

Nové možnosti rozvoje vzdělávání na Technické univerzitě v Liberci

Specifický cíl A3: Tvorba nových profesně zaměřených studijních programů

NPO_TUL_MSMT-16598/2022



Předmět: Technologie II (aditivní technologie) Přednáška č. 10: Úvod do aditivních technologií



Ing. Petr Keller, Ph.D.

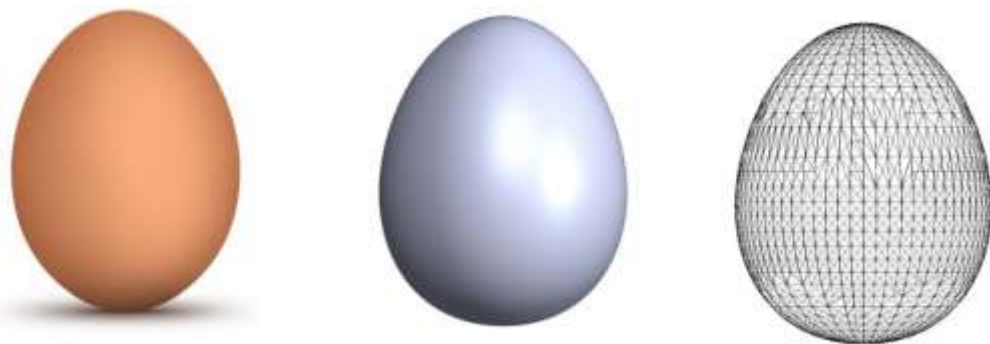
Aditivní technologie – definice

Aditivní výroba je termín, který popisuje technologie, které vytvářejí 3D objekty přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. Dnes používané materiály mohou být o plasty, kovy, sklo, keramika, beton atd.

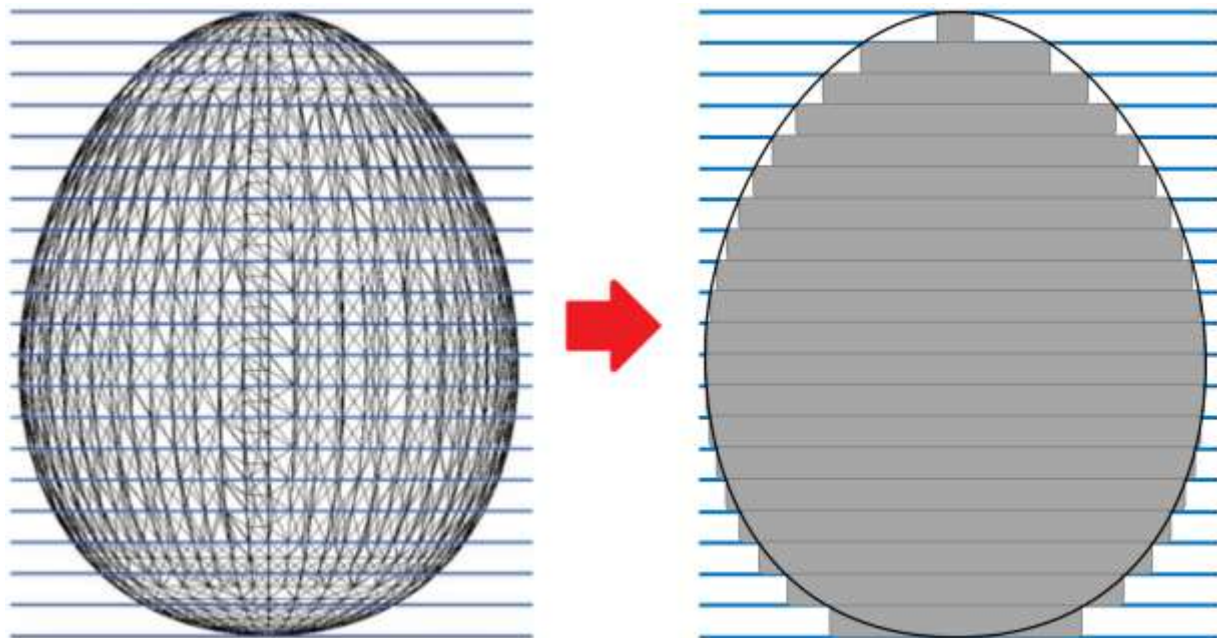
Další běžně používané názvy pro aditivní technologie (výrobu):

- Rapid Prototyping (RP)
- Additive Manufacturing (AM)
- 3D tisk

Obecný princip výroby dílů pomocí aditivních technologií



- Složením 2D tvarů (vrstev) na sebe lze získat 3D objekt
- Jednoduchá koncepce výrobního procesu – výborné pro automatizaci



Výhody aditivních technologií

- **Lze vyrobit velice tvarově složité součásti.**
- Obvykle jednoduchá a rychlá příprava výroby na základě 3D dat.
- U některých technologií lze kombinovat více materiálů v rámci jednoho výtisku.
- Vlastní výroba je obvykle plně automatický proces.
- Až na výjimky menší plýtvání materiálem.
- Aditivní technologie mění nároky na konstrukci součástí – např. topologická optimalizace



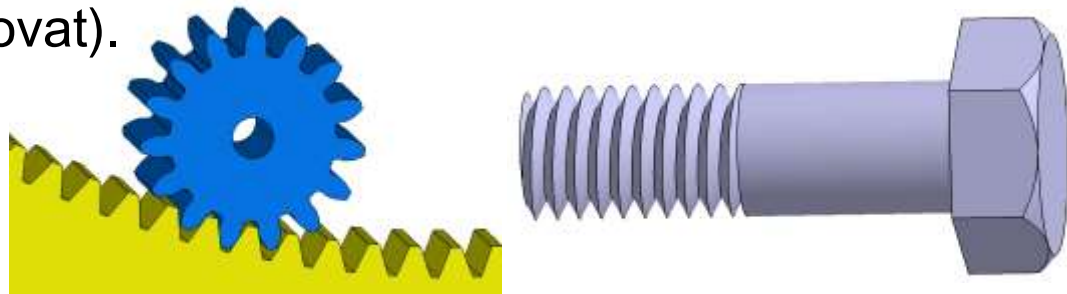
Zdroj: 3trpd.co.uk (výměník tepla)



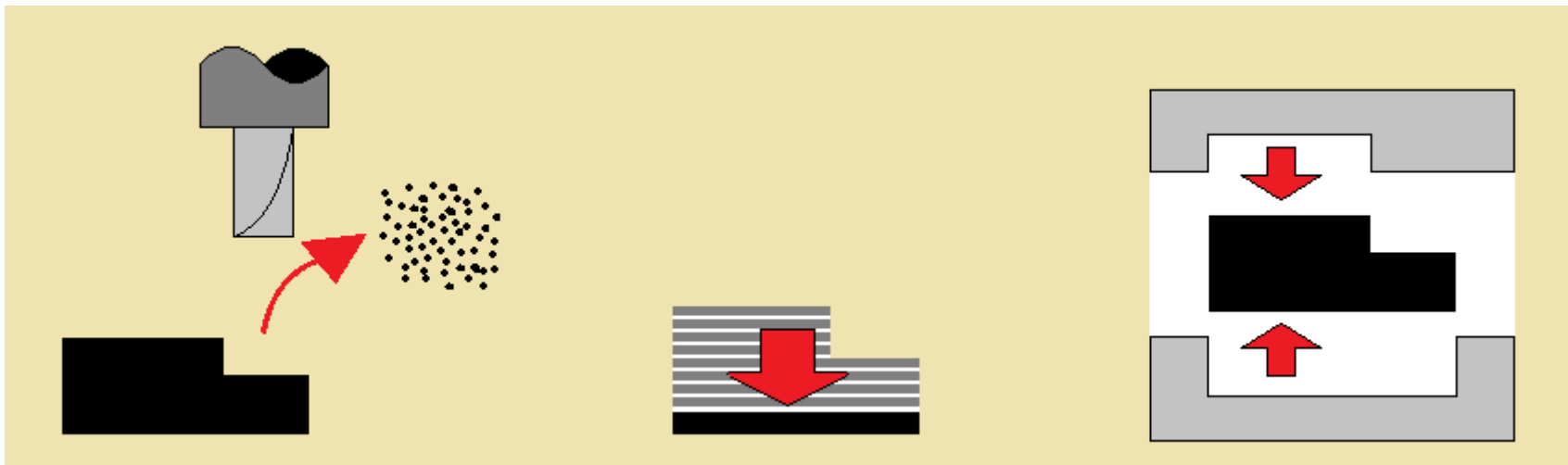
Zdroj: VAVERKA, Ondřej. Ultra lehké komponenty vyráběné 3D tiskem. MM průmyslové spektrum. Praha: MM publishing, 2019, 2019(4). ISSN 1212-2572.

Nevýhody aditivních technologií

- Horší rozměrová a geometrická přesnost, často i horší kvalita povrchu.
- Součásti z aditivní výroby mají často horší mechanické vlastnosti v porovnání s jinými výrobními technologiemi.
- Stroje pro aditivní výrobu nejsou univerzální – umožňují výrobu obvykle pouze jednou danou metodou.
- Technologie obvykle vyžadují tzv. post-processing (dokončení po vlastním 3D tisku).
- Po výpadku energie v průběhu stavby je problém navázat – pokračovat ve stavbě dále.
- Aditivní technologie mění nároky na konstrukci součástí – jiné (vyšší) možnosti geometrických tvarů, ale vše musí být v 3D modelu (nelze zjednodušovat).



Porovnání základních výrobních technologií



Odebírání materiálu

- obrábění
- nástroje
- různé stroje pro různé tvary dílů

Přidávání materiálu

- bez nástrojů

Tváření materiálu

- tváření, vstřikování...
- složité nástroje

Příklady využití aditivních technologií

- **Koncept** – sdílení všech nápadů
- **Vhodnost** – testování rozměrů na návrhu
- **Tvar** – zhodnocení estetičnosti a ergonomie dílů
- **Funkčnost** – testování v pracovním prostředí
- **Nabídka** – ocenění produktu z hlediska nabídky
- **Marketing** – komunikace o designu se zákazníkem
- **Výroba** – zejména speciální díly (letectví, kosmonautika, medicína,...)

Aditivní výroba

Přehled procesů aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:

(překlad do češtiny – Ing. Petr Keller, Ph.D. – není oficiální překlad)

- vytlačování (extrudování) materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém je materiál selektivně dávkován tryskou nebo otvorem,
- tryskání materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém jsou selektivně nanášeny kapičky stavěného materiálu,
- tryskání pojiva – proces aditivní výroby, ve kterém je kapalné pojivo selektivně nanášeno pro spojení práškového materiálu,
- laminování deskového materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém je pro vytvoření součásti spojován deskový materiál,
- fotopolymerizace ve vaně – proces aditivní výroby, při kterém je kapalný fotopolymer v nádobě selektivně vytvrzován polymerizací aktivovanou světlem,
- spojování prášku ve vrstvách teplem – proces aditivní výroby, při kterém tepelná energie selektivně spojuje oblasti ve vrstvě prášku,
- řízená energie natavování – proces aditivní výroby, při němž je tepelná energie soustředěna na spojení materiálů tavením v okamžiku nanášení.

Základní společné kroky aditivních technologií



Běžné formáty dat pro aditivní technologie

STL – Standard Triangulation Language

(vznikl v r. 1987 ve společnosti 3D Systems, kterou založil průkopník 3D tisku Chuck Hull)

↔ popis vnějšího povrchu 3D modelu pomocí trojúhelníkové sítě (mesh)

Výhody

- neutrální a snadno implementovatelný formát 3D modelu
- jde de-facto o standard a je široce podporován (téměř) každým CAD nástrojem, slicerem a webem pro sdílení modelů

Nevýhody

- nepodporuje informace o barvách nebo texturách, a proto není vhodný pro barevný tisk
- neobsahuje informace o měřítku, což vede k nejasnostem ohledně výchozích rozměrů (tj. milimetry, palce nebo jiné jednotky)
- je náchylný k chybám, které brání úspěšnému rozřezání na vrstvy nebo tisku modelu
- vyžaduje enormní velikosti souborů pro vysoké rozlišení nebo hladký povrch
- neobsahuje žádná další metadata o designu (například autorská práva)
- výsledná data je složité přepracovat – nelze jednoduše zpět převést na CAD model
- v budoucnu se může stát zastaralým

Běžné formáty dat pro aditivní technologie

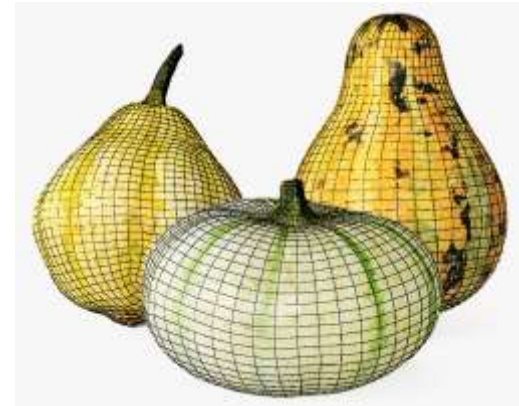
OBJ – Wavefront Object

(definován v 90. letech společností Wavefront Technologies)

↔ popis vnějšího povrchu 3D modelu pomocí obecné polygonové sítě

Výhody

- stejně jako STL je to open source a neutrální souborový standard s širokou podporou softwaru a dostupností již navržených modelů
- jde o nejjednodušší formát souboru pro podporu více barev
- má vylepšené rozlišení modelu a tím i kvalitu oproti STL
- ukládá další metadata do stejného souboru



Zdroj: <https://www.turbosquid.com/3d-models/decorative-pumpkins-model-1979585>

Nevýhody

- mohou nastat problémy s načtením díky samostatným souborům pro definici barev a textur
- stejně jako STL formát neposkytuje žádné informace o měřítku
- výsledná data je složité přepracovat – nelze jednoduše zpět převést na CAD model

Běžné formáty dat pro aditivní technologie

AMF – Additive Manufacturing File

(formát byl představen v roce 2011 a označen jako „STL 2.0“, v r. 2013 standardizován – ISO 52915)

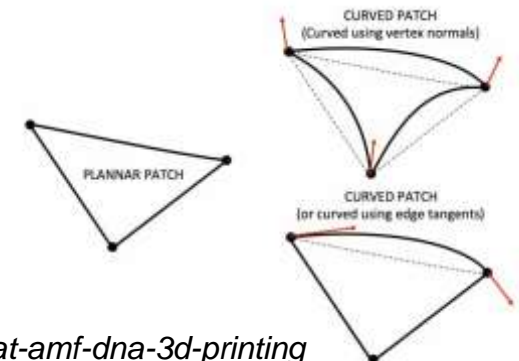
↔ popis vnějšího povrchu 3D modelu pomocí zakřivených trojúhelníků

Výhody

- je moderní, rozšiřitelný standard souborů založený na XML, který se může vyvíjet, aby držel krok s novými požadavky
- ukládá materiál, barvy a další metadata bez dalších souborů
- využívá pokročilé prostředky pro definování a ukládání geometrie tvaru, což vede k lepšímu rozlišení a menšímu počtu chyb

Nevýhody

- má nízkou úroveň podpory v CAD systémech i SW pro přípravu tisku (Slicerech)
- čelí nejisté budoucnosti díky nové alternativě 3MF



Běžné formáty dat pro aditivní technologie

3MF – 3D Manufacturing Format

(představen v r. 2015 (Microsoft), dnes open-source standard se zapojením klíčových hráčů pro 3D tisk)

↔ podobný AMF, vyšší numerická přesnost + informace o nastavení tisku

Formát 3MF podporují např.:

Výhody

- otevřený standard se silnou průmyslovou podporou
- opravuje mnoho zdrojů chyb geometrie modelu ve srovnání s jinými formáty
- zahrnuje všechny relevantní vlastnosti modelu pro 3D tisk, včetně licenčních informací a výrobních dat (např. nastavení sliceru, podpůrných struktur apod.)
- může zahrnovat zabezpečení a šifrování pro ochranu duševního vlastnictví modelů

Nevýhody

- zatím není plně kompatibilní napříč platformami (tj. export z jedné aplikace ≠ úspěšné otevření v jiném programu)
- pro jednoduché aplikace je považován za příliš složitý formát, tj. implementace do CAD programů je relativně pomalá

Prusa Slicer

Ultimaker Cura

Autodesk
(Fusion 360, Netfabb)

GrabCad Print

Dassault Systèmes
(SolidWorks, CATIA)

Creo

Siemens
(Solid Edge, NX)

Materialise Magics

Envision One RP
(EnvisionTec)

Microsoft
(Office, Paint 3D)

nTopology

Oqton

Další formáty dat pro aditivní technologie

VRML – Virtual Reality Modeling Language

VRML a jeho nástupce X3D jsou nejoblíbenější open-source formáty pro interaktivní 3D vektorovou grafiku. Obvykle se používají při hraní her, speciálních efektech a vizualizaci pro vědecké, inženýrské a lékařské účely. Mnoho slicerů (např. Cura) může číst X3D soubory přímo a jednoduše ignorovat jakákoli data, která nejsou relevantní. VRML lze přímo zpracovávat v programu Objet Studio společnosti Stratasys a tisknout na strojích Polyjet barevně.

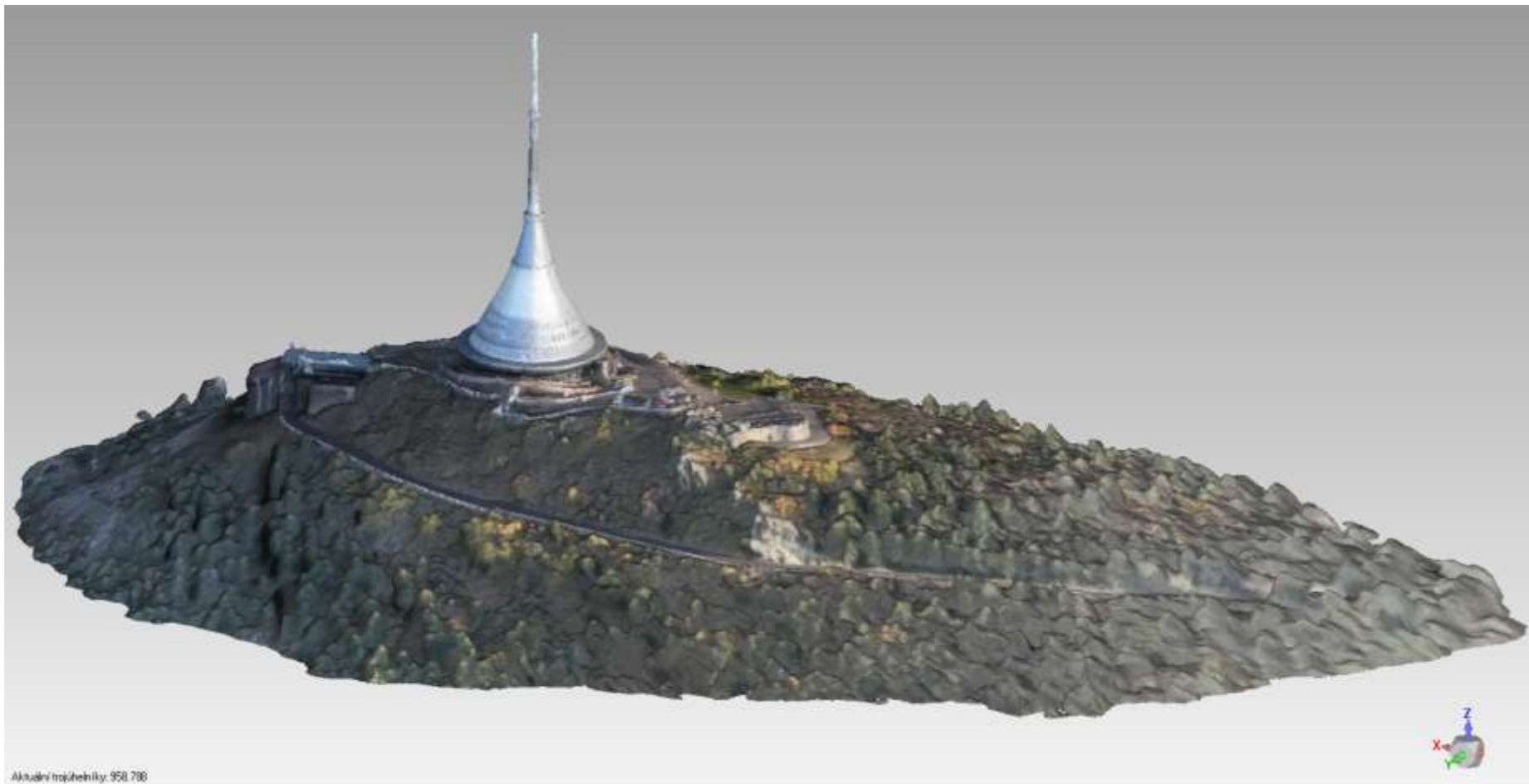
STEP & IGES

STEP a IGES jsou dva významné standardy souborů, určené pro interoperabilitu mezi inženýrskými aplikacemi. Namísto reprezentace sítě tyto formáty používají matematický popis objektů, což je složitější, ale přesnější přístup. Některé slicery podporují přímé použití těchto formátů, ale většinou je třeba data převést na STL (nebo OBJ, 3MF, ...).

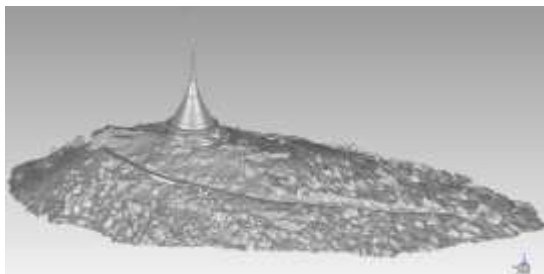
PLY – Polygon File Format nebo Stanford Triangle Format

PLY byl navržen především pro ukládání dat z 3D skenerů a je široce používán v zubním průmyslu. Je podporován jen speciálními slicery (například Formware).

Ukázka polygonálních dat s barevnou texturou (zde VRML)



Aktuální trojúhelníky: 950.798



STL

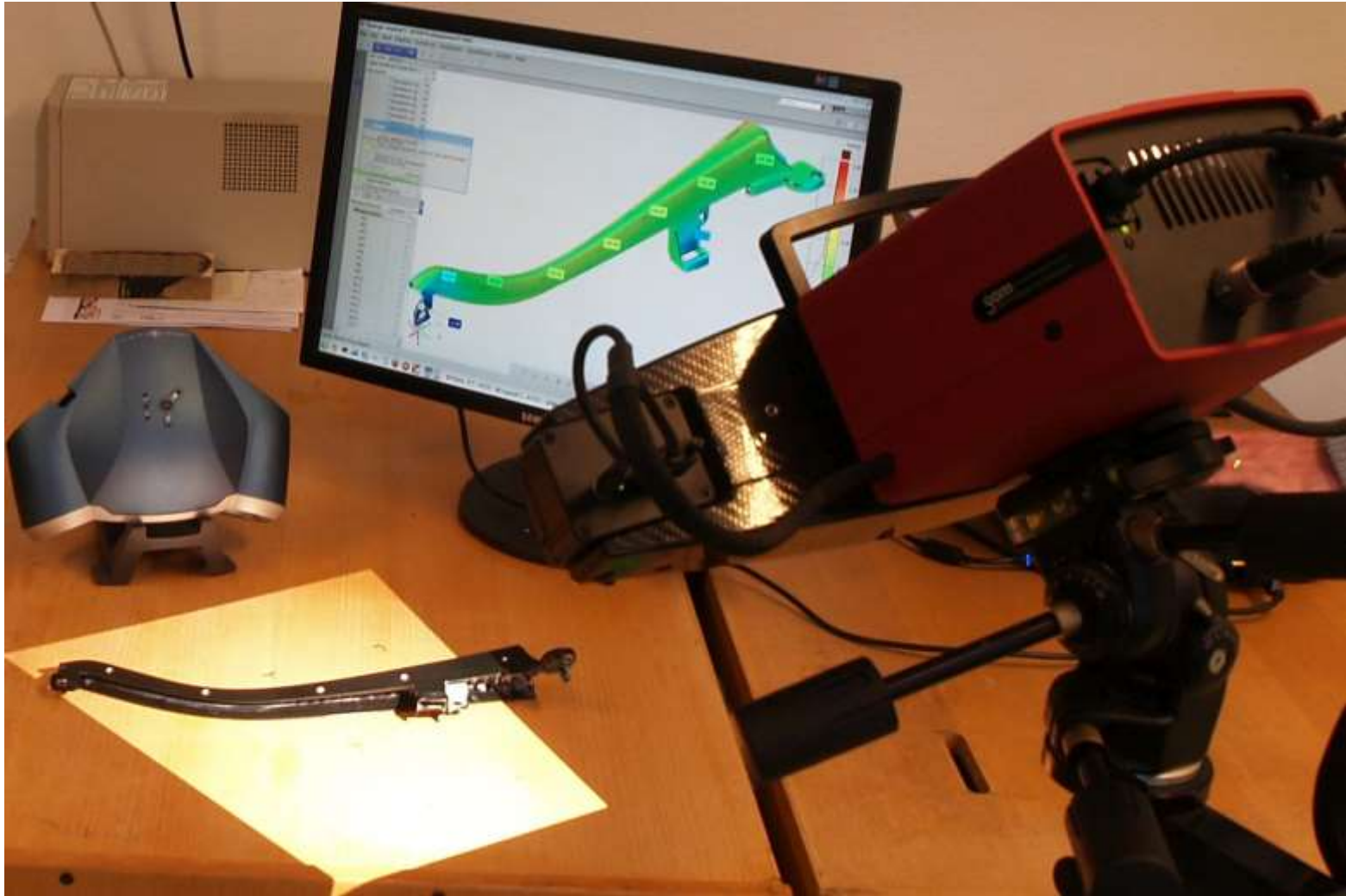


PNG

Jak získat data ve formátu STL

- ↔ popis vnějšího povrchu 3D modelu pomocí trojúhelníkové sítě (mesh)
- **3D model v CAD** → Soubor / Uložit jako... / *.STL
 - objemové těleso (solid) obvykle bez problémů
 - plošné těleso – pozor na úplné uzavření všech navazujících ploch
 - **3D skenování** – z reálného dílu (makety) tzv. mračno bodů (body povrchu dílu v souřadnicích X, Y, Z) → polygonizace → STL data
 - obvykle nutno výsledný data upravit, zejména vyplnit díry

Jak získat data ve formátu STL

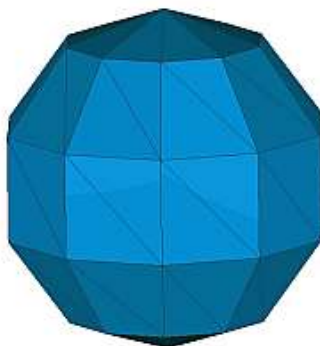


skenování dílu optickým skenerem Atos

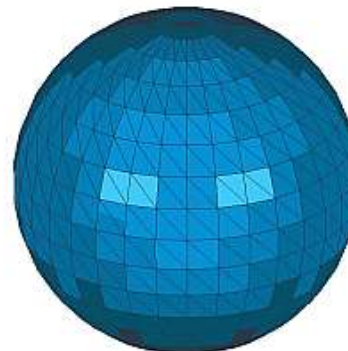
STL formát dat



koule

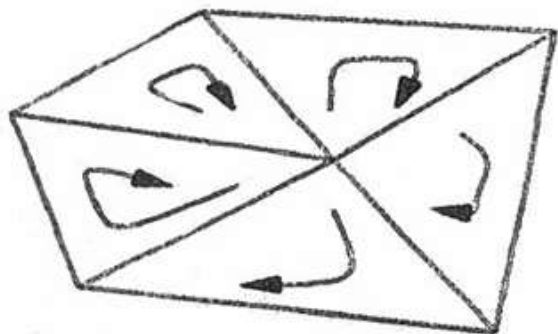


hrubé rozlišení



jenné rozlišení

Příklad reprezentace trojúhelníků v stl datech:



```
facet normal -9.462985e-001 3.177274e-001 5.973599e-002
outer loop
  vertex -5.000000e+001 2.686733e-015 1.467769e-015
  vertex -4.045085e+001 2.579150e+001 1.408996e+001
  vertex -4.045085e+001 2.914764e+001 -3.760846e+000
endloop
endfacet
facet normal -9.462985e-001 2.921588e-001 -1.384280e-001
outer loop
  vertex -5.000000e+001 2.686733e-015 1.467769e-015
  vertex -4.045085e+001 2.914764e+001 -3.760846e+000
  vertex -4.045085e+001 2.137037e+001 -2.017514e+001
endloop
endfacet
facet normal -9.462985e-001 1.549954e-001 -2.837172e-001
outer loop
  vertex -5.000000e+001 2.686733e-015 1.467769e-015
  vertex -4.045085e+001 2.137037e+001 -2.017514e+001
```

STL formát dat

Jednotky rozměrů ve formátu .STL nejsou standardně dány:

```
solid Default
  facet normal 9.965138e-01 8.302967e-02 8.140126e-03
    outer loop
      vertex 3.846057e+01 1.691150e+01 1.327663e+00
      vertex 3.846057e+01 1.678188e+01 2.649771e+00
      vertex 3.868277e+01 1.426173e+01 1.153604e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal 9.965144e-01 8.302087e-02 8.155012e-03
    outer loop
      vertex 3.868277e+01 1.426173e+01 1.153604e+00
      vertex 3.846057e+01 1.678188e+01 2.649771e+00
      vertex 3.868277e+01 1.414878e+01 2.303505e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal 1.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00
    outer loop
      vertex 3.868277e+01 1.414878e+01 2.303505e+00
      vertex 3.868277e+01 9.445481e+00 1.685040e+00
      vertex 3.868277e+01 1.426173e+01 1.153604e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal 1.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00
    outer loop
      vertex 3.868277e+01 1.426173e+01 1.153604e+00
      vertex 3.868277e+01 9.445481e+00 1.685040e+00
      vertex 3.868277e+01 9.528807e+00 8.443715e-01
    endloop
  endfacet
```

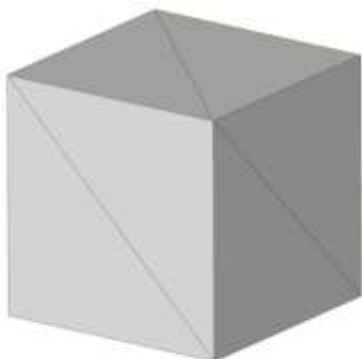
? μm , mm,
? cm, m,
? palce, ...

Některé typické chyby v STL datech

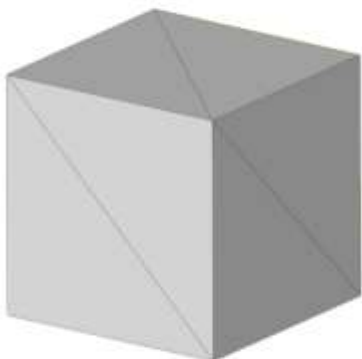
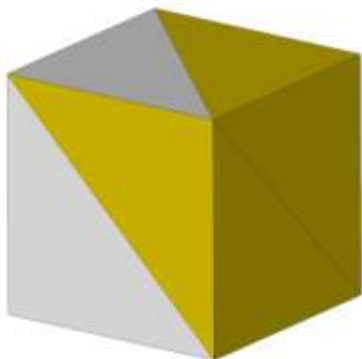
špatně



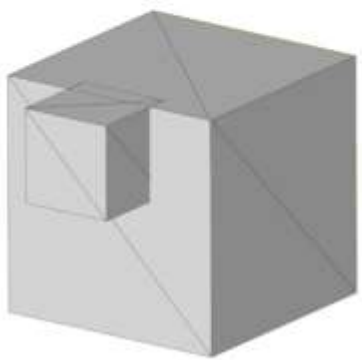
dobře



Díry – chybějící trojúhelníky



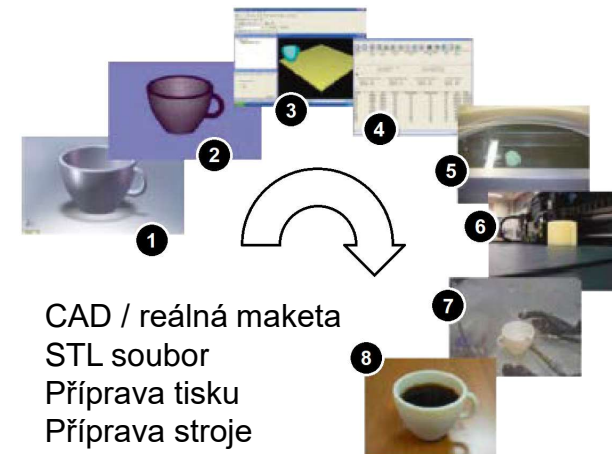
Obrácený směr normál



Protínající se trojúhelníky

Příprava tisku

- Ověření souboru (oprava)
- Orientace dílu
- Úprava měřítka, kompenzace smrštění
- Nastavení tloušťky vrstvy
- Generování podpor
- Nastavení více kopií dílu
- Uspořádání více dílů v pracovním prostoru stroje
- Rozdělení velkých dílů
- Simulace výroby, kontrola procesu
- Vytvoření odhadu času / ceny

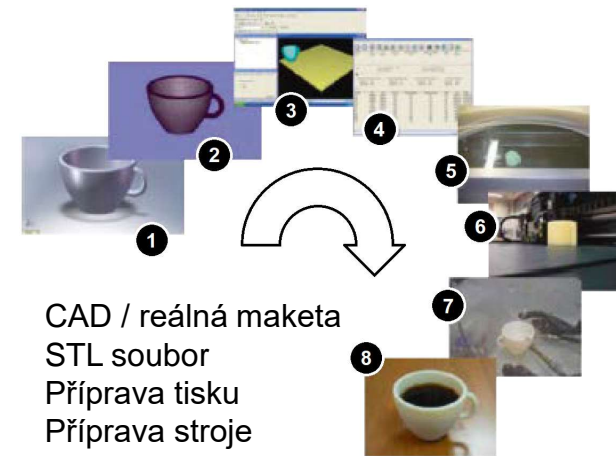


- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace



Příprava stroje

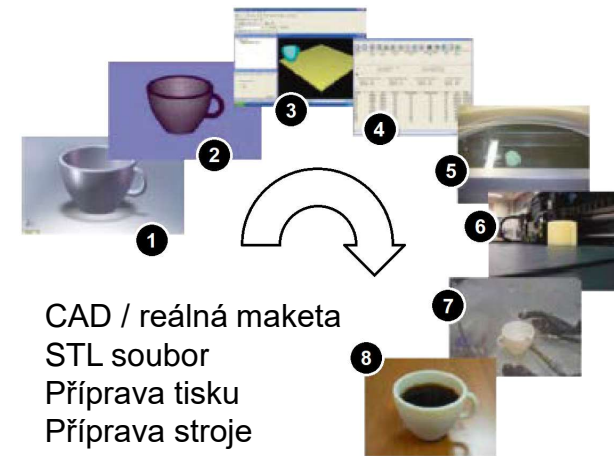
- Nastavení parametrů tisku na stroji
- Příprava materiálu
- Zahřátí stroje, tiskových hlav apod.
- Úprava prostředí v komoře stroje (inertní atmosféra apod.)
- Kalibrace tiskových hlav
- atd. – závisí na použité technologii



- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace



Stavba – 3D tisk

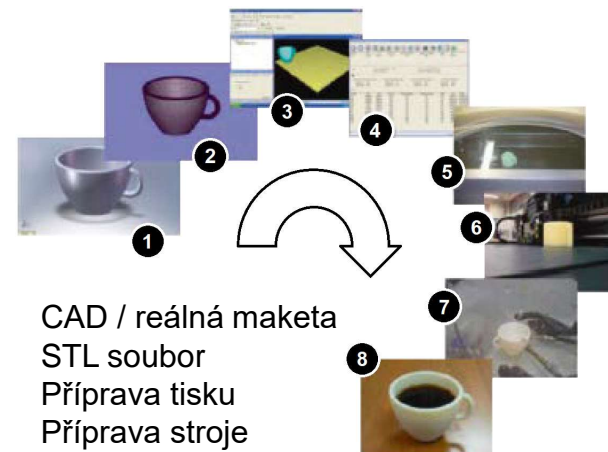


- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace

- Obvykle plně automatický proces
- Typicky tisk přes noc / víkend apod.

Post-processing

- Dotvrzení dílu
- Odstranění podpor
- Žihání k odstranění vnitřního pnutí
- Dokončování povrchu dílů
- atd. – závisí na použité technologii



- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace

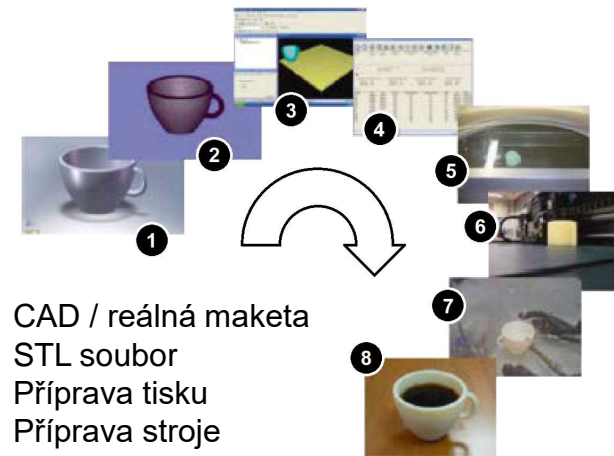


Zdroj: 1prototype.com/freeform_parts.html

Aplikace

Použití vytištěných dílů:

- Funkční části
- Kontrola smontovatelnosti
- Prototypy – kontrola funkce
- Modely pro kovové odlitky
- Vizualizace / prezentace dílů
- Vývoj / výzkum
- atd.



- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace



Zdroj: 3dprinting.co.uk



Zdroj: www.stm.com.tr



Aplikace – ukázky

Příklad: odlehčené struktury



Zdroj: www.engineering.com

Příklad: kombinace dvou nebo více různých materiálů

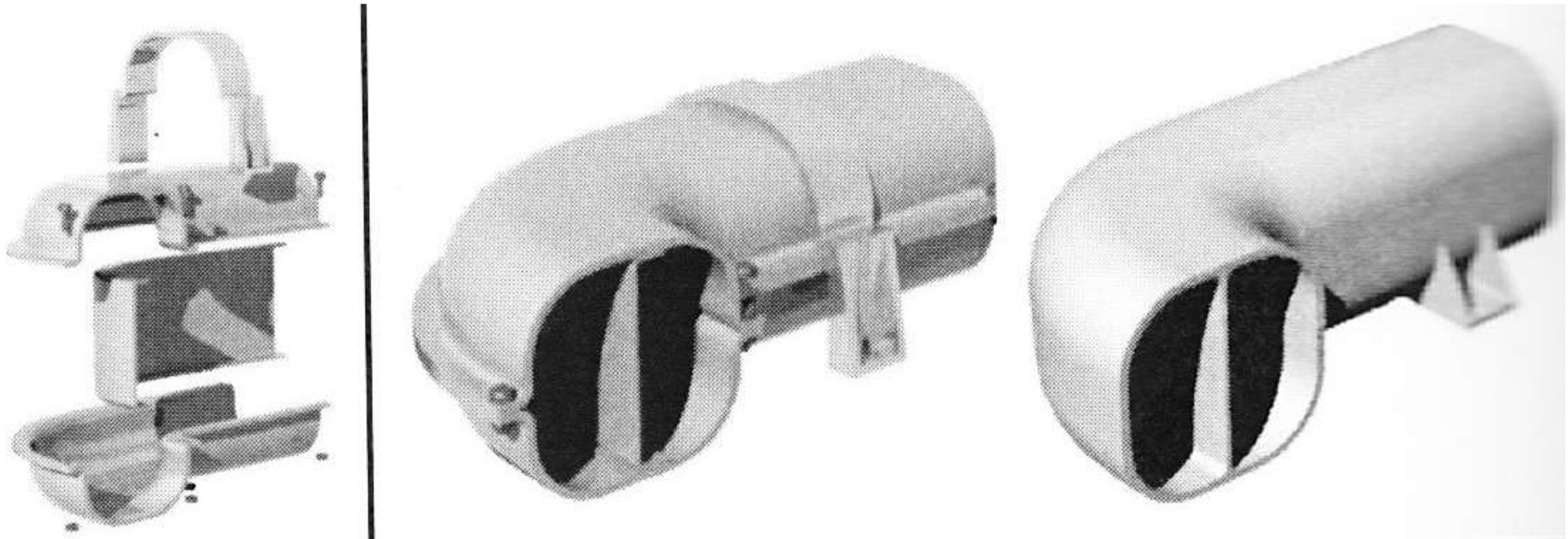


Zdroj: 3ddrucker.de



Aplikace – ukázky

Využití možností aditivních technologií – „**design for function**“



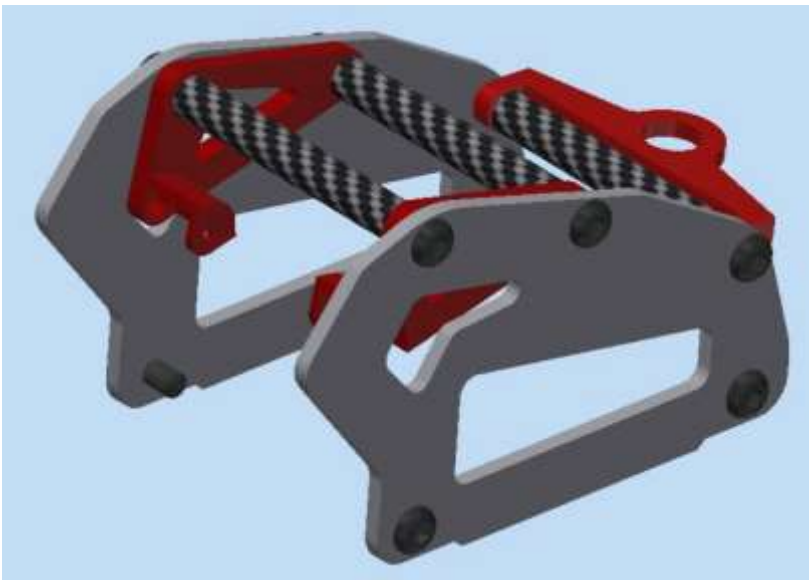
Zdroj: Seepersad C. C., Allison J., Sharpe C. The need for effective design guides in additive manufacturing. In: *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 5: Design for X, Design to X, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017.

Aplikace – ukázky

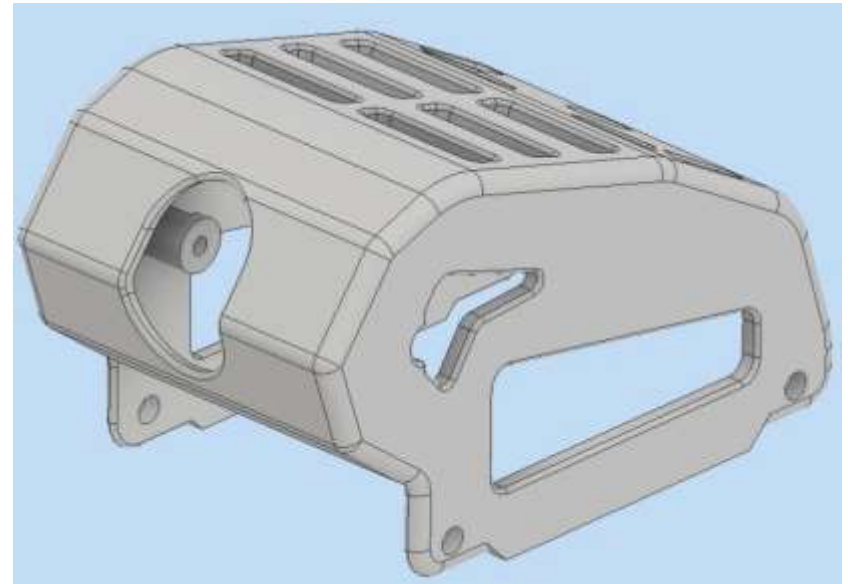
Využití možností aditivních technologií – „**design for function**“

Příklad realizovaný na KSA – kryt elektroniky modulární jednotky FPV dronu:

sestava cca 14 dílů na základě frézovaných bočnic:



jeden díl pro 3D tisk metodou MJF:



Aplikace – ukázka využití principu „design for function“



srovnání obou verzí dronů

	Frézovaná verze	3D tisk
Hmotnost základny (bez akumulátoru)	336 g	212 g
Cena výroby základny	600,-Kč	1450,-Kč
Počet dílů základny	12 + 10 šroubů M3	3 + 4 šrouby M3

Děkuji za pozornost!

Ing. Petr Keller, Ph.D.

TU v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů a automatizace

petr.keller@tul.cz