



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



TESTOVÁNÍ OBROBITELNOSTI DÍLŮ VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ RAPID PROTOTYPING

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Jan Fultner**
Vedoucí práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Fultner**
Osobní číslo: **S15000244**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Testování obrobitelnosti dílů vyrobených technologií Rapid Prototyping**
Zadávatel katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je najít vhodné technologické podmínky pro následné obrábění dílů vyrobených technologií Rapid Prototyping. Zejména se jedná o obrábění v nepříznivých podmínkách např. přerušovaný řez, tenká žebra apod.

Body vypracování:

1. Úvod, seznámte se s technologiemi RP dostupnými na KVS a CNC stroji pro následné obrábění.
2. Navrhněte testovací součást s problematickými tvary pro obrábění (tenká žebra, drážky apod.). Tato součást bude vyrobena z různých materiálů pomocí technologií RP.
3. Navrhněte postup testování následného obrábění. Provedte přípravu NC programů pro obrábění v CAD/CAM systému EdgeCAM pro vhodný CNC obráběcí stroj v laboratořích katedry.
4. Provedte praktické testování obráběním vytištěných dílů za různých podmínek.
5. Porovnejte a vyhodnoťte provedené experimenty.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 35 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

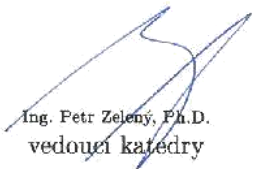
- [1] **YAMAZAKI MAZAK CORPORATION. *Integrex IV*. Japan: Yamazaki Mazak corp., 2005.**
[2] **VALIŠ, L. *Návod na obsluhu a programování řídicího systému soustruhu EMCO 120P*. Brno: IPM, 1992.**
[3] **KELLER, P. *Programování a řízení CNC strojů: Prezentace přednášek, 2.část*. Liberec: TU v Liberci, 2005.**
[4] **STRATASYS LTD. *Connex1 ? 3D Print Multi-Material Parts*. [online]. 2015 [cit. 2015-10-08].
Dostupné z:
<http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/connex1-systems>**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Keller, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. února 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 17.2016

Podpis: 

Bakalářská práce

Téma: **TESTOVÁNÍ OBROBITELNOSTI DÍLŮ VYROBENÝCH TECHNOLOGIÍ RAPID PROTOTYPING**

Anotace:

Cílem bakalářské práce bylo nastavení technologických podmínek pro soustružení výrobků z materiálů ABS Fotopolymer a VeroWhitePlus. Tato bakalářská práce byla vyhotovena na základě požadavku katedry výrobních systémů, která si nechala vytisknout x výrobků technologií Polyjet Matrix z materiálů ABS Fotopolymer a VeroWhitePlus. Při tomto procesu došlo k lidské chybě a katedra následně zjistila, že do vytisknutých kusů je nutné vysoustružit otvor. Jelikož pro tuto činnost nebyly známy technologické podmínky, všechny výrobky byly zničeny. V této bakalářské práci se podařilo definovat technologické podmínky nutné pro správné soustružení výrobků z materiálů ABS Fotopolymer a VeroWhitePlus.

Klíčová slova: Rapid Prototyping, Polyjet Matrix, Obrobitelnost

Theme: **THE TESTING OF THE MASHINABILITY FOR THE PARTS PRODUCED BY THE TECHNOLOGY RAPID PROTOTYPING**

Annotation:

The goal of this bachelor thesis was to define the technological conditions for the turning of products made of materials called ABS Fotopolymer and VeroWhitePlus. This bachelor thesis was written because of the requirement of the Department of Production Systems that needed to print out x products made of materials ABS Fotopolymer and VeroWhitePlus by means of the technology Polyjet Matrix. However, the human mistake occurred during this process and the Department of Production Systems found out that the hole had to be additionally turned into all printed parts. Because of missing technological conditions, all products had to be scrapped. This bachelor thesis managed to define the right technological conditions necessary for the turning of products made of materials ABS Fotopolymer and VeroWhitePlus.

key words:: Rapid Prototyping, Polyjet Matrix, Mashinability

1 Úvod	7
2 Vznik modelu.....	8
3 Rapid prototyping	9
3.1 Využití technologie Rapid Prototyping.....	10
3.2 Výrobky vyrobených technologií Rapid Prototyping.....	10
3.3 Možnosti využití Rapid Prototyping do budoucna:	11
3.4 Rozdělení Rapid Prototyping dle technologie na KSA:.....	13
4 Polyjet Matrix.....	13
4.1 Stroje používané na KSA v souvislosti s technologií Polyjet Matrix:	15
5 CNC.....	16
5.1 Další výhody CNC:	17
5.2 Nevýhody CNC:.....	17
6 CAM.....	18
7 CNC SOUSTRUH EMCO 120P	19
7.1 Základní osový systém stroje	20
7.2 Základní technické údaje stroje	20
8 Příprava k tisku.....	21
9 Tisk	22
9.1 Postup nastavení tisku:	23
9.2 Průběh tisku	25
10 Obrábění a zjišťování technologických podmínek	27
10.1 Nástroje.....	28
11 Technologické podmínky pro materiál ABS Polyjet Fotopolymer	29
12 Technologické podmínky pro materiál VeroWhitePlus	34
13 Závěr.....	36
14 Zdroje:	37
15 Seznam obrázků:	39
16 Seznam tabulek.....	40
17 Seznam příloh:.....	40
17.1 Přílohy	41

1 Úvod

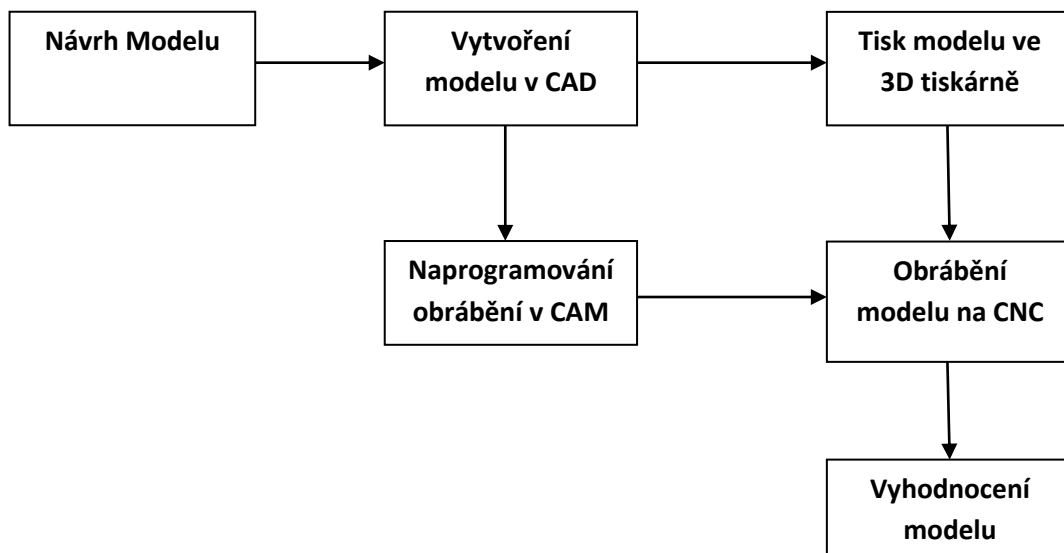
V dnešní době, kdy zákazník požaduje všechno rychle, přesně a levně jsou zaváděny různé technologie. V posledních desítkách let se konvenčním strojům tyto požadavky nedaří plnit. Ať už není v možnostech stroje obrobit danou součást nebo než se podaří vyrobit součást, která půjde do výroby, tak uplyne hodně času nebo se pracuje s drahým materiálem a nechceme mít zbytečný odpad. Důvodů může být hodně a v závislosti na nich nastupují nové trendy. Jedním z nich je aditivní technologie nazývaná Rapid Prototyping (dále RP) neboli 3D tisk. Tzn. z virtuálního modelu v počítači, je vyroben fyzicky ohmatatelný 3D model pomocí 3D tiskárny.

Katedra výrobních systémů Technické Univerzity v Liberci se zabývá technologiemi RP od roku 2001. Doposud se zaměřila především na technologie FDM (Fused deposition modeling) a Polyjet Matrix Printing, nově také na technologii Selective Laser Melting pro výrobu modelů z kovových prášků. V této bakalářské práci budou představeny první dvě z výše zmíněných technologií. Cílem této práce je najít vhodné technologické podmínky pro následné obrábění dílů vyrobených technologií Rapid Prototyping. Zejména se jedná o obrábění v nepříznivých podmínkách – přerušovaný řez, tenká žebra apod.

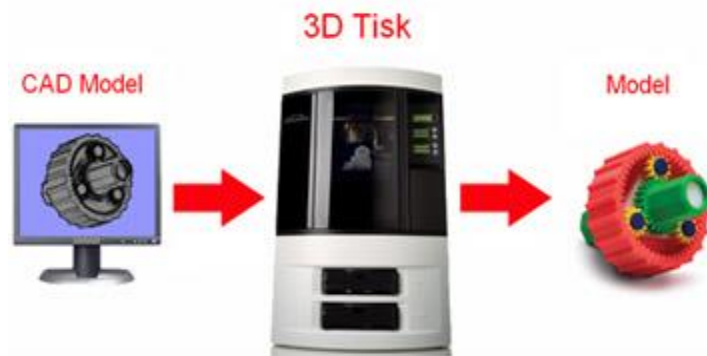
2 Vznik modelu

Model může vznikat ve většině 3D konstrukčních programech tzv. CAD (Solidworks, PTC Creo, Inventor atd.). Dokonce společnost Google nabízí volně ke stažení program Google SketchUp, což lze považovat za složitější malování. Jen je zapotřebí zapojit trochu fantazie nebo disponovat požadavky, co máme navrhout. Jediným omezením (mimo použitého materiálu) je velikost 3D tiskárny. Logicky, čím větší tiskárna, tím větší modely lze tisknout.

V některém z těchto programů bude navržen 3D model, odeslán na 3D tiskárnu a následně vytisknut (viz. Obr. 2).



Obr. 1 Schéma postupu vyhodnocení modelu



Obr. 2: Postup výroby modelů [3]

3 Rapid prototyping

O technologii RP lze říci, že jde o jakési „obrábění naruby“. Tzn., že materiál zde není odebírán jako u konvenčních technologií, ale naopak přidáván. To nám šetří peníze za materiál (nevzniká odpad, tzv. tříska).

Principem metody je vytvoření 3D modelu v CAD programu nebo odměření existujícího modelu 3D skenerem. Takto připravená data jsou vložena do speciálního softwaru Rapid Prototyping, kde je model „rozřezán“ na roviny xy. V ose z je přidavek materiálu v řádech setin až desetin milimetru. Je to tak malý přídavek, že je možno říkat o jednotlivých vrstvách, že jsou dvoudimenzionální (2D).

Tento model bude odsimulován. Pokud vše vyhovuje, tak lze začít tisknout. Tiskne se na nepřilnavou, tepelně odolnou podložku po jednotlivých vrstvách.

Velkou výhodou této technologie je, že je možno tisknout složité tvary prakticky bez odpadového materiálu. [1]

3.1 Využití technologie Rapid Prototyping

- pro vytvoření prostorových modelů složitých objektů s cílem získání názorné představy o celkovém provedení a tvaru;
- ke kontrole designu navrhovaného objektu;
- při vývoji výrobku, tzn., že kdykoli během vytváření výrobku můžeme vytisknout model a korigovat další vývoj;
- v oblastech výroby forem a nástrojů;
- k simulacím v oblastech namáhání, proudění, koncepčního konstruování, designu a archivace 3D objektů.[1]

3.2 Výrobky vyrobené technologií Rapid Prototyping



Obr. 3 Sestava motoru vyrobená technologií RP [1]

3.3 Možnosti využití Rapid Prototyping do budoucna:

Rapid Prototyping je rozhodně ve většině odvětví oblast budoucnosti např. ve strojírenství, zdravotnictví či gastronomii. Materiály se neustále zlepšují. Dříve se tisklo jenom z polymerních materiálů, v současnosti se tiskne z písku, z kovu. Dokonce lze tisknout výrobek za použití více druhů materiálů (technologie polyjet Matrix). Obrábění titanu, kobaltu bylo vždy problémové. V dnešní době se výrobek jednoduše vytiskne a má požadovanou kvalitu, design, drsnost i pevnost. [25]

Nejjasnější má 3D tisk uplatnění ve zdravotnictví. Kde se můžou tisknout náhradní klouby, zuby, čelisti (obr. 4) a dokonce vědci zkoušejí tisknout i živé buňky. To by znamenalo, že doktoři za pár let budou schopni vytisknout z buněk pacienta náhradní orgány určené pouze pro toho daného pacienta. Z toho vyplývá, že bude mnohem více pravděpodobné, že tělo pacienta bez problémů přijme náhradní orgán, což usnadní jeho léčbu.[18]

Americká společnost NASA má představu, že za pár let pošle společně s astronauty do vesmíru i 3D tiskárnu. Namísto hromady náhradních dílů, si vezmou „pytle“ s materiálem a pokaždé když se něco rozbije, tak si to jednoduše vytisknou. Dokonce plánují tisknout ve vesmíru celou loď, což je oproti nizozemským vědcům megalomanský projekt. Ti mají v plánu pomocí 3D tisku tisknout celé domy. NASA hodně investuje v oblasti 3D tisku i do gastronomie (obr. 5). Tisk čokolády už není novinka, ale třeba nedávno se podařilo z prášku vytisknout upečeného krocana. Představte si, že jste ve vesmíru a můžete si bez problému vytisknout jídla, které si dáváte běžně v restauraci. Ať už krocana, pizzu nebo čokoládu. Každý den mohou mít astronauti plnohodnotnou stravu, která zabere mnohem méně místa na lodi než v předchozích letech. To by otevřelo i možnosti podívat se do vesmíru mnohem dál než doposud.[5]

Nebo si představte, že jste doma a nechce se vám vařit. Zapnete si 3D tiskárnu na jídlo, stáhnete si z internetu recept od Zdeňka Pohlreicha, dáte suroviny v prášku do tiskárny. Počkáte pár minut a máte gurmánskou lahůdku první třídy. [26]



Obr. 4 Náhradní čelist vyrobená 3D tiskem [5]



Obr. 5 Vize modelu 3D tiskárny na jídlo[6]

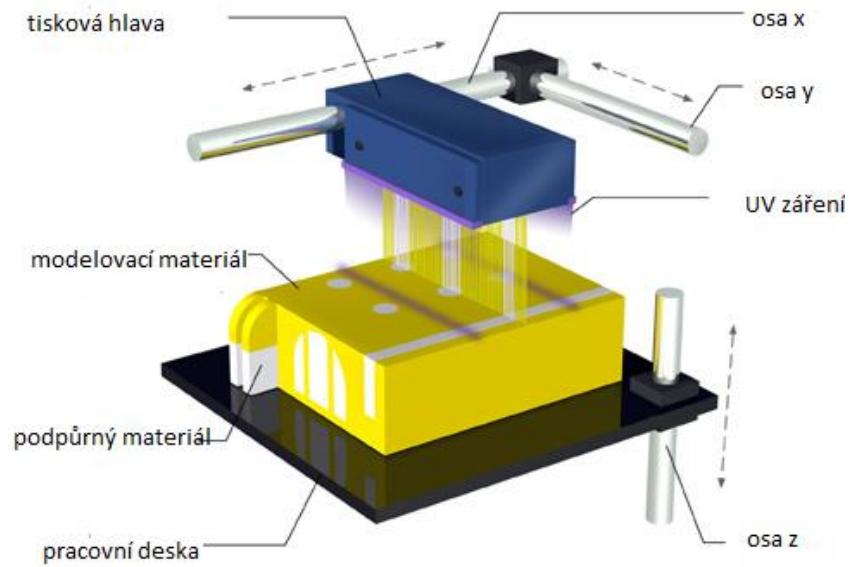
3.4 Rozdělení Rapid Prototyping dle technologie na KSA:

1. Technologie Fused Deposition Modeling (FDM)
2. Technologie Polyjet Matrix
3. Selective Laser Melting

4 Polyjet Matrix

Technologii Polyjet Matrix vymyslela a nechala si patentovat izraelská firma Objet, kterou nedávno koupila firma Stratasys. Jedná se o technologii, kde z tryskové hlavy můžou vystupovat dva odlišné fotopolymerní materiály současně. Můžou se tvořit tzv. digitální materiály. Což jsou materiály, které se zkombinují ze dvou modelových materiálů a vznikne digitální materiál se specifickými vlastnostmi. Dále tato technologie může pracovat s celou škálou materiálů od průsvitných, tvrdých přes pryž až po speciální fotopolymery určené pro 3D tisk v oblasti zubní a lékařské.

Postup technologie Polyjet Matrix je, že se na pracovní plochu tryskou nanášejí materiály ve vrstvách tenkých až 16/32 μm , které se hned vytvrzují UV zářením. Jednotlivé vrstvy tvoří velmi přesný 3D model. Společně s materiály, které tvoří model, se nanáší i materiál na stavbu podpor (u složitějších modelů, které to vyžadují). Tento materiál je rozpustný a snadno se sundá rukou nebo vodou. Model lze používat ihned po vyjmutí z tiskárny.[27]



obr. 6 Princip technologie Polyjet Matrix [14]



obr. 7 Ruka s kostí vyrobená technologií Polyjet Matrix [10]

4.1 Stroje používané na KSA v souvislosti s technologií Polyjet Matrix:

Jedná se o stroj od firmy Objet:

1. Objet500 connex



obr. 8 3D tiskárna Objet500 connex od firmy Objet [11]

4.2 Objet500 connex

- Tiskárna dokáže ze dvou různých materiálů namíchat dalších 12.
- Stroj má 96 trysek v tryskové hlavě.
- Více materiálový tisk eliminuje potřebu sestavení různých částí modelu po jejich dokončení.
- Šetří čas a umožňuje pracovat na několika požadavcích současně.
- Tisk s vysokým rozlišením: tloušťka nanášené vrstvy 16/3 mikónů, rozlišení 600 DPI.
- Tisk tenkých stěn až do tloušťky 0,6 mm.

- Rozměry stavební plochy jsou 500 x 400 x 200 mm – umožňuje tisk velkých dílů a mnoha malých částí v jednom zásobníku.
- Spolehlivost a odolnost – nejméně 72 hodin non – stop tisku.
- Okamžité použití – s vytisknutými 3D modely lze manipulovat ihned po dokončení 3D tiskové úlohy. [33]

5 CNC

CNC (Computer Numerical Control) stroje daly obrábění nový rozměr. Zvýšila se mnohonásobně produktivita i přesnost výroby. CNC jsou moderní adaptivní stroje určené pro více-osé obrábění, které by neměly chybět v žádné moderní kovovýrobě. Princip výroby na těchto strojích je následující:

1. Vytvoření modelu v některém z 3D konstrukčních programů tzv. CAD (Solidworks, Inventor atp.).
2. Vytvořený model je exportován do některého z programů CAM (SurfCAM, Edgecam atp.). Zde je navržen způsob obrábění (posuv, dráhy nástroje, typy nástroje, postup atd.) a odsimulován. Pokud je vše v pořádku, je vygenerován NC kód a odeslán na CNC stroj.
3. Na CNC stroji je načten náš model a poté může být spuštěno obrábění.
4. Na konci procesu je již vyhotovený výrobek.

CNC stroj dokáže udělat více operací na jedno upnutí. Dokáže vrtat, vyvrtávat, frézovat, soustružit, dělat závitky atp. a všechny tyto operace dokáže udělat v mnohonásobně vyšší rychlosti a přesnosti než u klasických, konvenčních strojů. Z důvodu své pružnosti se tyto stroje hodí zejména do malosériových a středně sériových výroben.

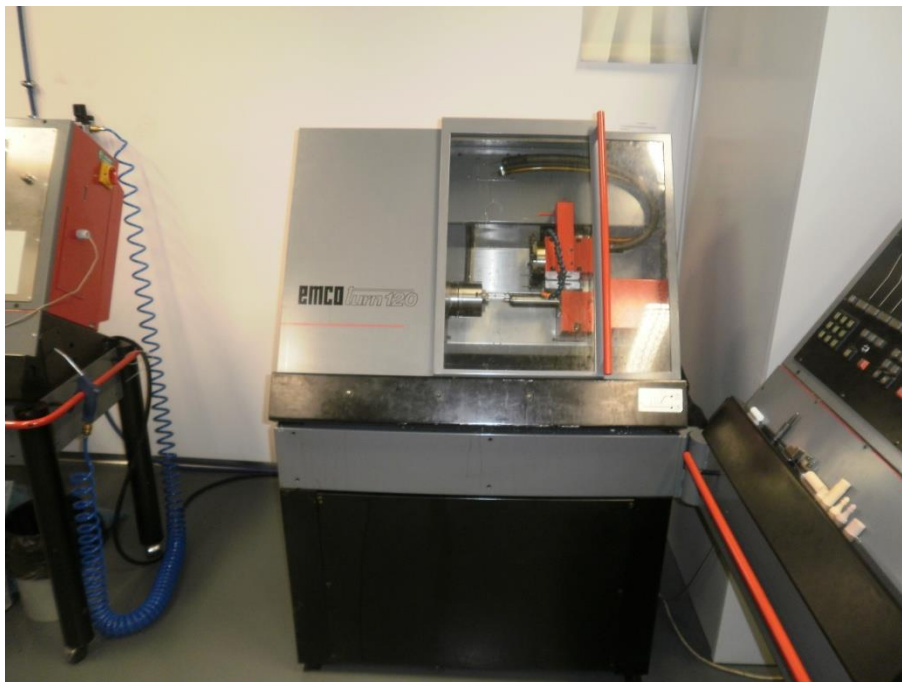
5.1 Další výhody CNC:

- Výroba tvarově velmi složitých výrobků, které na klasických, konvenčních strojích nebylo možné vyrobit.
- Pružná automatizace (výroba nového obrobku znamená pouze změnu CNC programu).

5.2 nevýhody CNC:

- Vysoká pořizovací cena stroje.
- Kvalifikovaný personál pro vytváření CNC programu. [12]

Katedra KSA v současnosti disponuje CNC stroji Mazak a Emco 120P obr. 12.



obr. 9 Soustruh EMCO 120P[15]

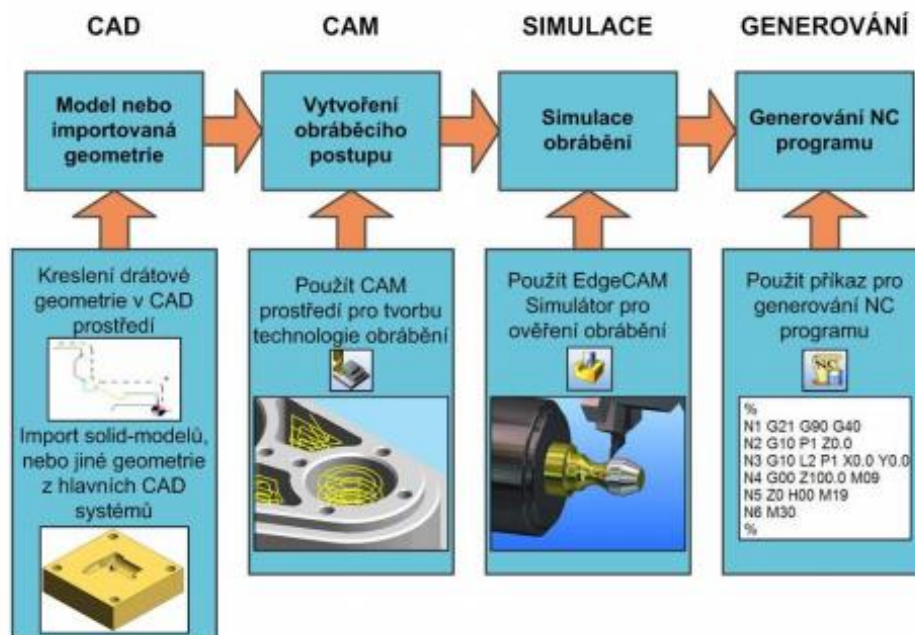
CNC stroje jsou moderní a téměř samostatné stroje, ale bez řady podporujících systémů by princip CNC strojů nemohl fungovat. Jedním z nich jsou CAM systémy.

6 CAM

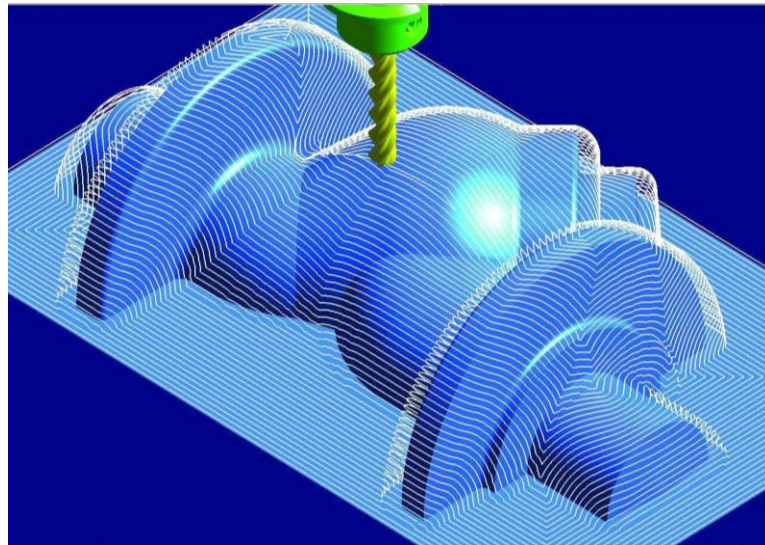
CAM (Computer Aided Manufacturing) = počítačem podporovaná výroba

CAM označuje systém, který připravuje data a programy pro řízení numericky řízených strojů pro automatickou výrobu součástí. [22]

Do CAM systému se vloží virtuální součást, která má být obráběna (postup obr. 13). V prostředí CAM je součást obrobena, následně odsimulována. Pokud nejsou žádné kolize a je zajištěn bezpečný chod vyráběné součásti, vygeneruje se NC kód a je odeslán na stroj. Na obr. 14 je možno vidět, jak vypadá prostředí CAM při simulaci obráběné součásti.



obr. 10 Hlavní kroky při použití CAD/CAM systému [22]



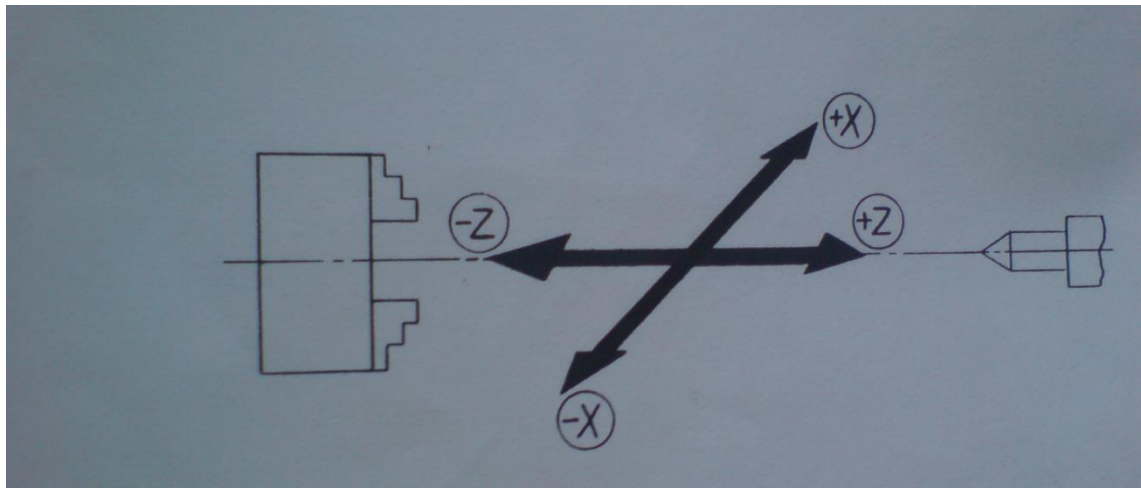
obr. 11 Prostředí CAM. Bílé čáry ukazují pohyb nástroje. [23]

7 CNC SOUSTRUH EMCO 120P

Stroj má souvislé řízení dráhy nástroje ve dvou souřadných osách se stálou polohovou zpětnou vazbou a synchronizací posuvových pohonů. Řízení dráhy nástroje se uskutečňuje prostřednictvím krokového motoru a posuvového kuličkového šroubu s předeprnutou kuličkovou maticí. Vyznačuje se vysokou přesností, spolehlivostí a jednoduchostí obsluhy.

Stroj je vybaven revolverovou hlavou pro osm nástrojů s řídicí logikou, chlazením nástrojů. Šikmým ložem, které umožňuje snadný odvod třísek a bohatým příslušenstvím. Dále je stroj vybaven pneumatickým koníkem a pneumatickým sklíčidlem. Soustruh je ideálním zařízením pro obrábění menších členitých součástí z ocelí, barevných kovů a plastů s mnoha různými operacemi, což odpovídá specifickým požadavkům v přesném strojírenství. [28]

7.1 Základní osový systém stroje



obr. 12 Osový systém stroje [28]

7.2 Základní technické údaje stroje

Pracovní rozsah:

Oběžný průměr nad ložem.....	180 mm
Oběžný průměr nad příčným suportem.....	75 mm
Největší soustružená délka.....	160 mm
Největší průměr obrobku.....	90 mm

Pracovní vřeteno:

Vrtání vřetene.....	20,7 mm
Rozsah otáček.....	150-4000 ot.min ⁻¹

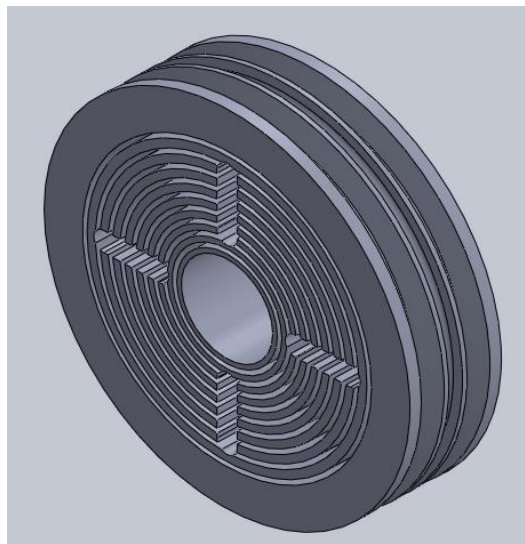
Hlavní pohon:

Výkon stejnosměrného motoru.....	2,2/4 kW
----------------------------------	----------

Maximální kroutící moment.....	23 Nm
<u>Posuvové pohony:</u>	
Posuv v osách X a Z.....	1-2000 mm.min ⁻¹
Rychloposuv.....	3 m.min ⁻¹
Posuvová síla.....	2000 N
<u>Revolverová hlava:</u>	
Počet míst v revolverové hlavě pro nástroje.....	8
Maximální průměr stopky spirálového vrtáku.....	12 mm [28]

8 Příprava k tisku

Model byl vykonstruován v programu Solidworks 2013. Je zaměřen na problémové tvary - tenká žebra, drážky.



obr. 13 Dokončený model v Solidworksu

Jakmile byl model vykonstruován v Solidworksu, byl následně převeden do formátu STL (STereoLitography nebo Standard Triangulation Language). Tento formát reprezentuje velmi jednoduchý zápis trojrozměrných objektů složených z jednotlivých trojúhelníkových plošek. Každá ploška je definována normálou a třemi vrcholy. Normála je vektor (orientovaná úsečka), který určuje rub a líc dané plochy. Pro 3D tisk je nezbytné, aby byly všechny normály správně nastaveny směrem ven z daného objektu.[29]

Model v STL formátu se následně otevře ve speciálním programu Objet Studio (obr. 17), který je napojen na tiskárnu Connex 500.

9 Tisk

Do tiskárny Objet500 Connex se vloží náplně s požadovanými materiály a při stříku materiálu na podložku se tyto materiály smíchají. Jsou to tak malé kapičky, že se bez problému dají tisknout žebra o tloušťce 1,2 mm. Kdyby žebra byly tenčí, tak není zaručeno dostatečné promíchání materiálu a hrozily by horší mechanické vlastnosti.[31]

Použité materiály na tisk modelů:

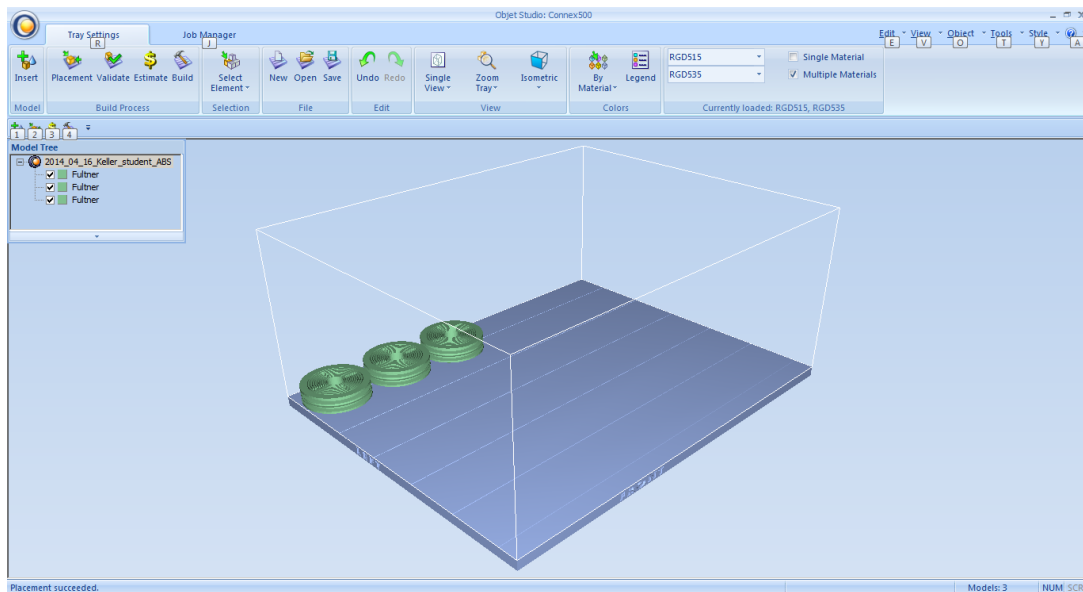
- 1) ABS Polyjet Fotopolymer
- 2) VeroWhitePlus

ABS Polyjet Fotopolymer

Digitální ABS Polyjet fotopolymer je materiál zkombinovaný z RDG515 a RDG535. Zajímavé je, že tiskárna Objet500 Connex dokáže tyto dva materiály namíchat dle požadavků a udělat z nich celkem dvanáct různých materiálů. [příloha A 1]

VeroWhitePlus

Jak už název napovídá, výrobek po vytisknutí bude mít bílou barvu a oproti předchozímu materiálu není zkombinovaný ze dvou materiálů. Verowhiteplus nese označení RGD835. [příloha A 2]

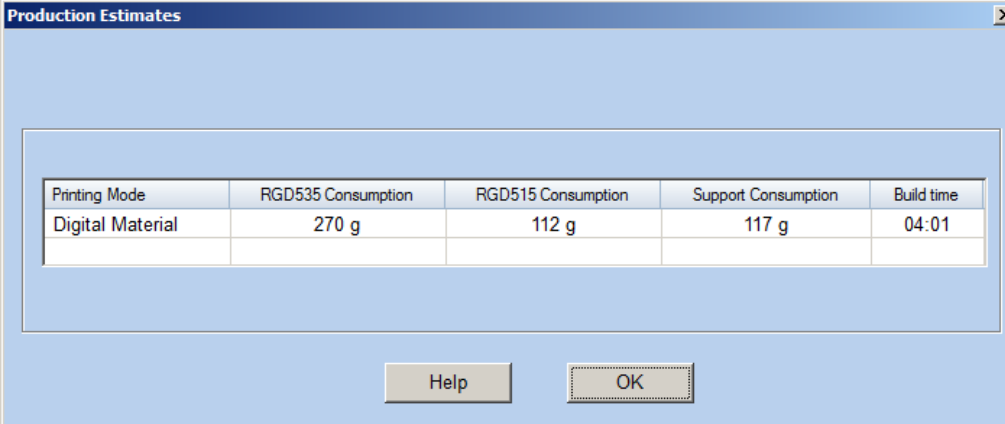


obr. 14 Prostředí programu Objet Studio: Connex 500 se třemi zkušebními modely

V tomto programu se nastaví veškeré podrobnosti ohledně tisku.

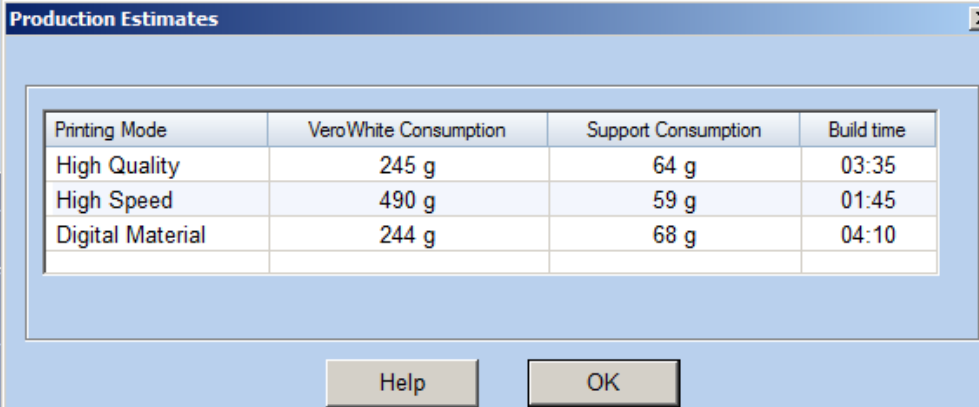
9.1 Postup nastavení tisku:

1. Model ve formátu STL je vložen do programu Objet Studio: Connex 500.
2. Model je umístěn na virtuální podložce.
3. Nastavení materiálu RGD515 a RGD535 nebo jenom RGD835.
4. Nastavení poměrného množství obou materiálů v modelu (viz obr. 18).
5. Nastavení tisku v high speed (tzn.: Tisková hlava přejede nad modelem tam i zpět a až poté se vrstva o tloušťce 32 μ m vytvrdí UV zářením).
6. Následně se ukáže tabulka s dobou tisku a tlačítkem print.



Printing Mode	RGD535 Consumption	RGD515 Consumption	Support Consumption	Build time
Digital Material	270 g	112 g	117 g	04:01

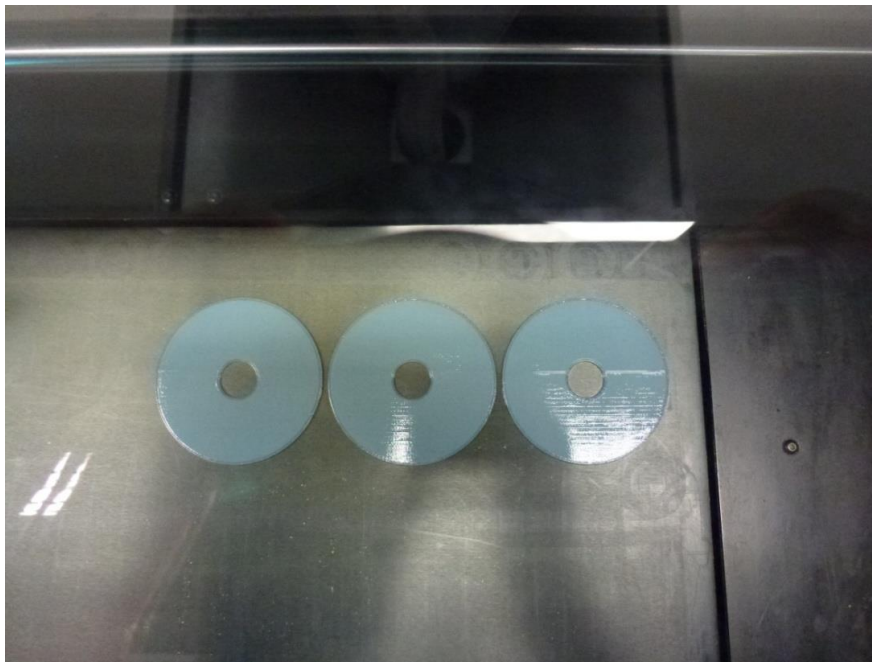
obr. 15 Spotřeba jednotlivých materiálů na tři modely i s podporou a dobou tisku pro ABS.



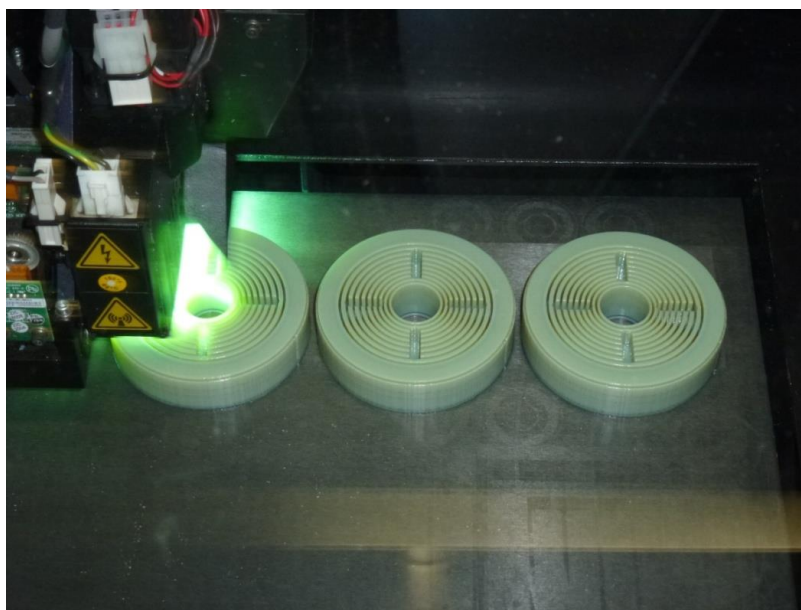
Printing Mode	VeroWhite Consumption	Support Consumption	Build time
High Quality	245 g	64 g	03:35
High Speed	490 g	59 g	01:45
Digital Material	244 g	68 g	04:10

obr. 16 Spotřeba materiálu pro 2 modely z materiálu VeroWhitePlus

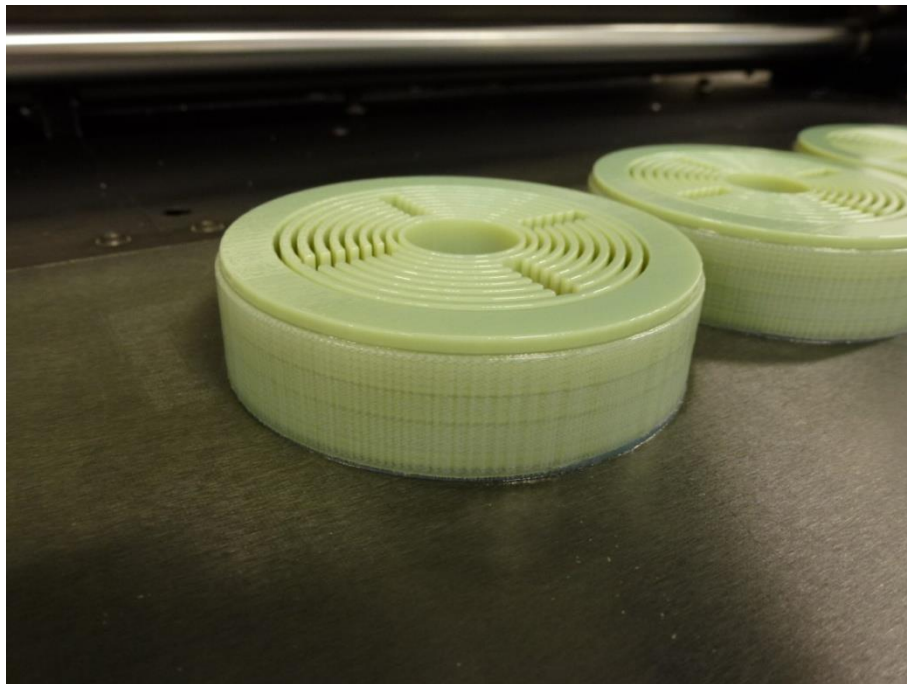
9.2 Průběh tisku



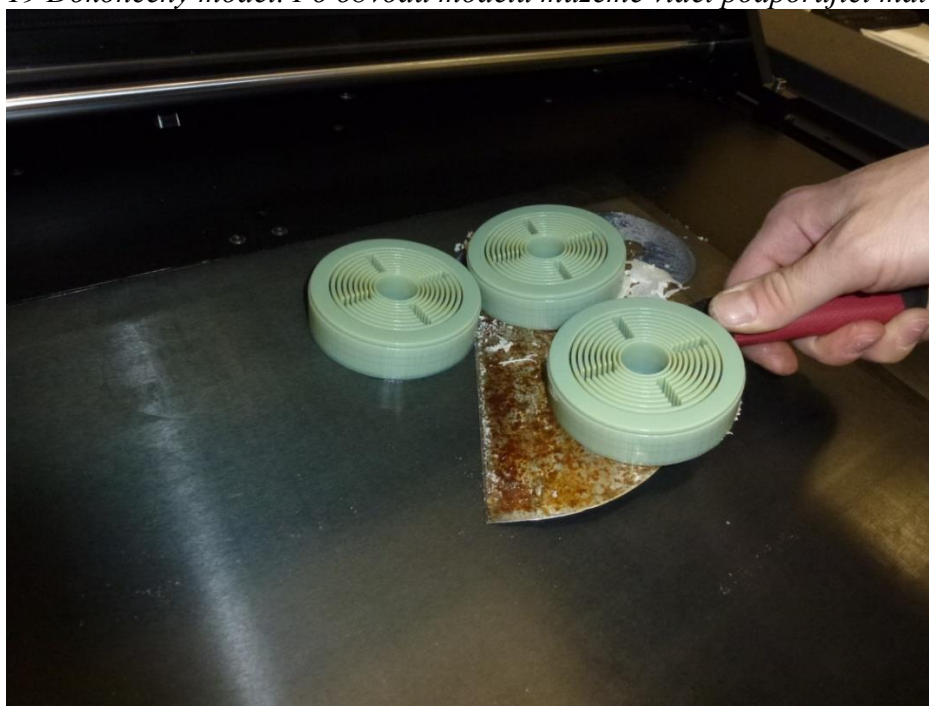
obr. 17 Průběh tisku po 10 minutách



obr. 18 Tisk se schyluje ke konci. Na obrázku je krásně vidět jak tisková hlava přejíždí nad modelem a právě položenou vrstvu vytvrzuje UV zářením.



obr. 19 Dokončený model. Po obvodu modelu můžeme vidět podporující materiál.



obr. 20 Pomocí škrabky se seškrábnou modely. Je vidět jak na podložce zůstane trochu podporujícího materiálu, nikoliv materiálu RGD5161.

10 Obrábění a zjišťování technologických podmínek

Nejdříve byly nastaveny NC kódy pro naši součást na soustruh EMCO TURN 120P.

Obrábění probíhalo ve dvou fázích:

1. Obrábění podélné (Obr. 25)
2. Obrábění čelní (Obr. 26)

```
; Pozice nástroje : 1   Popis nástroje: 01_Levy (Levý kopírovací nůž)
* Navez stroje:   EMCO TURN E-120P
* Navez soucasti: finalni_model_1
* Programator:
* Datum:         22/04/14
* Cas:           10:10:01
*
* Celkovy strojní cas (bez vymen nástroju): 1.320   minut
*****
%0001
N0010 G71 G53 G59

; Levý kopírovací nůž
N0020 T0101
N0030 G92 S2500
N0040 G96 M04 S60
N0050 G00 X82.000 Z2.000 G95
N0060 X81.600
N0070 G01 Z-20.500 F80
N0080 X81.980
N0090 G00 X83.980 Z-19.500
N0100 Z2.000
N0110 M30
```

obr. 21 NC kód pro podélné soustružení

```
; Pozice nástroje : 1   Popis nástroje: 01_Levy (Levý kopírovací nůž)
* Navev stroje:   EMCO TURN E-120P
* Navev součásti: finalni_model_1
* Programator:
* Datum:         22/04/14
* Cas:           10:14:29
*
* celkovy strojní cas (bez vymen nástroju): 1.135   minut
*****
%0002
N0010 G71 G53 G59

; Levý kopírovací nůž
N0020 T0101
N0030 G92 S2500
N0040 G96 M04 S60
N0050 G00 X82.000 Z0.000 G95
N0060 Z-0.200
N0070 G01 X22.000 F80
N0080 Z1.000
N0090 G00 X24.000
N0100 X82.000
N0110 M30
```

obr. 22 NC kód pro čelní soustružení

10.1 Nástroje

Pro obrábění plastu musí být nástroj perfektně naostřen. Proto se doporučují nástroje např. ze slinutého karbidu.

Na obrábění našich modelů byla použita karbidová břitová destička s pozitivní geometrií s označením DCGX070804-AL od švédského výrobce Sandvik COROMANT. Tato břitová destička patří do Systému CoroTurn 107, což je první volbou pro vnější i vnitřní obrábění malých, dlouhých a štíhlých součástí. Díky ostrým břitům a vynikající kontrole utváření třísek je zaručen klidný průběh záběru a nízké řezné síly, což umožňuje dosažení výjimečné kvality obrobeneé plochy. [32]

D=55°.....Úhel ostří

C=7°.....Úhel hřbetu

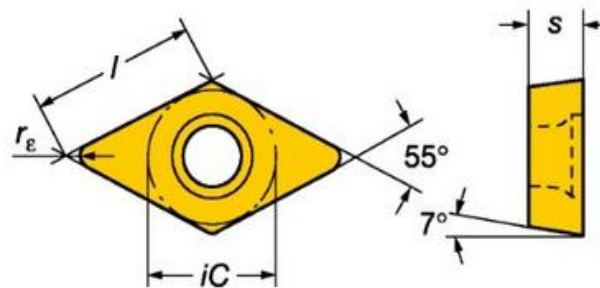
G=±0,13..... Přesnost [mm]

X=20°.....Úhel čela je 20°, ale na konci je destička zvýšená na úhel 25°

07.....Označení pro velikost řezné hrany

08.....Označení pro šířku destičky

04.....Označení pro poloměr [příloha A3]



obr. 23 Geometrie břitové destičky DCGX070804-AL [32]

11 Technologické podmínky pro materiál ABS Polyjet Fotopolymer

	Posuv [mm/ot]	Hloubka záběru[mm]	řezná rychlost[m/min]	čas obrábění [s]	produktivita[cm ³ /min]
1	0,05	1	150	39	7,50
2	0,05	1,5	150	39	11,25
3	0,05	1,25	150	39	9,38
4	0,05	0,5	200	30	5,00
5	0,05	0,5	180	33	4,50
6	0,05	0,5	125	48	3,13
7	0,05	0,5	100	60	2,50
8	0,05	0,5	50	119	1,25
9	0,05	1,25	400	15	25,00
10	0,02	0,5	150	99	1,50
11	0,05	0,5	150	40	3,75
12	0,15	0,5	150	13	11,25
13	0,1	0,5	150	20	7,50
14	0,2	0,5	150	10	15,00

Tabulka 1: Dosažené hodnoty při podélném soustružení obvodových drážek.

	Posuv [mm/ot]	hloubka záběru[mm]	řezná rychlost[m/min]	čas obrábění [s]	produktivita [cm ³ /min]
1	0,05	0,5	50	84,82	1,25
2	0,05	0,5	100	42,41	2,50
3	0,05	0,15	150	28,27	1,13
4	0,05	0,15	300	12,25	2,25
5	0,1	0,15	300	6,13	4,50
6	0,2	0,15	300	3,06	9,00
7	0,05	0,25	50	84,82	0,63
8	0,05	0,25	75	56,55	0,94
9	0,05	0,25	150	28,27	1,88
10	0,05	0,25	300	12,25	3,75

Tabulka 2: Hodnoty při čelním soustružení.

Měření probíhalo v laboratořích KSA. Na základě informací o obrábění plastu se začalo s nastavováním řezných podmínek a následným soustružením. Nejdříve se začalo vytisknutý model soustružit podélně (tabulka 1) a vzápětí čelně (tabulka 2). Zeleně zvýrazněné řádky znázorňují technologické podmínky, které vyhovují. To znamená, že povrch obrobku byl hladký a neměl žádná viditelná ani hmatatelná poškození (obr. 28). Nicméně to neznamená, že tyto podmínky budou stanoveny jako finální. Bylo zjištěno několik problémů:

1. Při obrábění bylo zjištěno, že docházelo k velkému nabalování třísky na nůž, což může při obrábění delších obrobků způsobovat problémy [příloha A 4]. Zajímavé bylo, že při obrábění vnějšího materiálu byla tříska v podobě prachu, ale jakmile se nůž dostal do vnitřního materiálu, tak se tříska začala nabalovat. To bylo důsledkem toho, že vnitřní materiál je hodně houževnatý.
2. Při vyjetí z drážky se na hranách nedořezávalo část materiálu. Tento kousek šel snadno odstranit rukou, ale je to operace navíc [příloha A 5].
3. Při soustružení čela se žebra částečně vylamovala. Když nůž zabral do žeber, tak bylo vše v pořádku, ale jakmile vyjžděl z žeber do drážky, tak se začaly žebra vylamovat [příloha A 6].

Dále bylo zjištěno, že řezná rychlost nemá na kvalitu povrchu obrobku prakticky žádný vliv. Když se žebra nebo drážky vylamovaly, tak smysluplným řešením bylo snižovat posuv a hloubku záběru. To mělo za následek zmenšení řezné síly. Ostatně to ukazuje i vzorec pro výpočet řezné síly:

$$F_c = k_s * f_{ot} * h$$

F_cřezná síla [N]

k_s měrný řezný odpor [Mpa]

f_{ot}posuv za otáčku [mm/ot]

hhloubka záběru [mm]

Produktivita:

$$Produktivita \left[\frac{cm^3}{min} \right] = posuv \left[\frac{mm}{ot} \right] * hloubka \text{ záběru} [mm] * \text{řezná rychlost} \left[\frac{m}{min} \right]$$

Čas pro podélné soustružení: $t_{sp} = \frac{l}{f_{ot} * n} * 60 = [s]$

ldélka součásti [mm]

Čas pro čelní soustružení:

$$t_{sa} = \frac{\pi}{2 * 1000 * f_{ot} * v_c} \int_a^D D dD$$

Po integraci:

$$t_{sa} = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4 * 1000 * f_{ot} * v_c} * 60 = [s]$$

Stejně jako při soustružení podélném byla u soustružení čela nastavena konstantní řezná rychlost. Jenomže u soustružení čela se zvyšují otáčky v závislosti na průměru. To znamená, že jakmile řezná rychlost byla $v_c \geq 188,5$ [m/min], tak se otáčky dostaly na maximální otáčky stroje a dál se nezvyšovaly. Tudíž se snižovala řezná rychlost v závislosti na průměru. U těchto případů je nutné změnit parametry a přičíst t_{sb} což je čas soustružení za konstantních otáček.

$$t_s = t_{sax} + t_{sb}$$

$$t_{sax} = \frac{(D^2 - d_x^2)\pi}{4 * 1000 * f_{ot} * v_c} * 60 = [s]$$

$$t_{sb} = \frac{(d_x - d) * 60}{2 * f_{ot} * n_{max}} = [s]$$

D.... vnější průměr [mm]

d.... vnitřní průměr[mm]

d_x průměr, kde se otáčky stanou konstantními [mm]

n_{max} ... maximální otáčky stroje [ot/min]

Na základě těchto poznatků byly stanoveny tyto technologické podmínky:

Pro podélné soustružení:

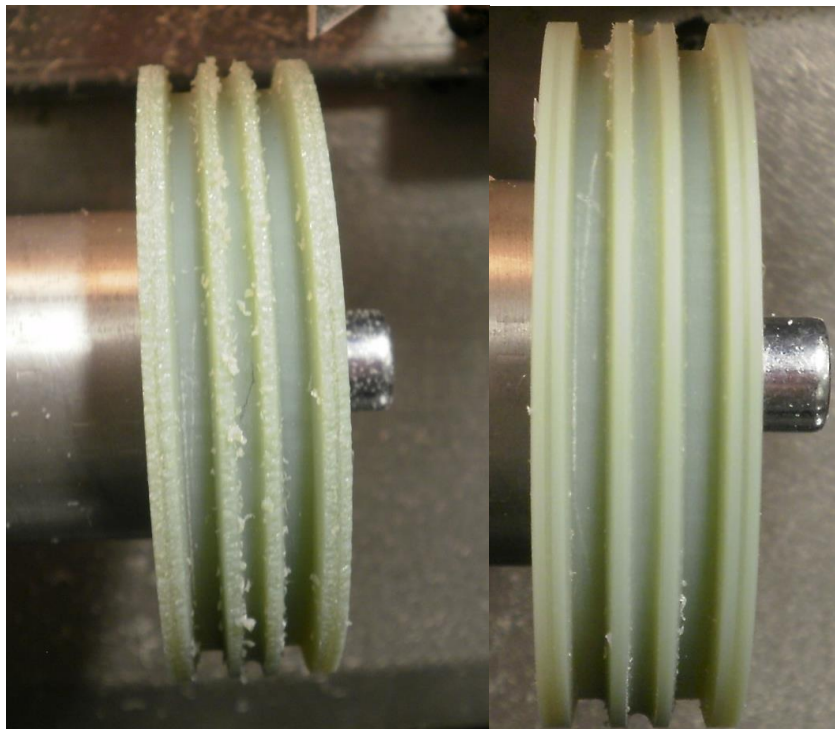
- Posuv $f=0,05$ [mm/ot]
- Hloubka záběru $h=1$ [mm]
- Řezná rychlost $v_c=150-400$ [m/min]

Pro čelní soustružení:

- Posuv $f=0,05$ [mm/ot]
- Hloubka záběru $h=0,15$ [mm]
- Řezná rychlost $v_c=150-300$ [m/min]

Po zvolení technologických podmínek byla vyměněna karbidová destička DCGX070804-AL na nástroji za DCMT070204-PF, což je od stejného výrobce, ale s negativní geometrií.

Soustružení probíhalo za optimálních technologických podmínek, které byly stanoveny v předchozím pokusu. Destička s negativní geometrií za stejných technologických podmínek vytrhávala žebra a zanechávala drsný povrch. Z toho vyplývá, že hodně záleží na geometrii nástroje.



obr. 24 Rozdíl mezi špatnou a dobrou kvalitou povrchu.

12 Technologické podmínky pro materiál VeroWhitePlus

	Posuv [mm/ot]	Hloubka záběru[mm]	Řezná rychlost[m/min]	Čas[s]	Produktivita[cm ³ /min]
1	0,2	0,5	150	9,93	15,00
2	0,15	0,5	150	13,24	11,25
3	0,1	0,5	150	19,85	7,50
4	0,05	0,5	150	39,71	3,75
5	0,05	0,5	200	29,78	5,00
6	0,05	0,5	300	19,85	7,50
7	0,05	0,5	250	23,83	6,25
8	0,1	0,25	250	11,99	6,25
9	0,1	0,2	250	12,00	5,00
10	0,1	0,2	500	6,00	10,00
11	0,2	0,4	500	2,99	40,00
12	0,1	0,4	500	5,97	20,00
13	0,1	0,3	500	5,99	15,00
14	0,05	0,6	500	11,88	15,00

Tabulka 3: Podélné obrábění pro materiál VeroWhitePlus.

	Posuv [mm/ot]	Hloubka záběru[mm]	Řezná rychlost[m/min]	Čas[s]	Produktivita[cm ³ /min]
1	0,1	0,2	250	12,00	5,00
2	0,05	0,2	250	24,01	2,50
3	0,05	0,1	250	24,07	1,25
4	0,05	0,15	150	40,06	1,13

Tabulka 4: Optimální řezné podmínky při obrábění čela.

Po zkušenostech s chováním materiálu použitým v předchozím případě byly stanoveny počáteční podmínky při soustružení. Byl použit rozměrově identický model jako v předchozím soustružení, jen byl z materiálu VeroWhitePlus. Vzorce pro výpočty byly

také stejné. Model z tohoto materiálu se obráběl lépe, protože není smíchaný s jiným materiálem. U tohoto materiálu byly podobné problémy jako u materiálu ABS. Tzn. špatný povrch, vylámaná žebra a namotávající se tříska. Na základě toho byly zjištěny optimální podmínky.

Nejprve se začalo se soustružením za účelem co nejkvalitnějšího povrchu a následně za účelem co největší produktivity. Mysleli jsme si, že hodnoty budou trochu odlišné, ale dospěli jsme k tomu, že jakmile překročíme posuv 0,1 [mm/ot], tak se tvoří špatný povrch.

Na základě těchto poznatků byly stanoveny tyto technologické podmínky:

Pro podélné soustružení:

- Posuv $f=0,1$ [mm/ot]
- Hloubka záběru $h=0,2$ [mm]
- Řezná rychlost $v_c=150-500$ [m/min]

Pro čelní soustružení:

- Posuv $f=0,05$ [mm/ot]
- Hloubka záběru $h=0,1$ [mm]
- Řezná rychlost $v_c=250$ [m/min]

13 Závěr

Tato práce byla vypracována na základě požadavku katedry výrobních systémů. KSA měla za úkol vytisknout sestavu složenou z několika dílů o dvou různých materiálech. ABS Fotopolymer a VeroWhitePlus. Vzhledem k tomu, že nebylo možné z technologických důvodů uskutečnit tisk výrobků smontovaných dohromady, přistoupilo se k tisku požadovaných výrobků po jednotlivých kusech s následnou montáží. Avšak nakonec se ukázalo, že vzhledem k tomu, že technologie RP není zcela přesná, jednotlivé díly na sebe po vytištění nepasovaly. Proto bylo nezbytné přistoupit k úpravám těchto výrobků, a to k soustružení těchto dílů. U materiálů ABS Fotopolymer a VeroWhitePlus však nebyly dosud známy technologické podmínky pro jejich soustružení a proto všechny výrobky vytisknuté ze jmenovaných materiálů při konečných úpravách byly zničeny. Na základě uvedené zkušenosti tato BP měla za úkol nalézt optimální technologické podmínky pro soustružené výrobky z materiálů ABS Fotopolymer a VeroWhitePlus. Nejenom, že hledané podmínky byly nalezeny, ale měřením také bylo zjištěno, co má a nemá vliv na kvalitu povrchu. Pokud byl nastaven velký posuv, tak povrch byl drsný. Pokud zase byla nastavena velká hloubka záběru, tak se nepřiměřeně na nástroj namotávala tříska. Zajímavé bylo zjištění, že na kvalitu povrchu neměla prakticky žádný vliv řezná rychlost. Naopak co mělo velký vliv, byla geometrie nástroje. Jakmile byla použita pozitivní geometrie, která je doporučována výrobcem na obrábění plastů, tak byly nalezeny optimální podmínky během několika pokusů. Poté se za výsledných vyhovujících podmínek začalo soustružit s negativní geometrií nástroje a všechny pokusy byly zmetkové. Z toho vyplývá, že geometrie nástroje má také velký vliv na kvalitu vysoustružených dílů.

14 Zdroje:

- [1] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění: ., [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenčni-metod>.
- [3] MCAE. 3D Tiskárny. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.mcae.cz/3d-tiskarny>.
- [5] PROTOCOM. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.protocom.cz/reseni/zdravotnictvi/>.
- [6] GIZMAG. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.gizmag.com/cornucopia-digital-gastronom>.
- [10] WILLIAMS 3D. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://williams3d.com.au/services/3d-printing/>.
- [11] STRATASYS. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series>.
- [14] PROTOTYPOS, Undo. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: http://www.undoprototipos.com/imagenes/tecnologia_.
- [23] FABRICATING AND METALWORKING. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2013/10/>.
- [18] BREJLOVÁ, Iva. Křidýlko nebo stehýnko? 3D tiskárna zvládne celé menu. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/ekonomika/236011->.
- [12] KELLER, Petr. Programování a řízení CNC strojů. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf.

- [22] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. Počítačová podpora procesu obrábění. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20_obrabeni.pdf.
- [25] BAUMAN, Milan. 3D tiskárny: produkce na míru a bez dělníků. Kdy se vrátí výroba z Číny na Západ? Jakou roli bude hrát ČR?. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://cfoworld.cz/trendy/3d-tiskarny-produkce-na->.
- [26] BURZA, Marek. Jídlo je v tiskárně... V New Yorku vymysleli funkční stroj na amarouny. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://hobby.idnes.cz/jidlo-je-v-tiskarne-vedci-z->.
- [27] STRATASYS. Polyjet Matrix. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/>.
- [28] [24] Vališ, L.: *Návod na obsluhu a programování řídicího systému soustruhu EMCO 120P.*, IPM, Brno 1992.
- [29] EARCH.CZ. Rapid prototyping: příprava a tisk STL modelů. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.earch.cz/cs/rapid-prototyping-priprava->.
- [30] STRATASYS. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Mater>.
- [31] STRATASYS. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/digital>.
- [32] KVALITNÍ- NÁSTROJE. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.kvalitni-nastroje.cz/dcgx/5723-dcgx-07->.
- [33] STRATASYS. [online]. [cit. 2014-05-13]. DOI: <http://www.objet.cz/produkty/objet-connex/>.

15 Seznam obrázků:

Obr. 1 Schéma postupu vyhodnocení modelu.....	8
Obr. 2: Postup výroby modelů [3].....	9
Obr. 3 Sestava motoru vyrobená technologií RP [1].....	10
Obr. 4 Náhradní čelist vyrobená 3D tiskem [5].....	12
Obr. 5 Vize modelu 3D tiskárny na jídlo[6]	12
obr. 6 Princip technologie Polyjet Matrix [14]	14
obr. 7 Ruka s kostí vyrobená technologií Polyjet Matrix [10]	14
obr. 8 3D tiskárna Objet500 connex od firmy Objet [11]	15
obr. 9 Soustruh EMCO 120P[15]	17
obr. 10 Hlavní kroky při použití CAD/CAM systému [22].....	18
obr. 11 Prostředí CAM. Bílé čáry ukazují pohyb nástroje. [23]	19
obr. 12 Osový systém stroje [28]	20
obr. 13 Dokončený model v Solidworksu.....	21
obr. 14 Prostředí programu Objet Studio: Connex 500 se třemi zkušebními modely	23
obr. 15 Spotřeba jednotlivých materiálů na tři modely i s podporou a dobou tisku pro ABS. ...	24
obr. 16 Spotřeba materiálu pro 2 modely z materiálu VeroWhitePlus	24
obr. 17 Průběh tisku po 10 minutách.....	25
obr. 18 Tisk se schyluje ke konci. Na obrázku je krásně vidět jak tisková hlava přejíždí nad modelem a právě položenou vrstvu vytvrzuje UV zářením.	25
obr. 19 Dokončený model. Po obvodu modelu můžeme vidět podporující materiál.....	26
obr. 20 Pomocí škrabky se seškrábnou modely. Je vidět jak na podložce zůstane trochu podporujícího materiálu, nikoliv materiálu RGD5161.	26
obr. 21 NC kód pro podélné soustružení	27
obr. 22 NC kód pro čelní soustružení	28
obr. 23 Geometrie břitové destičky DCGX070804-AL [32]	29
obr. 24 Rozdíl mezi špatnou a dobrou kvalitou povrchu.	33

16 Seznam tabulek

Tabulka 1: Dosažené hodnoty při podélném soustružení obvodových drážek.	29
Tabulka 2: Hodnoty při čelním soustružení.	30
Tabulka 3: Podélné obrábění pro materiál VeroWhitePlus.	34
Tabulka 4: Optimální řezné podmínky při obrábění čela.	34

17 Seznam příloh:

Příloha A 1: Tabulka s parametry materiálu digitální ABS Polyjet fotopolymer [30]	41
Příloha A 2: Tabulka s parametry materiálu VeroWhitePlus [30]	41
Příloha A 3: Označení s hodnotami pro karbidové destičky.	42
Příloha A 4: Při některých technologických podmínkách docházelo k nepřiměřenému nabalování třísky.	42
Příloha A 5: Častý problém. Nedořezaná hrana.	43
Příloha A 6: Při vyjetí nože z žeber do drážky, docházelo k vylamování. Obrobek se točí po směru hodinových ručiček.	43

17.1 Přílohy

Digital ABS, Green (RGD5160-DM, RGD5161-DM) made of RGD515 & RGD535 Digital ABS, Ivory (RGD5130-DM, RGD5131-DM) made of RGD515 & RGD531					
	ASTM	Units	Metric	Units	Imperial
Tensile strength	D-638-03	MPa	55-60	psi	8000-8700
Elongation at break	D-638-05	%	25-40	%	25-40
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2600-3000	psi	375,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	65-75	psi	9,500-11,000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	1700-2200	psi	245,000-320,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	58-68	°F	136-154
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure A	D-648-06	°C	82-90	°F	180-194
HDT, °C @ 0.45MPa after thermal post treatment procedure B	D-648-06	°C	92-95	°F	198-203
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	51-55	°F	124-131
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	65-80	ft lb/inch	1.22-1.50
Tg	DMA, E ₂	°C	47-53	°F	117-127
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	85-87	Scale D	85-87
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	67-69	Scale M	67-69
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.17-1.18		

Příloha A 1: Tabulka s parametry materiálu digitální ABS Polyjet fotopolymer [30]

VeroGray RGD850, VeroBlackPlus RGD875, VeroWhitePlus RGD835, VeroYellow RGD836, VeroCyan RGD841, YellowMagenta RGD851					
	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 ₂	°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/cm ³	1.17-1.18		
Ash content VeroGray, VeroWhitePlus	USP281	%	0.23-0.26	%	0.23-0.26
Ash content VeroBlackPlus	USP281	%	0.01-0.02	%	0.01-0.02

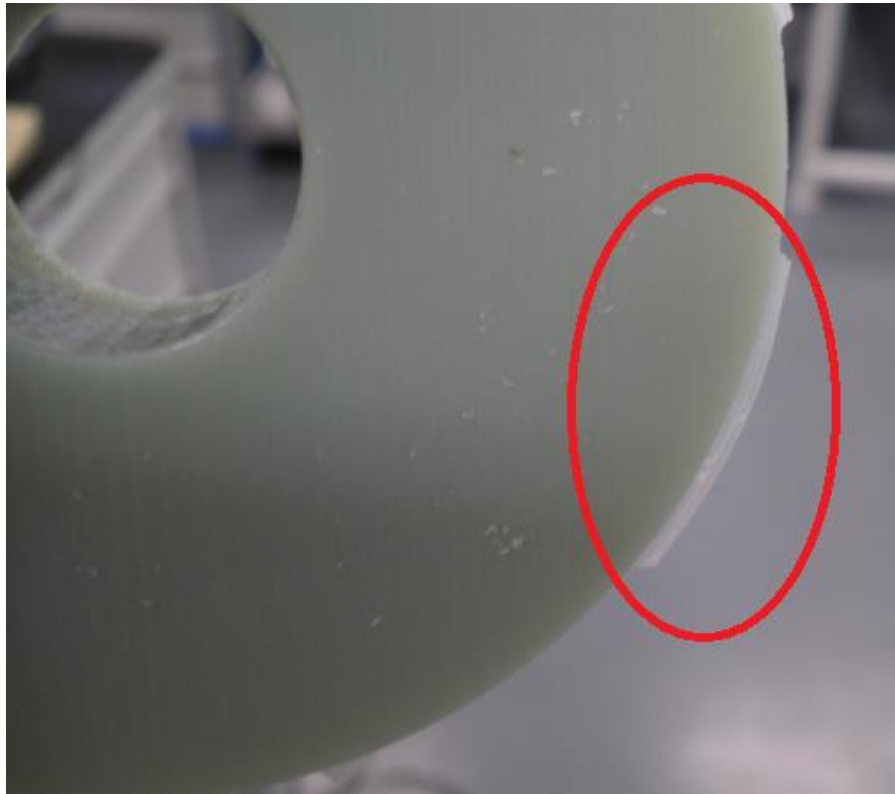
Příloha A 2: Tabulka s parametry materiálu VeroWhitePlus [30]



Příloha A 3: Označení s hodnotami pro karbidové destičky.



Příloha A 4: Při některých technologických podmínkách docházelo k nepřiměřenému nabalování třísky.



Příloha A 5: Častý problém. Nedořezaná hrana.



Příloha A 6: Při vyjetí nože z žeber do drážky, docházelo k vylamování. Obrobek se točí po směru hodinových ručiček.