAD data (návrh, digitalizovaný fyzický model)
- **Kontrola** – úplnost a jakost povrchu, orientace, převod do STL formátu
- **Vrstvení** - tvorba řezů, podpůrné konstrukce, orientace
- **Stavba** – nanášení vrstev a tvorba fyzického modelu (FDM,SLS, LOM)
- **Dokončení** – vytvrzení a následná úprava povrchu
- **Navazující operace:** vizuální a optické zhodnocení, testy funkčnosti, montážové testy a rozměrová přesnost [7].



Obr. 5. Postup RP od CAD modelu až po finalizaci [7]

3 METODY

V současné době se můžeme setkat s řadou metod, které mají různá uplatnění pro technickou praxi. Přehled těch nejrozšířenějších je uveden v následující tabulce (tab.1).

Tab. 1. Přehled nejrozšířenějších metod v oblasti Rapid Prototyping [7]

Zkrácený název	Celý název
SLA	Stereolitografie
SGC	Solid GroundCuring
SLS	Selectiv Laser Sintering
FDM	FusedDeposition Modeling
LOM	Laminatedobjectmanufacturing

3.1 SLA (Stereolitografie)

Stereolitografie (SLA) se v současné době stává velmi používanou metodou v oblasti 3D tisku. Díky nízkým nákladům se tato technologie hojně využívá mezi designéry a technickými inženýry. Ve srovnání s ostatními technologiemi (např. FDM) vykazuje vynikající rozměrovou přesnost a také vysokou kvalitu vyrobených dílů.

V dřívějších dobách se ovšem metoda SLA nemohla srovnat s metodou FDM a to hlavně kvůli špatné dostupnosti, nízké životnosti a ceně pryskyřice. Do nynější doby už se ale situace stabilizovala a na trhu se nacházejí různé druhy pryskyřic pro samotný 3D tisk a podobné aplikace. Tato metoda nese konkurenceschopné náklady pro strojírenské aplikace.

Princip SLA spočívá v kladení postupných vrstev a následné selektivní vytvrzování kapalně fotopolymerizační pryskyřice elektronicky řízeným UV laserovým paprskem. Kapalná pryskyřice je obvykle uložena a skladována v pevné nádrži. Díly se téměř vždy vytváří metodou „*zdola nahoru*“ (vzhůru nohama). Do kapalně (tekuté) pryskyřice se díly namočí a to pouze v řádu jednotek centimetrů. Rychlost a produktivita tohoto procesu závisí na množství pryskyřice. Metoda „*zdola nahoru*“ se v porovnání s opačnou metodou „*shora dolů*“ vyznačuje větší kontrolou nad polymerací. Zmíněná metoda „*shora dolů*“ má totiž kyslík obsažený v atmosféře a je vždy ve styku s vytvrzovanou plochou. Z toho důvodu zde dochází k tzv. fotopolymerizační reakci. Tato reakce má za následek

negativní jev, který se projevuje zanecháním filmu na každé vrstvě nevytvrzené pryskyřice. Skutečnou tloušťku hotového produktu nelze přesně určit. Závisí na teplotě a rychlosti tisku, ale také na viskozitě dané pryskyřice. Pryskyřice, která není vytvrzená, může způsobovat různé rozměrové nestability. Těmto negativním jevům je ovšem velmi obtížné se v technické praxi vyhnout.

U metody „*zdola nahoru*“ dochází k úplnému zvednutí formy po naklazení každé vrstvy. To nese za následek velmi časově náročný proces, při kterém se součást může poškodit.

SLA patří mezi nejstarší metody 3D tisku. Princip spočívá ve vytvoření 3D modelu použitím UV laserového paprsku. Ten se co nejpřesněji zaostří optickou soustavou na povrch roztoku foto – polymerní pryskyřice, která je postupně vytvrzována do jednotlivých 2D vrstev (definováno určitým softwarem). Děje se tak v místě ohniska laserového paprsku. Vytvořené vrstvy mají tloušťku obvykle od 0,05 mm do 0,15 mm. Nanášení probíhá posléze tak, že se o hodnotu tloušťky sníží nosná deska z důvodu opakování celého procesu. Tímto způsobem se docílí ponoření předem vyrobené vrstvy do pryskyřice. Potom dojde k vytvoření další vrstvy. Podstatným prvkem metody stereolitografie je stírací lišta, která má za úkol před započítím nanesení další vrstvy zarovnat nadbytečnou pryskyřici na požadovanou tloušťku. Pokud modely vykazují obtížný tvar a konstrukci, je nutné použít podpěr. Jejich hlavní účel je podpírat vyráběný model. Jakmile se díl vyhotoví, podpěry se odstraní. Nejčastěji to bývá ručním způsobem. Potom model podléhá povrchové úpravě a v UV komoře se následně opracuje dle požadavků. Samotná UV komora slouží k dosažení optimální kvality povrchu a také k tvorbě barevných odstínů[8].

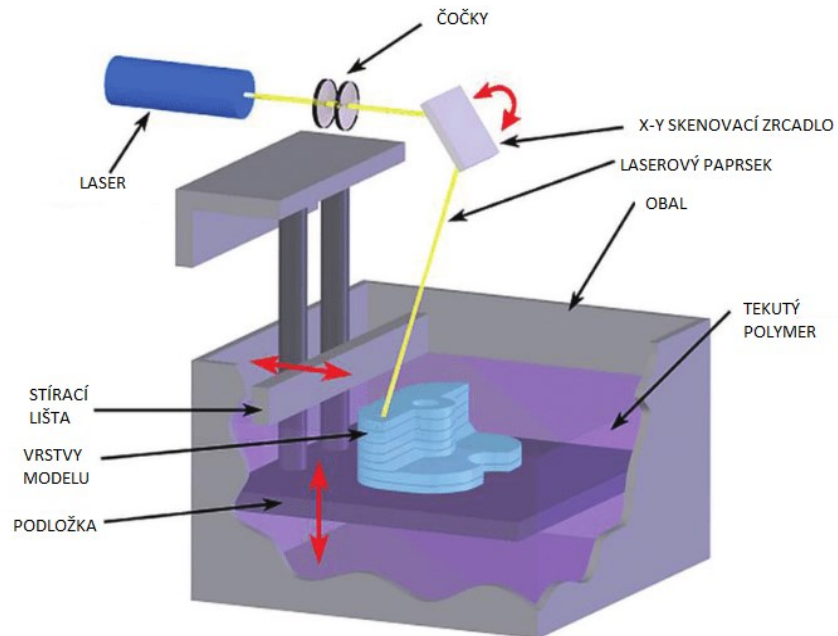
Výhody:

- zhotovení složitých a přesných výrobků
- rychlost výroby
- komplexnost
- možnost výroby vodotěsných dílů
- výborná jakost povrchu

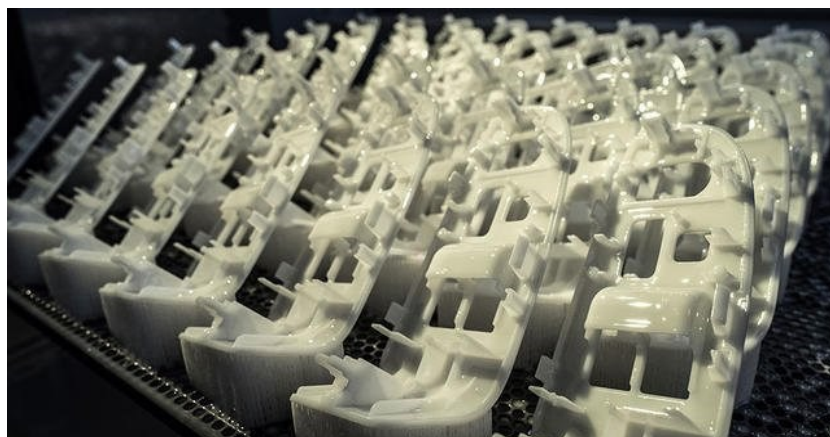
Nevýhody:

- Nízká tepelná odolnost výrobku

- Vysoká pořizovací cena
- Konečné vytvrzování modelu
- Omezený úběr materiálu [8]



Obr. 6. Princip metody SLA [7].



Obr. 7. Typické díly vyrobené pomocí metody SLA [9]

3.2 SGC(Solid GroundCuring) – vytvrzování na pevném povrchu

SGC – (Solid GroundCuring) – vytvrzování na pevném povrchu. Při této technologii se produkt vyrábí postupným přidáváním materiálu. Neprobíhá zde žádné odstraňování nebo deformování materiálu. Tato metoda 3D tisku zlepšuje efektivitu procesů, zejména výrobu vstříkovacích forem.

SGC umožňuje vyrábět několik dílů najednou. Díly mohou mít různou geometrii. Proto se tato metoda využívá především v kusové výrobě.

V samotném procesu výroby se na masce generuje elektrostatické napětí. Na pracovním místě se mezitím rozprostírá tenká vrstva foto – vytvrditelné pryskyřice. V dalším kroku se skleněná deska společně s maskou umístí mezi povrch pracovního prostoru a UV lampu. U této metody se využívá UV lampa místo laserového paprsku. UV lampa má za úkol vyplnit komoru a rovněž zpevnit vrstvu. Zbytková kapalná pryskyřice se setře a poté se model přesune zpět pod UV lampu. Následuje druhá etapa, ve které pryskyřice ztuhne. Vrstvy, které mají volné prostory, se vyplní horkým tekutým voskem. Po zchládnutí vosku se dané vrstvy pryskyřice upraví na požadovanou tloušťku.

Použitá pryskyřice se v procesu výroby SGC dále již nepoužívá. Došlo totiž k jejímu vytvrzení. UV lampa se vystavuje každé vrstvě se stejným časovým rozpětím. V praxi ale záleží na konkrétním rozhodnutí operátora. Doba výroby a spotřeba pryskyřice nejsou závislé na počtu dílů a jejich geometrii. Náklady a čas na výrobu jsou závislé na počtu vyrobených vrstev při samotné výrobě.

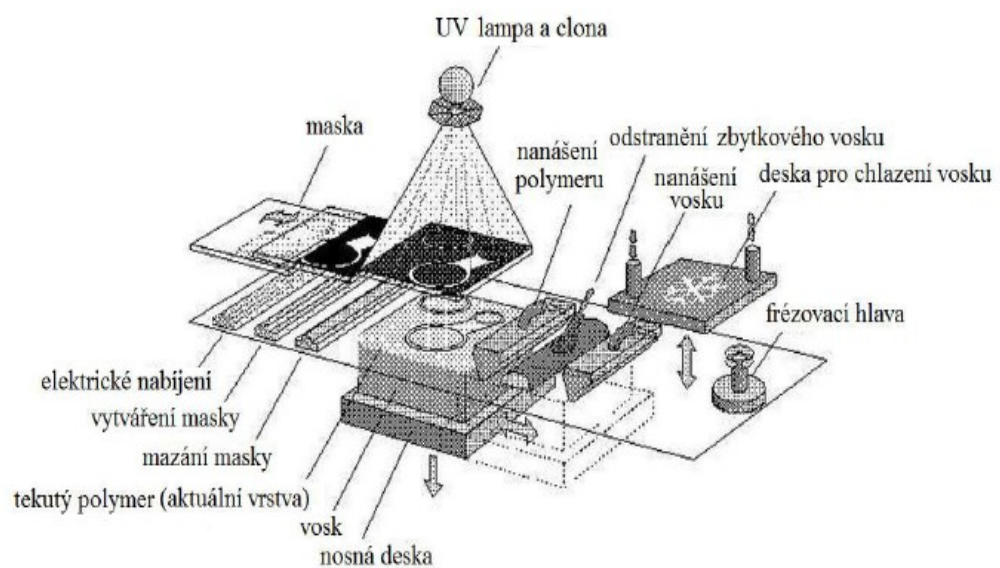
Celkový způsob je podobný předchozí metodě SLA. Hlavní odlišnost je ta, že se celá tenká vrstva foto-polymerní pryskyřice nasvítí na nosnou desku. Ta je usazena pod šablonovou deskou, která je vyrobená ze skla. Na tuto skleněnou desku se poté nanese tzv. toner (speciální barva). Celý pracovní prostor musí být osvětlen UV lampou a to po celý proces vytvrzování. Důležitost šablonové desky spočívá v zabránění UV záření a to tak, aby nedošlo k vytvrzení míst, která nebudou součástí cíleného produktu. Proto šablonová deska zaujímá negativní tvar momentálně vyráběné vrstvy. Přebytečná vrstva nevytvrzené pryskyřice se odstraní po odebrání šablonové desky. Odstranění probíhá obvykle odsáváním. Místo pryskyřice se tak na povrch dostává roztavený výplňový vosk. Ten plní funkci tzv. podpory pro další vrstvu. Než se bude tvořit další vrstva, musí se povrch aktuální vrstvy zarovnat. Jedná se o řády desetin milimetrů. Zbylé voskové podpory se v závěru procesu musí odstranit. Většinou se používá kyselina citrónová. [10], [11].

Výhody:

- Vytvoření celé vrstvy na jednou
- Možnost odfrézování špatně vyrobené vrstvy

Nevýhody:

- Omezený výběr materiálu
- Dlouhé výrobní časy
- Cena UV lampy



Obr. 8. Princip metody SGC [12].



Obr. 9. Typické díly vyrobené pomocí metody SGC [13].

3.3 SLS (Selectiv Laser Sintering) – selektivní laserové spékání

Tato technologie využívá pro vytvoření 3D produktu práškový materiál. Ke spojení práškových částic se používá laser. Nepoužívá se zde rozprašovací roztok. Laser má za úkol „kreslit“ daný vzor na povrch práškového lože, na který musí být přesně směřován. Tímto způsobem se vytvoří první vrstva. Po jejím dokončení válec rozdělí novou vrstvu prášku na předchozí vrstvu. Postupným tvořením jednotlivých vrstev se buduje požadovaný produkt. Tato technologie se vyznačuje rychlou produktivitou. Jedná se o bezrozpouštědlový proces. Díky přítomnosti laseru lze vyrábět velmi složité a přesné dílce. Mezi nejpoužívanější materiály využívající této metody jsou: kovové slitiny, keramika nebo různé typy plastů. SLS se například nehodí pro použití do farmaceutické oblasti. Laser totiž může díky své vysoké energii degradovat lékařské produkty, jestliže jsou použity jako výchozí materiál.

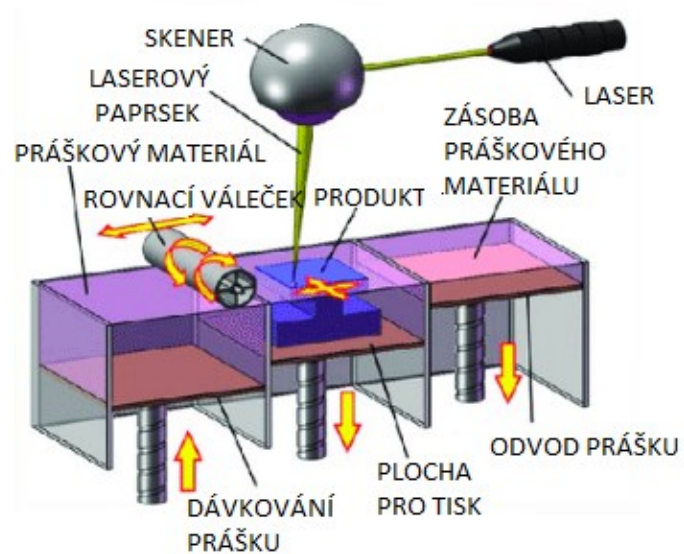
Jak již bylo zmíněno, stavební materiál pro metodu SLS obstarává jemný prášek. Tato metoda nepotřebuje podpurný materiál. Důvod je ten, že se zde hromadí nespečený stavební materiál, který je schopen zastat tuto funkci. Jeho podstata spočívá v tom že, zpevňuje modelovaný díl umístěný v pracovním prostoru a dá se opakovaně použít. Ze zásobníku na podložku se dopravuje stavební materiál. Doprava probíhá v tenké vrstvě. Za přítomnosti laseru se stavební materiál nataví a poté ihned dojde ke spékání v daném místě. Další etapu představuje pohyb podložky, který nastává směrem dolů a to o hodnotu tloušťky další vrstvy (0,1- 0,5 mm). Pomocí válečku se další vrstva prášku potřebného k tisknutí rozprostře. Materiál prášku je v drtivé většině případů plast, keramika, pryž, kov nebo různé speciální písky. Jakmile se proces dostane do konečné fáze je nutno použít dokončovací operace. Nejčastěji to bývá tryskání, broušení, leštění, obrábění popřípadě odstranění nespečeného materiálu [14].

Výhody:

- Pevnost výrobků
- Není potřeba podpěr
- Nízká cena
- Široké spektrum využití různých materiálů

Nevýhody:

- Použití dokončovacích operací
- Nekvalitní povrch
- Náročnost procesu
- Vysoká cena zařízení
- Neschopnost vytvoření uzavřených dutin



Obr. 10. Princip metody SLS [15].



Obr. 11. Typické díly vyrobené pomocí metody SLS [16].

3.4 FDM (FusedDeposition Modeling)

FDM (Fuseddeposition Modeling) je metoda pro výrobu 3D produktů, kdy se vytváří postupné vrstvy za pomoci PC. Tato technologie využívá pro tvorbu modelů jako materiál tiskovou strunu, která prochází tiskovou hlavou, kde je její termoplastický materiál taven do polotekutého stavu a takto je postupně nanášen na stavební podložku. V místech, kde je to potřeba, vytváří 3D tiskárna tzv. podpůrné struktury s vodou rozpustného materiálu. Při této technologii se dá použít velmi široká škála materiálů. Jedná se například o kompozity na keramické bázi, kompozity vyztužené vlákny nebo kovové matrice.

V současnosti metoda FDM patří mezi nejpoužívanější postupy v rámci 3D tisku. Uplatňuje se zejména pro aplikace složitějších prostorových modelů. Princip této metody se zakládá na roztavení tenkého vlákna termoplastu. Potom následuje jeho nanášení na podložku nebo folii, která bývá uložena na vyhřívané základové desce. Na rozdíl od předchozích způsobů zde nefiguruje laser. Touto metodou je vhodné vyrábět modely vykazující přesné a zároveň složité tvary. Dalším znakem je, že nevzniká příliš odpadu a náklady na výrobu jsou velmi nízké. Zařízení je založeno na použití tiskového plotru, který je v porovnání s jinými metodami cenově přívětivější. Z tohoto důvodu tato metoda 3D tisku proniká mezi domácí kutily a stala se v podstatě nejpoužívanější metodou 3D tisku.

Dle stavebního materiálu a na typu 3D tiskárny závisí hodnota tloušťky vyráběných vrstev. Nejčastěji leží v rozmezí od 0,05 po 0,33 mm. Pro dosažení požadovaných mechanických vlastností je zásadní orientace vláken, která na ně mají podstatný vliv. Při procesu u této metody nutně využíváme podpůrný materiál. Nese ovšem jiné vlastnosti než stavební materiál. Hlavní jeho požadavek je ten, aby byl křehký. Po skončení tisku se totiž musí odstranit. Ve většině případů se odstraňuje mechanicky. V některých případech to může být chemicky – rozpuštěním v lázni. Díly zhotovené touto metodou vykazují značnou odolnost vůči vysokým teplotám (až do 190°C). Také se svými parametry podobají finálním produktům[17].

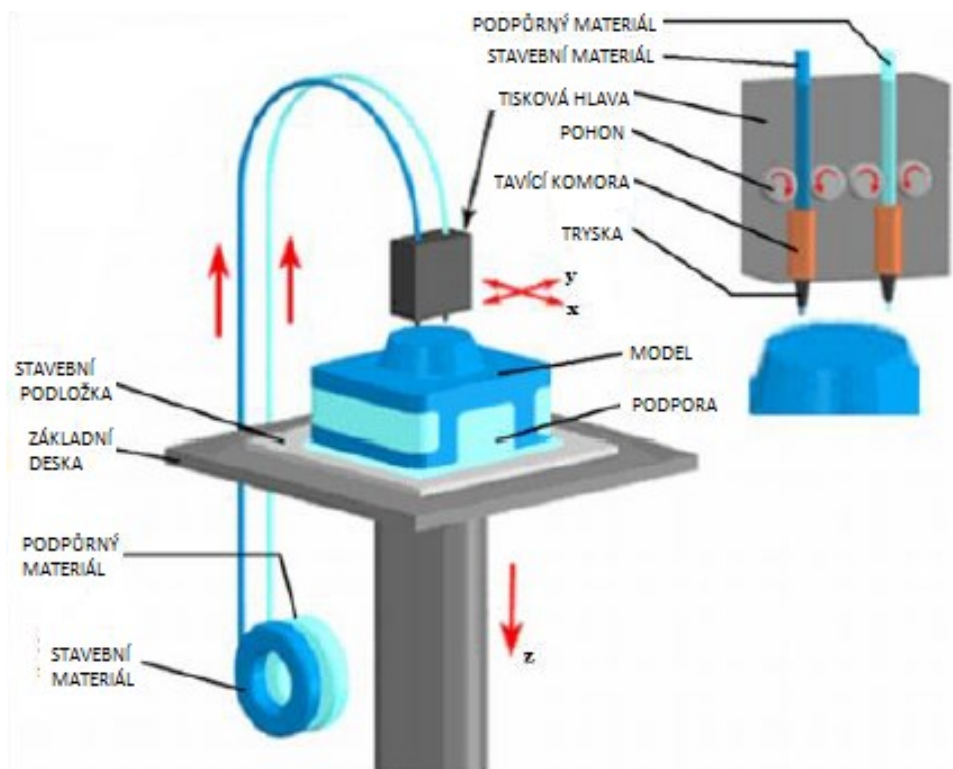
Výhody:

- Minimální odpad
- Levné a dostupné stavební materiály – PC, ABS, PET apod.
- Přesnost produktů
- Pevnost produktů

- Nízká pořizovací cena zařízení
- Jednoduchý způsob výroby
- Odolnost produktů vůči vnějším vlivům

Nevýhody:

- Příliš dlouhé výrobní časy (obvykle několik hodin)
- Závislost přesnosti produktu na použitém stavebním materiálu a průměru trysky



Obr. 12. Princip metody FDM [18].



Obr. 13. Typické díly vyrobené pomocí metody FDM [19].

3.5 LOM (Laminatedobjectmanufacturing)

Tato technologie nachází své uplatnění především pro deskové materiály. Konkrétní aplikace se týká plošné laminace. Princip tkví ve vyříznutí každé vrstvy z plátu materiálu a následnému plošnému přilepení na předchozí vrstvu. Jednotlivé tloušťky vrstev se pohybují v rozmezí od 0,01- 0,2 mm a jsou tvořeny folií. Aby proces fungoval, musí být každá folie opatřena přínavým nátěrem. Ten se nanáší na jednu stranu folie a zajišťuje tím přilepení dalších vrstev materiálu. Dále se folie navíjí přes pracovní prostor. Pomocí válce je poté folie zažehlena. Jako v předchozích metodách tak i u této technologie slouží stavební materiál jako podpurný materiál. Nástroj - vyřezávací nůž nebo laserový paprsek slouží k vyřezání dané kontury. Až je model dokončen, dojde k jeho oddělení z bloku materiálu. Materiál, který zbude, se většinou rozřeže a putuje do odpadu. Tento přebytečný materiál se pro další zpracování již nevyužívá. Jako stavební materiál se nejčastěji využívá papír nebo PVC apod. Stěžejními parametry zmíněných typů stavebních materiálů je jejich spotřeba a cena. Zatímco spotřeba je velice značná, tak cena je naopak nízká. Technologie LOM se nehodí pro výrobu modelů, jejichž konstrukce vykazuje složitou a jemnou geometrii. Dochází zde totiž k závěrečnému oddělování (separaci), které mohou konstrukci modelů porušit. Kladení jednotlivých vrstev, které probíhá v pracovním prostoru, se uskutečňuje v drtivé většině případů vodorovně. Tento způsob se projevuje zlepšením přesnosti výroby ve vodorovném směru [20].

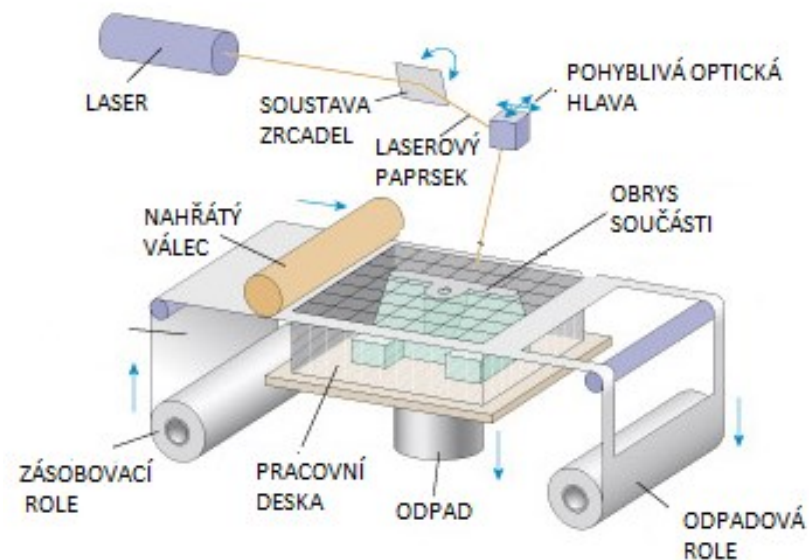
Výhody:

- Nízká cena

- Široký výběr materiálů
- Rychlost výroby

Nevýhody:

- Nízká pevnost vytisknutých materiálů
- Vysoké množství odpadu



Obr. 14. Princip metody LOM [21].



Obr. 15. Typické díly vyrobené pomocí metody LOM[22].

4 MATERIÁLY VYUŽÍVANÉ PRO 3D TISK

U 3D tisku je nutné pečlivě zvážit typ materiálu pro samotnou výrobu. Materiál musí splňovat různé vlastnosti pro potřebnou tvorbu. Jedná se zejména o jeho skupenství, které se mění s teplotou. Tento stejný jev se využívá také u vstřikování. V závislosti na konkrétních typech zvolených metod se potom realizuje výběr určitých materiálů. Mohou to být například termoplasty, kovové materiály, keramika nebo i papír [23].

V následující tabulce jsou zaznamenány probrané metody 3D tisku a jejich vhodný typ stavebního materiálu.

Tab. 2. Přehled metod 3D tisku a jejich vhodné typy stavebních materiálů [23].

METODA	STAVEBNÍ MATERIÁL	TLOUŠŤKA[mm]
SLA	Foto-polymerní pryskyřice	0,05 - 0,15
SGC	Foto-polymerní pryskyřice	0,10 – 0,50
SLS	Prášek: ABS, PET, kov, keramika apod.	0,10 – 0,50
FDM	Drát (struna): ABS, PC, PC/ABS, PET, PLA atd.	0,05 – 0,33
LOM	Fólie: papír, PA, PES, keramika atd.	0,01 – 0,20

5 TRENDY A VÝVOJ 3D TISKU

Rapid prototyping se stává ve světě čím dál rozšířenější technologií. V současné době se užívá 3D tisku v podstatě v každém odvětví. Stále se hledají nové možnosti a aplikace. Například v Česku se první 3D tiskárna začala používat v roce 2006. V dnešní době se objevuje 3D tisk kromě technického průmyslu také ve zdravotnictví. Na trhu už jsou dostupné 3D tiskárny, které mají schopnost tisknout i biomateriály.

Cena tiskáren je v současné době velmi přívětivá. Například 3D tiskárny určené pro technologii FDM se řadí k těm vůbec nejlevnějším. Velmi oblíbené jsou dnes tzv. hobby tiskárny. Slouží především pro domácí kutily a pro výrobu jednoduchých a hrubých modelů. Na trhu jsou poměrně žádané a snadno dostupné. Mnoho lidí si je pořizuje, protože není problém sestavit si ji podle návodu. Pomocí PC a 3D softwaru je už velice snadné si navrhnout a poté vytisknout dané modely. Také samotné materiály potřebné pro výrobu (pryskyřice) lze snadno získat a bez obtíží se dají dovézt až domů.

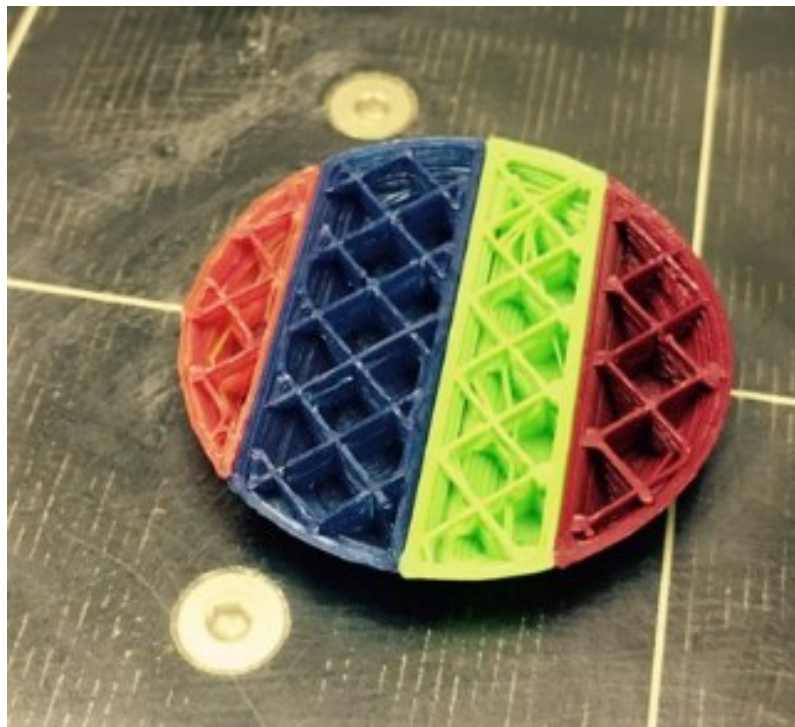
Co se týče vývoje materiálů, tak se neustále vyvíjí nové materiály pro samotnou výrobu. Mohou to být pevnostně a tepelně odolné pryskyřice, průhledné pružné materiály, filamenty plněné hliníkem nebo mědí a podobně. Hlavním řešením je najít co nejlepší parametry k vytvoření nejjemnější vrstvy.

K velkým pokrokům došlo rovněž u obráběných dílů. Pro celé prototypy a jejich části se změnila materiály používané k výrobě. K významnému vývoji došlo také u strojů, které jsou určeny speciálně pro Rapid Prototyping. Můžeme se setkat se zařízeními na různé prototypové hliníkové výrobky nebo na umělé dřevo. Cena těchto zařízení je nižší než cena speciálních strojů pro náročnější aplikace nebo stroje na výrobu sériových dílů. Jsou na ně totiž kladeny menší požadavky a také způsob využití se nepatrně liší.

Hlavní zastoupení má Rapid prototyping bez pochyby v automobilovém průmyslu. Zde se začal objevovat už od roku 1993. Od této doby vykonal významný pokrok. Vznikla velmi široká škála různých produktů. Existují rozměrné produkty, ale také velmi malé, přesné a složité modely. S nástupem LED světelných zdrojů se začaly prosazovat složitější díly na výrobu. Jedná se například o komplikované optické plochy, protože LED technologie vyžaduje malé díly v porovnání s halogenovými světly, které se používaly v dřívějších dobách [24].

5.1 Vícebarevný tisk

V současné době je technologie 3D tisku velmi hojně zastoupena ve všech odvětvích. Má širokou řadu využití pro technickou praxi. Dříve ovšem narážel na jeden negativní případ. Většina modelů se totiž pomocí tisku dala vytvořit pouze jednobarevně. V roce 2016 ale tento problém vymizel. Byly objeveny zcela nové typy tiskáren, které umožnily barevný tisk. Bohužel jde o velmi malou síť těchto zařízení. Lze zcela jistě předpokládat, že za několik let se tato situace určitě bude vzestupně vyvíjet a prohlubovat. Každá tiskárna tedy bude schopna využít plnohodnotného tisku v širokém spektru barev. Mnoho firem se v nynější době již zabývá samotným vývojem těchto zařízení a možnostech tisku [25].

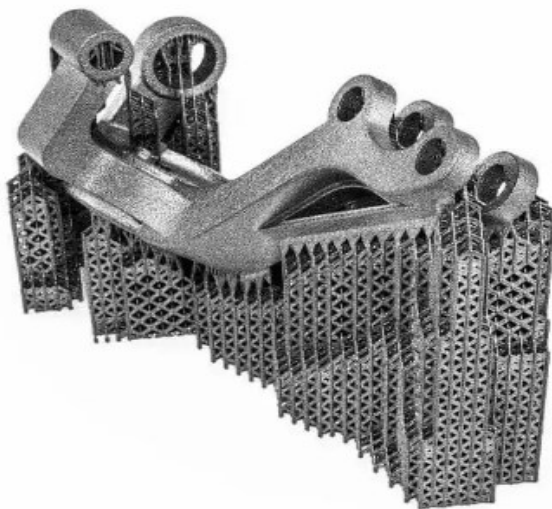


Obr. 16. Model vyrobený pomocí vícebarevného tisku[26].

5.2 3D tisk kovů

Tisk předmětů z materiálů ve formě kovů postupně proniká do celé řady podniků. Stále je ale tiskování kovových dílů velice zdoluhavý a nákladný proces v porovnání s jinými technickými materiály. Vytisknuté modely z kovů bývají obvykle menších rozměrů. Vykazují kvalitní povrch. V následujících letech se určitě 3D tisk z kovů posune do vyšších pater. Dá se očekávat rozvoj týkající se širší varianty výběru materiálu, tisk větších

součástí a snížení ceny tisku. Významnou roli by měl hrát především v kosmickém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu nebo v lékařství[27].



Obr. 17. Model vyrobený pomocí 3D tisku kovů [28].

5.3 3D tisk orgánů

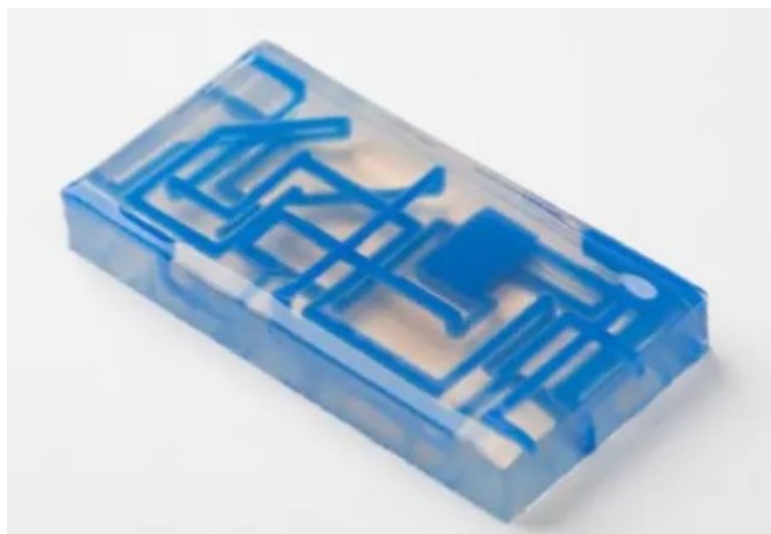
Využití toho způsobu si ve farmaceutickém průmyslu postupně buduje své místo. V dřívějších dobách byl tento postup těžko představitelný. Ovšem uplynulo mnoho let a tisk orgánů se posunul do velké míry kupředu. Ačkoliv se ještě nepodařilo vyvinout myšlenku, jakým způsobem vytisknout nové srdce, vědci neustále spekulují a dnes již provádějí různé pokusy s 3D vyhotovenou ledvinou. Nicméně velkou neznámou je fakt, do jaké míry dokáže lidské tělo zareagovat na cizí materiály, popřípadě jestli je dokáže vůbec přijmout. Vědci zrealizovali na začátku roku 2016 tisk jaterní tkáně, různých kostí a tepen. Tyto orgány se potom implantovaly do těla živé opice. Její tělo je přijalo, což vzbudilo veliký ohlas a zaznamenalo důležitý pokrok. S postupem přibývajících let se dá očekávat významný vývoj této technologie[29].



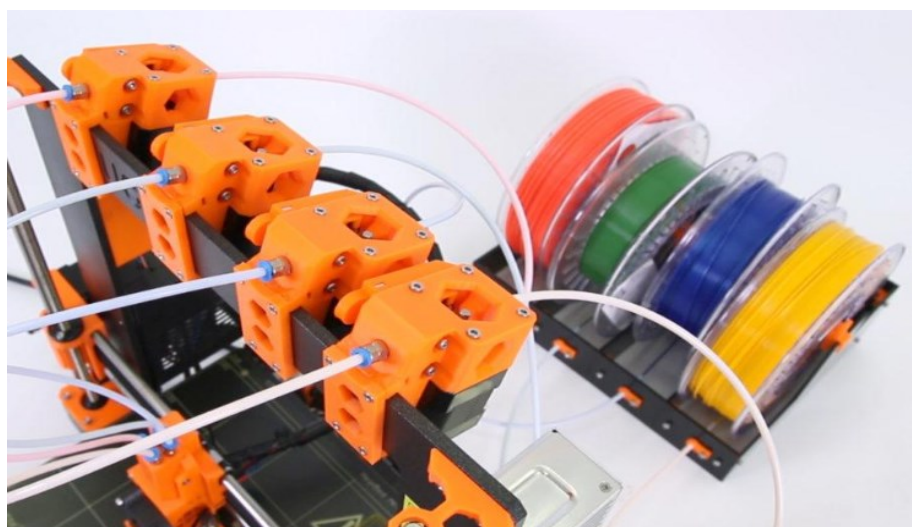
Obr. 18. 3D tisk orgánů [30]

5.4 Vícemateriálový tisk

Situace 3D tisku za použití jednoho druhu materiálu se stala běžnou záležitostí. Velká řada návrhářů a výrobců 3D tiskáren se začala zaměřovat na to, aby byly schopné tisknout z různých materiálů. Hlavní požadavek je kladen na použití stále jednoho extruderu, který má zajistit vícemateriálový tisk. Nalezneme ho téměř ve všech typech 3D tiskáren. Možným řešením by bylo využít např. výhybky. Pomocí nich by se zrealizovalo střídání více materiálů. Dnešní doba totiž vyžaduje použití předmětů vyrobených a složených z různorodých materiálů. Tyto předměty podléhají velmi obtížnému a nákladnému výrobnímu procesu (montáž, dokončovací operace). Jestliže by se v budoucnu podařilo vymyslet, jakým způsobem zhotovit celý předmět najednou, ulehčil by se zmiňovaný výrobní proces. Podstatným znakem této metody bude schopnost rozmístit různé kovy na součásti. Namáhaná místa tak přináší odolnost vůči teplotním rázům a opotřebením. Zvýší se tak pevnost a současně životnost součásti [31].



Obr. 19. Typický produkt vícemateriálového tisku [32].



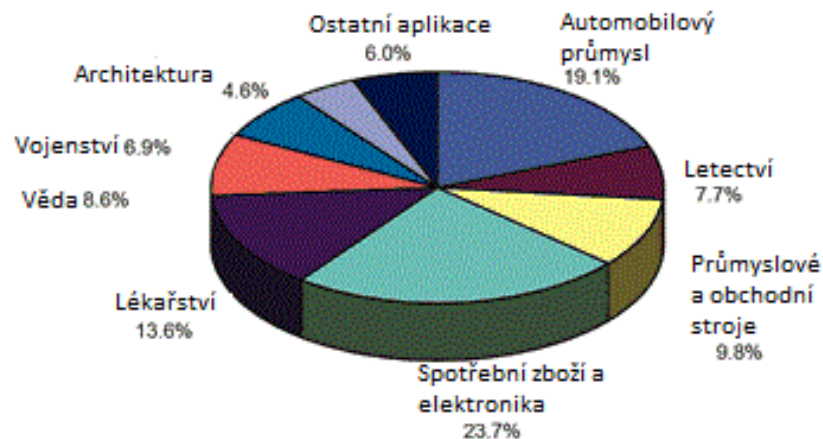
Obr. 20. Ukázka procesu vícemateriálového tisku [33]

6 UPLATNĚNÍ 3D TISKU V PRAXI

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách –*Rapid Prototyping* má svoje největší zastoupení především v technické praxi. Hlavní místo zde zaujímá automobilový průmysl, který tuto technologii využívá primárně k produkci krycích skel světlometů. Ve zdravotnictví se pomocí RP technologie vyrábí např. implantáty kolenních kloubů. V spotřebním průmyslu se díky této technologii vyrábí např. různé typy simulátorů.

Celkové oblasti využití Rapid Prototypingu jsou vyobrazeny na grafu (viz obr 21).

Rozvoj 3D tisku dnes umožňuje tisk ve všech odvětvích výroby. Výtisky lze zhotovit ve velkých firmách pro ověření funkčnosti a vhodnosti dílu před začátkem sériové výroby. Velkou výhodou je snadná úprava modelu, který slouží jako šablona pro tisk součástí, takže lze snadno, rychle a ekonomicky opravit chyby. Důležitým důvodem použití 3D tisku jsou také personalizace[34].

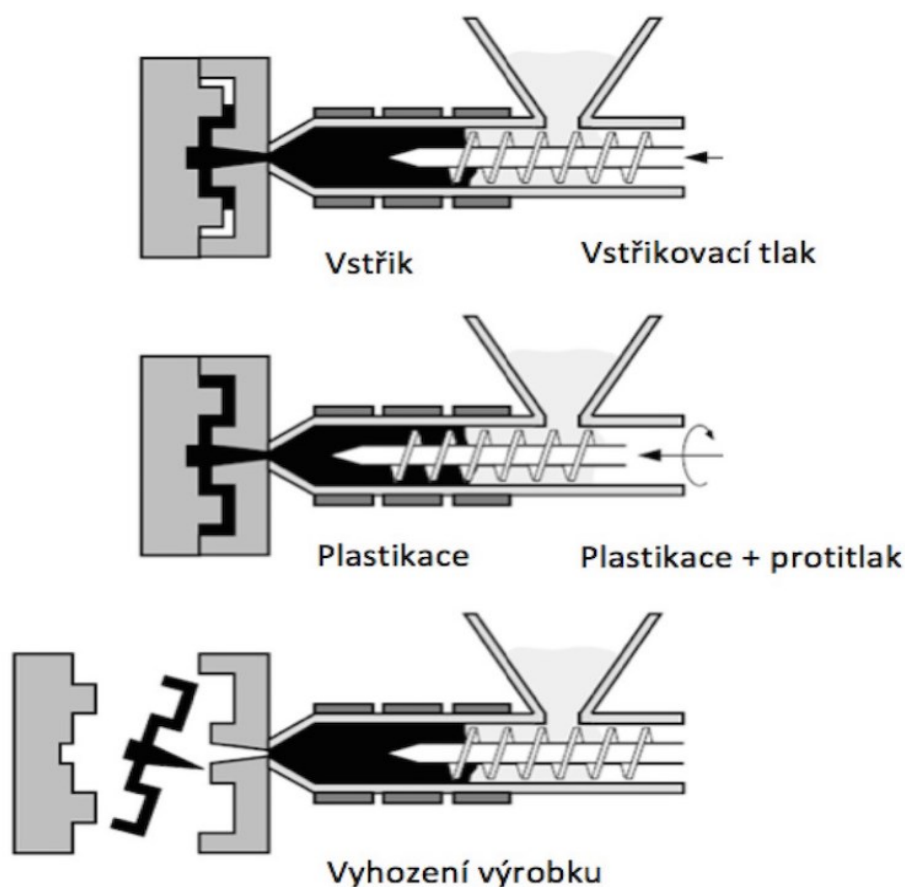


Obr. 21. Oblasti použití Rapid Technology [35]

7 VYUŽITÍ 3D TISKU PŘI VÝROBĚ VSTŘIKOVACÍCH FOREM

7.1 Porovnání 3D tisku a vstřikování

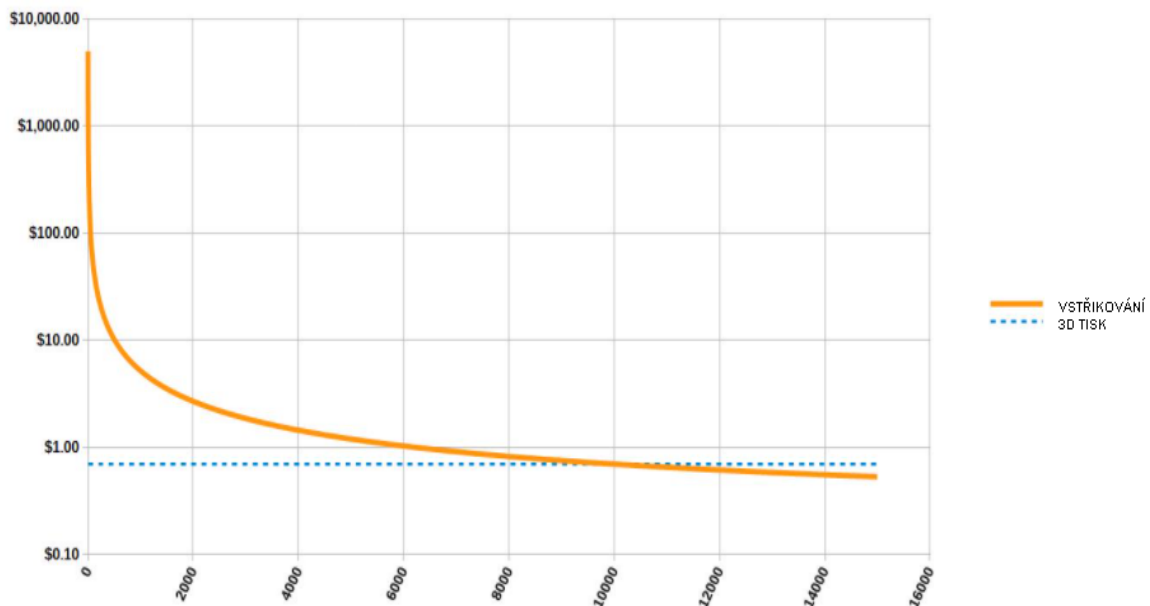
Jedním z nejběžnějších výrobních procesů v plastikářském průmyslu je bezpochyby vstřikování plastů. Jedná se o způsob výroby, kdy se roztavený plast vstříkuje do dutiny formy. Poté vlivem ochlazování postupně tuhne. Následně se vstřikovací forma otevře a dojde k vyjmutí samotného výrobku. Tato technologie se využívá hlavně v hromadné výrobě [36].



Obr. 22. Proces vstřikování plastů [37]

Dříve byl 3D tisk považován za dražší metodu než vstřikování a to zejména v hromadné výrobě. V současné době už toto tvrzení dávno neplatí. Z důvodu rozšíření 3D tisku a zavedení různých propracovaných způsobů výroby je cenově dostupnější. Na následujícím grafu (obr.23) je vyobrazeno porovnání nákladů za kus při výrobě vstřikováním a 3D tiskem [38].

Vstřikování vs. 3D tisk



Obr. 23. Cenové porovnání 3D tisku a vstřikování [38]

Standardně stojí vstřikovací forma zákazníka okolo 100 tisíc korun. Pro samotnou formu je vždy nejdůležitější její velikost a složitost. Z těchto hledisek se potom určují náklady na formu a vstřikovací lis. Celková cena jednoho kusu po vytvoření formy se odhaduje na 5 korun.

Co se týká 3D tisku, tak celkové náklady na jeden kus jsou zhruba 30 korun bez nutnosti počáteční investice.

Díky těmto aspektům lze tedy 3D tisk považovat za výhodnější, jestliže vytváříme méně než 1 tisíc až 3 tisíce kusů, protože cena za kus s připočítanou cenou za formu u vstřikování klesne pod hranici 3D tisku většinou někde mezi tímto množstvím.

Mezi další výhody 3D tisku se zahrnují například opětovné měnění designu součásti během výroby. Kdežto u vstřikování tento způsob znamená zvýšení ceny s ohledem na vstřikovací formu. Díky 3D tisku se dostane produkt na trh výrazně rychleji (není potřeba vyčkávat na nastavení lisu a obtížnou výrobu formy).

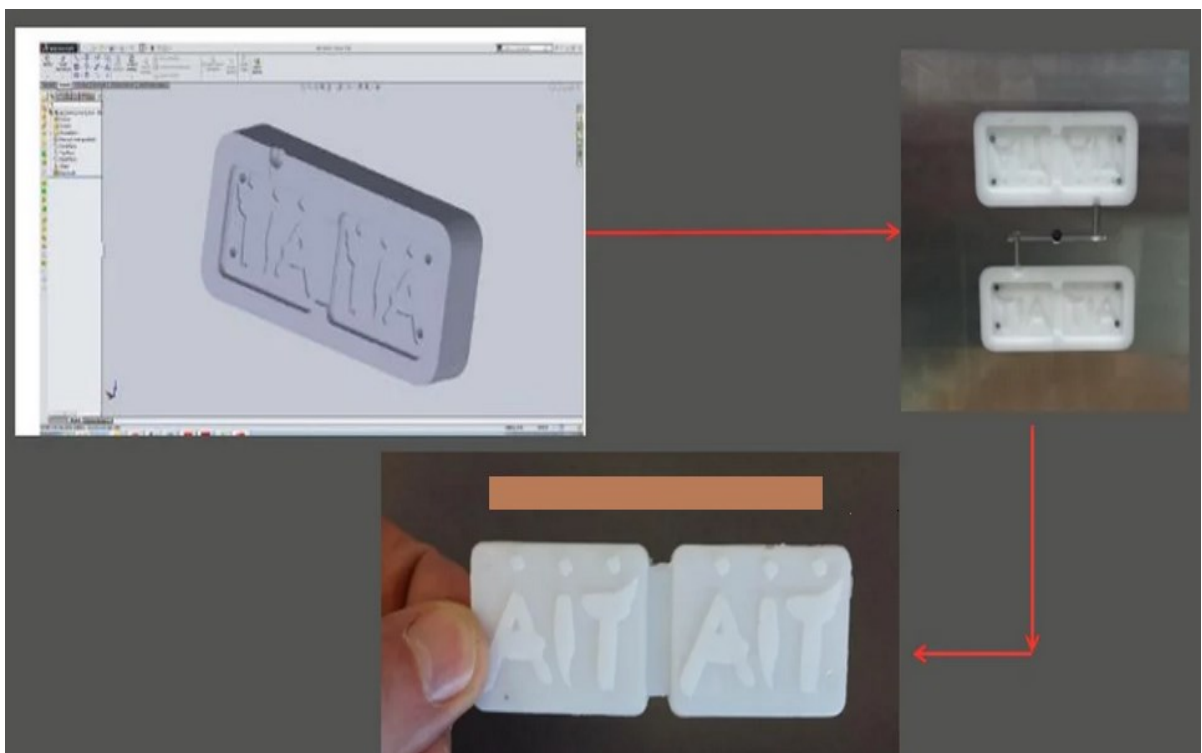
V současnosti je 3D tisk pro plastové dílce daleko rozšířenějším a dostupnějším způsobem výroby než vstřikování. Proces vstřikování se především používá ve velkých firmách, protože většina těchto firem obvykle neuplatňuje malé zakázky. Naopak pro menší firmy je využití 3D tisku naprosto optimální [38].

7.2 Výroba vstřikovacích forem pomocí 3D tisku

7.2.1 Proces a postup

Vstřikovací formy jsou v podstatě bloky s dutinami určující tvar výrobku. Vyrábějí se díky CNC frézovacím strojům. Tato metoda je ovšem velice nákladná. Materiál vstřikovacích forem nejčastěji to bývají kovy – ocel a hliník, proto je velmi obtížné formy po vyrobení upravovat. V důsledku tohoto jevu se nabízí 3D tisk jako skvělá alternativa. Vyniká zejména díky své flexibilitě.

Postup pro vytisknutí vstřikovací formy je obdobný běžnému 3D tisku součástí. Pomocí CAD softwaru se navrhne forma. Návrh se uloží do formátu STL a následně dojde k samotnému procesu 3D tisku. Formy musí být vsazeny do kovových rámců. Potom je forma připravena pro vstřikování [36].



Obr. 24. Proces 3D tisku vstřikovací formy [39].

7.2.2 Materiály

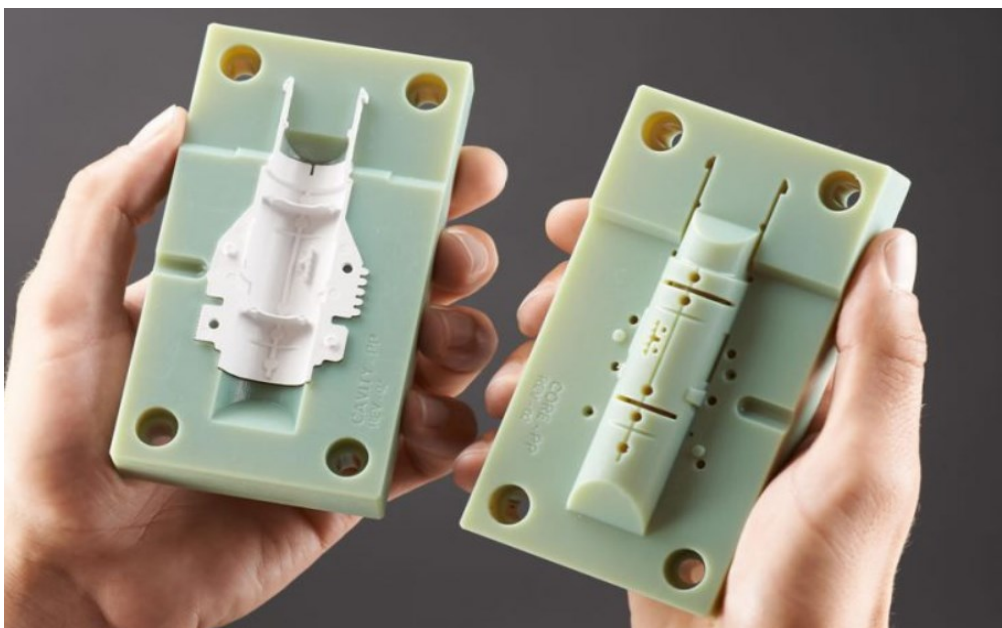
Obecně platí, že materiály používané pro 3D tisk musí vykazovat vysokou pevnost a tuhost. Důraz je také kladen na odolnost vůči tlaku vytvářený během procesu. Dalším požadavkem bývá vysoká tepelná odolnost materiálu [36].

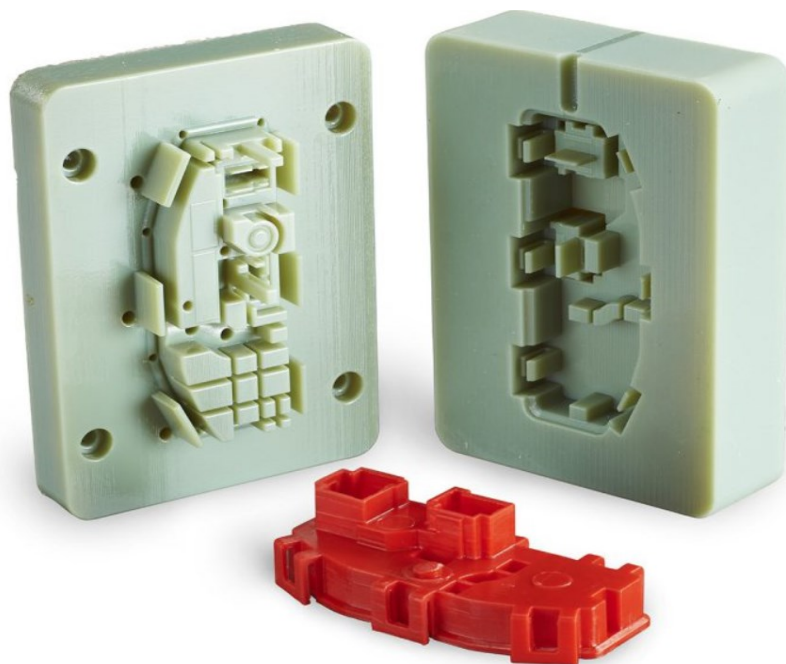
Mezi nejpoužívanější materiály pro 3D tisk vstřikovacích forem jsou:

- PETG (polyethylentereftát)
- ABS (akrylonitril – butadien-styren)
- Nylon
- PA (polyamid)
- PP (polypropylen)
- TPE (termoplastické polymery)
- POM (polyoxymethylen)

7.2.3 Používané metody

Vstřikovací formy pro 3D tisk se nejčastěji provádí pomocí metod SLA, FDM a SLS. Tyto metody jsou podrobně rozebrány v kapitole 3. Z důvodu vysokých požadavků na rozměrovou přesnost a hladký povrch formy, je upřednostňována metoda SLA [36].





Obr. 25. Příklady 3D tištěných forem [40]

7.2.4 Výhody a nevýhody

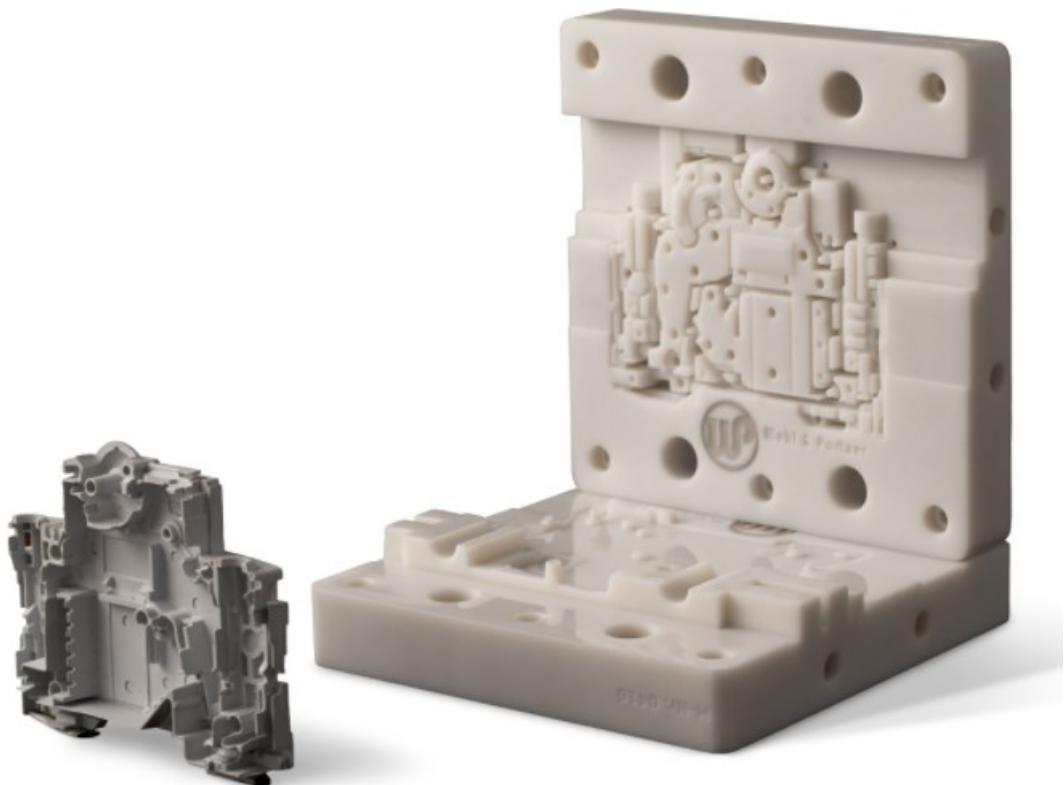
3D tisk považujeme za velmi vhodnou volbu pro výrobu vstřikovacích forem. Jako u každé metody, tak i u 3D tisku se setkáváme s řadou výhod a nevýhod [36].

Mezi hlavní výhody patří:

- **Nízké náklady**—Oproti vstřikování je 3D tisk podstatně levnější. Předpokládá se, že formy vyráběné 3D tiskem v porovnání se vstřikováním mohou ušetřit až 80% celkových nákladů.
- **Vysoká flexibilita a efektivita**—Doba výroby a návrhu se díky 3D tisku snižuje.
- **Využití v přesné malosériové výrobě**—Vstřikovací formy vyráběné konvenčními metodami jako například CNC frézování se vyznačují velkými počátečními náklady, proto se s nimi setkáváme zejména ve velkých sériích. Kdežto 3D tisk kvůli zdlouhavým výrobním časům je vhodný pro malosériovou výrobu (*zminěno v kapitole 7.2.1*).

Mezi nevýhody se zařazuje:

- **Delší výroba součástí**–Vzhledem k tomu, že plast ve srovnání s kovy má nižší tepelnou vodivost, trvá vyhotovení 3D tištěné formy a určitých produktů delší dobu. V návaznosti na tuto situaci se snižuje rychlost a produktivita výroby.
- **Smrštění**–Obdobně jako u jiných 3D tištěných modelů mohou i formy podléhat značným smrštěním. Hlavní příčinou tohoto jevu je proces chlazení, který u 3D tisku nastává. V důsledku chlazení se potom mohou rizikově měnit přesné rozměry formy.
- **Degradace**-Velká část forem vyrobených z plastu není schopna opakovaně dlouhou dobu odolávat vyššímu tlaku a teplotě. Tyto činitele mají zásadní vliv na samotnou degradaci materiálu[36].



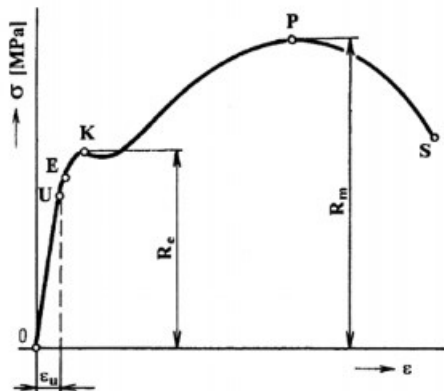
Obr. 26. Forma vytištěná technologií SLA[41]

8 MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ

Mechanické vlastnosti vyrobených tělísek technologií vstřikování jsou závislé na mnoha činitelích. Jedná se primárně o technologické parametry procesu a druh použitého materiálu. Jejich přítomnost může ovlivnit výsledný tvar výstřiku.

8.1 Zkouška mechanických vlastností tahem

Slouží k určení pevnosti materiálu. Tato zkouška je považována za nejpoužívanější zkoušku mechanických vlastností. Po celém průřezu zkušebního tělesa je rozloženo rovnoměrně napětí. Po upevnění zkušebního tělesa se začne postupně zatěžovat silou. Vyvolaná síla působí ve směru jeho podélné osy a díky ní dojde k deformaci a následnému přetržení zkušebního tělesa. Tahová zkouška se vysvětluje pracovním diagramem (obr.65). Udává závislost velikosti napětí σ na poměrném prodloužení ε [42].



Obr. 27. Pracovní diagram tahové zkoušky[42]

- ✓ U – mez úměrnosti – do meze úměrnosti je napětí přímo úměrné deformaci, platí Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]}$$

Tato oblast je v diagramu tvořena přímkou, kde je konstantou úměrnosti modul pružnosti E

- ✓ E – mez pružnosti – stanovení hodnoty pro mez pružnosti je obtížné, proto se v praxi stanovuje smluvní hodnota napětí způsobující trvalou deformaci 0,1% původní délky
- ✓ K – mez kluzu – oblast, kdy napětí stoupá pomalu (nebo se jeho nárůst zastaví), zatímco prodloužení se stále zvětšuje.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa]$$

R_e -napětí na mezi kluzu [MPa]

F_e -síla na mezi kluzu [N]

S_0 -původní průřez zkušební tělesa [mm²]

- ✓ P – mez pevnosti – maximální napětí, které snesl zkušební vzorek.

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa]$$

R_m -napětí na mezi pevnosti [MPa]

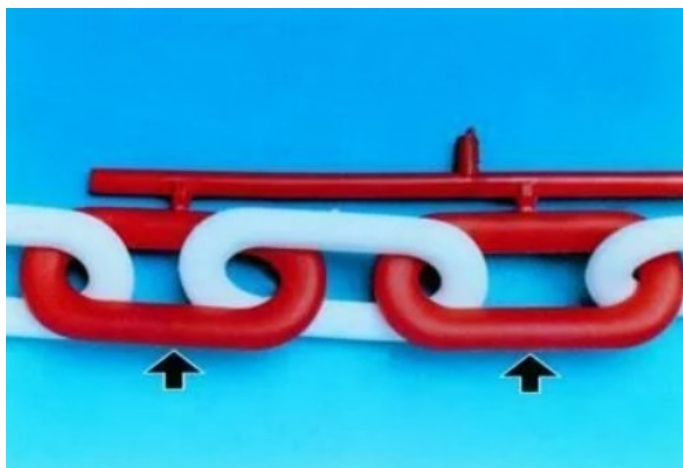
F_{max} -síla na mezi pevnosti [N]

S_0 -původní průřez zkušební tělesa [mm²]

- ✓ S – bod přetržení součásti [42].

8.1.1 Studený spoj

Studený spoj je negativní jev vznikající při vstřikování. Bývá situován v místě výstřiku, kde se spojují dva proudy taveniny v průběhu plnění dutiny formy. Obvykle záleží na povrchové energii a viskozitě dané taveniny, ale také na druhu použitého plastu. Pokud není spoj optimální, bude se výstřik v tomto místě projevovat zhoršenými mechanickými vlastnostmi (rázová houževnatost, pevnost v ohybu a v tahu) [43].



Obr. 28. Ukázka vzniku studeného spoje v praxi [44]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zásady pro vypracování diplomové práce:

- Proved'te literární rešerši na dané téma
- Navrhněte vhodnou testovací geometrii
- Tvarové dutiny vytiskněte pomocí vybraných technologií a materiálů
- Samotné testování pomocí vstřikování termoplastu, zhodnocení experimentu

10 POUŽITÝ SOFTWARE

Na základě návrhu testovací geometrie tvarových vložek se využilo následujícího softwaru.



Obr. 29. Použitý software

10.1 Autodesk Inventor Professional 2021

Software Autodesk Inventor Professional 2021 patří do společnosti Autodesk, pod který spadá ještě například AutoCAD. Jedná se o profesionální nástroj používající se hlavně ve strojírenství. Umožňuje tvorbu navrhování a konstruování různých strojírenských elementů a sestav. Pomocí tohoto softwaru lze také vytvářet specifická elektromechanická zařízení, dynamické simulace, pevnostní analýzy zatížení, návrh strojového vybavení forem. Slouží k vytváření animací a prezentací [45].

10.2 PreFormFormlabs

Plní funkci optimalizace tiskového procesu. Nejprve se navrhne 3D model v CAD softwaru, potom se model importuje do souboru STL. Po splnění tohoto postupu se model

načte. Následuje nastavení orientace a podpěr tisku. Během několika minut se model připraví na tisk a nahraje se na příslušnou 3D tiskárnu [46].

10.3 Sinterit Studio 2019

Sinterit Studio 2019 bylo vytvořeno speciálně pro tiskárny Sinterit SLS. Tento software se navrhuje tak, aby proces tisku byl plynulý a rychlý. S jeho pomocí lze snadno uspořádat modely a také sledovat proces tisku [47].

10.4 Siemens NX

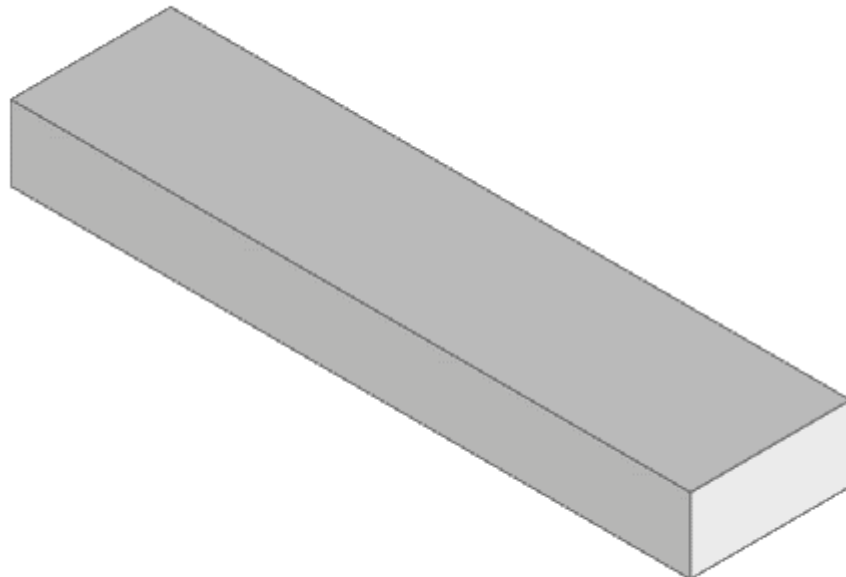
Tento typ softwaru zajišťuje kompletní vývoj produktu. Je určený pro návrh, ale také pro výpočty a pevnostní analýzy. Dále je schopný vytvářet výkresovou dokumentaci, simulaci, modelování sestav i programování NC obráběcích strojů [48].

11 NÁVRH TESTOVACÍ GEOMETRIE TVAROVÝCH VLOŽEK

Jako testovací geometrie byly zvoleny tvarové vložky. Tyto tvarové vložky budou sloužit slouží k vyhotovení zkušebních tělísek, které budou vyrobeny technologií vstříkování. Kompletní návrh proběhl v softwaru Autodesk Inventor Professional 2021.

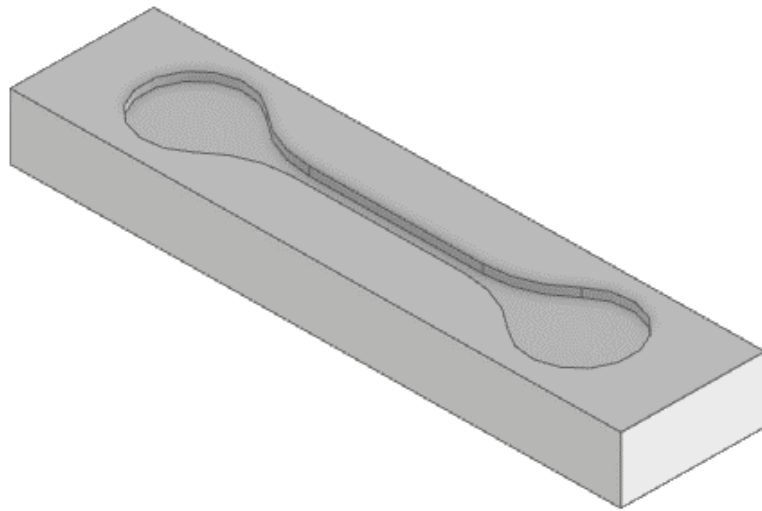
11.1 Návrh první testovací geometrie tvarové vložky

V prvním kroku došlo k vymodelování základního tvaru testovací geometrie. Jedná se o obdélníkový profil. Na vytvoření tohoto objektu se využilo příkazu *extrusion* (obr.30.).



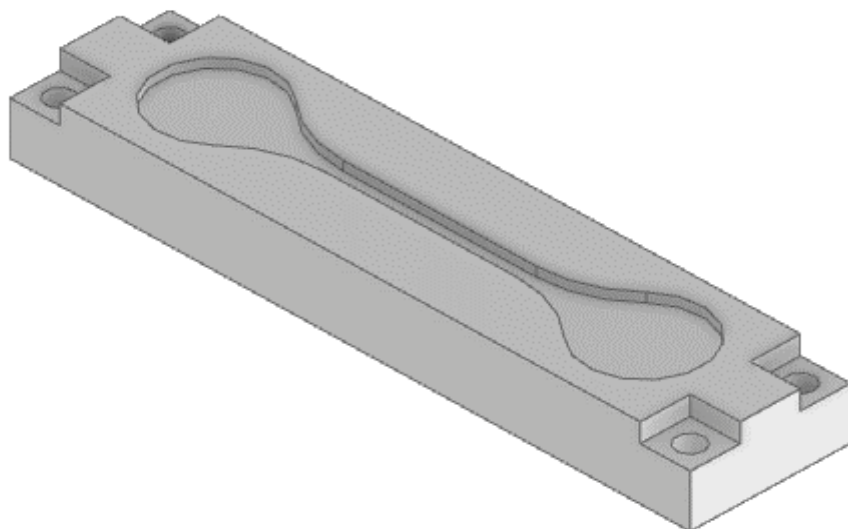
Obr. 30. Vytvoření základních rozměrů testovací geometrie

Dále byla vytvořena samotná dutina pro navrhnutou testovací geometrii a to rovněž pomocí příkazu *extrusion* (obr.31.).

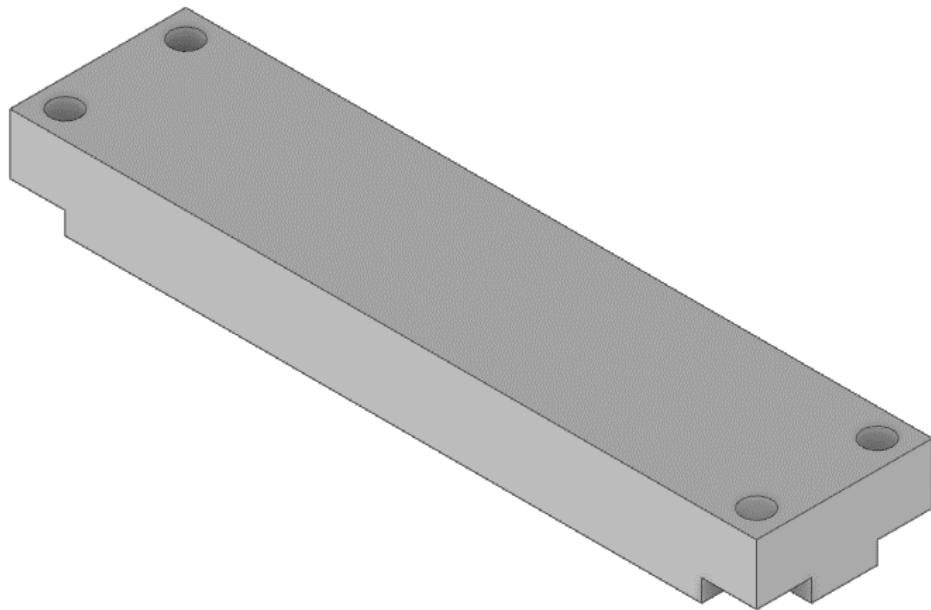


Obr. 31. Vytvoření dutiny

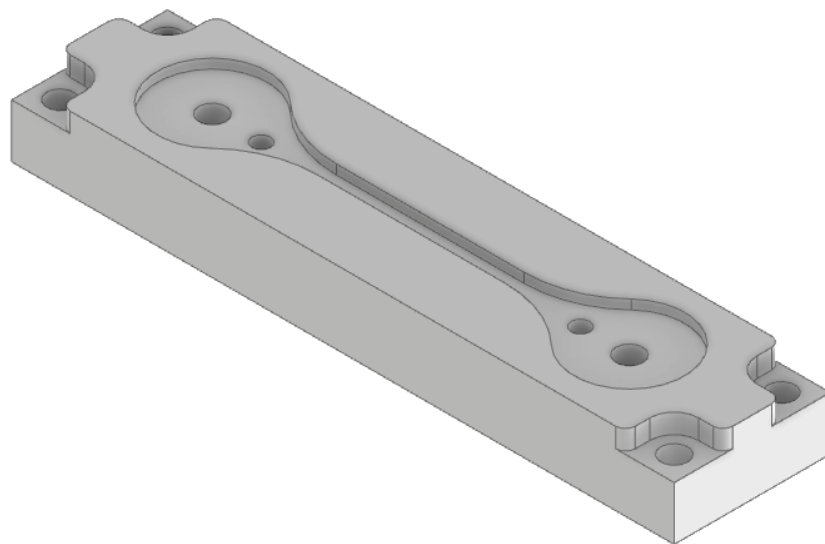
Následně byly vytvořeny díry pro upnutí vložky do rámu vstříkovacího stroje (*obr.32,33*) a díry pro vyhazovače (*obr.34,35*). To vše pomocí příkazu *hole*.



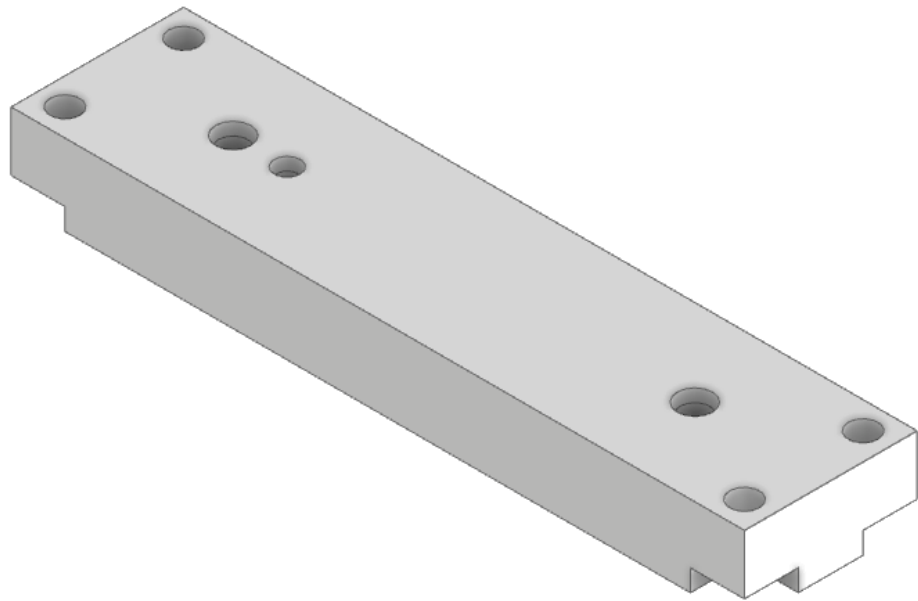
Obr. 32. Vytvoření děr pro upnutí vložky



Obr. 33. Vytvoření děr pro upnutí vložky

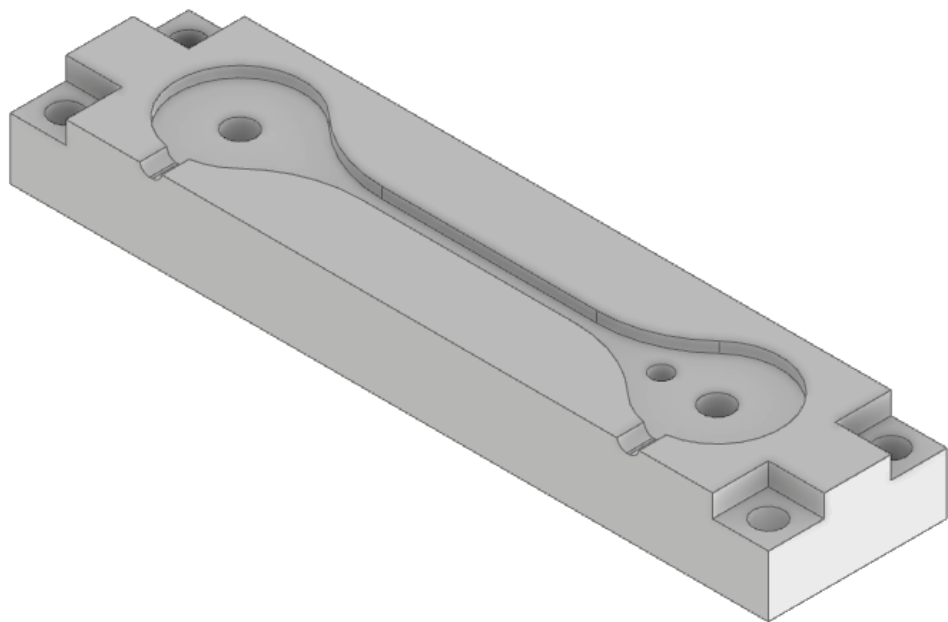


Obr. 34. Vytvoření děr pro vyhazovače



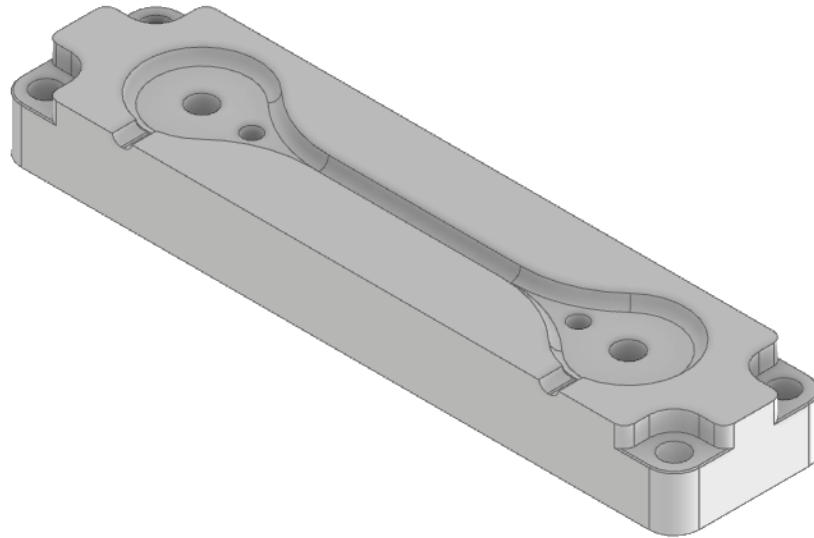
Obr. 35. Vytvoření děr pro vyhazovače

V dalším kroku se provedlo vytvoření kanálů, které slouží k plnění a dopravě polymeru do dutiny tvarové vložky(*obr.36*).



Obr. 36. Vytvoření kanálu do dutiny

Na závěr se provedla příslušná zaoblení a zkosení hran (*obr.37*).

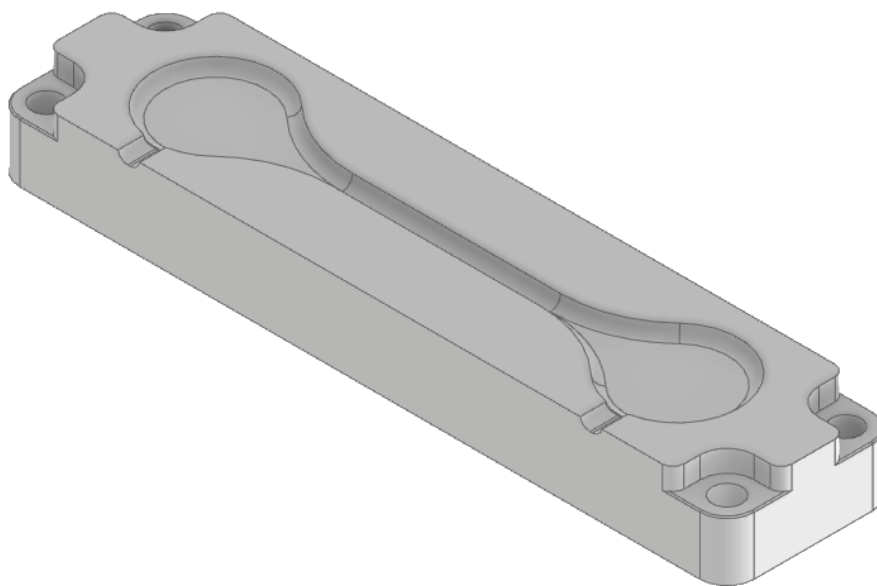


Obr. 37. Sražení hran a tvorba zaoblení

11.2 Návrh druhé testovací geometrie

Obdobným způsobem došlo k vymodelování druhé testovací geometrie tvarové vložky. Rozměry odpovídají první testovací geometrii. Zásadní rozdíl je pouze v tom, že druhá testovací geometrie neobsahuje díry pro vyhazovače (*obr.37*).

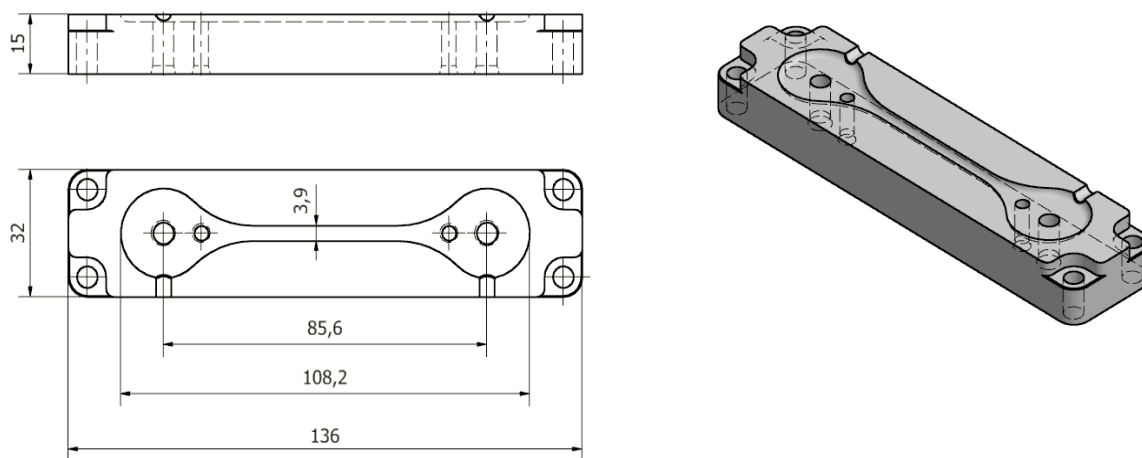
Tvorba druhé testovací geometrie také proběhla v programu Autodesk Inventor Professional 2021. Potom následovalo převedení navrženého 3D modelu do formátu STL, který je zásadní pro vygenerování G-kódu a vtištění 3D modelu pomocí 3D tiskárny.



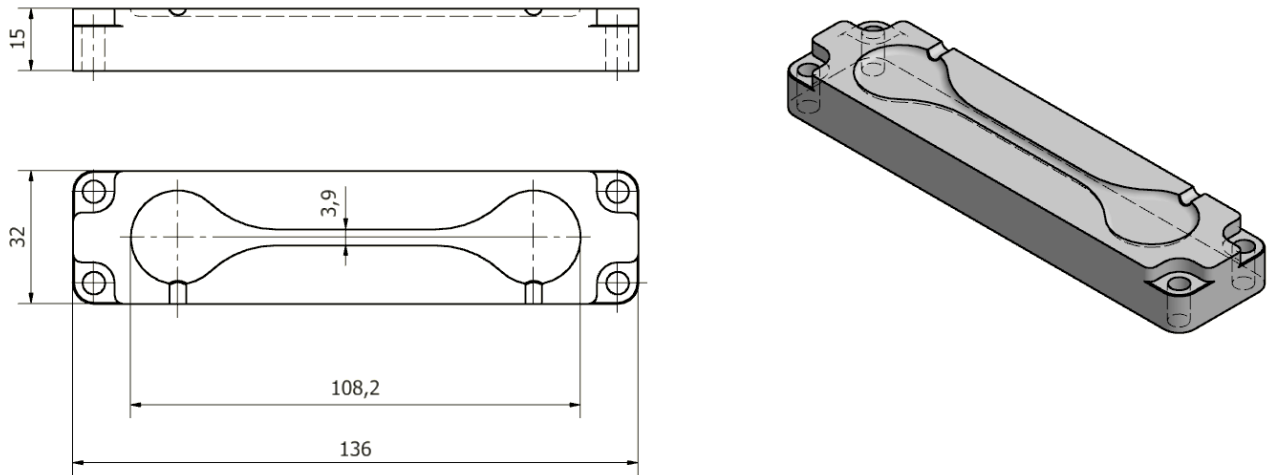
Obr. 38. 3D model druhé testovací geometrie

11.3 Přehled navržených těles

Na následujících obrázcích (obr.39 a obr.40) jsou znázorněna navržená tělesa testovací geometrie spolu se základními rozměry.



Obr. 39. Navržená první testovací geometrie se základními rozměry



Obr. 40. Navržená druhá testovací geometrie se základními rozměry

12 POUŽITÉ MATERIÁLY TVAROVÝCH VLOŽEK

Pro výrobu 3D tisku je zásadní volba vhodných materiálů. Je důležité počítat s určitými vlastnostmi a parametry, které ovlivňují samotnou výrobu 3D tisku a to jak pozitivně tak negativně.

12.1 Materiál tvarových vložek pro technologii SLA

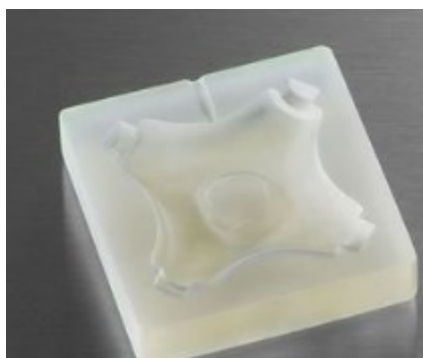
Po celkovém zvážení těchto předpokladů byl jako materiál vybrán pryskyřice (vytvrzená).

Nevytvrzená pryskyřice je zpravidla viskózní lepkavá kapalina. Závisí na molekulové hmotnosti, čím vyšší bude molekulová hmotnost, tím vyšší teplota tání.

Vytvrzená pryskyřice podléhá chemické reakci. Dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými molekulami. K vytvrzení se přidává tzv. tvrdidlo (polythioly, polyaminy) obvykle za pokojové teploty. Materiál je chemicky i tepelně odolný a velice pevný [49].

12.1.1 Vysokoteplotní pryskyřice (HIGH TEMP RISIN)

Tento typ zvolené pryskyřice se vyznačuje *vysokou teplotou tvarové stálosti (HDT)*, která nám udává teplotní odolnost plastů. Pomocí ní se zkoumá velikost průhybu plastů při daném teplotním zatížení. Materiály s vyšším HDT jsou typické pro svoje nižší prodloužení při zpracování. Vysokoteplotní pryskyřice se používá pro 3D tisk přesných prototypů, které mají vysokou tepelnou odolnost. Jedná se například o žáruvzdorné držáky, pouzdra, upínací přípravky a jejich příslušenství. Hlavní uplatnění ovšem nachází u forem a vložek [49].



Obr. 41. Ukázka vysokoteplotní pryskyřice [49].

12.1.2 Technická data

Všechny potřebné údaje týkající se dané pryskyřice jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab 3., Tab.4).

Tab. 3. Tepelné vlastnosti vysokoteplotní pryskyřice HIGH TEMP RISIN[PŘÍLOHA1]

	Nevytvrzená	Vytvrzená	Vytvrzená + Teplotně vytvrzená
Teplota tvarové stálosti při 1,8 [MPa]	43,6[°C]	99,2[°C]	101[°C]
Teplota tvarové stálosti při 0,45 [MPa]	49,3[°C]	142[°C]	238[°C]

Tab. 4. Mechanické vlastnosti vysokoteplotní pryskyřice HIGH TEMP RISIN[PŘÍLOHA1]

	Nevytvrzená	Vytvrzená	Vytvrzená + Teplotně vytvrzená
Maximální pevnost v tahu	20,9 [MPa]	58,3 [MPa]	51,1 [MPa]
Maximální prodloužení při přetržení	14 [%]	3,3 [%]	2,4[%]
Modul pružnosti v tahu	0,75 [GPa]	2,75 [GPa]	2,9 [GPa]
Pevnost v ohybu při přetržení	24,1 [MPa]	94,5 [MPa]	93,8 [MPa]
Modul pevnosti v ohybu	0,69 [GPa]	2,62 [GPa]	2,62 [GPa]

12.1.3 Standardní pryskyřice – černá (STD Black)

Tento typ pryskyřice se hodí pro výrobu přesných robustních součástí. Vyznačuje se lesklým a vysoce kvalitním povrchem [49].

12.1.3.1 Technická data

Základní mechanické vlastnosti uvádí následující tabulka.

Tab. 5. Mechanické vlastnosti standardní pryskyřice STD[PŘÍLOHA2]

	Nevytvrzená	Vytvrzená
Maximální pevnost v tahu	38 [MPa]	65 [MPa]
Maximální prodloužení při přetržení	12 [%]	6,2 [%]
Modul pružnosti v tahu	1,6 [GPa]	2,8 [GPa]

12.2 Materiál tvarových vložek pro technologii SLS

Co se týká materiálů pro technologii SLS, tak zde byl jako materiál zvolen Polyamid (PA) ve formě prášku.

12.2.1 Polyamid PA12 Smooth v1

Polyamid PA12 Smooth v1 se skládá z prášku polyamidu na bázi nylonu. Mezi jeho přednosti patří zejména dobré mechanické vlastnosti, kvalitní povrch, vysoká chemická odolnost a poměrně příznivá cena. Nejčastější využití pro 3D tisk tohoto materiálu jsou konstrukčně složité prvky, funkční prototypy, finální díly, chemicky odolné předměty nebo drobné produkty [51].



Obr. 42. Polyamid PA12 Smooth v1 [51]

12.2.1.1 Technická data

V následujících tabulkách jsou zaznamenány veškeré informace o materiálu *Polyamid PA12 Smooth v1*.

Tab. 6. Obecné vlastnosti [PŘÍLOHA 2]

Typ materiálu	Nylon 12
Granulace	18-90 [μm]
Barva	Tmavě šedá
Material refreshing ratio	26 [%]

Tab. 7. Mechanické vlastnosti [PŘÍLOHA 2]

Modul pevnosti v tahu	32 [MPa]
Maximální prodloužení při přetržení	10 [%]
Rázová odolnost (Charpyho test)	16 [KJ/m ²]
Tvrdość dle Shoreho na stupnici D	74

Tab. 8 Tepelné vlastnosti[PŘÍLOHA 2]

Teplota Tavení	185 [°C]
Hustota při tisku	0,92 [g/cm ³]

12.3 Materiál tvarových vložek pro technologii Polyjet

V této technologii se jako materiál použil *VeroWhitePlus RGD 835*. Jedná se taktéž o pryskyřici. Výrobky z tohoto materiálu se vyznačují hladkým povrchem a zpravidla bílou barvou. Své použití například uplatňuje u domácích spotřebičů a vodovodních instalací [52].



Obr. 43. VeroWhitePlus RGD 835

V následující tabulce jsou zaznamenány základní vlastnosti tohoto materiálu.

Tab. 9. Základní vlastnosti materiálu High-Temperature RGD525[PŘÍLOHA 3]

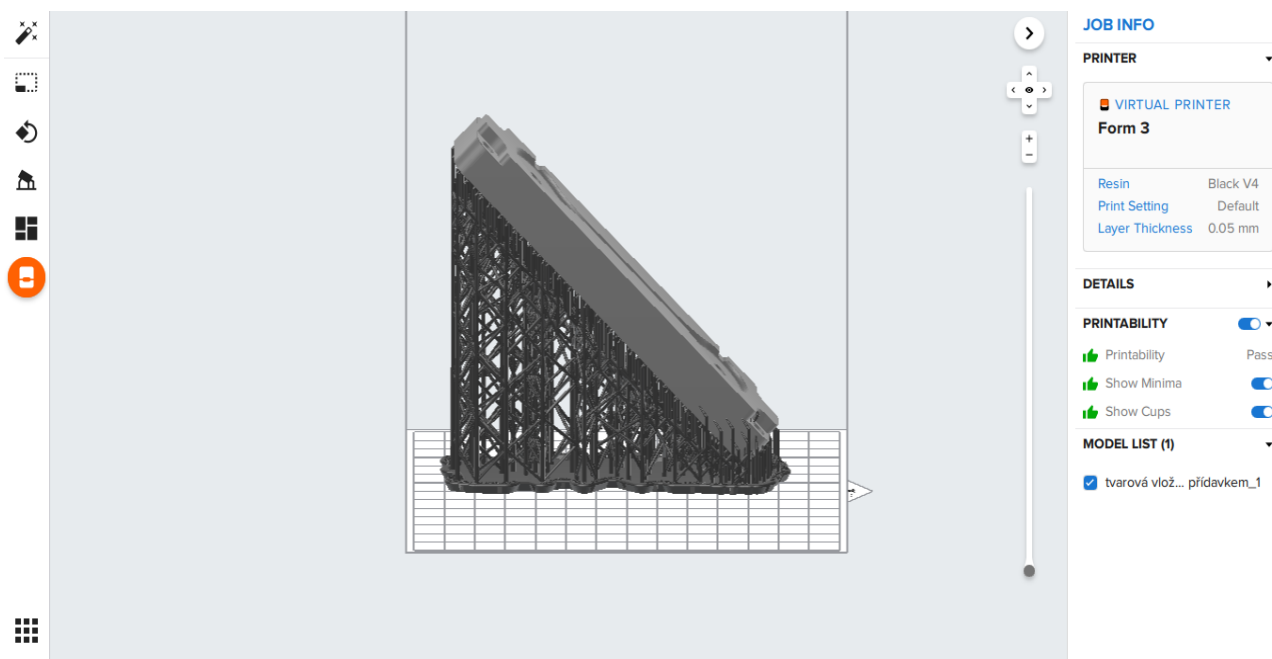
Pevnost v tahu	50-65 [MPa]
Max. prodloužení při přetržení	10-25 [%]
Modul pevnosti v tahu	2000-3000 [MPa]
Pevnost v ohybu	75-110 [MPa]
Modul v ohybu	2200-3200 [MPa]

13 3D TISK TVAROVÝCH VLOŽEK

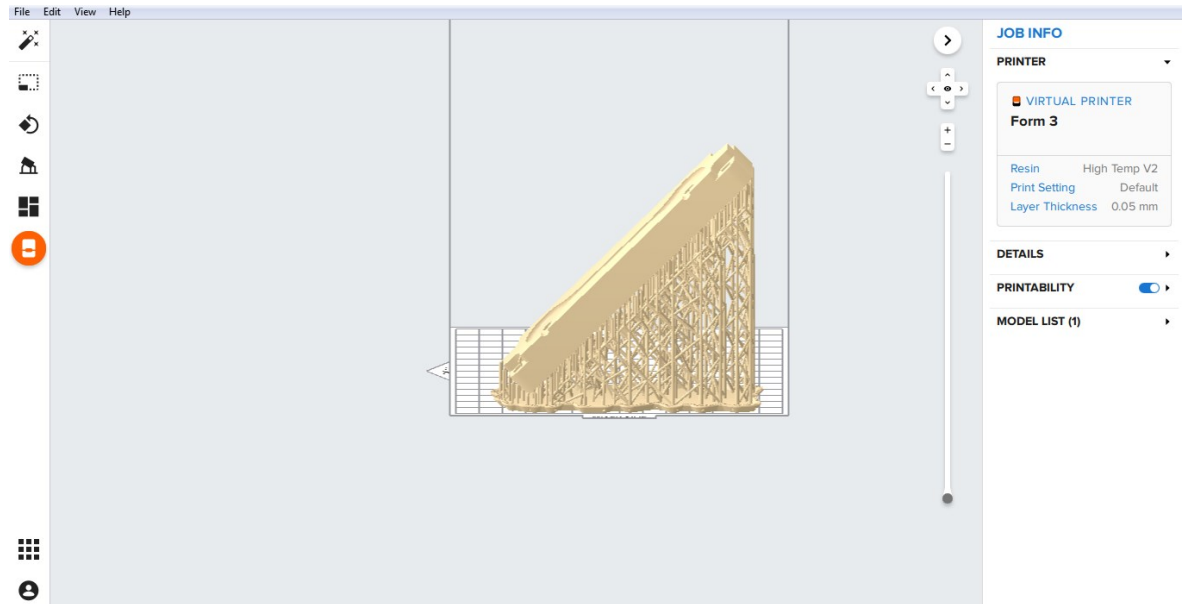
Před samotným 3D tiskem se nejdříve provedlo vytvoření 3D modelu tvarových vložek (*kap.11*). V dalším kroku se tato součást vyexportovala do formátu STL k dalšímu zpracování. Tento formát využívá a definuje CAD data díky trojúhelníkové síti, která slouží pro další úpravy modelu a dat. V zásadě všechny 3D tiskárny se opírají o tento typ formátu.

13.1 Tisk technologií SLA

Po splnění všech popsaných kritérií se kompletní data 3D modelu nahrála do požadovaného softwaru. V mém případě se jednalo o software PreForm Formlabs. Po načtení modelu bylo nutné definovat vstupní a výstupní parametry procesu (typ zařízení a materiálu, tloušťka vrstev atd.). Potom se uskutečnilo nastavení orientace modelu. Následující obrázky (*obr.44.*, *obr.45*) znázorňují uživatelské prostředí softwaru pro zvolené typy materiálů.



Obr. 44. Uživatelské prostředí softwaru PreFormFormlabs – STD Black



Obr. 45. Uživatelské prostředí softwaru PreFormFormlabs – HT

13.1.1 Zařízení pro výrobu

Tisk těchto modelů tvarových vložek z pryskyřic proběhl na tiskárně FormlabsForm 2 (obr.46) Technická data a parametry tohoto zařízení jsou potom zaznamenány v tabulce č.10



Obr. 46. Tiskárna Formlabs Form 2

Tab. 10. Technické parametry tiskárny FormlabsForm 2

Model 3D tiskárny FormlabsForm 2	
TECHNOLOGIE	SLA
TISKOVÝ OBJEM	145x145x175 mm
VÝŠKA VRSTVY	25-300 μm (dle zvoleného materiálu)
PRŮMĚR VYTVRZOVACÍHO BODU	140 μm (laser)
VÝKON LASERU	250 mW
OVLÁDÁNÍ	Barevný dotykový display
PODPOROVANÉ PLATFORMY	Windows (7 a vyšší), macOS (10.6.8 a vyšší)
PODPOROVANÉ FORMÁTY DAT	STL, OBJ
PŘENOS DAT	WIFI, LAN, USB
ROZMĚRY ZAŘÍZENÍ	350x330x520 mm

13.1.2 Proces

Po dobu tisku také musela probíhat úprava modelu od nevytvrzené pryskyřice. Vykonávala se oplachováním za pomoci 100% - ního isopropylaloholu. Model byl v tomto roztoku namočený 15 minut a sušen 30 minut na vzduchu. Potom se vytvrzoval 60 minut pod UV světlem. Za pomoci automaticky vygenerovaných podpěr díky softwaru PreForm se model tiskl pod úhlem 45° (*obr. 47*). Výsledné produkty jsou znázorněny na *obr. 48*. Po vytisknutí ještě došlo jemnému doobrobení tvarových vložek – naformátování na přesnou výšku a zpřesnění děr pro vyhazovače.



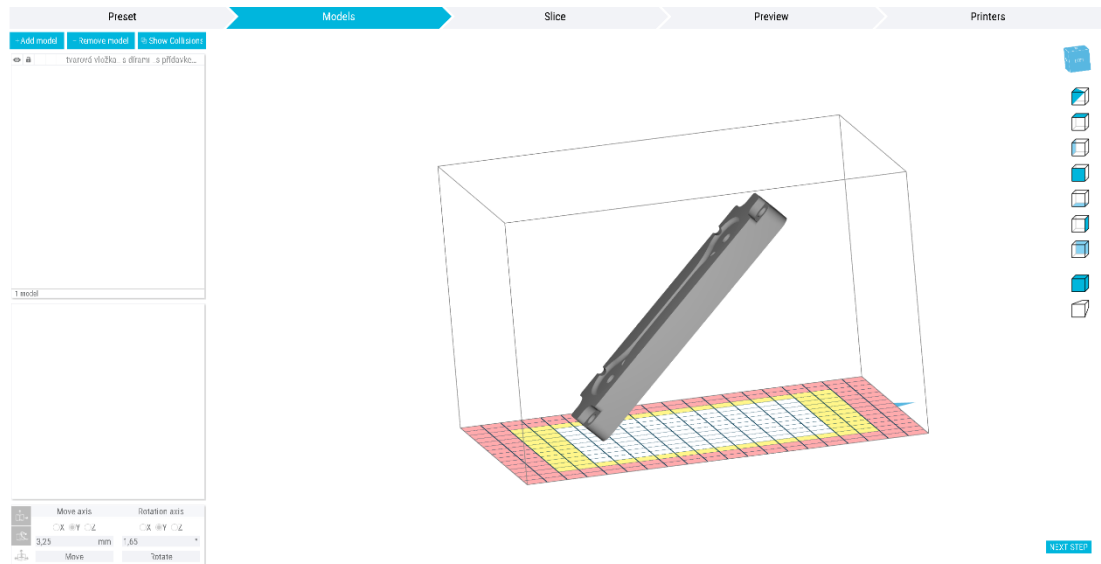
Obr. 47. Tisk technologií SLA



Obr. 48. Tvarové vložky vytisknuté pomocí SLA

13.2 Tisk technologií SLS

Načtení souboru proběhlo obdobným způsobem jako při využití technologie SLA. Tato metoda uplatňuje 3D software, který nese název Sinterit Studio 2019. Jako v předchozím případě byla součást tištěna pod úhlem 45°.



Obr. 49. Uživatelské prostředí softwaru Sinterit Studio 2019

13.2.1 Zařízení pro výrobu

Jako zařízení pro výrobu se použila tiskárna, která se nachází v prostorách Ústavu výrobního inženýrství (obr.50).



Obr. 50. Zařízení pro 3D tisk metodou SLS [52].

13.2.2 Proces

V této technologii se využívalo práškového materiálu (*obr.51*). Došlo ke spékání práškového materiálu a povrchovému natavení. Vyhotovený produkt je vyobrazen na *obr. 52*. Tyto tvarové vložky se také ještě podrobily procesu obrábění a to stejným způsobem jako u tvarových vložek vyrobených metodou SLA.



Obr. 51. Prášek polyamidu připravený k tisku



Obr. 52. Tvarová vložka vytisknutá pomocí SLS

13.3 Tisk technologií Polyjet

Vytvrzování probíhalo za přítomnosti UV záření po velmi tenkých vrstvách. Jakmile byly vytvořeny požadované produkty, následovalo jejich dokončovací vytvrzování.

13.3.1 Zařízení pro výrobu

Tato 3D tiskárna se nazývá Objet Eden 250 (*obr.53*). Její princip je analogický jako má klasická inkoustová tiskárna. Pracuje pro rychlé a přesné vytváření jakékoli geometrie. Výsledné produkty bývají hladké a trvanlivé. Vynikají kvalitní povrchem. Vyhotovený produkt je patrný z *obr. 54*.



Obr. 53. 3D tiskárna Objet Eden 250



Obr. 54. Tvarová vložka vytisknutá pomocí Polyjet

14 VÝROBA TVAROVÉ VLOŽKY NA CNC STROJI

Navržené tvarové vložky se obráběly na CNC frézovacím centru v dílnách Ústavu výrobního inženýrství.

14.1 Proces

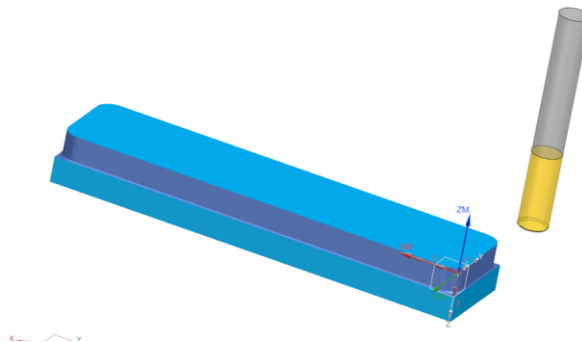
Pro vyrobení tvarové vložky bylo nutné vytvořit program pro CNC stroj. Software, který tento program umožňuje vytvořit, se nazývá NX a byl také použit pro vyhotovení samotné tvarové vložky. 3DModel se uložil do formátu *stp*. a následně se importoval do softwaru NX. Potom následovala tvorba programu určeného k obrábění. Jako hlavní operace programu sloužily:

- ✓ Cavity mill - slouží především k základnímu úběru třísky. Doporučuje se pro úběr materiálu velkých objemů a to v zápustkách, dutinách tvárnících apod.
- ✓ Rest milling – odstranění zbytkového materiálu po předchozích operacích
- ✓ Area mill – operace sloužící k frézování kapes v ploše
- ✓ Drilling – funkce umožňující vrtání otvorů kruhových tvarů

Před samotným obráběním byly stanoveny rozměry polotovaru, přídavky na obrábění a dokončení. Rozměry polotovaru byly stanoveny na 17 mm x 34 mm x 138 mm. Tudiž ve všech směrech se přidal 1 mm. Dále byl zvolen přídavek na hrubování 0,5 mm a přídavek na dokončení 0,25 mm.

14.1.1 Hrubování spodní části

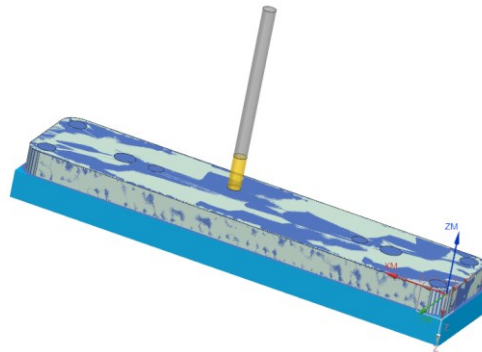
Po upnutí součásti do svěráku stroje následovala operace hrubování. Ta byla vytvořena příkazem *Cavity Mill*. Jako nástroj se použila válcová fréza o průměru 10 mm.



Obr. 55. Hrubování spodní části

14.1.2 Zbytkové obrábění

Operace *Rest milling* byla využita pro proces zbytkového obrábění. V této operaci se uplatnila válcová fréza o průměru 5 mm.

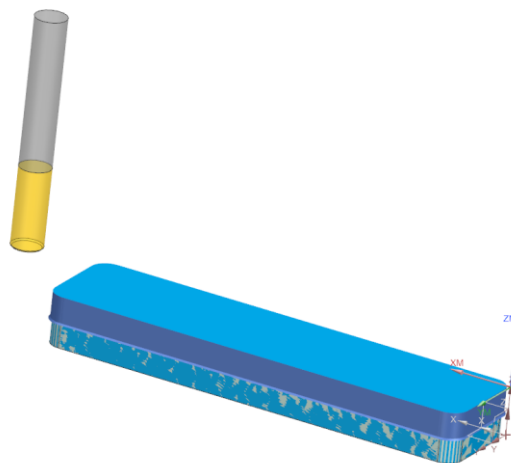


Obr. 56. Zbytkové obrábění předchozí operace

V dalším kroku došlo k otočení součásti o 180°

14.1.3 Hrubování vrchní části

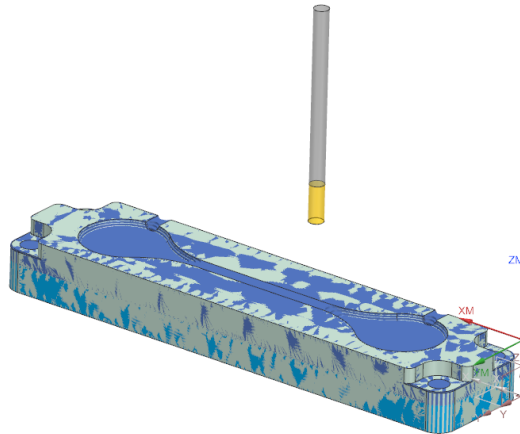
Po otočení se součást opět upevnila do svěráku obráběcího stroje. Tato operace byla vytvořena válcovou frézou o průměru 10 mm.



Obr. 57. Hrubování vrchní části

14.1.4 Zbytkové obrábění vrchní části

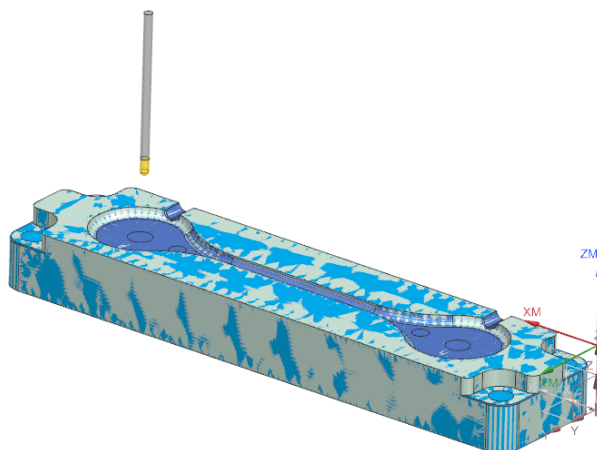
Stejně jako před otočením součásti došlo ke zbytkovému obrábění. Nástroj je stejný jako v přechodím nastavení, tedy válcová fréza o průměru 5 mm.



Obr. 58. Zbytkové obrábění vrchní části

14.1.5 Frézování dutiny

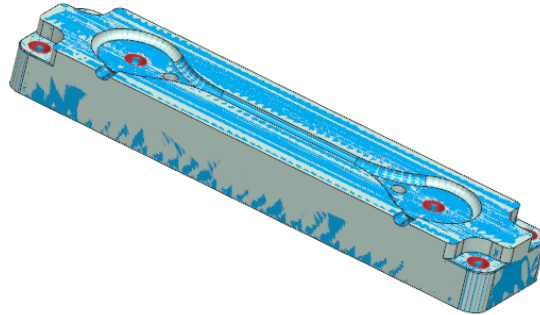
Samotná dutina (kapsa) se vyhotovila pomocí příkazu *Area Mill*. Použitým nástrojem byla kulová fréza o průměru 2 mm. Tím stejným nástrojem proběhlo dokončení rádiusů.



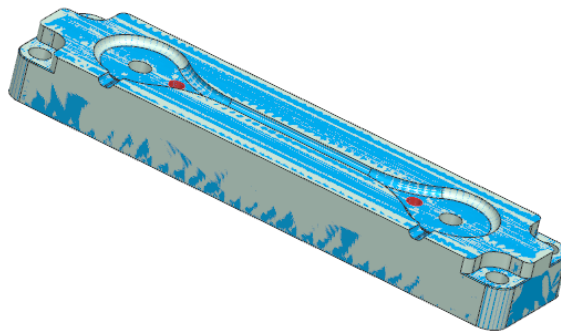
Obr. 59. Frézování dutiny

14.1.6 Vrtání děr

V poslední kroku došlo k vrtání děr. Nejprve byly vyrobeny díry o průměru 6 mm (*obr. 60*). Potom byly vyhotoveny díry o průměru 4 mm (*obr. 61*).



Obr. 60. Vrtání děr o průměru 5,5 mm

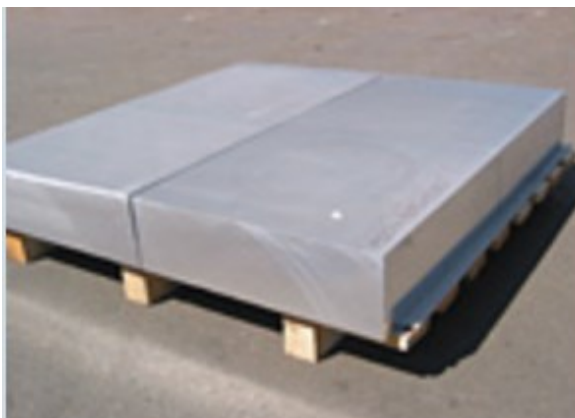


Obr. 61. Vrtání děr o průměru 3,8 mm

Seznam všech použitých operací a nástrojů společně s parametry obrábění je souhrnně zaznamenám v *tabulce 12. (kap. 14.3)*

14.2 Použitý materiál

K výrobě této součásti se použil materiál *EN AW 7022 AlZn5Mg3Cu*.



Obr. 62. Blok materiálu *EN AW 7022 AlZn5Mg3Cu* [53]

Jedná se o speciální slitinu hliníku, zinku, hořčíku a mědi. Je určena nejen pro výrobu forem, ale i pro základové desky střížných nástrojů nebo stavby jednoúčelových strojů. Vyznačuje se dobrou svařitelností, obrobiteľností a je vhodný k erozivnímu obrábění. Základní vlastnosti tohoto materiálu uvádí *tabulka č.11*.

Tab. 11. Základní vlastnosti materiálu *EN AW 7022 AlZn5Mg3Cu* [PŘÍLOHA 4]

Mez kluzu [MPa]	400-495
Pevnost v tahu [MPa]	490-555
Tažnost [%]	6-9
Tvrdość HBW (Brinell) [2,5/62,5]	165-170
Objemová hmotnosť [g/cm³]	2,76
Modul pružnosti [GPa]	72
Elektrická vodivost [m/Ω · mm²]	18-22
Koeficient tepelné roztažnosti [K⁻¹ · 10⁻⁶]	23,6
Tepelná vodivost [W/m · K]	120-150
Specifická tepelná kapacita [J/kg · K]	862

14.3 Použité nástroje

K výrobě součásti posloužily nástroje, které jsou vypsány v následující tabulce (tab12.). Použité nástroje jsou od výrobce SECO.

Tab. 12. Seznam použitých nástrojů a parametrů obrábění

Operace	Nástroj	Řezná rychlost [m/min]	Posuv/zub [mm/zub]
Hrubování spodní části	Válcová fréza ϕ 10 mm	500	0,08
Zbytkové obrábění spodní části	Válcová fréza ϕ 5 mm	580	0,032
Hrubování vrchní části	Válcová fréza ϕ 10 mm	500	0,08
Zbytkové obrábění vrchní části	Válcová fréza ϕ 5 mm	580	0,032
Frézování dutiny	Kulová fréza ϕ 2 mm	710	0,012
Vrtání děr o průměru	Šroubovité vrták ϕ 6 mm	335	0,24
Vrtání děr o průměru	Šroubovité vrták ϕ 4 mm	320	0,19

14.4 Čas jednotlivých operací

Následující tabulka pojednává o čase jednotlivých operací, který byly definovány v programu NX. Vyplývá z ní, že celkový čas procesu obrábění bude trvat necelých 18 minut.

Tab. 13. Parametry obrábění

Operace	Nástroj	Čas operace [hod : min : s]
Hrubování spodní části	Válcová fréza ϕ 10 mm	00:00:11
Zbytkové obrábění spodní části	Válcová fréza ϕ 5 mm	00:04:48
Hrubování vrchní části	Válcová fréza ϕ 10 mm	00:00:11
Zbytkové obrábění vrchní části	Válcová fréza ϕ 5 mm	00:09:07
Frézování dutiny	Kulová fréza ϕ 2 mm	00:01:53
Vrtání děr o průměru	Šroubovitý vrták ϕ 6 mm	00:00:09
Vrtání děr o průměru	Šroubovitý vrták ϕ 4 mm	00:00:04
		00:17:47

14.5 Zařízení pro výrobu

Kompletní výroba tvarové vložky proběhla na CNC frézce s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI DMU 50 (obr.63). Pro svůj provoz využívá pětiosé simultánní obrábění. Lože stroje jsou obsaženy z jednoho kusu. Pohon je realizován kuličkovými šrouby.

Měření dráhy probíhá ve všech osách. Technické parametry tohoto stroje jsou uvedeny v *tabulce.14.*



Obr. 63. CNC frézka s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI DMU 50

Tab. 14. Technické parametry stroje DMG MORI DMU 50

Maximální pojezd v ose X	650 mm
Maximální pojezd v ose Y	520 mm
Maximální pojezd v ose Z	475 mm
Maximální zatížení stolu	300 kg
Průměr stolu	630 mm
Maximální otáčky	15 000 min ⁻¹
Řízení a software	Siemens/Celos

15 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK TECHNOLOGIÍ VSTŘIKOVÁNÍ

Pro výrobu zkušebních tělísek vstřikováním, bylo hlavní si nejdříve vyrobít tvarové vložky, jejichž dutina odpovídá rozměru zkušebního tělíska. Tato výroba proběhla pomocí zvolených metod technologie 3D tisku. Konkrétně se to týkalo metod SLA, SLS a Polyjet (kap.13.).

15.1 Vstřikovací stroj

Ke vstřikování posloužil elektrický vstřikovací stroj *Arburg Allrounder 470 E 1000-290s* inovativní technologií pohonu s vřetenovými převody a servomotory vstřikovací stroj sloupové konstrukce *Arburg270S 400-100* (obr.64). Disponuje automatickou regulací uzavírací síly a zajišťuje stabilizaci procesu. Vyniká tím, že minimalizuje dobu instalace formy a údržby. Jeho technické parametry jsou uvedeny v *tabulce. 15*.



Obr. 64. Vstřikovací stroj *ArburgAllrounder 470 E 1000-290*

Tab. 15. Technické parametry stroje ArburgAllrounder 470 E 1000-290

Vzdálenost mezi sloupky	470 x 470 mm
Uzavírací síla	1000 kN
Rozměry upínací desky	637 x 637 mm
Max. kalkulovaný objem materiálu	144 cm ³

15.2 Proces

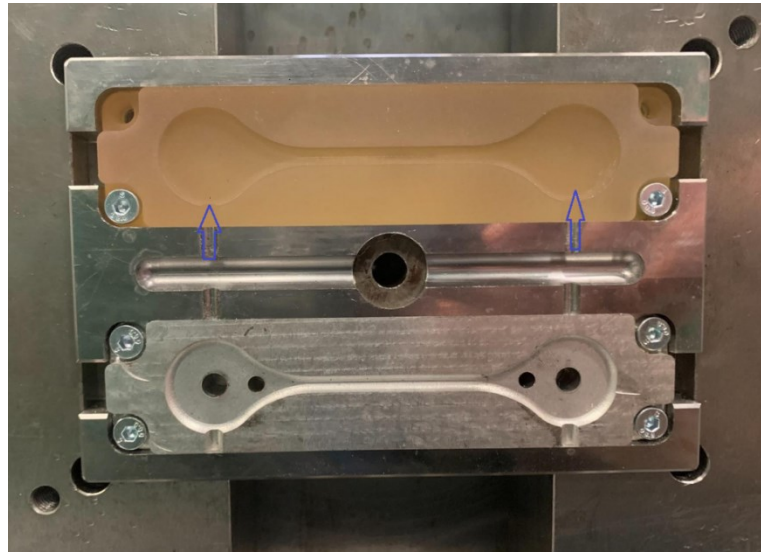
Tvarové vložky vyrobené díky 3D tisku se upevnily do rámu vstříkovací formy pomocí imbusových šroubů.



Obr. 65. Připevněné tvarové vložky do vstříkovací formy stroje

Do jedné z dutin vzorků se poté vstříknul polymer. Jednalo se o materiál HDPE, který se ještě smíchal s dřevěnou drtí. Konkrétní složení této směsi bylo 50% HDPE a 50% dřevěné drti. Dřevěná drť se použila proto, aby se zvýšil vliv studeného spoje na mechanické

vlastnosti. Druhý vzorek je zaslepený a otočený vtoky dolů. Vzorky kanálu byly plněny oběma kanály (materiál tekł z obou stran).



Obr. 66. Způsob plnění vzorku tvarové vložky

Veškeré technologické parametry vstřikování pro tvarové vložky zhotovených metodami SLA a Polyjet jsou zaznačeny v *tabulce.16*. Pro metodu SLS zůstaly všechny technologické parametry stejné kromě vstřikovacího tlaku a dotlaku (*tab.17*).

Tab. 16. Technologické parametry vstřikování do tvarových vložek vyrobených metodami SLA a Polyjet

MATERIÁL	HDPE + dřevěná drt'
TEPLOTA TAVENINY [°C]	185
TEPLOTA FORMY [°C]	45
VSTŘIKOVACÍ RYCHLOST [mm/s]	50
VELIKOST DOTLAKU [bar]	750
DOBA DOTLAKU [s]	10
VSTŘIKOVACÍ TLAK [bar]	850
DOBA CHLÁDNUTÍ [s]	120

Tab. 17. Technologické parametry vstřikování do tvarové vložky vyrobené metodou SLS

MATERIÁL	HDPE + dřevěná drť
TEPLOTA TAVENINY [°C]	185
TEPLOTA FORMY [°C]	45
VSTŘIKOVACÍ RYCHLOST [mm/s]	50
VELIKOST DOTLAKU [bar]	790
DOBA DOTLAKU [s]	10
VSTŘIKOVACÍ TLAK [bar]	920
DOBA CHLÁDNUTÍ [s]	120

15.2.1 Výsledný produkt

Díky technologii vstřikování se získal požadovaný výsledný produkt ve formě zkušebního tělíska (obr.67), na který byl využit materiál HDPE smíchaný společně s dřevěnou drtí. Následně se toto těleso podrobí tahové zkoušce.

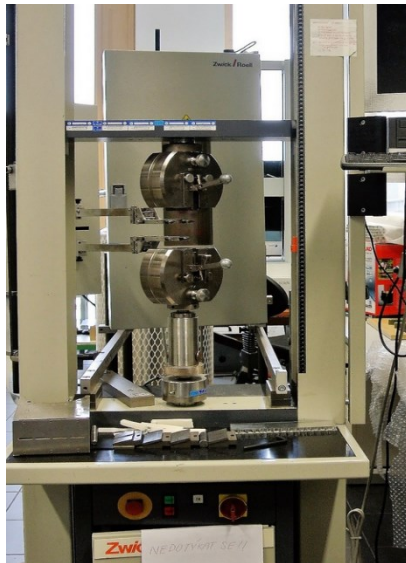


Obr. 67. Výsledný produkt zkušebního tělíska

16 TAHOVÁ ZKOUŠKA

16.1.1 Použité zařízení

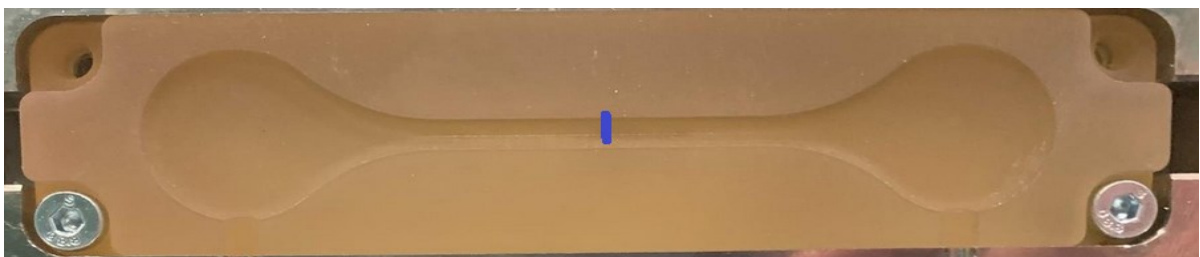
Tahová zkouška se zrealizovala na trhacím přístroji *ZwickRoell 1456* nacházející se v laboratořích UTB. Je určený pro zatížení těles v tahu, tlaku a v ohybu. V průběhu tahové zkoušky byla nastavena rychlost odtahových čelistí 20 mm/min.



Obr. 68. Trhací přístroj ZwickRoell 1456

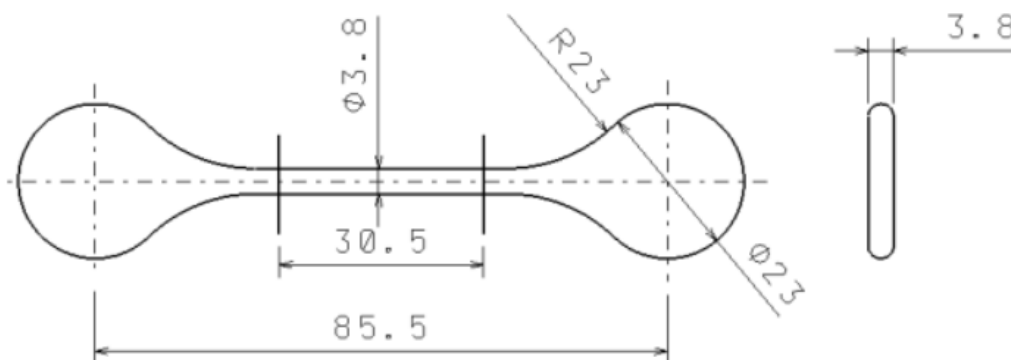
16.1.2 Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky

Jak již bylo zmíněno v *kap.15.2.* vstříknutý materiál se plnil oběma kanály – vyplňuje dutinu tvarové vložky z obou stran. Z tohoto důvodu vzniká ve finálním produktu studený spoj. Ve většině takových případů se studený spoj nachází ve středu produktu (označený modře). U 3D tištěných vložek vykazuje studený spoj zvýšenou pevnost. Je to zapříčiněno tím, že vložky vyrobené danými technologiemi vykazují nízkou tepelnou vodivost.



Obr. 69. Vznik studeného spoje

Vyhotovená zkušební tělíska byla namáhána tahovou silou. Rozměry jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obr. 70. Rozměry zkušebního tělíska

V tabulce č.18. jsou uvedeny naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro jednotlivé typy tvarových vložek.

Tab. 18. Naměřené hodnoty tahové zkoušky

Typ tvarové vložky	Počet měření pevnosti v tahu σ [MPa]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Polyjet	7,72	8,12	9,24	7,93	8,88	9,59	8,16	9,31	7,65	8,12
SLA- FORM HT	8,43	9,23	9,41	9,05	7,98	8,63	8,97	9,02	8,50	8,46
SLA- FORM STD	8,34	8,72	7,05	9,11						
SLS	6,97	7,86	9,01	8,05	8,28	7,94	7,57	7,93	8,59	7,45
EN AW 7022	7,22	7,99	8,32	7,56	7,06	8,09	8,24	7,60	7,37	7,12

Z tabulky je patrné, že tahové tělíska z materiálu Form STD (epoxidová pryskyřice) tisknutá metodou SLA praskla již po čtyřech pokusech.

Tab. 19. Vypočtené hodnoty tahové zkoušky

	Pevnost v tahu	Síla při přetržení	Relativní prodloužení
Typ tvarové vložky	σ [MPa]	F_{\max} [N]	ε [%]
SLA-FORM HT	8,77	99,46	2,51
POLYJET	8,47	96,06	2,42
SLA-FORM STD	8,31	94,24	2,37
SLS	7,97	90,39	2,28
EN AW 7022	7,66	86,87	2,19

Jelikož všechna zkušební tělíska, která byla vstříknuta do jednotlivých tvarových vložek, jsou z materiálu HDPE, byly zjištěny a vypočteny tyto hodnoty:

- ✓ Modul pružnosti HDPE v tahu **E = 350 MPa**
- ✓ Plocha průřezu **S = 11,34 mm²**

Dle provedených výpočtů (*tab.19.*) lze tedy usoudit, že zkušební tělíska připadající pro tvarovou vložku vyrobená technologií *SLA –FORM HT* vykazují největší pevnost v tahu. Také vyniká největší vynaloženou tahovou silou a poměrným prodloužením. Naopak zkušební tělíska odpovídající tvarové vložce z materiálu *EN AW 7022* jsou charakteristická nejnižší pevností v tahu, ale i tahovou silou a poměrným prodloužením.

Tento výsledek je způsoben tepelnou vodivostí použitých materiálů, do kterých se vstříkovalo. Například když si porovnáme materiál *FORM HT* (pryskyřice) a *EN AW 7022* (slitina hliníku), tak první zmiňovaný materiál má nižší tepelnou vodivost. To se projeví tím, že materiál v dutině tvarové vložky z *FORM HT* bude chladnout velmi pomalu. V důsledku tohoto jevu budeme mít vyšší teplotu tuhnutího materiálu a dojde k prodloužení času propletení makromolekul. Díky tomu se pevnost studeného spoje vždy zvýší. Proto se *EN AW 7022* nachází v tabulce až na posledním místě co se týče pevnosti studeného spoje.

Z toho plyne, že vstříknutý polymer chladne pomalu, ale má vyšší teplotu, čímž se prodlouží čas propletení makromolekulárních řetězců.

17 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V ekonomickém zhodnocení proběhl výpočet celkových nákladů na tisk. Dle softwaru byla stanovena hmotnost jednotlivých tvarových vložek a doba, za kterou proběhlo jejich vyhotovení. Dále byla zjištěna cena tisku za hodinu pro jednotlivé metody. Vše je shrnuto v následující tabulce.

Tab. 20. Cena materiálu pro jednotlivé metody

	Hmotnost [g]	Doba tisku [h]	Cena tisku za hodinu [Kč]	Celková cena [Kč]
SLA – Form HT	37,78	30,3	180	5 454
SLA – Form STD	37,65	24,5	180	4 410
SLS	37,43	29	220	6 380
POLYJET	36,9	26,5	370	9 805

Z tabulky vyplývá, že nejvyšší cenové náklady na celkovou cenu materiálu jsou kladeny na metodu POLYJET. Tato technologie má totiž největší náklady ceny za materiál. Takže lze usoudit, že celková doba tisku nemá zásadní vliv na celkovou cenu tisku jedné součásti. V porovnání například s metodou SLA – FormHT, je doba tisku u metody Polyjet zhruba o čtyři hodiny kratší, ale celková cena je téměř dvojnásobně vyšší.

ZÁVĚR

V této diplomové práci bylo za úkol navrhnutí vlastní testovací geometrie a následné vyrobení aditivními technologiemi. Jako testovací geometrií byly dle vlastního uvážení navrženy, zkonstruovány a vyrobeny tvarové vložky z odlišných materiálů.

Nejprve se navrhla testovací geometrie tvarových vložek v 3D CAD softwaru. Potom se navržené modely importovaly do příslušných softwarů, ve kterých se nastavily podmínky pro vybrané metody 3D tisku. Konkrétně se jednalo o metody SLA, SLS a Polyjet. Pro metodu SLA byly jako materiály použity pryskyřice (vysokoteplotní epoxidová a standardní STD). U metody SLS se tisknulo z materiálu Polyamid a metoda Polyjet využila jako materiál pryskyřici značenou *Vero WhitePlus RGD 835*.

Kromě 3D tisku se jedna tvarová vložka vyhotovila obráběním na CNC frézce. Posloužil nám k tomu materiál *EN AW 7022AlZn5Mg3C*. Programování součásti se uskutečnilo v softwaru NX.

V další části diplomové práce se představuje technologie vstřikování. Předchozími metodami vyrobené tvarové vložky se upnuly do rámu vstřikovacího stroje. Poté došlo k vstříknutí materiálu do dutin jednotlivých tvarových vložek. Vstřikovaný materiál byl zvolen HDPE smíchaný s dřevěnou drtí. Jakmile materiál ztuhl, proběhlo jeho sejmutí z formy. Tímto procesem se docílilo výsledných produktů ve formě zkušebních tělísek.

Vyrobená zkušební tělíška se v dalším kroku podrobila tahové zkoušce. Vzhledem ke tvaru dutiny tvarové vložky se zkoumala pevnost studeného spoje pro jednotlivé materiály. Tento negativní jev byl způsoben technologií vstřikování. Ze získaných výsledků se zjistilo, že největší pevnost studeného spoje vykazuje tvarová vložka z materiálu *Form HT* vyrobená technologií SLA. Naopak nejnižší pevnost připadá tvarové vložce z materiálu *EN AW 7022AlZn5Mg3C*, která se obráběla na CNC stroji.

Na závěr se provedlo stručné ekonomické zhodnocení tištěných součástí. Zaznamenaly se jejich konkrétní časy a byla určena cena za tištěný materiál. Následně se vypočetly celkové ceny. Jako nejdražší se jeví metoda Polyjet, zatímco nejmenší cenové náklady připadají technologii SLA zastoupená materiálem *Form STD*.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAURYA, NagendraKumar, Vikas RASTOGI a Pushendra SINGH. Anoverviewofmechanicalproperties and formerrorfor rapid prototyping. CIRP JournalofManufacturing Science and Technology. 2020, 29, 53-70. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2020.02.003
- [2] Evekter [online]. Brno: © 1999 - 2020Evekter [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.evekter.cz/cz/rapid-prototyping>
- [3] Whaat.cz. Wwww.whaat.cz [online]. Klatovy, 2020, 15.1.2020 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.whaat.cz/xyz-3d-tiskarna-xyz-da-vinci-2-0a-dual-extruder-abs-pla-pva>
- [4] Aditivní technologie - metoda Rapid prototyping. VUT BRNO [online]. Brno, 2011 [cit.2020-10-14].Dostupnéz:http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [5] VUJO s.r.o. [online]. Sokolov, 2017 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://3dtisk.vujo.cz/historie-3d-tisku/>
- [6] GURR, M. a R. MÜLHAUPT. Rapid Prototyping. Polymer Science: A Comprehensive Reference. Elsevier, 2012, 2012,, 77-99. ISBN 9780080878621. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-53349-4.00202-8
- [7] Rapid prototyping, reverzní inženýrství a 3D tisk. <Http://jointlab.upol.cz/> [online]. Olomouc,2008 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <http://jointlab.upol.cz/schovanek/RapidPROTOTYPINGpodklad-1.pdf>
- [8] COSMI, Francesca a Alberto DAL MASO. A mechanicalcharacterizationof SLA 3D-printed specimensforlow-budget applications. MaterialsToday: Proceedings. 2020. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.04.602
- [9] 3D SYSTEMS [online]. Copyright © 2020 3D Systems [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>
- [10] MOUZAKIS, Dionysios E. Advanced Technologies in Manufacturing3D-Layered Structuresfor Defense and Aerospace. Lamination - Theory and Application. InTech, 2018, 2018-03-21. ISBN 978-953-51-3925-6. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.74331

- [11] ZHANG, X., B. ZHOU, Y. ZENG a P. GU. Model layout optimization for solid ground curing rapid prototyping processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2002, 18(1), 41-51. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/S0736-5845(01)00022-9
- [12] Hisour.com [online]. [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.hisour.com/solid-ground-curing-40617/>
- [13] 3D Scanning Service Engineering [online]. © 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.sseengineering.net/canon-announces-development-of-proprietary-ceramic-material-for-3d-printers-201812/>
- [14] FINA, Fabrizio, Alvaro GOYANES, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *International Journal of Pharmaceutics*. 2017, 529(1-2), 285-293. ISSN 03785173. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2017.06.082
- [15] XU, Yuanyuan, Xiaoyue WU, Xiao GUO, Bin KONG, Min ZHANG, Xiang QIAN, Shengli MI a Wei SUN. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*. 2017, 17(5). ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s17051166
- [16] 3D PEOPLE [online]. London, 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.3dpeople.uk/sls-3d-printing>
- [17] SOLOMON, I. John, P. SEVVEL a J. GUNASEKARAN. A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*. 2020. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.05.484
- [18] Custompartnet.com [online]. Copyright © 2020 CustomPartNet [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [19] Materialise [online]. 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/fused-deposition-modeling>
- [20] CHIU, Y.Y., Y.S. LIAO a C.C. HOU. Automatic fabrication for bridged laminated object manufacturing (LOM) process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 140(1-3), 179-184. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(03)00710-6

- [21] 3DPrinting and Product Design [online]. COPYRIGHT 2019 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://3d-printing-expert.com/different-types-of-3d-printing-for-3d-printers/>
- [22] Industrialautomation [online]. © 2019 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.industrialautomationindia.in/articleitm/10835/3D-Printing-93-Cutting-Edge-Revolutionary-Manufacturing-Process/articles>
- [23] PIRES, Felipe Q., Ihatanderson ALVES-SILVA, Ludmila A.G. PINHO, Juliano A. CHAKER, Livia L. SA-BARRETO, Guilherme M. GELFUSO, Tais GRATIERI a Marcilio CUNHA-FILHO. Predictivemodelsof FDM 3Dprintingusingexperimental design based on pharmaceuticalrequirementsfor tablet production. International JournalofPharmaceutics [online]. 2020, 588 [cit. 2020-12-01]. ISSN 03785173. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2020.119728
- [24] Vývoj Rapid Prototypingu. CAD.CZ [online]. © 2009 - 2020 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/grafika-design/81-grafika-design/8568-vyvoj-rapid-prototypingu.html>
- [25] TheJournalofProstheticDentistry [online]. 2020 [cit. 2020-12-01]. ISSN 00223913. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002239132030158X>
- [26] 3D-tisk.cz – vše o 3D tisku a aditivní výrobě © 2019 Vydavatelství Nová média, s. r. o. [online]. [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stolni-3d-tisk-se-vraci-do-doby-vicebarevne-a-vice-materialove/>
- [27] KLIMYUK, Daniil, Mikhail SEREZHKIN a Andrey PLOKHIKH. Applicationof3Dprinting in sheet metal forming. MaterialsToday: Proceedings [online]. 2020 [cit. 2020-12-01]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.155
- [28] FutLab [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://futlab.cc/3d-tisk-kovu/>
- [29] SREEKALA, P., M. SURESH a S. LAKSHMI PRIYADARSINI. 3D organ printing: Review on operationalchallenges and constraints. MaterialsToday: Proceedings [online]. 2020 [cit. 2020-12-01]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.349
- [30] MCAE [online]. Kuřim, 2020 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/sluzby/3d-tisk-a-rychla-vyroba-prototypu/>

- [31] HAN, Daehoon, Chen YANG, Nicholas X. FANG a Howon LEE. AdditiveManufacturing [online]. 2019, 27, 606-615 [cit. 2020-12-01]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.03.031
- [32] 3DPrinting Media Network [online]. RushdenWay, Farnham, Surrey, 2017 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/aceo-display-breakthrough-multimaterial-silicone-3d-printer-fomrnext/>
- [33] 3D Print.com [online]. 2016 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://3dprint.com/150853/multi-material-prusa-upgrade/>
- [34] Protechasia.com [online]. Copyright © 2018 PrototechAsia.com [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <https://prototechasia.com/en/different-software-applications-used-rapid-prototyping>
- [35] MoldMaking Technology [online]. © 2020 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/worldwide-review-and-analysis-of-additive-fabrication>
- [36] ALL3DP. ALL3DP.COM [online]. 2020 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printed-injection-mold/>
- [37] COMETPE. COMETPE.COM [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <http://www.cometpe.com/products/vision-systems/vision-system/>
- [38] HARPLAYERS. sharplayers.cz [online]. © 2021 Sharplayers s.r.o. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://sharplayers.cz/3d-tisk-versus-vstrikovani-jaky-zpusob-vyroby-ma-cenu/>
- [39] AIT connect and discover: mri.ait.ie [online]. 2021 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://mri.ait.ie/capabilities/additive-manufacturing/>
- [40] 3D MODEL. *3dmodel.com* [online]. 2017 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://www.3dmodel.com.tr/en/silicone-molding/>
- [41] 3D HUBS. *3dhubs.com* [online]. 2021 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/blog/3d-hubs-rapid-tooling/>
- [42] Statické zkoušky krátkodobé, [online], [cit. 2014-02-15], Dostupné z [www.:http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)

- [43] Techportal *www.techportal.cz*. [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/studene-spoje-a-tokove-cary-pri-vstrikovani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxM96bv-13jpY/>
- [44] MMSPEKTRUM. *www.mmspektru.com* [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-1-dil-priciny-vzniku-vad-a-studene-spoje>
- [45] Autodesk. *Autodesk.com* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?term=1-YEAR&support=null>
- [46] FORMLABS. *Formlabs.com* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/software/>
- [47] SINTERIT. *Sinterit.com* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.sinterit.com/sinterit-studio-2019/>
- [48] NX 12 [online], 2017. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/release_notes/#uid:index
- [49] FORMLABS. *Formlabs.com* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/materials/engineering/#high-temp-resin>
- [50] SINTERIT. *Sinterit.com* [online]. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.sinterit.com/pa12-smooth/>
- [51] Stratasys. *www.Stratasys.com* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://support.stratasys.com/en/materials/polyjet/vero-family>
- [52] Sinterit. *Sinterit.com* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sinterit.com/shop/products/sinterit-lisa>
- [52] Valsteel. *www.valsteel.eu* [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://www.valsteel.eu/dural.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

°	Stupeň
°C	Stupeň Celsia
µm	Mikrometr
ABS	Akrylonitril – Butadien - Styren
CAD	ComputerAided Design
CNC	ComputerNumericControl
E	Modul pružnosti
FDM	FusedDeposition Modeling
GPa	Gigapascal
HDT	Teplota Tvarové Stálosti
hod	hodina
Kč	Koruna česká
L	délka zkušebního vzorku
LOM	LaminatedObjectManufacture
mm	Milimetr
MPa	Megapascal
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PES	Polyester
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát
PLA	Polylaktid Acid
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid

RP	Rapid Prototyping
SF	Freeformfabrication
SGC	Solid GroundCuring
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard TriangulationLanguage
TPE	Termoplastické Polymery
UV	Ultraviolet – ultrafialové záření
3D	Trojrozměrný Prostor

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Výroba součásti aditivní technologií (3D tiskem)[1]</i>	12
<i>Obr. 2. Model 3D tiskárny [3]</i>	13
<i>Obr. 3. Vývoj a proces vzniku reálné součásti [4]</i>	14
<i>Obr. 4. Model první 3D tiskárny typu SLA – 1, zhotovená firmou 3D Systems [5]</i>	15
<i>Obr. 5. Postup RP od CAD modelu až po finalizaci [7]</i>	18
<i>Obr. 6. Princip metody SLA [7]</i>	21
<i>Obr. 7. Typické díly vyrobené pomocí metody SLA [9]</i>	21
<i>Obr. 8. Princip metody SGC [12]</i>	23
<i>Obr. 9. Typické díly vyrobené pomocí metody SGC [13]</i>	23
<i>Obr. 10. Princip metody SLS [15]</i>	25
<i>Obr. 11. Typické díly vyrobené pomocí metody SLS [16]</i>	25
<i>Obr. 12. Princip metody FDM [18]</i>	27
<i>Obr. 13. Typické díly vyrobené pomocí metody FDM [19]</i>	28
<i>Obr. 14. Princip metody LOM [21]</i>	29
<i>Obr. 15. Typické díly vyrobené pomocí metody LOM[22]</i>	29
<i>Obr. 16. Model vyrobený pomocí vícebarevného tisku[26]</i>	32
<i>Obr. 17. Model vyrobený pomocí 3D tisku kovů [28]</i>	33
<i>Obr. 18. 3D tisk orgánů [30]</i>	34
<i>Obr. 19. Typický produkt vícemateriálového tisku [32]</i>	35
<i>Obr. 20. Ukázka procesu vícemateriálového tisku [33]</i>	35
<i>Obr. 21. Oblasti použití Rapid Technology [35]</i>	36
<i>Obr. 22. Proces vstřikování plastů [37]</i>	37
<i>Obr. 23. Cenové porovnání 3D tisku a vstřikování [38]</i>	38
<i>Obr. 24. Proces 3D tisku vstřikovací formy [39]</i>	39
<i>Obr. 25. Příklady 3D tištěných forem [40]</i>	41
<i>Obr. 26. Forma vytištěná technologií SLA[41]</i>	42
<i>Obr. 27. Pracovní diagram tahové zkoušky[42]</i>	43
<i>Obr. 28. Ukázka vzniku studeného spoje v praxi [44]</i>	44
<i>Obr. 29. Použitý software</i>	47
<i>Obr. 30. Vytvoření základních rozměrů testovací geometrie</i>	49
<i>Obr. 31. Vytvoření dutiny</i>	50
<i>Obr. 32. Vytvoření děr pro upnutí vložky</i>	50
<i>Obr. 33. Vytvoření děr pro upnutí vložky</i>	51
<i>Obr. 34. Vytvoření děr pro vyhadzovače</i>	51

<i>Obr. 35. Vytvoření děr pro vyhazovače</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36. Vytvoření kanálu do dutiny.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 37. Sražení hran a tvorba zaoblení</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 38. 3D model druhé testovací geometrie</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 39. Navržená první testovací geometrie se základními rozměry</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 40. Navržená druhá testovací geometrie se základními rozměry.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 41. Ukázka vysokoteplotní pryskyřice [49].</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 42. Polyamid PA12 Smooth v1[51]</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43. VeroWhitePlus RGD 835.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44. Uživatelské prostředí softwaru PreFormFormlabs – STD Black</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 45. Uživatelské prostředí softwaru PreFormFormlabs – HT.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 46. Tiskárna Formlabs Form 2</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 47. Tisk technologií SLA.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48. Tvarové vložky vytisknuté pomocí SLA</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 49. Uživatelské prostředí softwaru Sinterit Studio 2019.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 50. Zařízení pro 3D tisk metodou SLS [52].....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 51. Prášek polyamidu připravený k tisku</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 52. Tvarová vložka vytisknutá pomocí SLS</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 53. 3D tiskárna Objet Eden 250</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 54. Tvarová vložka vytisknutá pomocí Polyjet</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 55. Hrubování spodní části</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 56. Zbytkové obrábění předchozí operace</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 57. Hrubování vrchní části</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 58. Zbytkové obrábění vrchní části</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 59. Frézování dutiny.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 60. Vrtání děr o průměru 5,5 mm</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 61. Vrtání děr o průměru 3,8 mm</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 62. Blok materiálu EN AW 7022 AlZn5Mg3Cu[53]</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 63. CNC frézka s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI DMU 50</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 64. Vstříkovací stroj ArburgAllrounder 470 E 1000-290.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 65. Připevněné tvarové vložky.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 66. Způsob plnění vzorku tvarové vložky.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 67. Výsledný produkt</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 68. Trhací přístroj ZwickRoell 1456</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 69. Vznik studeného spoje</i>	<i>80</i>

Obr. 70. Rozměry zkušebního tělíska81

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Přehled nejrozšířenějších metod v oblasti Rapid Prototyping [7]</i>	19
<i>Tab. 2. Přehled metod 3D tisku a jejich vhodné typy stavebních materiálů [23].</i>	30
<i>Tab. 3. Tepelné vlastnosti vysokoteplotní pryskyřice HIGH TEMP RISIN[PŘÍLOHA1]</i>	57
<i>Tab. 4. Mechanické vlastnosti vysokoteplotní pryskyřice HIGH TEMP RISIN[PŘÍLOHA1]</i>	57
<i>Tab. 5. Mechanické vlastnosti standardní pryskyřice STD[PŘÍLOHA2]</i>	58
<i>Tab. 6. Obecné vlastnosti[PŘÍLOHA 2]</i>	59
<i>Tab. 7. Mechanické vlastnosti[PŘÍLOHA 2]</i>	59
<i>Tab. 8. Tepelné vlastnosti[PŘÍLOHA 2]</i>	60
<i>Tab. 9. Základní vlastnosti materiálu High-Temperature RGD525[PŘÍLOHA 3]</i>	60
<i>Tab. 10. Technické parametry tiskárny FormlabsForm 2</i>	63
<i>Tab. 11. Základní vlastnosti materiálu EN AW 7022AlZn5Mg3Cu [PŘÍLOHA 4]</i>	72
<i>Tab. 12. Seznam použitých nástrojů a parametrů obrábění</i>	73
<i>Tab. 13. Parametry obrábění</i>	74
<i>Tab. 14. Technické parametry stroje DMG MORI DMU 50</i>	75
<i>Tab. 15. Technické parametry stroje ArburgAllrounder 470 E 1000-290</i>	77
<i>Tab. 16. Technologické parametry vstřikování do</i>	78
<i>Tab. 17. Technologické parametry vstřikování do tvarové vložky</i>	79
<i>Tab. 18. Naměřené hodnoty tahové zkoušky</i>	81
<i>Tab. 19. Vypočtené hodnoty tahové zkoušky</i>	82
<i>Tab. 20. Cena materiálu pro jednotlivé metody</i>	83

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI Vysokoteplotní pryskyřice (HIGH TEMP RISIN)

Příloha PII Standardní pryskyřice (Standard Black)

Příloha PII Polyamid PA12 SMOTH V1

Příloha PIII VeroWhitePlus RGD 835

Příloha PIV EN AW 7022 AlZn5Mg3Cu

CD obsahující:

- Modely navržených součástí
- Obrobení součástí v NX
- Použitý seznam nástrojů v PDF

PŘÍLOHA PI: VYSOKOTEPLTNÍ PRYSKYŘICE (HIGH TEMP RISIN)

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 

Material Properties Data Metric

	METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴	
Thermal Properties				
Heat Deflection Temp. @ 1.8 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.

PŘÍLOHA PII - STANDARDNÍ PRYSKYŘICE (STANDARD BLACK)

Material Properties Data

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12 %	6.2 %	12 %	6.2 %	ASTM D 638-10
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
Impact¹ Properties					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07

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

²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, without additional treatments.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings and post-cured with 1.25 mW/cm² of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

PŘÍLOHA PIII: POLYAMID PA12 SMOOTH V1



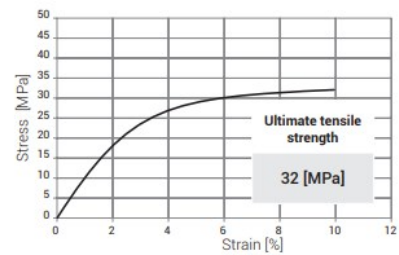
PA12 Smooth ^{v2}

High surface quality

Good quality to price ratio | Excellent surface quality and high level of recreated details | High chemical resistance



Tensile testing



General information	Method
Material type	Nylon 12
Granulation	18 - 90 [µm]
Color	Navy Grey
Material refreshing ratio ¹	22 [%]
Compatible with ²	Lisa & Lisa Pro

Parameters		
Tensile Strength	32 [MPa]	PN-EN ISO 527-2:2012
Elongation at Break	10 [%]	PN-EN ISO 527-2:2012
Impact resistance (Charpy test / unnotched)	16 [KJ/m ²]	PN-EN ISO 179-1/1eU:2010
Shore hardness in type D scale	74	PN-EN ISO 868:2005

Thermal properties		
Melting point	185 [°C]	Internal procedure
Printout density	0.92 [g/cm ³]	PN-EN ISO 845:2010

Applications
Rapid prototyping, detailed objects, functional parts of highest quality, low volume production of low stress parts, working mechanisms.

Functions
High details, smooth surface, high chemical resistance, regular mechanical properties.

Charpy U- and V-notched impact testing

Nº	notch	KJ/m ²
1.	U	5.23
2.	V	3.28

Charpy impact test results for specimens tested using pendulum of maximum energy of 50 [J], weight of 6.8 [kg] and length of 380 [mm].

Surface roughness

Roughness parameter	side surface	top surface
Ra	9.680 [µm]	6.470 [µm]
Rz	54.184 [µm]	31.633 [µm]

Roughness of test specimens surfaces printed with layer thickness of 100 [µm].

¹ Material refreshing ratio - percent of Fresh powder which has to be mixed with Used (unsintered) powder - to be reused during next print.

² Available as part of the appropriate profile purchased.

Information provided within this document are average values for reference and comparison only. Parameters presented in this specification are subject to change. Final part properties may vary based on printed part design and print orientation.

ŘÍLOHA PIV: *VEROWHITEPLUS RGD 835*



VeroWhitePlus™ (RGD835)

RIGID OPAQUE MATERIAL SIMULATING STANDARD PLASTICS

	ASTM	UNITS	METRIC	UNITS	IMPERIAL
Tensile Strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation at Break	D-638-05	%	10-25	%	10-25
Modulus of Elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-465,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5
Tg	DMA, E»	°C	52-54	°F	126-129
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized Density	ASTM D792	g/cm3	1.17-1.18		
Ash Content	USP281	%	0.23-0.26	%	0.23-0.26

PŘÍLOHA PV: EN AW 7022



Válcované desky na výrobu forem

CERTAL®

TECHNICKÝ LIST

CERTAL®

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 7022 [AlZn5Mg3Cu], speciální typ
Typ slitiny	vytvrditelná
Povrch	T651, uvolněný
Stav materiálu	válcovaný povrch

Mechanické vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Mez kluzu R _{0,2}	[MPa]	400 - 495
Pevnost v tahu R _m	[MPa]	490 - 555
Tažnost A ₅₀	[%]	6 - 9
Tvrdość HBW	[2,5/62,5]	165 - 170

Fyzikální vlastnosti ²⁾		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm ³]	2,76
Modul pružnosti	[GPa]	72
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm ²]	18 - 22
Koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,6
Tepelná vodivost	[W/m · K]	120 - 150
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	862

Technologické vlastnosti ²⁾		
Tvarová stálost/Vnitřní prnutí		2 - 3
Obrobitelnost		1
Vhodnost k erozivnímu obrábění		1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)		6 / 6 / 6 / 2 / 3
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětří / SpRK)		5 / 5 / 4
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) ³⁾		90 / 120
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) ⁴⁾		3 / 6 / 2
Leštitelnost		1
Vhodnost k leptání struktur		1 - 2
Kontakt s potravinami (podle EN 602)		ne

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] ⁵⁾	Tloušťka [mm]	Délka & Šířka [mm]
8 - 140	gem. EN 485-3	gem. EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte			DIN ISO 2768-1m

Dodávané formáty		
Formáty [mm]	1.520 × 3.020	u tlouštěk od 8 - 100 mm
	1.400 × 3.020	u tlouštěk od 110 mm
	1.200 × 3.020	u tlouštěk od 120 mm
	1020 × 3020	u tlouštěk od 130 mm
	950 × 3.020	u tlouštěk od 140 mm
Tloušťky na skladě	8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
	60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140	

Další tloušťky podle poptávky!

Datum: 12.07.2016

- 1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.
- 2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný).
- 3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.
- 4) Výlučně technická znodizace. Neposkytujeme žádnou záruku na barevný vzhled/řešení.
- 5) Tolerance rovinnosti se měří výlučně na měřících stolech a s použitím ocelového pravítka.

CERTAL® je registrovaná obchodní značka firmy CONSTELLUM Valais SA