

Následné operace na modelu po tisku

Povrchové úpravy modelů

Postprocessing

Ing. Petr Keller, Ph.D., Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Postprocessing

– konečná úprava modelu obecně

- jedná se o poslední část výroby dílů pomocí AM, jednotlivé kroky závisí na použité technologii
- vyjmutí součásti ze zařízení, u některých metod je třeba vyčkat určitý i delší čas, než je možno prostor vyráběné součásti zpřístupnit obsluze
- odstranění okolního materiálu, především u technologií na bázi prášků nebo fotopolymérů
- následné zpracování – temperace, vytvrzení dílu UV zářením, napuštění dílu další látkou pro zvýšení jeho pevnosti apod.
- odstranění podpor (pokud byly použity)
- povrchová úprava dílu - obrábění, broušení, barvení, lakování, galvanické pokovení, vyhlazování v parách rozpouštědla (Vapor Smoothing) apod.

Postprocessing – konečná úprava modelu pro FDM

System Dimension sst 768, po tisku následuje:



- vyjmutí součásti ze zařízení, lze bezprostředně po tisku
- odstranění podpor
- závěrečná povrchová úprava

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro FDM

Odstranění podpor

U starších systémů bylo třeba podpory odstranit mechanicky.

U stroje Dimension sst 768 je možné použít rozpustné podpory (ozn. výrobce „Soluble Support“). Po stavbě je model i s podporami ponořen do lázně s hydroxidem sodným ohřáté na 70°C. Podpory se rozpustí, zbyde čistý model.

- takto lze stavět i nerozebíratelné pohyblivé sestavy – je třeba díly namodelovat s patřičnou vůlí (cca 0,25 mm na každou stranu). Tyto mezery jsou při stavbě vyplněny podpurným materiálem, který se následně rozpustí a zbyde pohyblivý model.

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro FDM

Závěrečná povrchová úprava

Vzhledem k poměrně hrubým vrstvám technologie FDM bývá povrchová úprava dílu potřebná, zvláště pokud se jedná o prototypové díly sloužící k posouzení vzhledu nebo díly sloužící jako tzv. Master model pro technologii odlévání ve vakuu.

V závislosti na použitém stavebním materiálu lze díly obrábět, brousit, barvit, naleptat („homogenizovat“) povrch apod.

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro FDM

Příklad finální úpravy dílů tmelením, broušením, lakováním



tmelení a lakování dílu po
tisku na stroji Dimension sst
768
z materiálu ABS



finální úprava dílu
(tmelení -> broušení ->
lakování)

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro FDM

Finální úpravy dílů tmelením, broušením, lakováním

Tento způsob závěrečné úpravy je poměrně pracný, je však možné takto finalizovat i poměrně tvarově komplikované díly.

Určitou nevýhodou je ztráta rozměrové přesnosti dílů, velmi závisí na lidském faktoru. S tím je třeba počítat u sestav dílů, nejlépe již před samotným tiskem a díly modelovat s patřičnými vůlemi dle zkušenosti.

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro FDM

Finální úpravy dílů naleptáním povrchu acetonem

Jedná se o poměrně jednoduchý způsob závěrečné úpravy dílů vyrobených z ABS (tento materiál se v acetonu rozpouští). Na díly se nechají určitou dobu působit páry acetonu v uzavřené nádobě. Koncentraci par je možné ovlivnit teplotou, ovlivnění povrchové vrstvy dobou působení par.

Je poměrně zásadní stanovení obou parametrů správně, jinak hrozí ztráta přesnosti dílu, příp. až jeho zničení!

Tento postup má také zásadní nevýhodu v použitém rozpouštědle – problematika ekologie, pracovního i životního prostředí!

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro PolyJet

System Objet Connex 500 / Stratasys J750, po tisku dílů následuje:



- vyjmutí součásti ze zařízení, lze bezprostředně po tisku
- odstranění podpor
- následné zpracování některých materiálů
(např. Vero Clear – dotvrzení dílu UV zářením pro lepší optické vlastnosti, ABS like – temperace apod.)

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro PolyJet

Odstranění podpór



Omytí (otryskání) podpůrného materiálu tlakem vody ve speciálním zařízení, následně je obvykle třeba součást dočistit od zbytků podpór mechanicky, příp. v roztoku hydroxidu sodného např. v ultrazvukové čističce a omýt vodou.

Postprocessing

– konečná úprava modelu pro PolyJet

Ukázka kvality povrchu dílů ze stroje Objet Connex 500



Díky malé tloušťce vrstev této technologie (0,014 – 0,032 mm) většinou není u dílů třeba dále vyhlazovat povrch.

Postprocessing

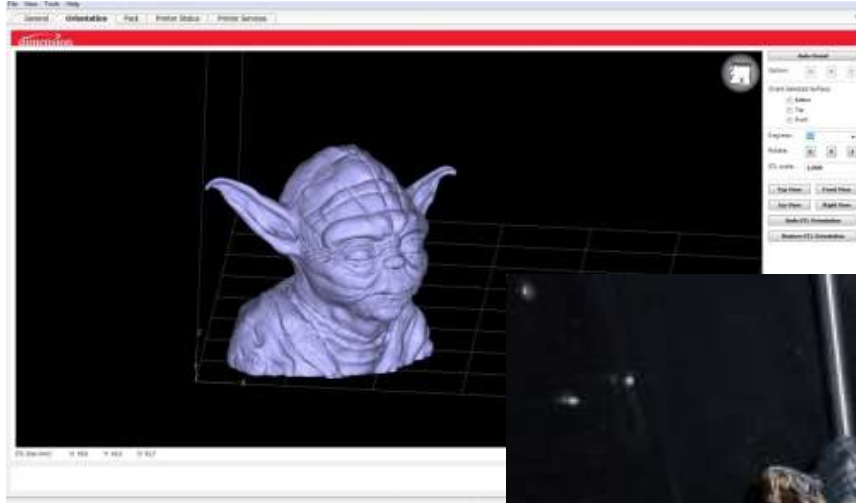
– konečná úprava modelu pro PolyJet

Případné další možnosti povrchových úprav dílů

Řadu materiálů (materiály skupiny Vero, materiály ABS Like apod.) lze v případě potřeby dále brousit, leštit, pokovovat i obrábět.

Je třeba respektovat materiálová omezení – křehkost, tepelnou odolnost apod., aby nedošlo k deformaci či destrukci dílu.

Experimenty s chemickým vyhlazováním – vstupní model z ABS



Experimenty s chemickým vyhlazováním – Methyl Ethyl Keton (MEK)

Methylethylketon, známý jako butanon, je organická sloučenina se vzorcem C_4H_8O . Používá se jako rozpouštědlo při výrobě pryskyřic, gumy, nátěrů z acetátu celulózy a také pro vinylové filmy. Dále také při výrobě plastů, textilií, parafínu a je součástí mořidel, laků a odstraňovačů nátěrů. Použití našel také jako denaturační činidlo, přísada do lepidel a jako čistič.

Nanesením jemného povlaku methylethylketonu, mohou vytištěné objekty získat vysoký lesk a je možné snížit či dokonce odstranit zřetelné vrstvy po tisku.

Experimenty s chemickým vyhlazováním – Methyl Ethyl Keton (MEK)



Levá půlka bez ošetření, pravá polovina 1 nátěr MEK



2 nátěry MEK



3 nátěry MEK

Experimenty s chemickým vyhlazováním – Aceton

Jedná se o rozpouštědlo organických látek se vzorcem C_3H_6O . Za pomoci acetonu a dalších sloučenin se chemickými reakcemi vytvoří sloučenina potřebná pro zhotovování plexiskla. Používá se též při výrobě např. podpatků, podrážek a jiných gumových částí obuvi.

Leptání 3D dílů z ABS plastu použitím acetonových par je velmi efektivní způsob, jak vytvořit lesklý a hladký povrch dílů. Nanášení acetonu štětcem nebo ponoření dílu do kapaliny, obvykle vede ke ztrátě detailů na objektu. Páry vedou k zachování detailů a k dokonalému povrchu. Bod varu acetonu je $55^{\circ}C$, k odpařování ale dochází i za pokojové teploty, je tedy nutné mít místnost dobře větranou.

Experimenty s chemickým vyhlazováním

– ABS + páry acetonu



55°C, 60 sekund – nedostatek par v nádobě



120°C, 35 sekund



120°C, 60 minut



110°C, 84 sekund



110°C, 5 minut

Experimenty s chemickým vyhlazováním – technologie FDM, ABS + páry acetonu

Příklad finální úpravy dílů naleptáním povrchu acetonem



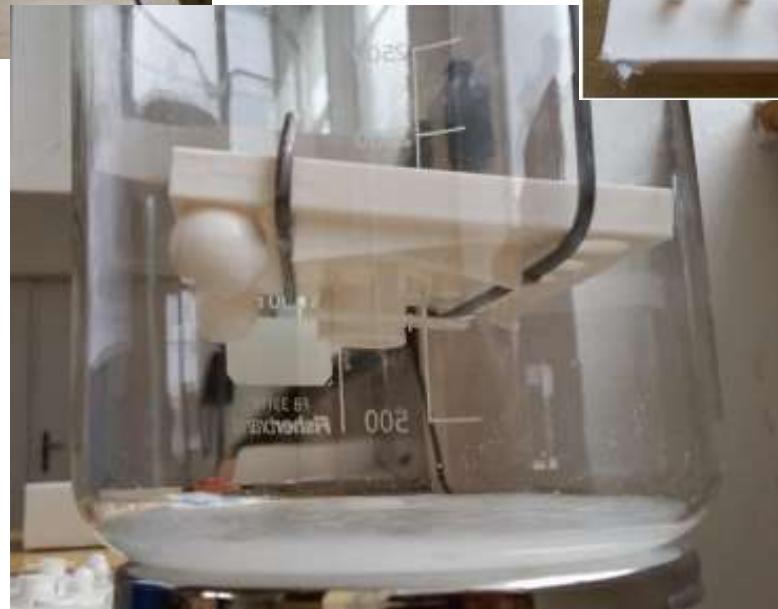
originální povrch dílu
vytištěný na stroji
Dimension sst 768
z materiálu ABS



povrch téhož dílu po
naleptání povrchu parami
acetonu (110°C, 84 sekund)
– došlo ke slití vrstev

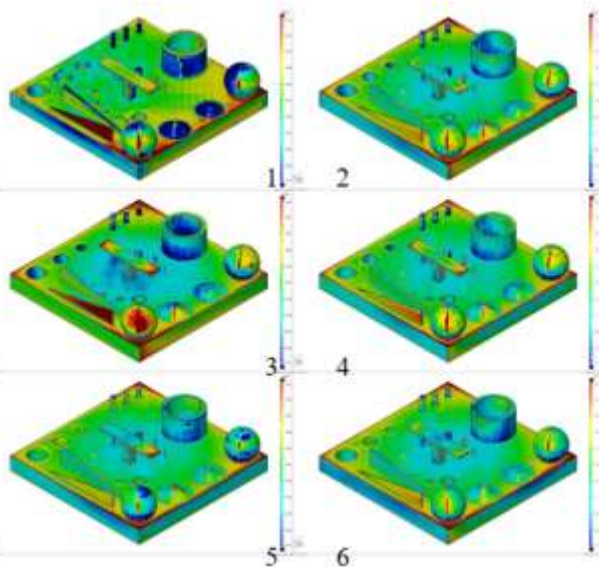
Experimenty s chemickým vyhlazováním

– ABS + páry acetonu

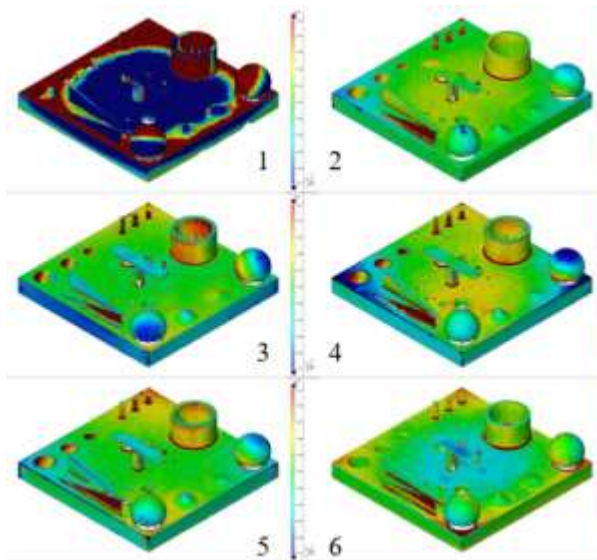


Experimenty s chemickým vyhlazováním

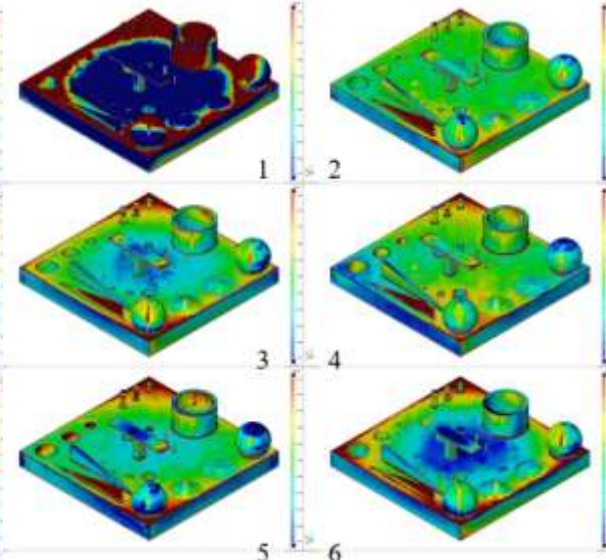
– porovnání CAD dat s výtiskem formou barevných map odchylek



CAD data vs. neupravený výtisk



neupravený výtisk vs. vyhlazený výtisk



CAD data vs. vyhlazený výtisk

- 1 – ponoření do acetonu
- 2 a 3 – páry acetonu, 120°C, 35s
- 4 a 5 – páry acetonu, 135°C, 60s
- 6 – nátěr MEK, 5xnátěr

Chemické vyhlazování



Pro chemické vyhlazení lze využít např. systémy AMT PostPro3D, DyeMansion PowerFuse S, Zortrax Apoller aj., které využívají k vyhlazení povrchu speciální chemickou sloučeninu.

Tato sloučenina se v první fázi procesu odpaří a naplní tak pracovní komoru mlhou. Následně dojde k její kondenzaci na povrchu dílu, čímž naleptá jeho strukturu.

Poté následuje zahlazení ostrých nerovností a tím dojde ke sjednocení povrchu dílu.

V konečné fázi je zbývající mlha z komory a povrchu zpracovaných dílů odvětrána.

Chemické vyhlazování výtisků (nejen) po tisku technologií FDM / FFF

Přehled nejběžnějších materiálů pro technologie FDM / FFF:

ABS (Akrylonitril Butadien Styren) – odolný proti mechanickému poškození, tuhý, houževnatý materiál, odolný proti kyselinám, hydroxidům, pro teploty do 100°C. Nevýhodou je vysoká smrštitelnost (0,3 - 0,7 %). ABS se rozpouští v acetonu, methylethylketonu a některých dalších organických rozpouštědlech.

ASA (Akrylonitrile Styrene Akrylat) - obdoba ABS, butadien je ve složení nahrazen znovu akrylátem. Má menší smrštitelnost než ABS, odolný UV záření. Vlastnosti podobné ABS.

PLA (Polylactic acid, neboli kyselina polymléčná) – bio plast vyráběný z kukuřičného škrobu. PLA není nijak zdravotně závadný a je rozložitelný v přírodě řízeným kompostováním. Má vyšší pevnost než ABS, menší smrštitelnost (lépe se tiskne), ale menší teplotní odolnost (do cca 60°C). Rozpouští se v tetrahydrofuranu (při kontaktu s vlhkým prostředím výbušné!) nebo chloroformu (běžně nedostupné).

PETG (Polyetylen tereftalát glykol) – pružnější, mechanicky odolnější materiál než ABS. Teplotní odolnost 70 - 80°C. PETG výtisk se dá vyhladit dichlormethanem (běžně nedostupný).

PVA (Polyvinyl alkohol) – materiál rozpustný ve vodě, nejvíce se používá ve více hlavových tiskárnách pro tisk podpor.

HIPS (houževnatý polystyrén) – HIPS se vyznačuje výbornou prostorovou stabilitou, zejména pro tisk rozměrnějších objektů. Rozpouští se a lze vyhladit pomocí D-limonenu.

PA (polyamid) – odolný termoplast, vysoká smrštitelnost, velmi špatná přilnavost k tiskové podložce. PA je rozpustný ve fenolu, roztoku methanolu nasyceném chloridem vápenatým a koncentrovanou kyselinou mravenčí nebo koncentrovanou kyselinou sírovou, dusičnou či chlorovodíkovou (nereálné v domácích podmínkách).

TPE a TPU (termoplastický elastomer, termoplastický polyuretan) – flexibilní filamenty kombinující termoplastické polymery, měkký pružný materiál a další přísady. Odolnější vůči chemikáliím, olejům, tukům i některým rozpouštědlům je TPU. Lze vyhlazovat v dimethylformamidu, dimethylsulfoxidu, N-methylpyrrolidonu či tetrahydrofuranu (nereálné v domácích podmínkách).

Chemické vyhlazování

– příklady



Mechanické vyhlazování

– mikro tryskání

Za pomoci tlaku vzduchu je vrháno abrazivum proti povrchu součásti. Jedná se o suchý, velmi jemný proces, který používá malé trysky (od 0,25 mm do 1,5 mm). Otryskávaná oblast má obvykle od 1 mm² až po několik cm² (v extrémních případech).

Použité tryskací médium má přesně určenou velikost zrna v rozmezí od 0,01 do 0,3 mm. Jedná se o velmi přesnou technologii, kterou lze například vytvářet nápisy na sklo a zároveň je tak jemná, že lze vytvořit vzor na vaječné skořápce.

Pro tryskání je používán vysoký tlak. Rychlost úbytku materiálu a velikost ovlivněného území je závislá na vzdálenosti trysky od plochy obrobku.

Výhodou je nepatrná produkce tepla, schopnost zpracovávat tvrdé a křehké materiály. Nevýhodou je malý úběr materiálu, proto se zpravidla používá jako dokončovací operace.

Mechanické vyhlazování – mikro tryskání



Mechanické vyhlazování – mikro tryskání

Brousicí média

Granulát z ořechových skořápek – abrazivum není tak agresivní a proto je vhodné pro jemné broušení povrchů.

Ocelové kuličky – jsou vhodné pro úpravy povrchů kuličkováním a také pro broušení povrchů.

Skleněné nebo zirkonové korálky – používají se pro abrazivní tryskání a navíc zirkonové lze také použít pro kuličkování.

Mechanické vyhlazování – mikro tryskání

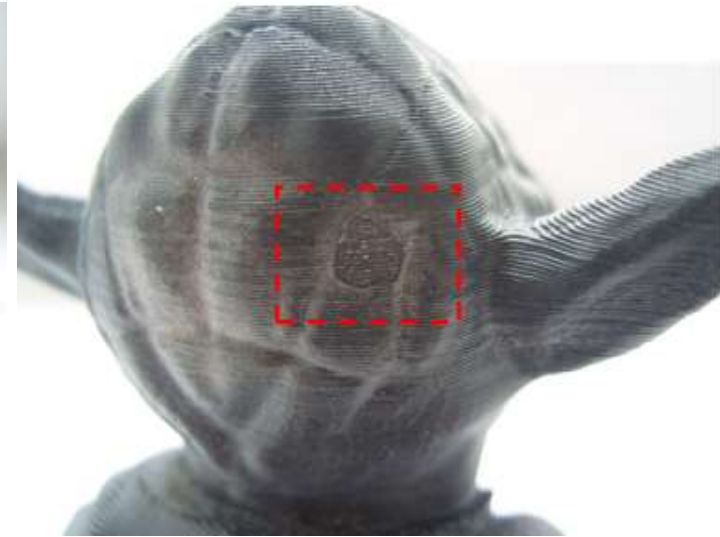
Příklad aplikace



IEPCO PEENMATIC PM 620 S



Ošetření substrátem B-2



Substrát C – lokální roztavení

IEPCONORM B-2 je neabrazivní substrát o střední velikosti částic 0,2 milimetru a tvrdosti HV 800. V tomto případě docházelo k jemnému obrušování, kdy se vzhled povrchu změnil z černé na „zaprášenu“. Struktura zůstala nezměněná a to i po soustředění se na jedno místo na povrchu.

IEPCONORM C, abrazivum o střední velikosti zrn v rozmezí 0,125 až 0,250 milimetrů o tvrdosti HV 1300. Zde docházelo ke stejnému efektu jako u předchozího případu, ale navíc také k lokálnímu roztavení materiálu.

Mechanické vyhlazování – omílání

Omílání je často používané jako předúprava povrchu před galvanickým pokovením nebo nanášením nátěrových hmot a to především u menších komponent.

V případě 3D tisku z kovu se používá také pro dosažení konečného povrchu s hladkým a lesklým povrchem. Vibrační omílání eliminuje povrchové defekty a zlepšuje užité vlastnosti.



Mechanické vyhlazování

– omílání

Vibrační – v tomto případě jsou k dispozici vany či misky v různých velikostech. Obě varianty jsou vhodné pro veškeré FDM materiály. Z důvodu agresivního zpracování dílu ve standartních vanách, byly přidány distanční tyče, které zabraňují uvíznutí abraziva mezi součástí a stěnou. Při zpracovávání dílů v miskách nejsou tyto vymežující tyče nutné, jelikož zde nedochází k tak silnému rozpořbování abraziva s díly. Nevýhodou omílání v miskách je delší čas procesu, z důvodu šetrnějšího opracovávání, ale díly jsou lépe chráněny před poškozením.

Odstředivé – je vhodné pro všechny součásti vyrobené pomocí FDM technologie z jakéhokoliv materiálu. Jediným omezením je tu velikost dílu, po vložení musí být mezera mezi stěnou a objektem 12 cm. Toto dokončování je vhodné, pokud se mají zpracovávat křehké díly a je třeba zachovat jemné detaily.

Mechanické vyhlazování – omílání

Broušící média

Keramická – vhodná pro mohutné FDM díly z PC, ULTEM či PPSF. Keramická tělíska jsou nejtěžší a nejagresivnější médium.

Syntetická – největší výhodou je zde samotná váha abraziva. Díky tomu, že je lehčí než plast a keramika, eliminuje se zde poškození upravovaných dílů (zlomení tenkých částí nebo poškození jemných rysů). Nevýhoda spojená s hmotností je delší procesní čas.

Kukuřičné klasy – toto médium je ve stádiu testování. Uplatnění našlo zvláště pro leštění, ale v kombinaci s jinými materiály ho lze použít i pro jiné metody. Tímto abrazivem může dojít k obarvení dílu, ale to lze lehce smýt.

Povrchové úpravy

– mokré lakování

Mokrý lakování spočívá v nanášení tekutých plničů, bází, barev nebo laků pomocí lakovací pistole na povrch dílu.

Mokrý lakování se používá především u designových dílů a pohledových prototypů vyráběných v menších sériích.

Díky lakování je možné docílit velmi realistického vzhledu o vysoké kvalitě, různých vlastností a hrubostí povrchu nebo přesných RAL odstínů barev.



Povrchové úpravy

– barvení máčením

Díky této technologii lze probarvit díly v těžko dostupných strukturách a plochách.

Barvení máčením je vhodné zvolit u dílů, které vyžadují vysokou odolnost vůči otěru barvy.

Tento postprocessing může být konečnou úpravou povrchu nebo předcházet např. chemickému vyhlazení.



Povrchové úpravy

– pokovení

Pokovení je proces vytvoření kovového povlaku na povrchu dílu.

Za pomoci metody vakuového napařování lze nanést na díl velmi tenké kovové vrstvy různých materiálů, které přesně kopírují povrch výrobku.

Pokovení se v aditivní výrobě typicky využívá pro designové díly, u kterých je vyžadován metalický vzhled, nebo k dosažení vodivého povrchu, přes který lze odvádět elektrický náboj.

Pokovením lze také zvýšit odolnost a změnit funkční vlastnosti finálního produktu.



Tepelné zpracování

Tepelné zpracování je základní technologická úprava železných i neželezných kovů s cílem upravit mechanické a materiálové vlastnosti, jako jsou např. pevnost, tažnost, pružnost, mikrostruktura, atd.



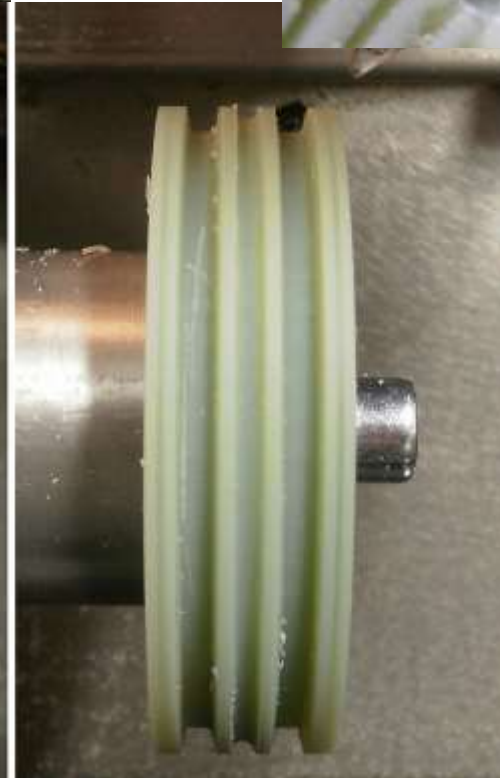
Obrábění

Třískové obrábění se v aditivním průmyslu nejčastěji využívá jako dokončovací operace pro dosažení přesných rozměrů a požadované kvality povrchu např. u otvorů a tvarových ploch.



Obrábění

– ukázka problematiky obrábění materiálu ABS Like (PolyJet)



Optimální řezné podmínky:

$$f_n = 0,1 \quad [\text{mm/ot}]$$

$$a_p = 0,2 \quad [\text{mm}]$$

$$v_c = 150 \quad [\text{m/min}]$$

Postprocessing

– zdroje

Hádek, J.: Dokončovací operace na dílech z 3D tiskáren. Liberec: TUL, FS, 2014, 57s, vedoucí BP Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Hádek, J.: Vliv dokončovacích operací na geometrickou přesnost dílů vyrobených aditivními technologiemi. Liberec: TUL, FS, 2016, 101s, vedoucí DP Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.

KELLER, P. Optimal Cutting Conditions for Surface Finishing of Parts Made of Photopolymers. *In: Materials Science Forum*. 862. Switzerland, Pfaffikon: Trans Tech Publications, 2016, 862, s. 192-199. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.862.192. ISBN 978-3-03835-728-5. ISSN 0255-5476

www.one3d.cz/post-processing

www.materialpro3d.cz/blog/chemicka-odolnost-a-vyhladitelnost-3d-vytisku

blog.prusa3d.com/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani_36268

www.protocast.cz/cz/povrchove-upravu