

# **Aditivní technologie**

## **(aditivní výroba, Rapid Prototyping)**

**Ing. Petr Keller, Ph.D.**

# **Aditivní technologie – obsah**

**Přednášky:** (cca první polovina semestru – oba bloky)

- Definice aditivních technologií, porovnání s ostatními výrobními technologiemi, výhody nevýhody
- Princip výroby dílů pomocí aditivních technologií, základní postup přípravy výroby
- Vstupní formát 3D dat pro aditivní technologie, vlastnosti
- Klasifikace aditivních technologií dle normy, základní rozdělení dle formy používaných materiálů
- Představení aditivních technologií na bázi vstupního materiálu ve formě kapalných fotopolymérů
- Představení aditivních technologií na bázi vstupního materiálu ve formě prášků (jak kovových, tak nekovových)
- Představení aditivních technologií na bázi vstupního materiálu ve formě pevného materiálu (plasty, vosky, kovy atd.)
- Technologičnost konstrukce pro aditivní výrobu
- Pomocné technologie k aditivním technologiím – technologie lití ve vakuu do silikonových forem
- Budoucnost aditivních technologií, hybridní technologie

# **Aditivní technologie – obsah**

**Cvičení:** (cca druhá polovina semestru – oba bloky)

- Zadání samostatné práce – konstrukce vlastního dílu pro následnou přípravu výroby a výrobu pomocí aditivních technologií
- Zadání přípravy krátkého referátu na téma „aditivní technologie“
- Příprava výroby a výroba navržených dílů (viz výše), vliv orientace dílů na jeho vlastnosti
- Tzv. postprocessing – dokončení vytištěných dílů
- Praktické představení vybraných technologií dostupných v laboratoři (laboratoř pod CxI – cvičící Ing. Šafka, Ph.D.)
- Stavba a oživení 3D tiskárny z připravených komponent (stavebnice)
- Přednesení krátkých prezentací na téma aditivních technologií, zápočet

# **Aditivní technologie – doporučená literatura ke studiu**

**Základem jsou přednášky a cvičení + materiály na e-learningu (elearning.tul.cz)**

Další literatura (v angličtině):

[1] GEBHARDT A. *Understanding Additive Manufacturing*. Munich: Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42552-1.

[2] SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2016. ISBN 9781498714785.

[3] CHEN, Tin-Chih Toly. *3D printing and ubiquitous manufacturing*. Cham, Switzerland: Springer, [2020]. SpringerBriefs in applied sciences and technology. ISBN 978-3-030-49149-9.

[4] DIEGEL, Olaf a Axel Nordin, Damien Motte. *A practical guide to design for additive manufacturing*. Singapore: Springer, [2020]. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-981-13-8283-3.

# Aditivní technologie – zápočet a zkouška

## Zápočet:

- splnění všech úkolů z výuky
- docházka (povolené 3 absence)
- díl pro 3D tisk
- krátká prezentace
- splnění úkolů Dr. Šafky

## Zkouška:

- písemný test na základě probrané látky (přednášky i cvičení)
- ústní pohovor – rozbor písemného testu + doplňující dotazy

Termíny zkoušky budou upřesněny v závěru semestru, po předchozí dohodě lze uskutečnit i individuální termíny.

# Aditivní technologie – případná distanční výuka

**Výuka je aktuálně plánována pouze prezenčně.**

Pokud bude nařízena distanční výuka (on-line), bude probíhat v čase standardní výuky dle rozvrhu přes Google Meet.

Pro připojení na Google Meet se nemusíte nikam registrovat - účet ke službám Google máte vytvořen automaticky s univerzitním účtem - **pro přihlášení ke službám Google tedy prosím použijte univerzitní email** - budete automaticky přesměrováni na přihlašovací stránku TUL, kde zadáte jméno a heslo do LIANE. V případě použití soukromého Google účtu můžete mít problémy se připojit.

Odkaz pro připojení k výuce přes Google Meet Vám bude zaslán na e-mail, který máte uveden na STAGu – prosím o kontrolu aktualizace.

# **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. Jednoho dne možná i lidské orgány.

Další běžně používané názvy pro aditivní technologie (výrobu):

- Rapid Prototyping (RP)
- Additive Manufacturing (AM)
- 3D tisk (pozor – jedna z technologií AM se přímo jmenuje 3D printing)

# Výhody aditivních technologií

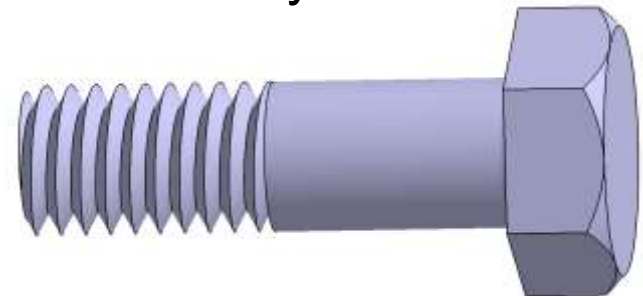
- **Lze vyrobit velice tvarově složité součásti.**
- U některých technologií lze kombinovat více materiálů v rámci jednoho výtisku.
- Jednoduchá příprava výroby.
- Vlastní výroba je obvykle plně automatický proces.
- Až na výjimky menší plýtvání materiálem.





## 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 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).

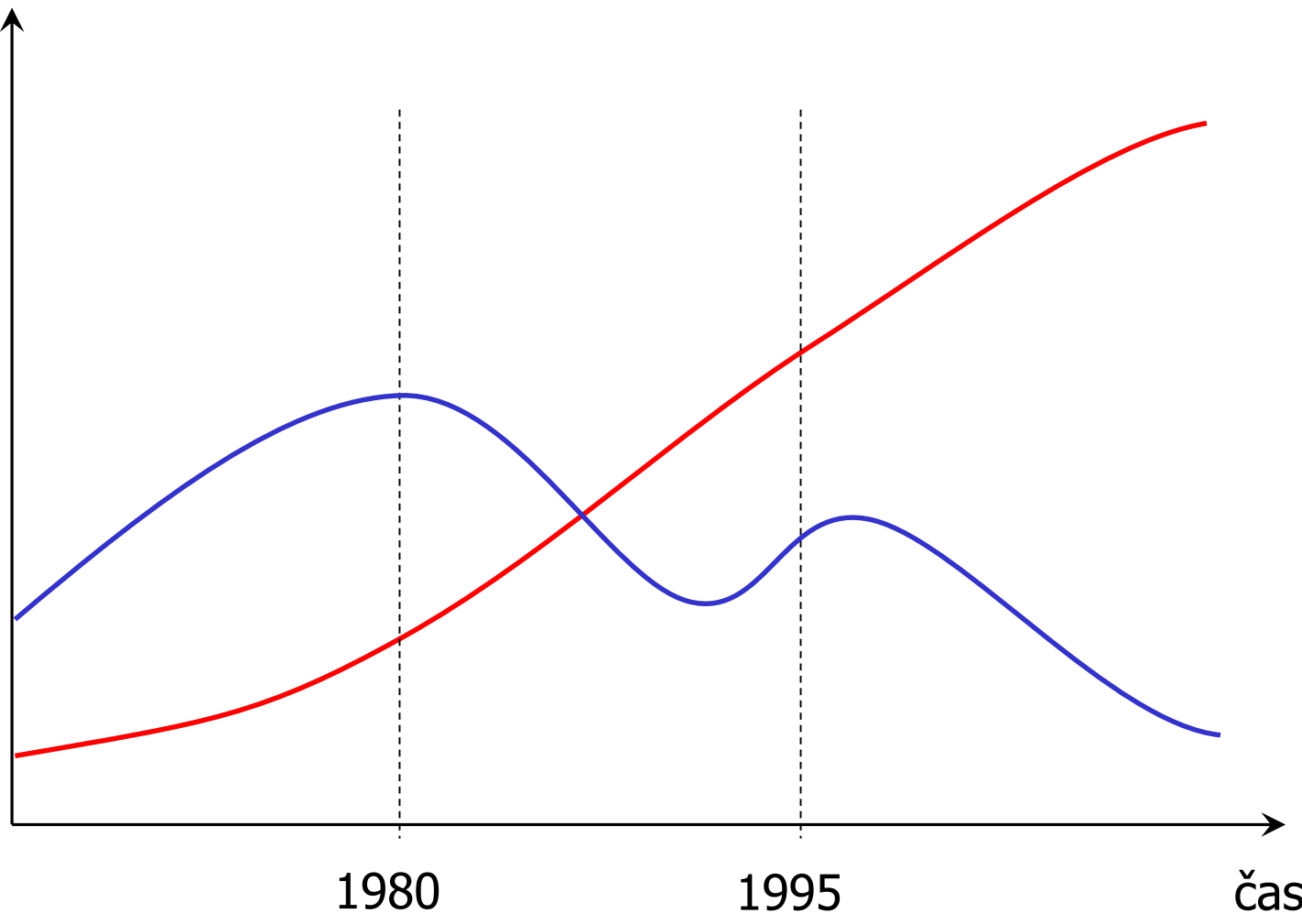


2D výkresy,  
konvenční technologie

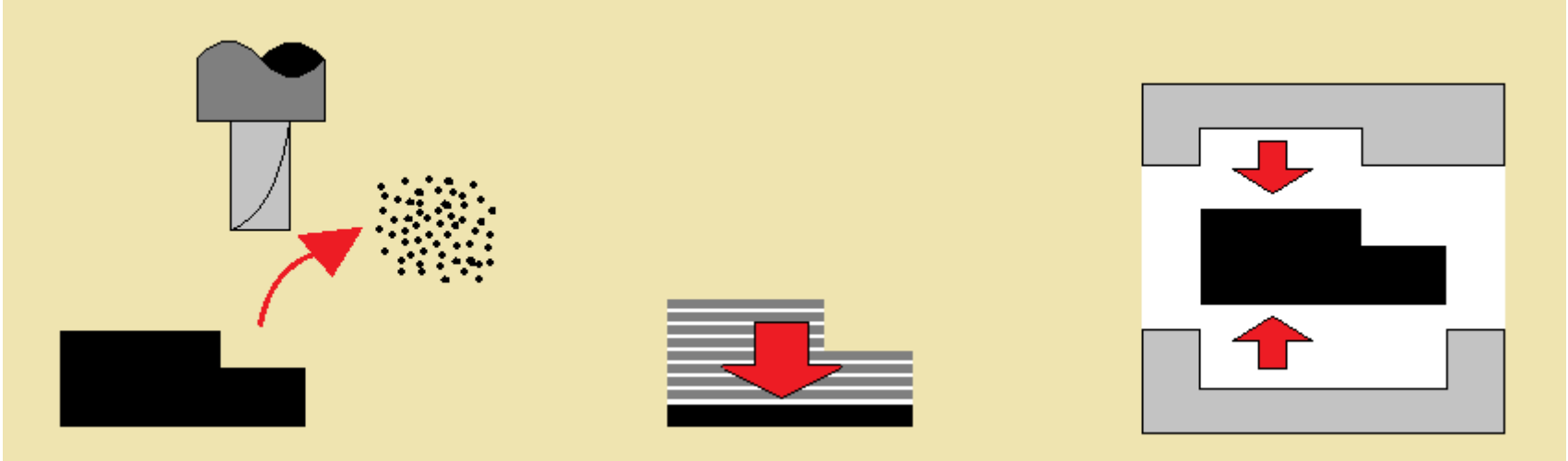
2D/3D CAD  
CNC stroje

Rapid Prototyping  
Aditivní technologie

tvárová  
složitost  
náklady  
na vývoj



# Porovnání základních výrobních technologií



## Odebírání materiálu

- obrábění
- nástroje
- různé stroje  
pro různé  
tvary dílů

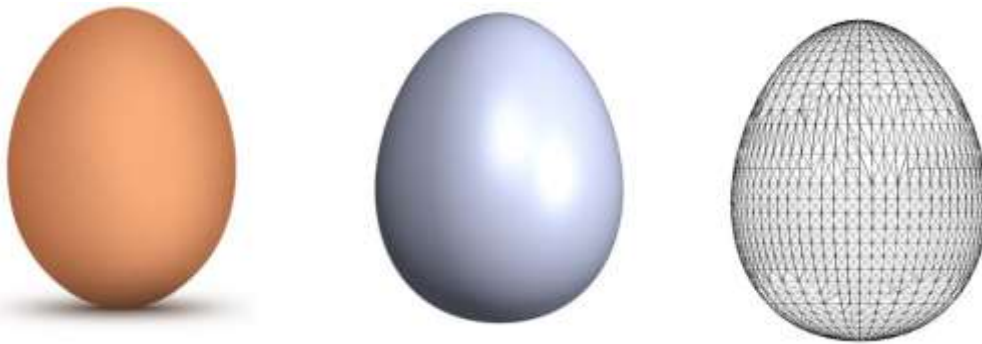
## Přidávání materiálu

- bez nástrojů

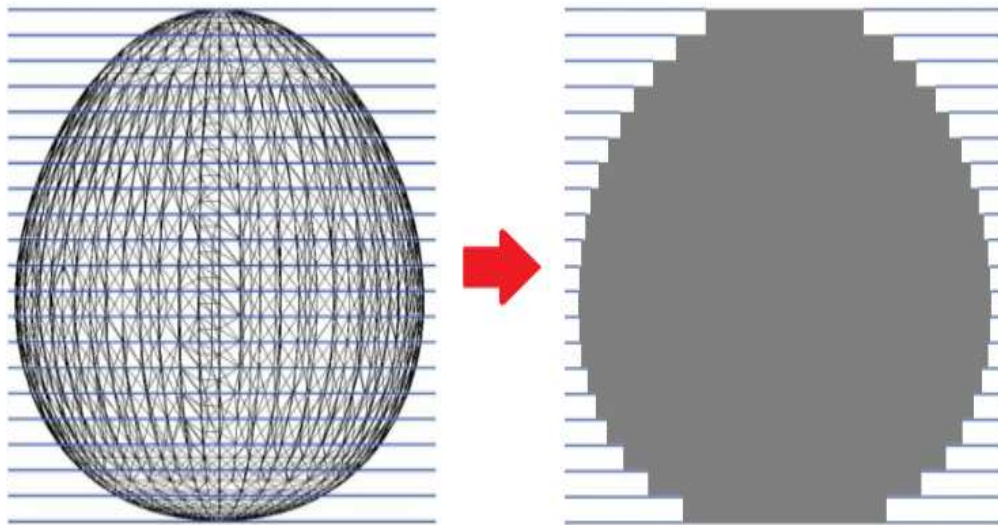
## Tváření materiálu

- tváření, vstřikování...
- složité nástroje

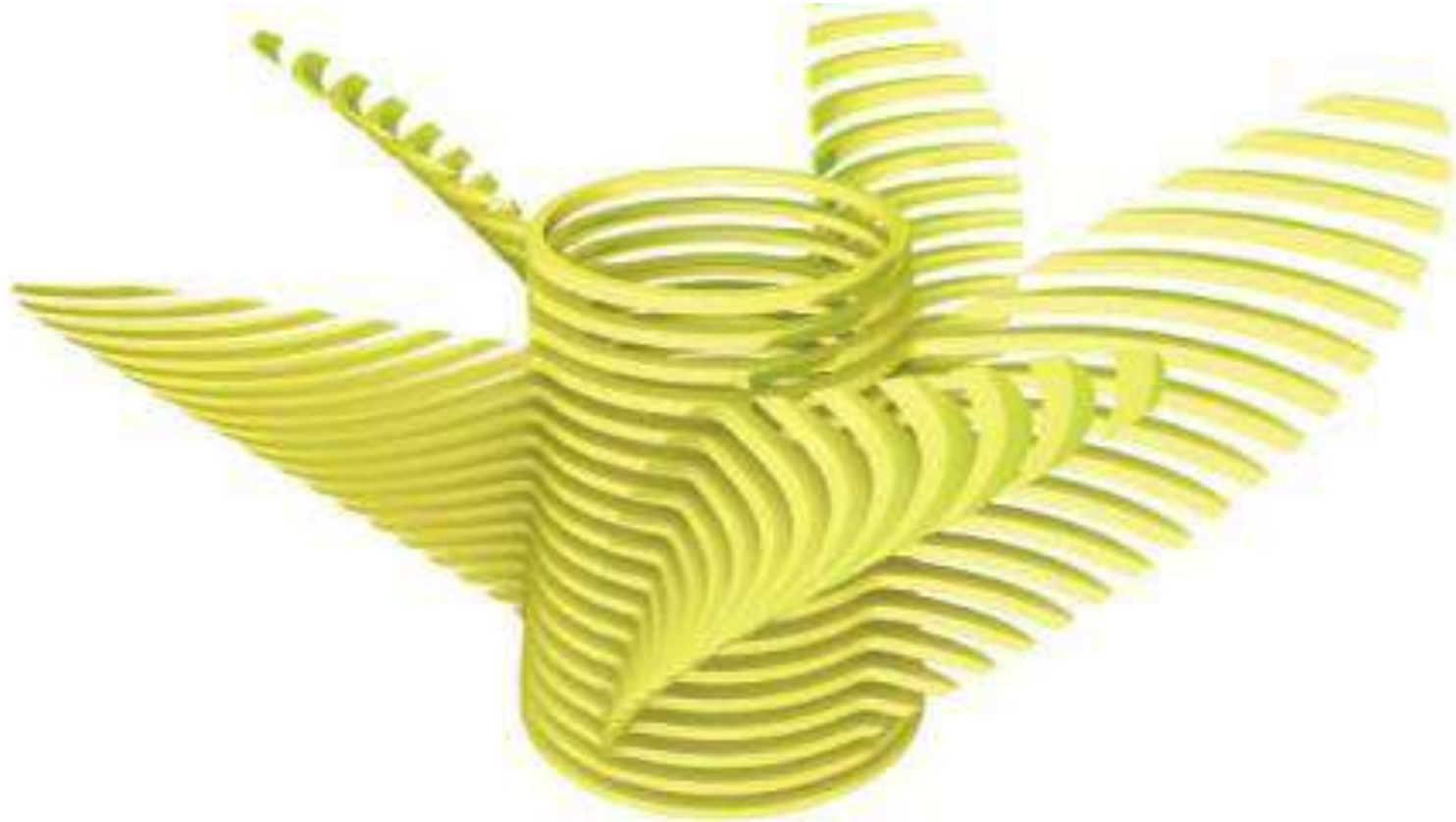
# Princip výroby pomocí aditivních technologií



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

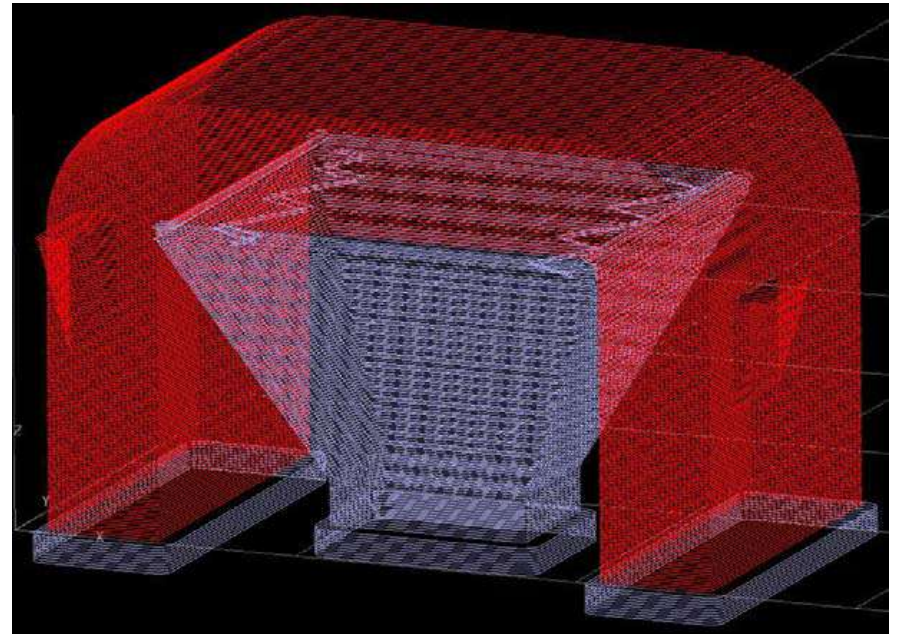
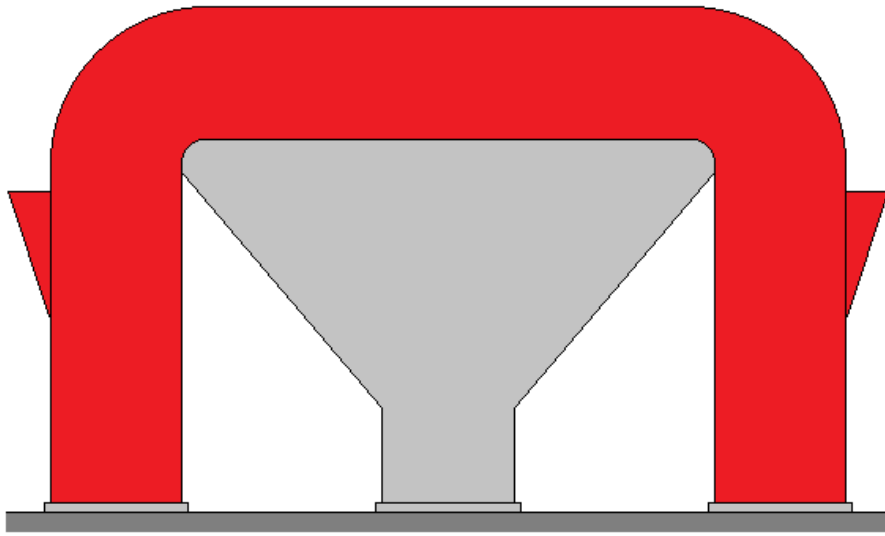


**Objekty jsou vytvořeny z vrstev**



# Některé aditivní technologie se neobejdou bez tzv. podpor

příklad FDM technologie



# Historie 3D tisku

Rapid prototyping systémy se objevily v roce **1987** se zavedením **stereolithografie (STL)** – procesu, který vytvrzuje vrstvy na UV světlo citlivého kapalného polymeru pomocí laseru. V následujících letech byly představeny další rapid prototyping technologie, jako například: **Fused Deposition Modeling (FDM)**, **Selective Laser Sintering (SLS)** a **Laminated Object Manufacturing (LOM)**. První rapid prototyping systémy založené na technologii **PolyJet** byly představeny firmou Objet v roce 2000.

V témže roce byla představena technologie **SLM (Selective Laser Melting)** firmou SLM Solutions, v roce **2006** proběhlo první praktické spékání hliníkových a titanových prášků pomocí SLM.

Zdroj: <http://www.stratasys.com/resources/rapid-prototyping> a [http://stage.slm-solutions.com/index.php?history\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?history_en)

FDM technologie byla představena v roce 1992 firmou Stratasys, dnes asi nejrozšířenější technologie, zejména díky „hobby“ sféře.

Na TUL byla první 3D tiskárna pořízena v roce 2001 (Prodigy, cena přes 3 mil. Kč). V roce 2011 vzniká na TUL Laboratoř prototypových technologií, dnes pod Cxl. Další vybavení laboratoře s podílem KSA: Dimension sst768 (pořízen v r. 2008), Objet Connex 500 (2011), SLM 280HL (2013), HP MultiJet Fusion (2019) a další.

# 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,...)



# Základní společné kroky aditivních technologií



# Jak získat data ve formátu STL

## STL – Standard Triangulation Language

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

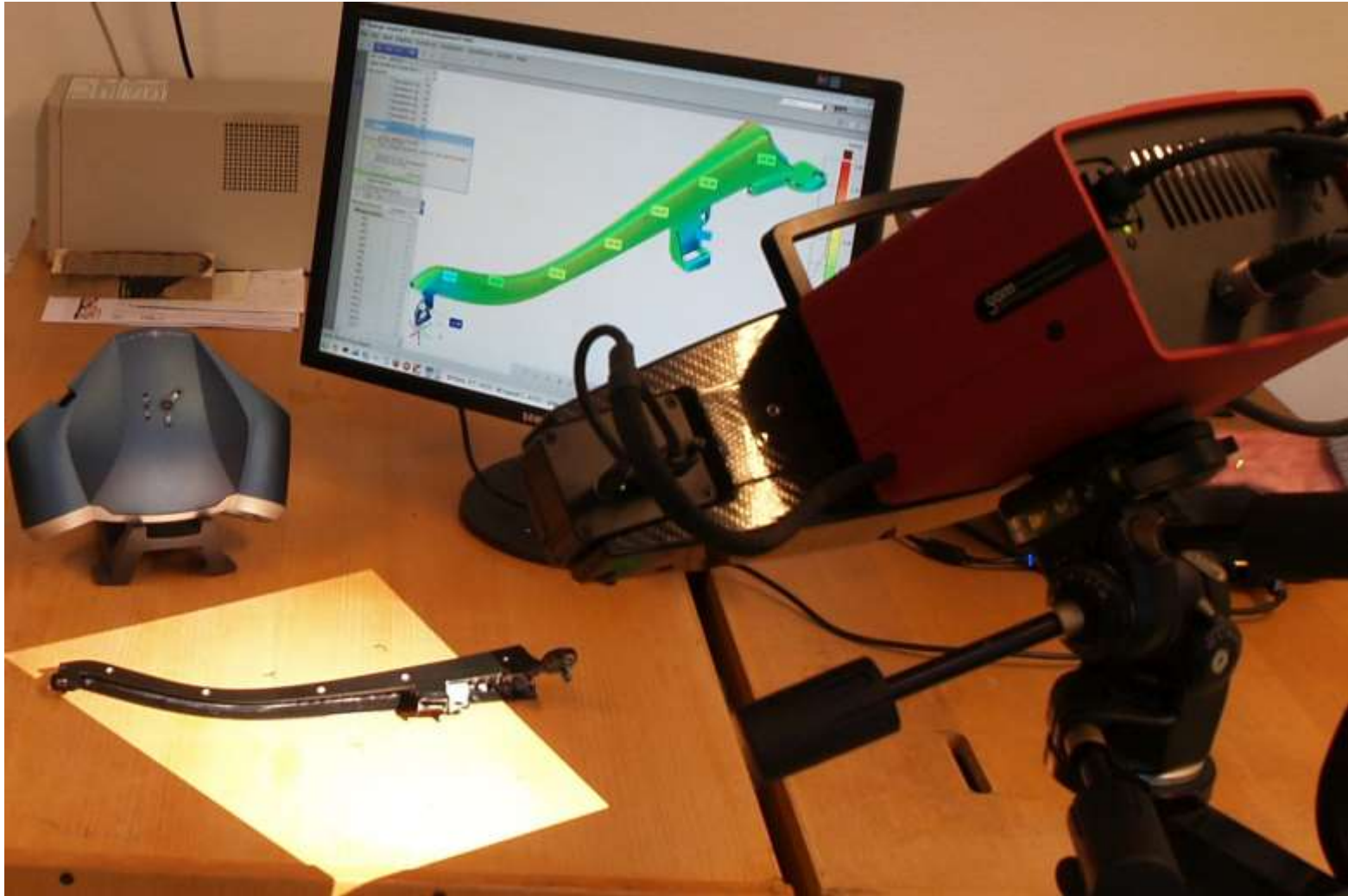
• **3D model v CAD** → Soubor / Uložit jako... / \*.STL

- 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

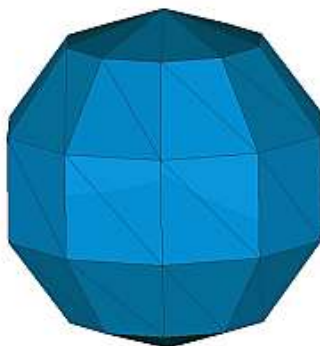


skenování dílu optickým skenerem Atos

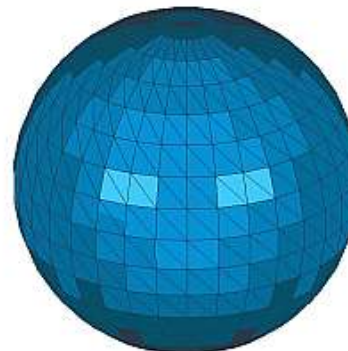
# STL formát dat



koule

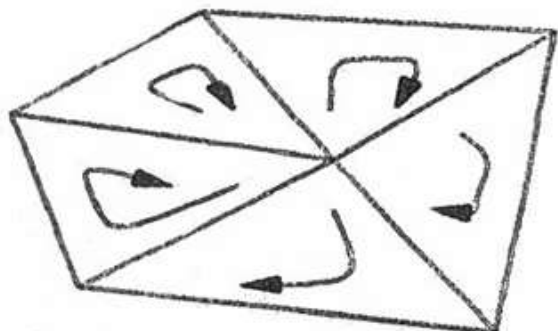


hrubé rozlišení



jenné rozlišení

## Příklad reprezentace trojúhelníků v stl datech:



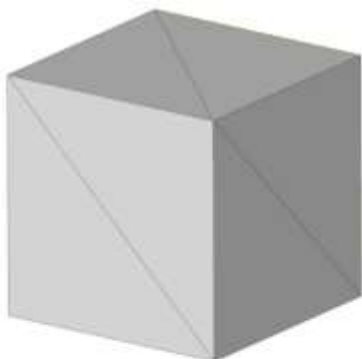
```
facet normal -9.462985e-001 3.177274e-001 5.973599e-002
outer loop
  vertex -5.000000e+001 2.686733e-015 1.467769e-015
  vertex -4.045085e+001 2.579150e+001 1.408996e+001
  vertex -4.045085e+001 2.914764e+001 -3.760846e+000
endloop
endfacet
facet normal -9.462985e-001 2.921588e-001 -1.384280e-001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

# Možné chyby v STL datech

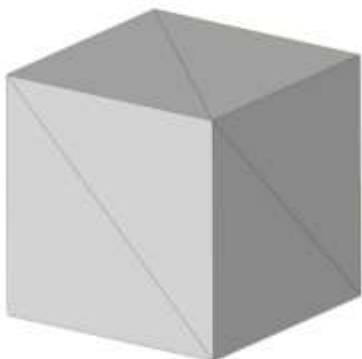
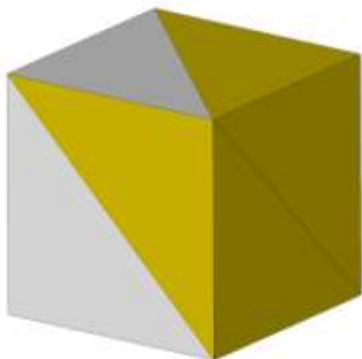
špatně



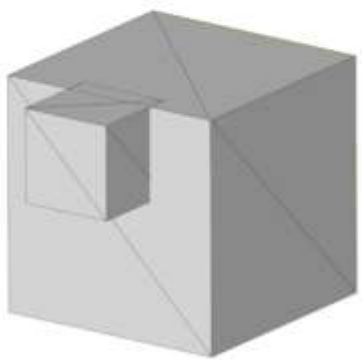
dobře



Díry – chybějící trojúhelníky



Obrácený směr normál

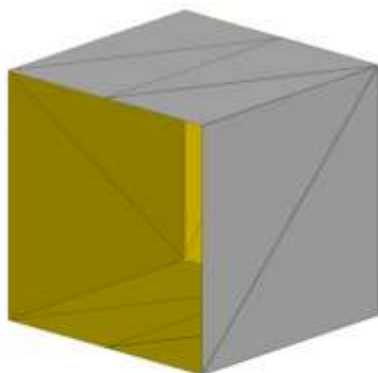
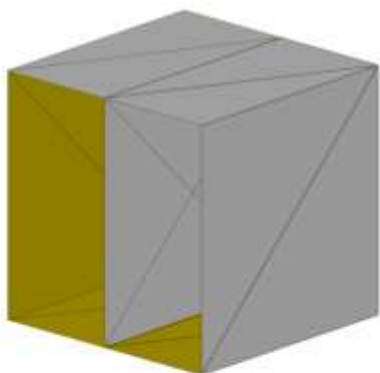


Protínající se trojúhelníky

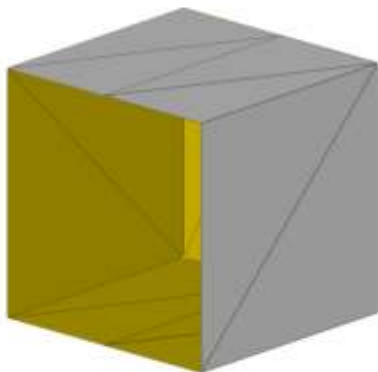
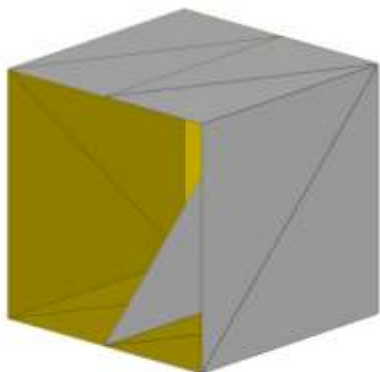
# Možné chyby v STL datech

špatně

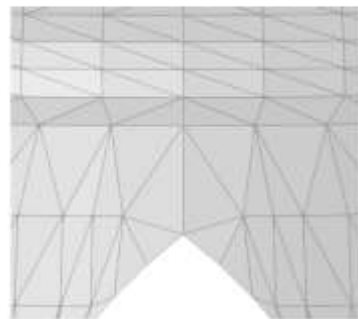
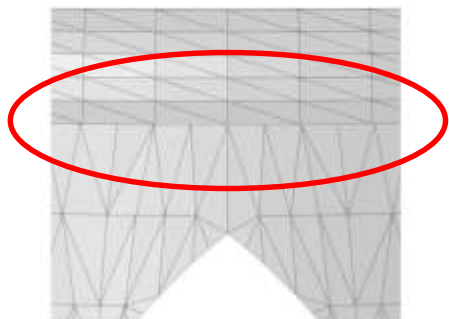
dobře



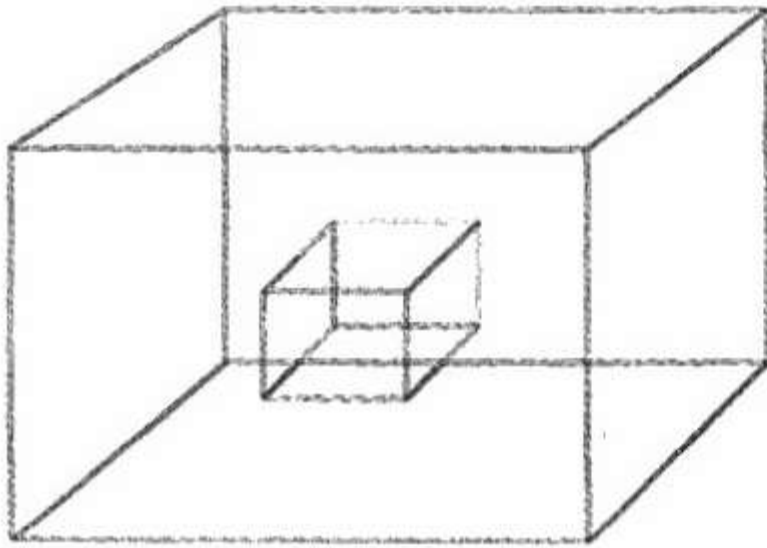
Překrývající se trojúhelníky  
(jedna strana modelu odříznuta)



Trojúhelník(y) navíc  
(jedna strana modelu odříznuta)

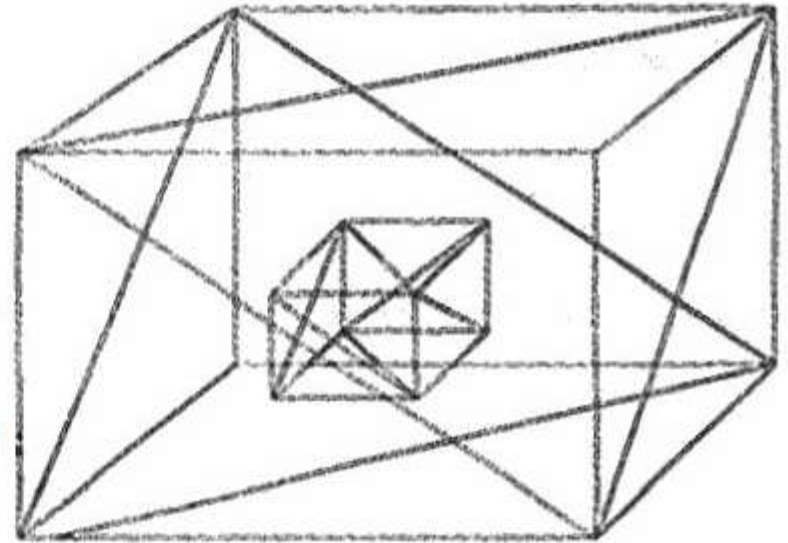


Nenavazující trojúhelníky  
(nemají společné vrcholy)

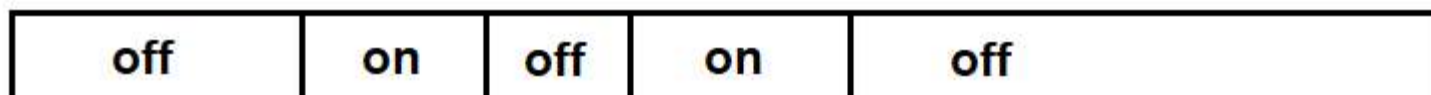
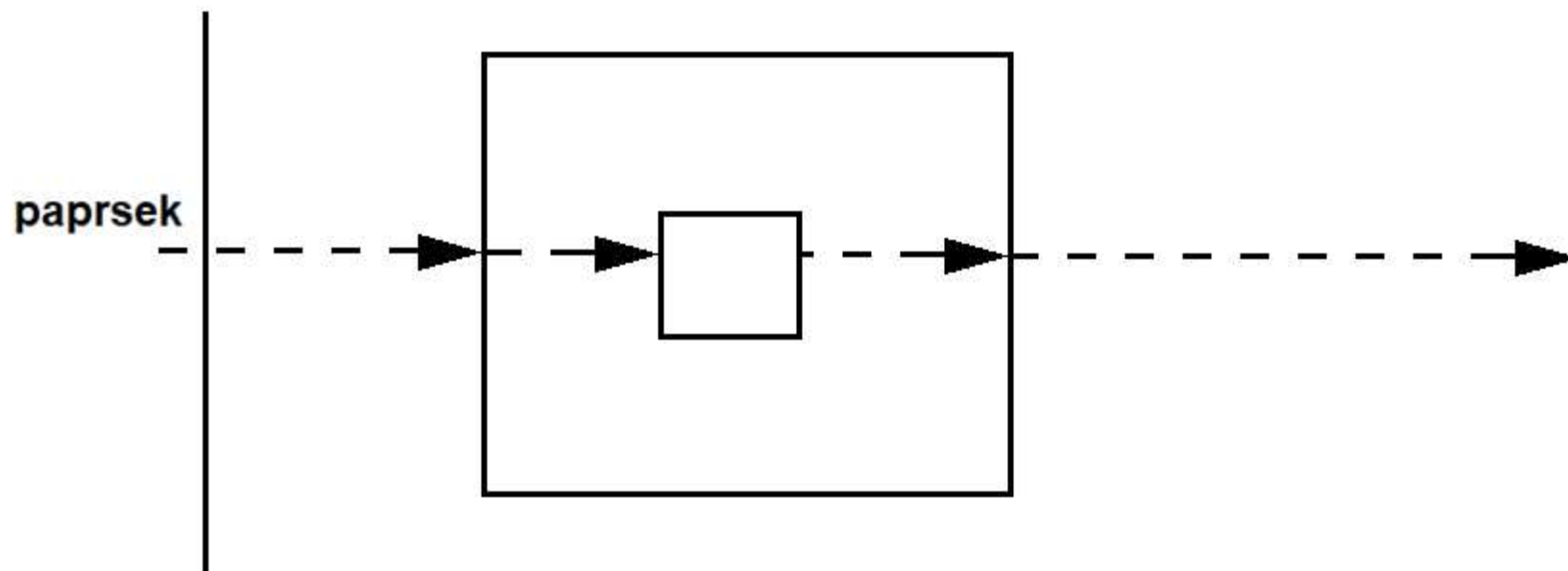


**dutý kvádr**

**a jeho reprezentace v stl datech**



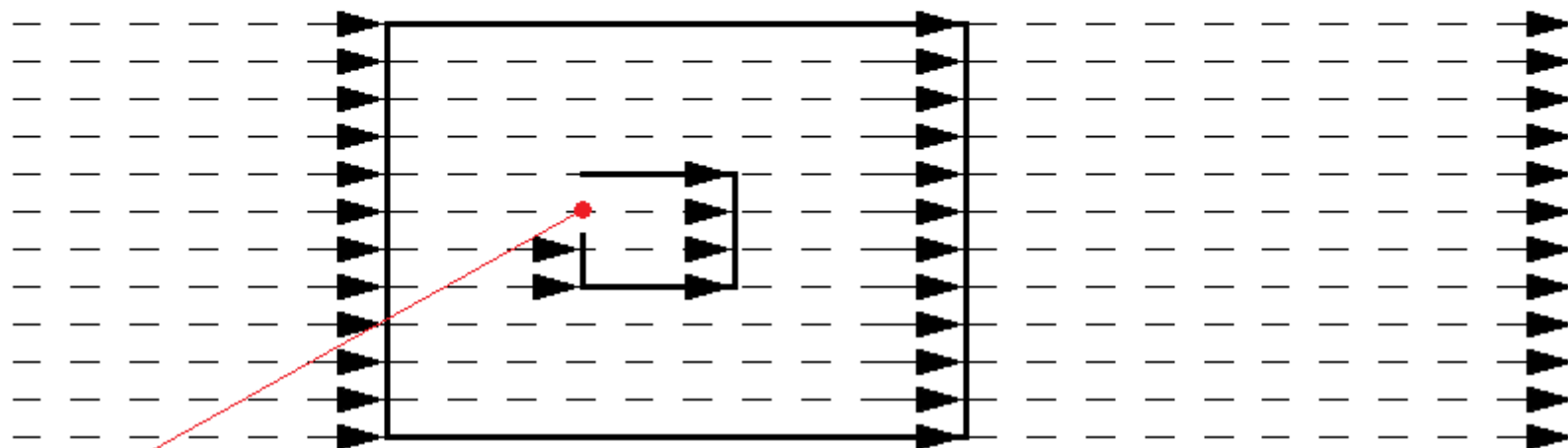
## Princip zpracování stl dat pro nanášení materiálu



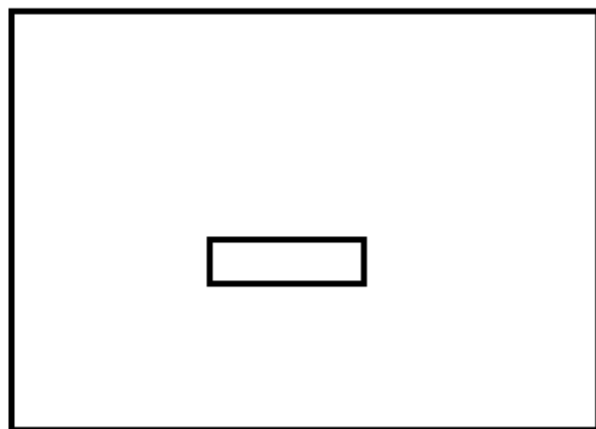
stav nanášení materiálu



**Aplikace předchozího principu na stl data s chybou:  
(dírou v stl datech)**



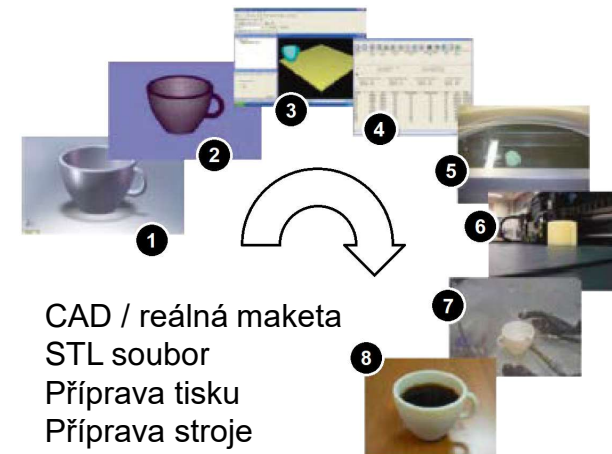
**díra v síti**



**výsledný tvar vyrobené  
součásti díky chybě v stl  
datech**

# 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

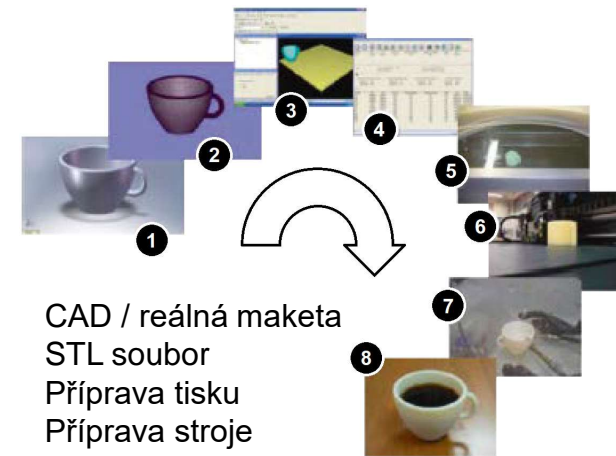


- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace



# Příprava stroje

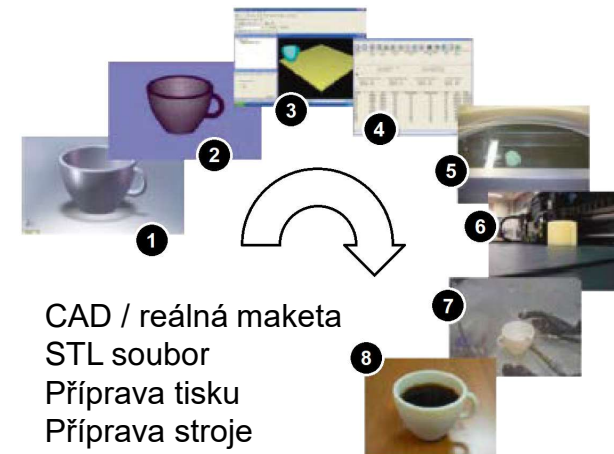
- Nastavení parametrů tisku na stroji
- Příprava materiálu
- Zahřátí stroje, tiskových hlav apod.
- Úprava prostředí v komoře stroje (inertní atmosféra apod.)
- Kalibrace tiskových hlav
- atd. – závisí na použité technologii



- 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

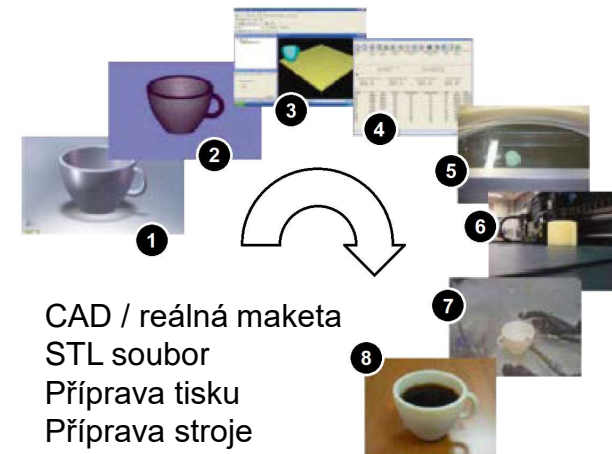


- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace

- 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



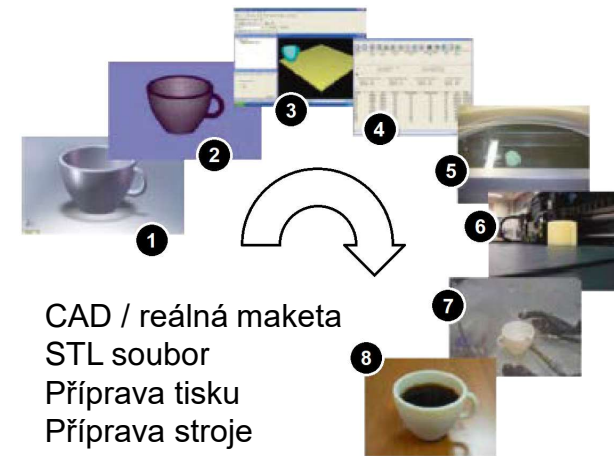
- 1 CAD / reálná maketa
- 2 STL soubor
- 3 Příprava tisku
- 4 Příprava stroje
- 5 Stavba
- 6 Vyjmutí vytištěné součásti
- 7 Post-processing
- 8 Aplikace



# 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



## Aplikace – ukázky

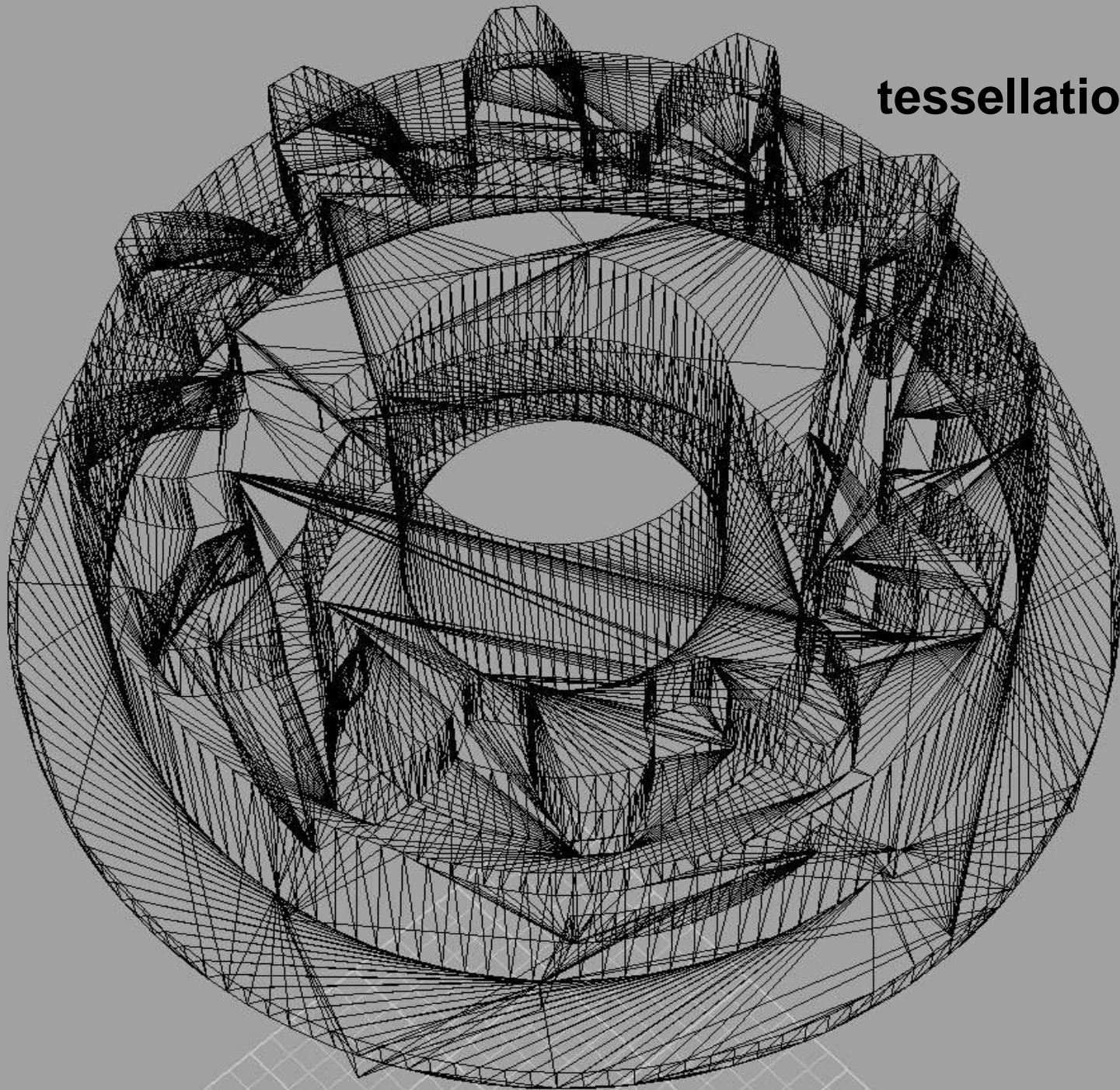
Příklad: odlehčené struktury



Příklad: kombinace dvou nebo více různých materiálů

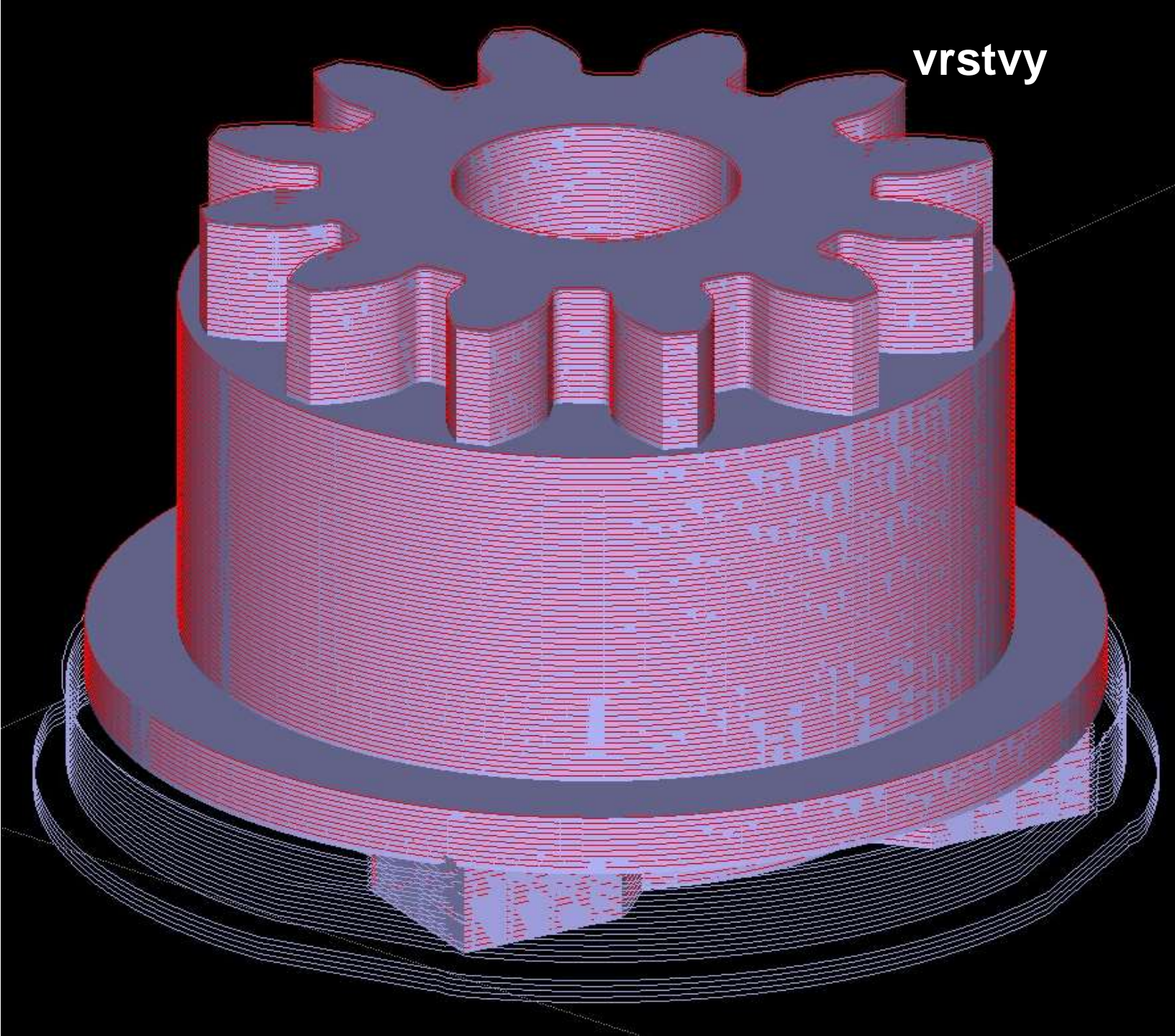


tessellation





**vrstvy**



# HYDRAULIC PUMP



Material  $\text{cm}^3$ :

Model: 90

Supports: 34

TIME: 9:50'

Material  $\text{cm}^3$ :  
Pattern: 38  
Supports: 13,9

TIME: 6:48'



Scan SFING  
ATOS  
TRITOP

Mesh 3 mil.



SFING SCULPTURE



SFING



Material **cm<sup>3</sup>**:

Pattern: 79

Supports: 41

Time: 14:09'

Mirror  
holder



Material  $\text{cm}^3$ :

Pattern: 16

Supports: 14

Time: 3:14'

Material cm<sup>3</sup>:

Pattern: 50

Supports: 64

Time: 7:35'

Blower Cover



# SAFETY HELMET

Made of 10 parts

Glued together and  
assembly mechanically  
supported











# SHELL MOULD na ABS



100<sup>0</sup> C - max 0,24%

200<sup>0</sup> C - creep

500<sup>0</sup> C - burning

900<sup>0</sup> C - gas & ashes burn



# Aditivní výroba

**Norma ISO/ASTM 52900 uvádí schválené kategorie a názvy procesů aditivních technologií, které jsou uvedeny v následujícím seznamu:**

- material extrusion – an additive manufacturing process in which material is selectively dispensed through a nozzle or orifice
- material jetting – an additive manufacturing process in which droplets of build material are selectively deposited
- binder jetting – an additive manufacturing process in which a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder material
- sheet lamination – an additive manufacturing process in which sheets of material are bonded to form a part
- vat photo-polymerization – an additive manufacturing process in which liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization
- powder bed fusion – an additive manufacturing process in which thermal energy selectively fuses regions of powder bed
- directed energy deposition – an additive manufacturing process in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited

# 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.

# Starší dělení dle stavu vstupního materiálu

## Kapalina (fotopolymery):

- Stereolithography Apparatus (SLA)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Digital Light Processing (DLP)
- Polyjet printing

## Prášek:

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM, DMLS)
- Three Dimensional Printing (3DP)
- Multi Jet Fusion (MJF)

## Pevný:

- Fused Deposition Modelling (FLM, FDM, FFF)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Thermoplastic Ink Jet (TIJ)
- ARBURG Plastic Freeforming (APF)