

Aditivní technologie

Přehled nejběžnějších technologií používajících
vstupní materiál v pevné formě

Ing. Petr Keller, Ph.D.

Starší dělení dle stavu vstupního materiálu

Kapalina (fotopolymery):

- Stereolithography Apparatus (SLA)
- Digital Light Processing (DLP)
- Polyjet printing

Prášek:

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM, DMLS)
- Three Dimensional Printing (3DP)
- Multi Jet Fusion (MJF)
- Directed Energy Deposition (DED, Laser Cladding, MPA,...)

Pevný:

- Fused Deposition Modelling (FLM, FDM, FFF)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Drop on demand, Thermoplastic Ink Jet (DOD, TIJ)
- ARBURG Plastic Freeforming (APF)
- Directed Energy Deposition (DED, MIG/MAG navařování)

Aditivní výroba

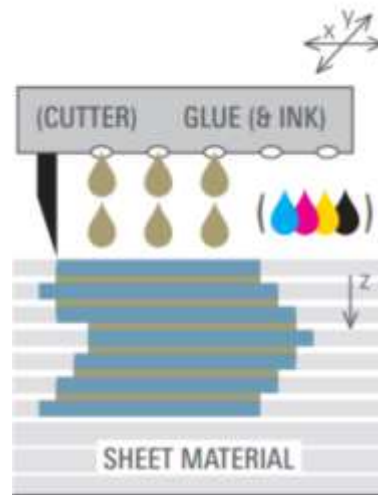
Norma ISO/ASTM 52900 uvádí schválené kategorie a názvy procesů aditivních technologií, které jsou uvedeny v následujícím seznamu:

- **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 – 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.**

Aditivní technologie

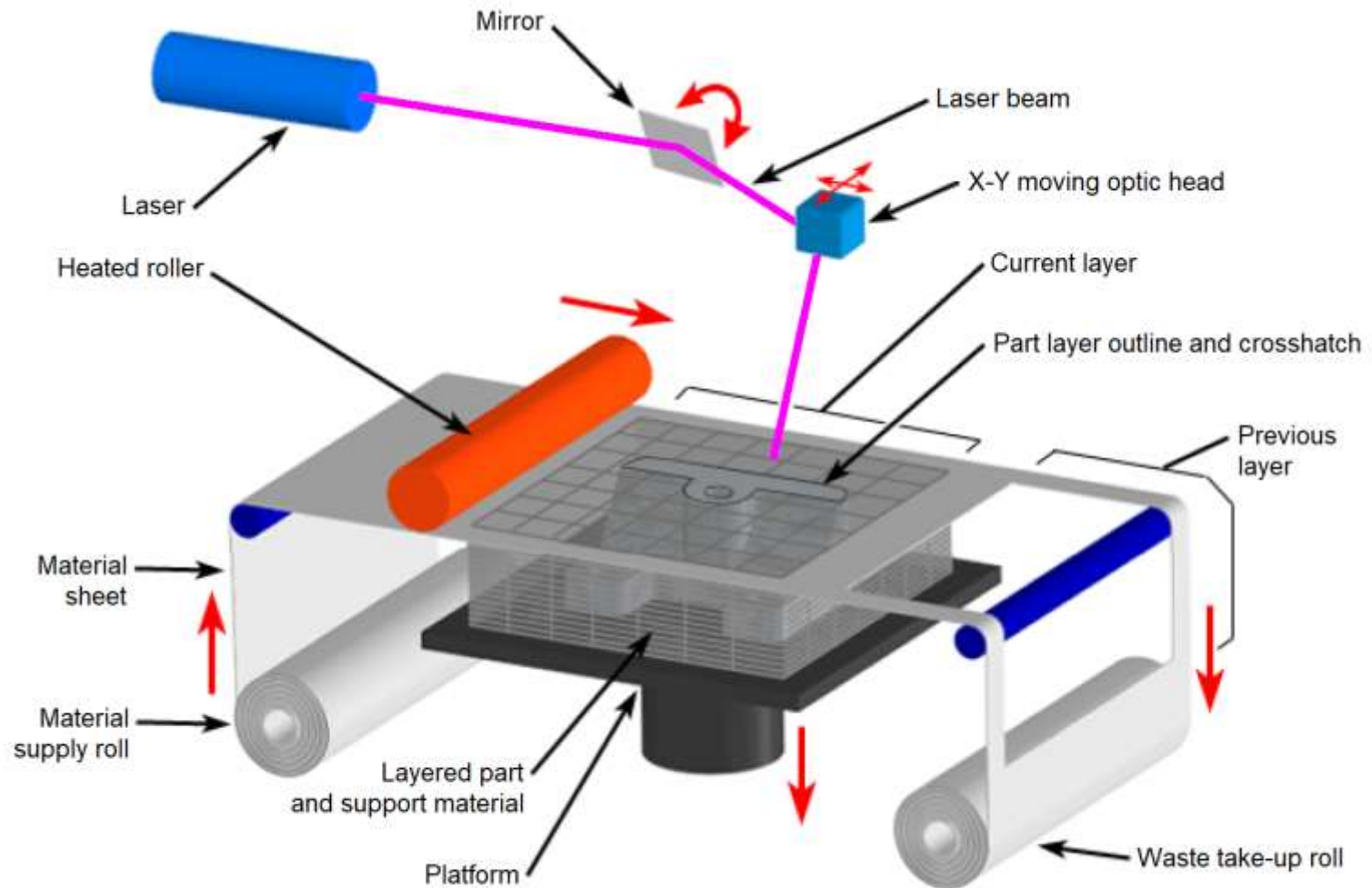
– laminování deskového materiálu

- laminování deskového materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém je pro vytvoření součásti spojován deskový materiál
- sheet lamination – an additive manufacturing process in which sheets of material are bonded to form a part



Laminování deskového materiálu

- technologie Laminated Object Manufacturing (LOM)



Laminování deskového materiálu

- vytváření dílů vyřezáním obrysů z deskového materiálu a jejich slepením, svařováním, stavením nebo slisováním
- možné materiály: papír, termoplasty, kovy, (fotopolymery)
- existují dva způsoby procesu: Bond-then-Form a Form-then-Bond ("spoj, pak vyřež" a "vyřež, pak spoj")

Technologie založené na laminování deskového materiálu:

- Laminated Object Manufacturing (papír)
- Selective Deposition Lamination (papír A4)
- Solido Technology (PVC)
- Ultrasonic Consolidation (kovy)

Postprocessing – „decubing“

a



b



c



d



Helisys

- technologie uvedena na trh v roce 1990
- kolem roku 2000 ukončena činnost



- materiál: speciální papír s fólií termoplastu pro lepení vrstev teplem
- vyřezávání pomocí laseru

Mcor Technologies

- technologie uvedena na trh v roce 2007
- posléze pod firmou CleanGreen3D (činnost ukončena květen 2022)
- technologie patentována pod názvem Selective Deposition Lamination (SDL)



- materiál: kancelářský papír A4
- vyřezávání pomocí nože
- plně barevný tisk

Solido

- nejlevnější 3D tisk kolem roku 2010
- v roce 2011 ukončena činnost



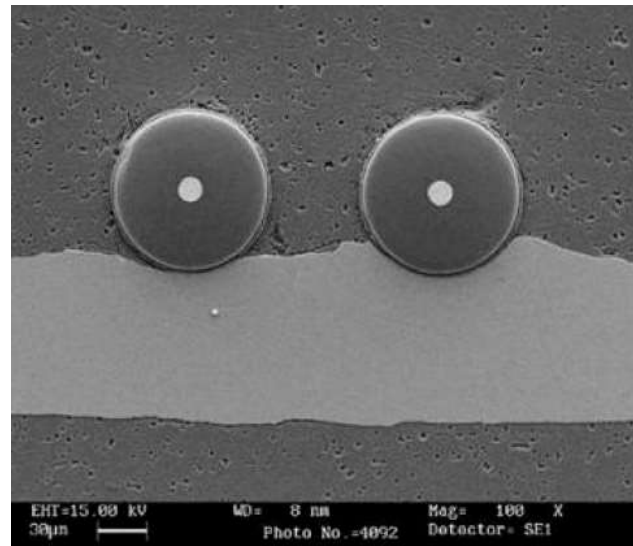
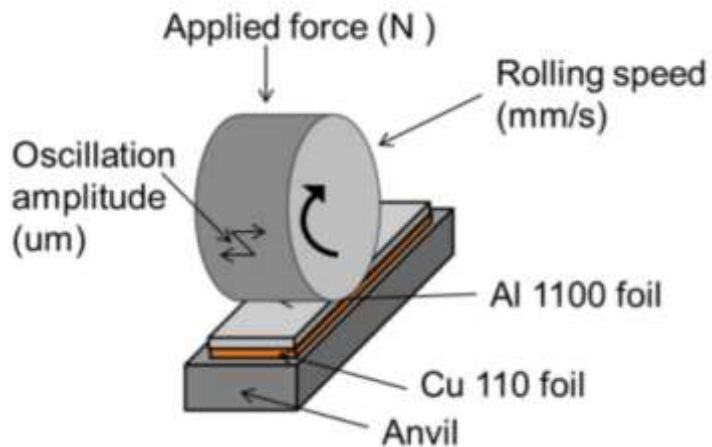
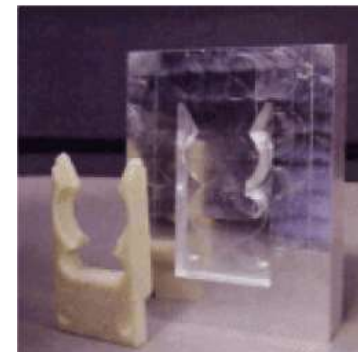
- kancelářské použití
- materiál: PVC fólie
- vyřezávání pomocí nože
- lepení vrstev lepidlem

Laminování deskového materiálu – Solido



Fabrisonic

- Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) – technologie 3D tisku z kovů bez tavení
- kombinace ultrazvukového svařování kovových fólií a CNC frézování tvaru ve vrstvě



How It Works...Fabrisonic's 3D Printing Technology



The Science (...in a nutshell)

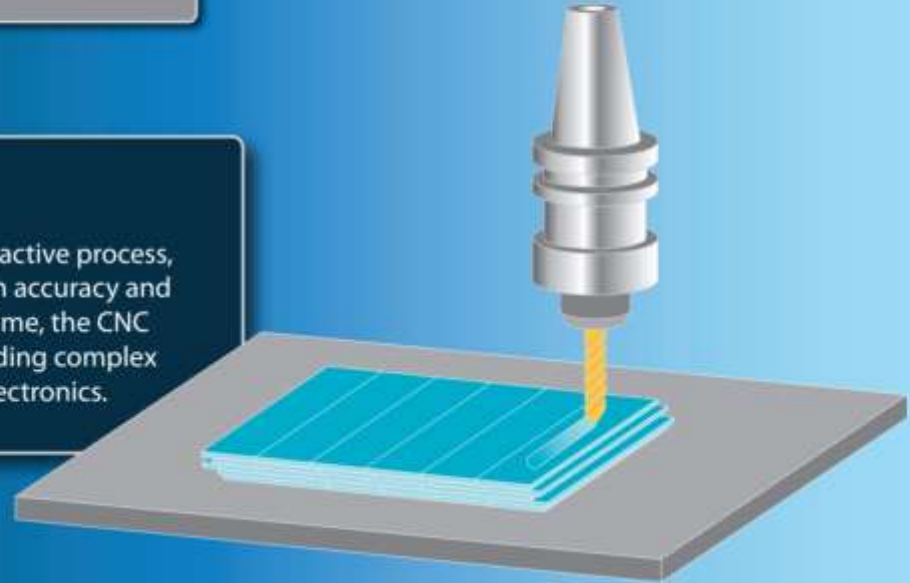
Metals like to fuse to other metals. In the absence of atmosphere, like in outer space, pushing two metal plates together will cause them to bond.

For metals on earth, there is a layer of oxide that interferes with electrons being shared and metals no longer want to naturally bond.



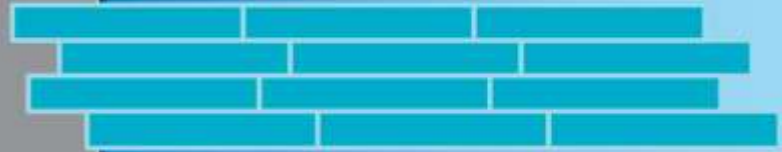
The Machining

With the unique hybrid additive/subtractive process, final shape can be machined with high accuracy and excellent surface finish. At the same time, the CNC milling capability can be used for building complex internal shapes and for embedding electronics.



The Layering

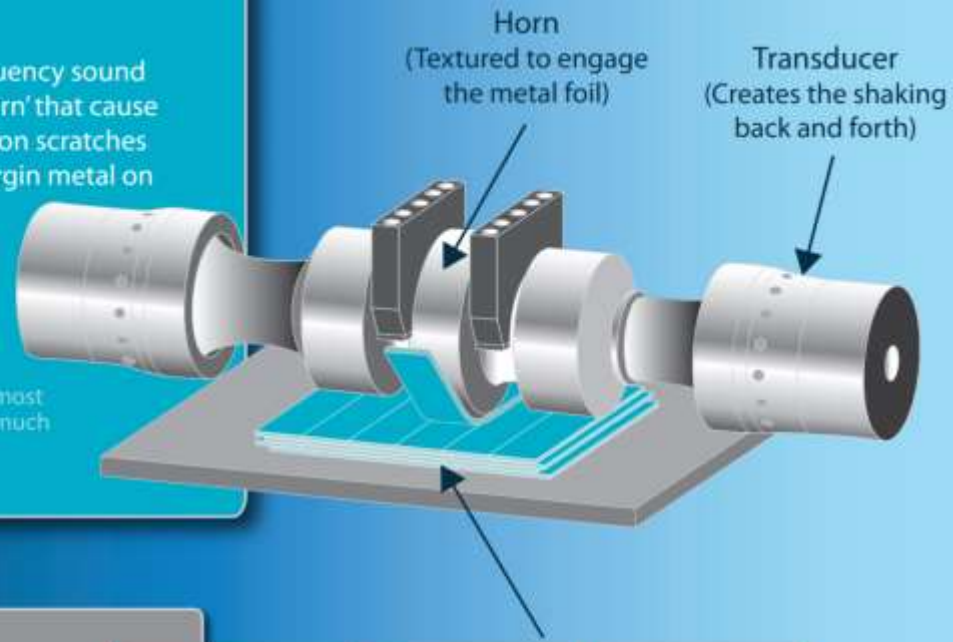
3D Shapes are built up to near net shape using a staggering thin metal strips, layer by layer, much like laying brick.



The Technology

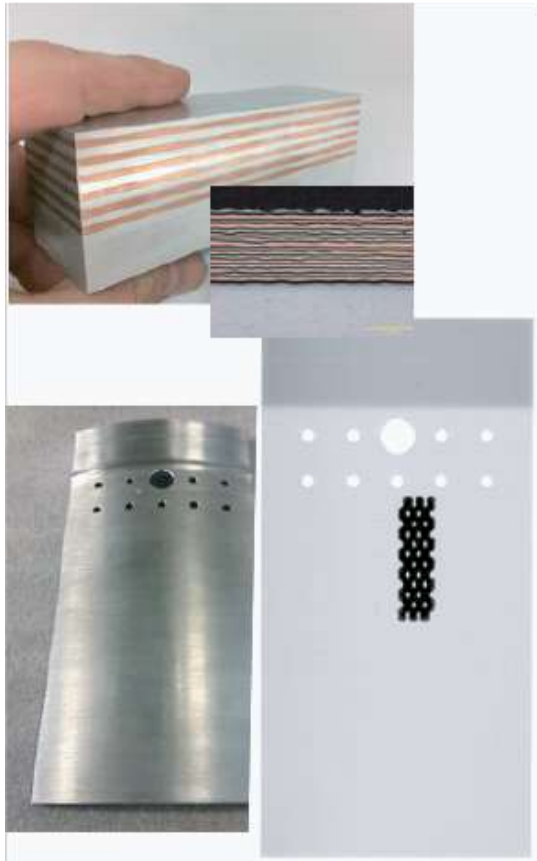
Fabrisonic's process utilizes high frequency sound waves transmitted through a steel 'horn' that cause thin metal foils to vibrate. This vibration scratches off the thin layer of oxide exposing virgin metal on each foil face allowing a bond. Creating this kind of bond is known as *solid-state welding.

*Solid-state welding means that the process does NOT MELT the metals. For our most common metals, Fabrisonic does not reach much more than 200° F. AGAIN, NO MELTING.



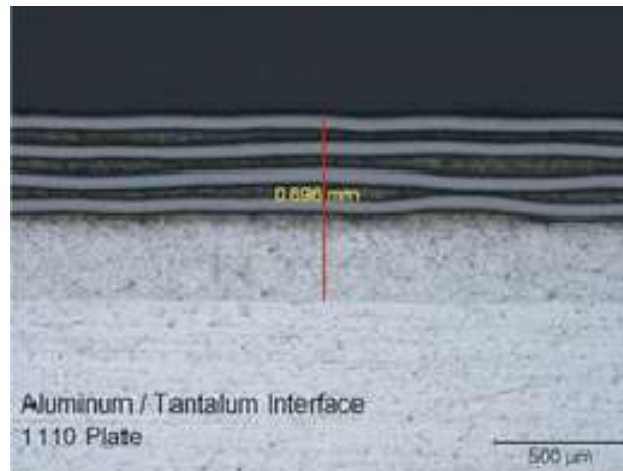
Fabrisonic

- Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) – technologie 3D tisku z kovů bez tavení



	Al	Be	Cu	Ge	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pd	Pt	Si	Ag	Ta	Sn	Ti	W	Zr	
Al Alloys	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Be Alloys		●	●			●										●			
Cu Alloys			●		●	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●	
Ge				●							●								
Au					●	●			●	●	●	●	●			●	●	●	
Fe Alloys						●			●	●	●		●	●		●	●	●	
Mg Alloys							●						●			●			
Mo Alloys								●	●		●			●		●	●	●	
Ni Alloys									●	●	●			●		●	●		
Pd										●			●	●					
Pt Alloys											●	●		●		●	●		
Si													●	●					
Ag Alloys													●	●					●
Ta Alloys														●		●	●		
Sn															●				
Ti Alloys																●	●		
W Alloys																	●		
Zr Alloys																			●

● Material pair proven for ultrasonic welding



Laminování deskového materiálu – Fabrisonic



Laminování deskového materiálu – Fabrisonic



Výhody technologie laminování

- rychlý, levný a poměrně přesný tisk
- v originále určeno zejména na velké objekty (modely karoserie aut, části letadel apod.) – speciální papír
- později spíše kancelářská zařízení – **levný tisk i plnobarevný tisk**

tyto technologie již nejsou na trhu

- kovové díly bez působení tepla – tj. bez vnitřního pnutí v dílu, vhodné pro speciální technologie – míchání různých kovů po vrstvách (využití např. jaderná energetika, speciální díly pro chemický a elektrotechnický průmysl apod.)

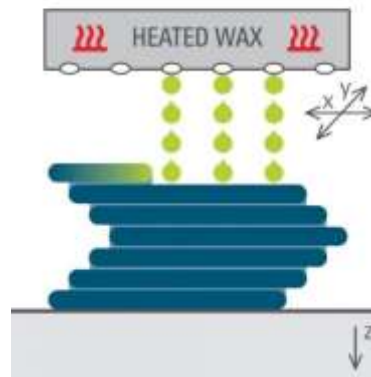
Nevýhody technologie laminování

- v originále nutnost použití speciálního papíru
- **náročný postprocessing**
- málo materiálů

- **velký objem odpadu** (čím menší využitý pracovní objem, tím více odpadu)
- u kovových dílů tvar ve vrstvě omezen technologií frézování

Aditivní technologie – tryskání materiálu

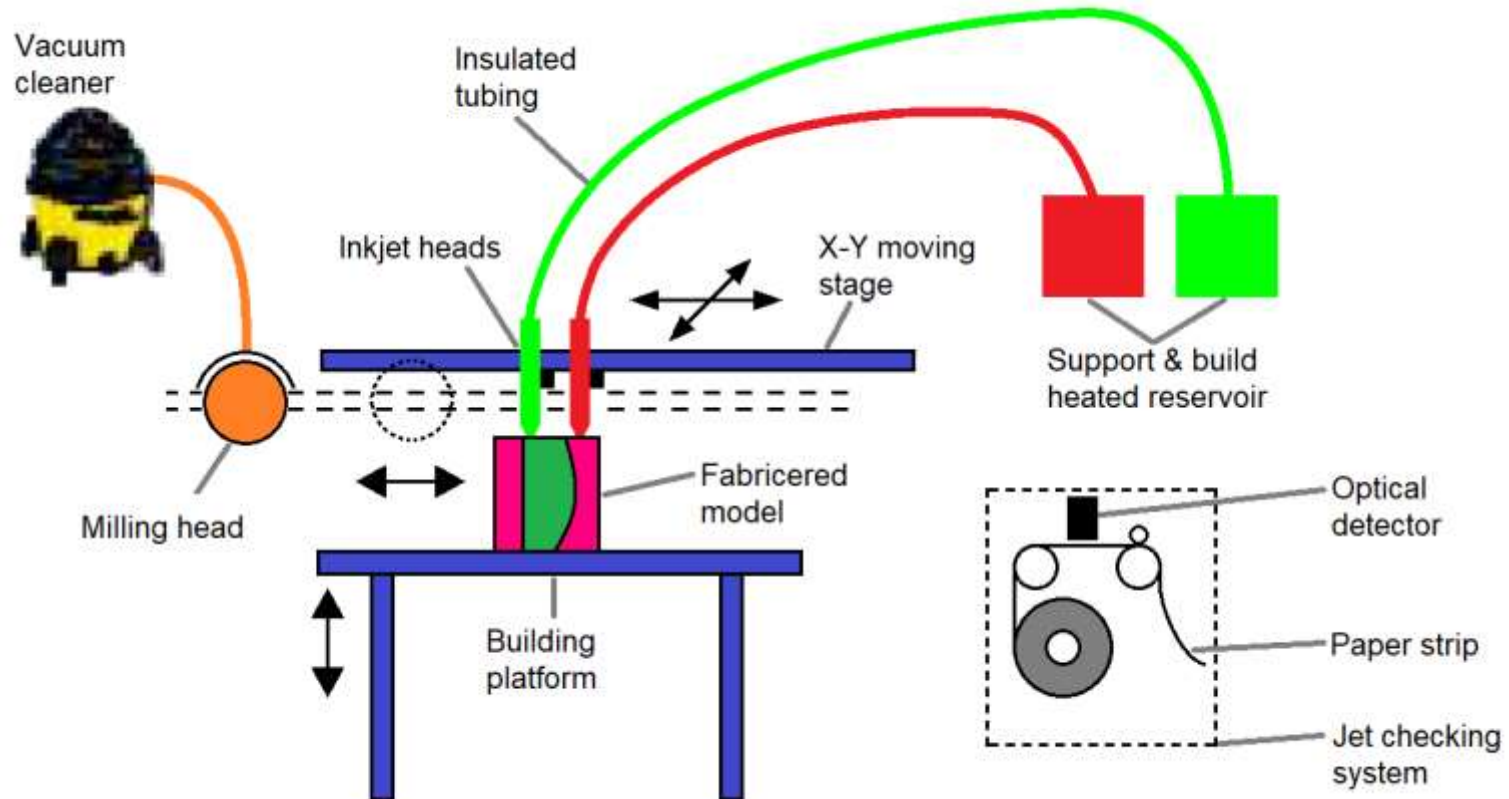
- tryskání materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém jsou selektivně nanášeny kapičky stavěného materiálu
- material jetting – an additive manufacturing process in which droplets of build material are selectively deposited



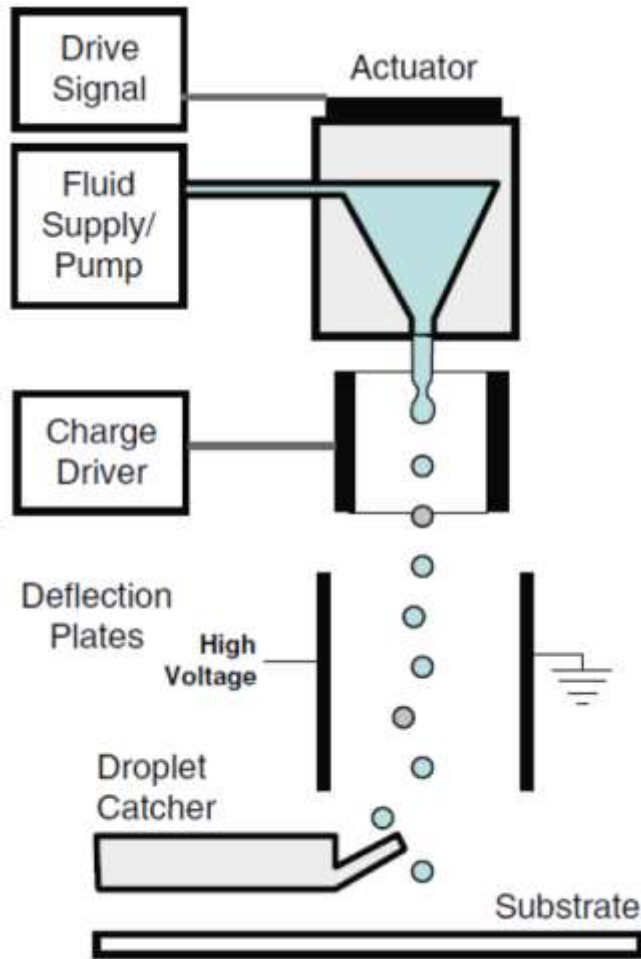
Tryskání materiálu

- technologie Drop On Demand (DOD), Thermoplastic Ink Jet (TIJ)

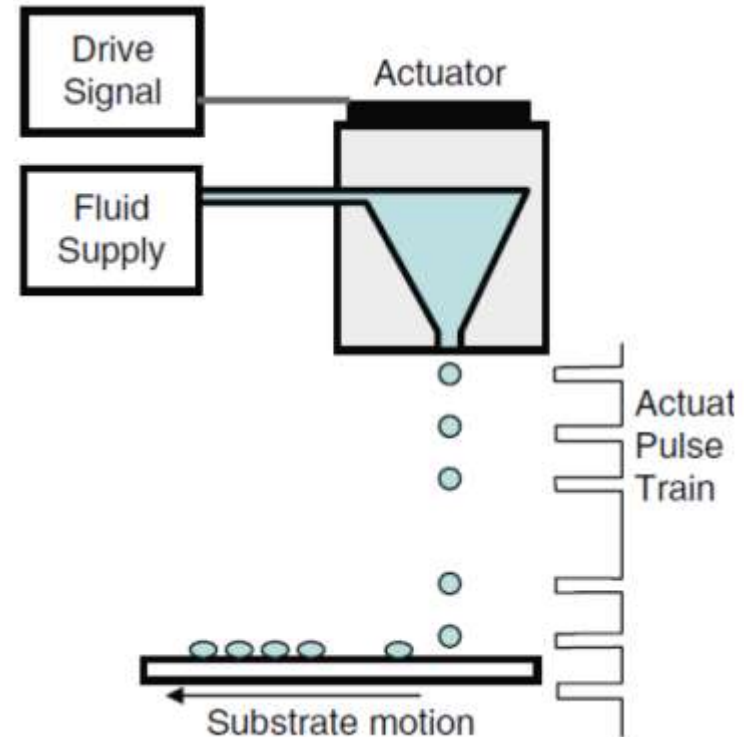
- vstupní materiál ve formě granulátu termoplastů nebo vosků
- je třeba stavět podpory pod vlastní součásti



Princip funkce tiskové hlavy



Continuous drops and deflection

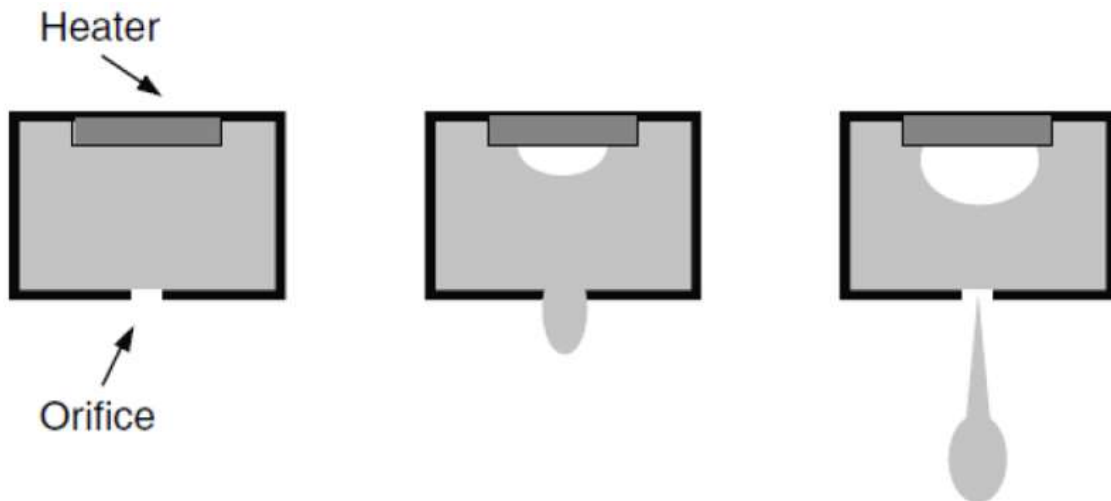


Drop on demand

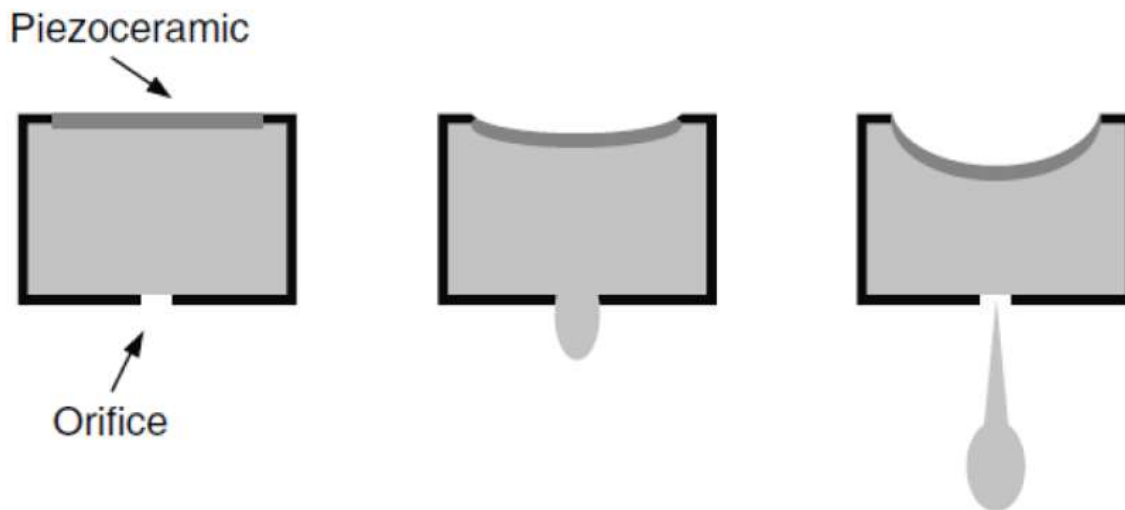
Princip funkce tiskové hlavy

Drop on demand

Termální princip



Piezo-elektrický princip

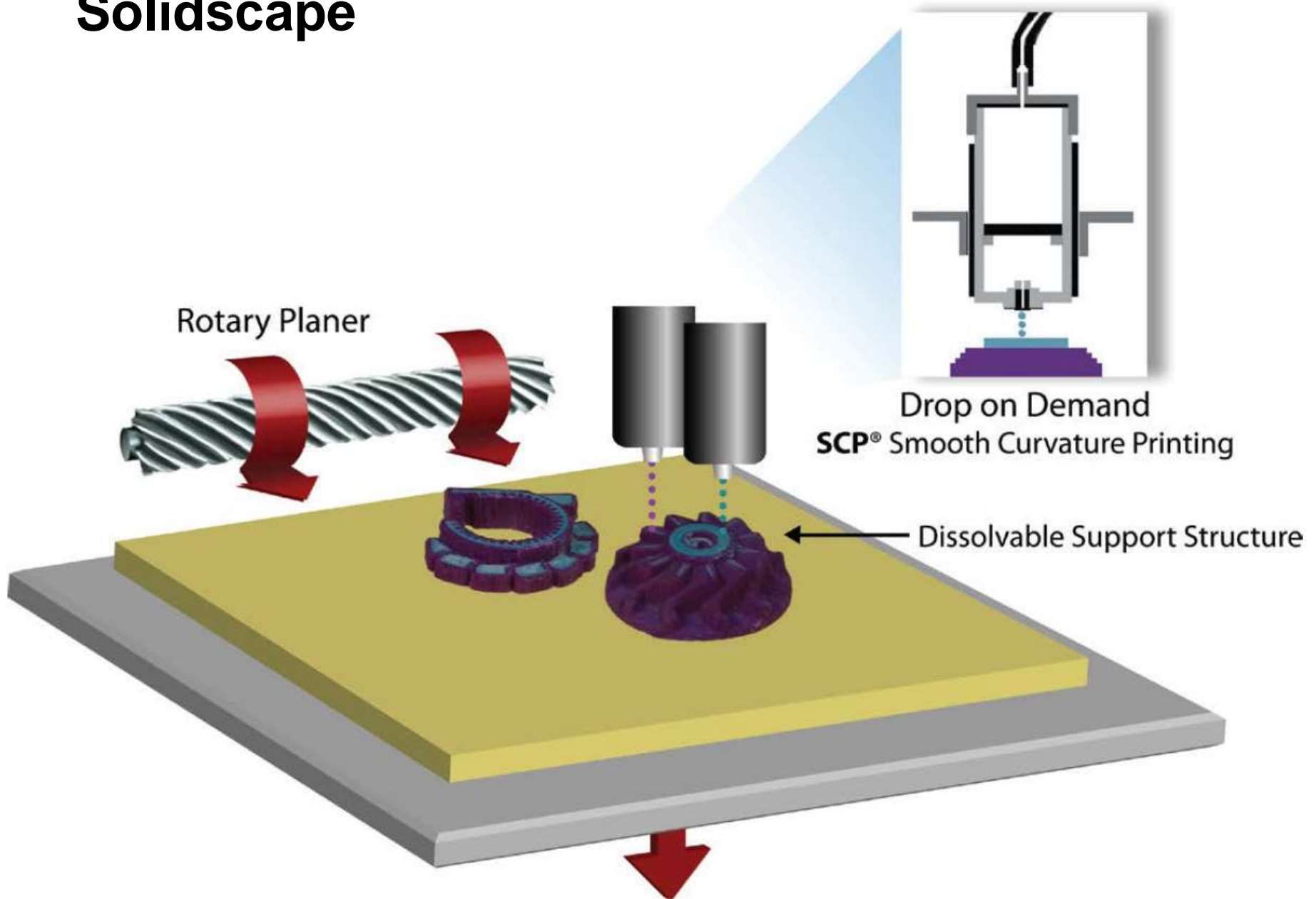


Solidscape

- na trh uvedena v roce 1994 ještě pod jménem Sanders
- poté dceřiná společnost firmy Stratasys
- dnes člen skupiny Prodways Group



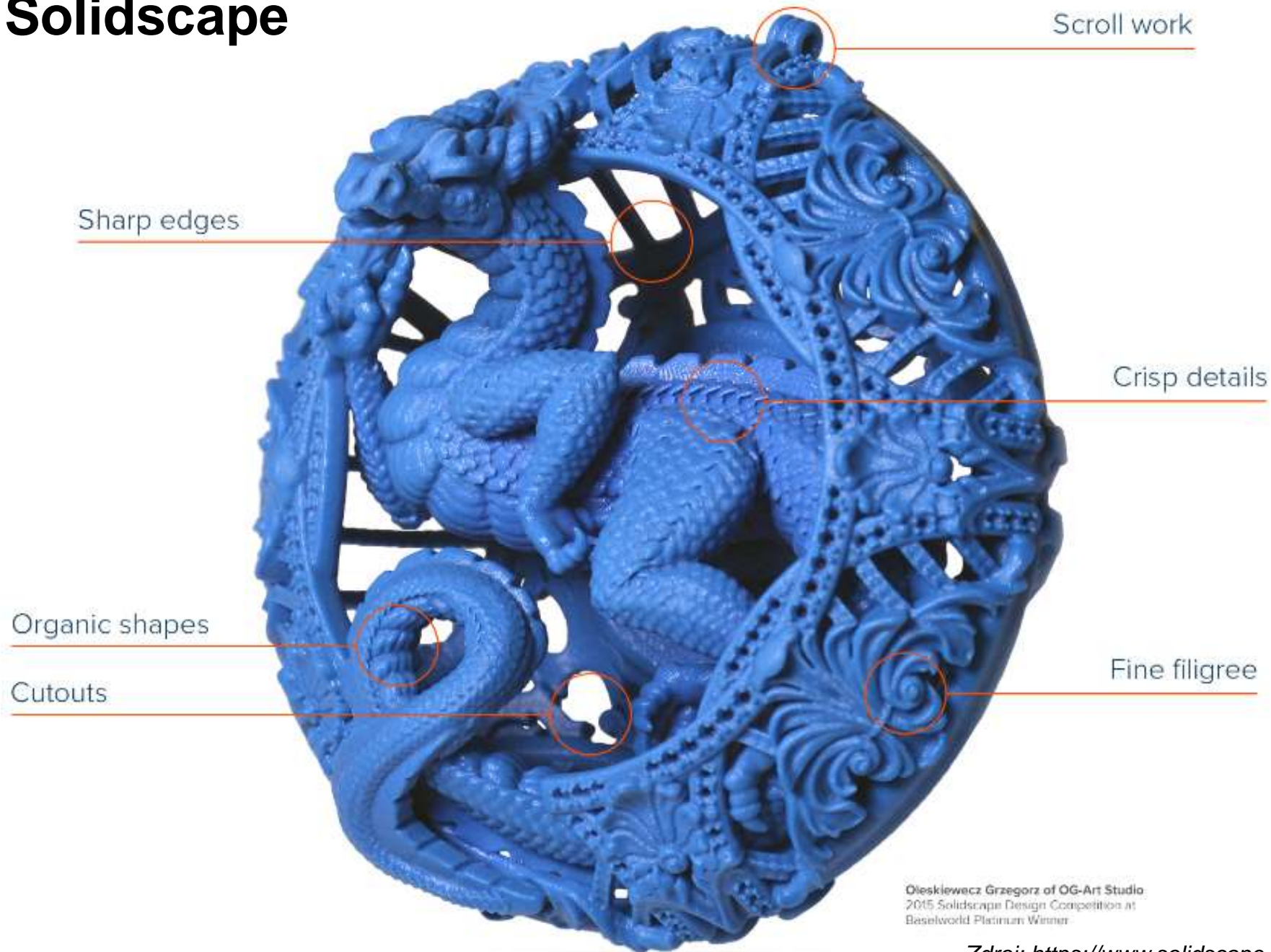
Solidscape



Tryskání materiálu – Solidscape

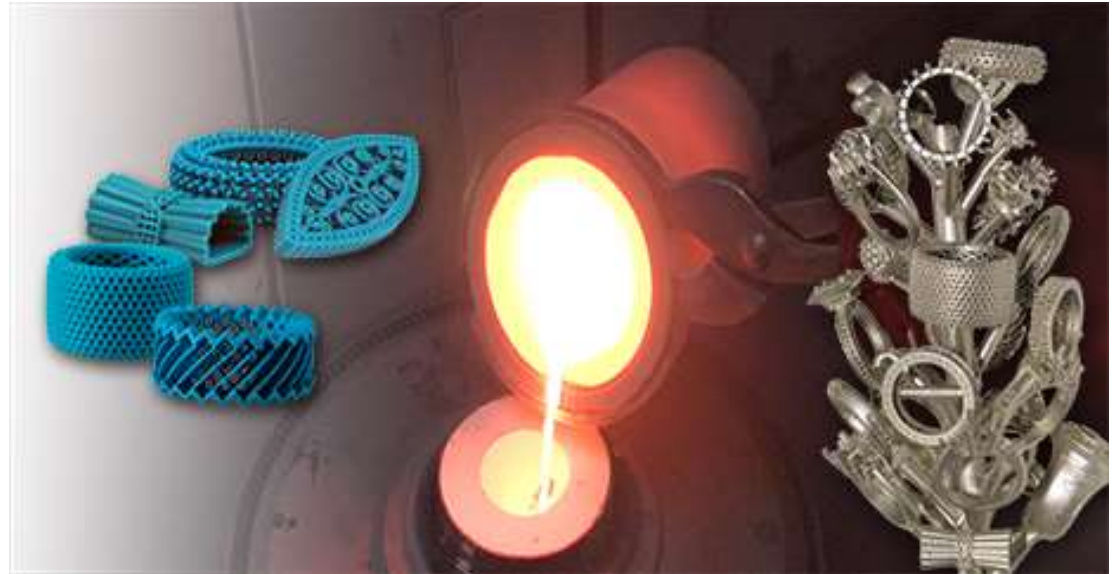


Solidscape



Solidscape

- technologie vhodná na výrobu členitých součástí s malými detaily, typické použití ve výrobě šperků
- 3D tisk voskových modelů, na který navazuje technologie odlévání metodou „ztraceného modelu“



Solidscape – ukázky použití



Tryskání materiálu

- technologie MultiJet Printing (MJP)

3D Systems

- stroj Thermojet představen v roce 1998
- 3D tiskárny pro tisk vosků i termoplastů



ProJet MJP 3600W



Výhody tryskání vosků (příp. speciálních termoplastů)

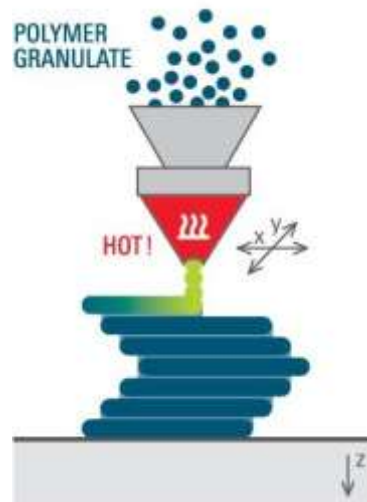
- **detailní a přesná** výroba (přesnost srovnatelná s SLA)
- ideální pro výrobu modelů pro technologii investment casting (technologie lití kovů do keramické formy metodou ztraceného voskového modelu)

Nevýhody tryskání vosků

- omezené použití, relativně malé modely
- velmi pomalý tisk
- vzhledem k daným materiálům výtisky náchylné na mechanické poškození

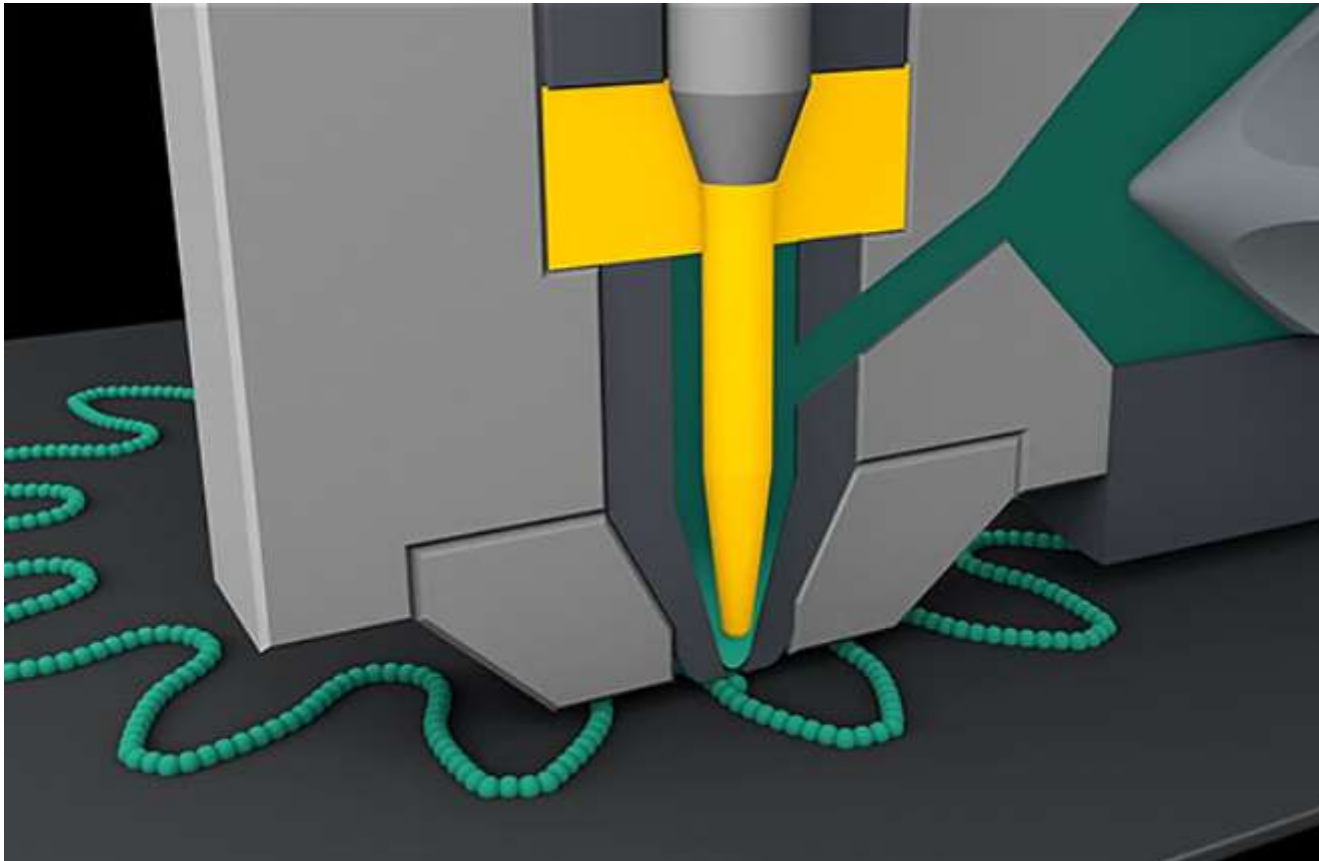
Aditivní technologie – tryskání materiálu

- tryskání materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém jsou selektivně nanášeny kapičky stavěného materiálu
- material jetting – an additive manufacturing process in which droplets of build material are selectively deposited

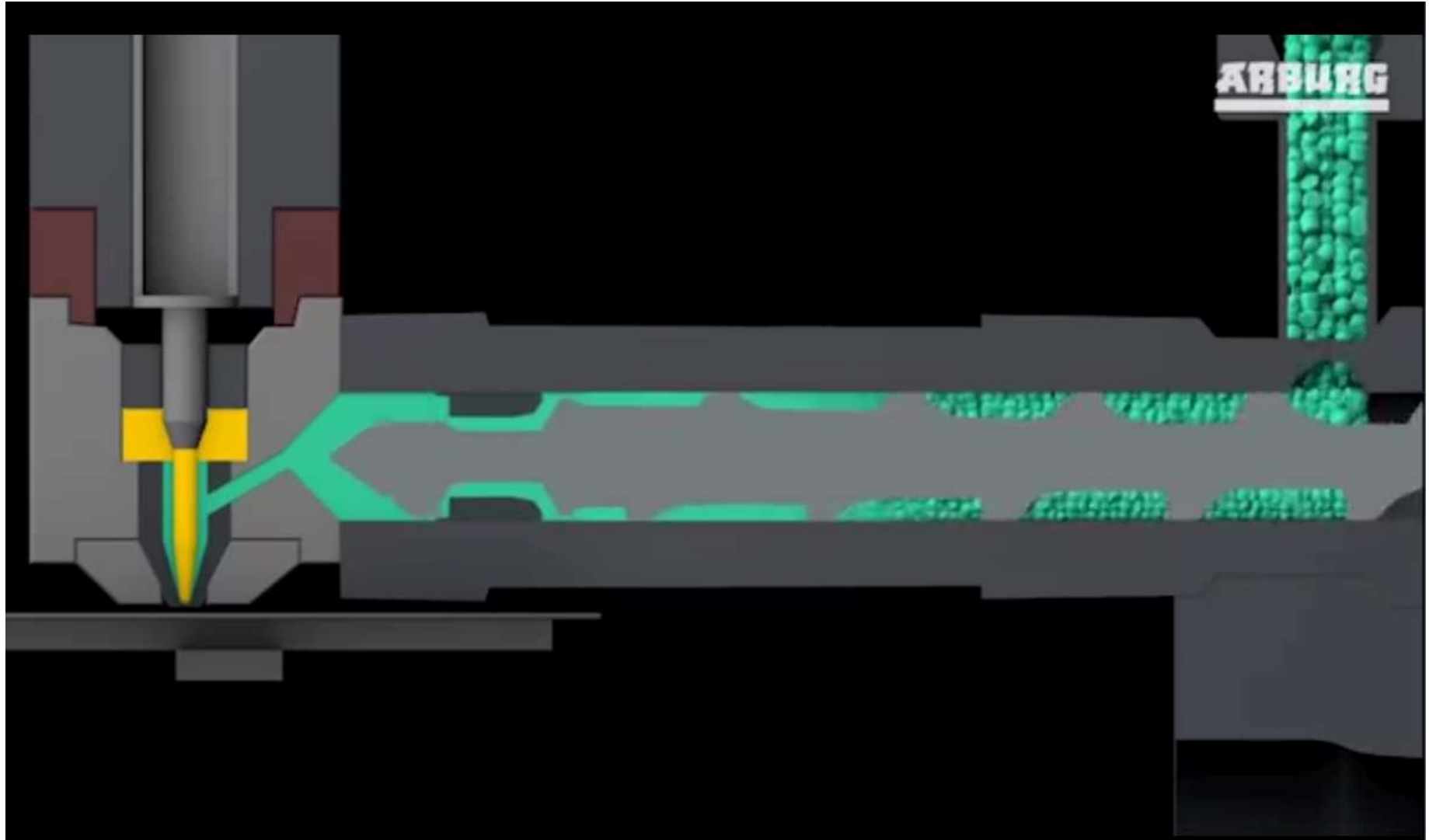


Tryskání materiálu

- technologie ARBURG Plastic Freeforming (APF)



Tryskání materiálu – ARBURG Plastic Freeforming (APF)



Ukázka možností APF



kombinace materiálů:
ABS, TPU a armat 21
výška vrstvy: 0,2 mm

doba tisku: cca. 16 hodin



doba tisku: cca. 6 hodin



materiál: SEBS (Cawiton PR13576)

výška vrstvy: 0,2 mm

doba tisku: cca. 4 hodiny

velmi měkký a odolný materiál proti roztržení
vhodné i jako funkční těsnění

Výhody technologie APF

- velmi **levný vstupní materiál** – granulát termoplastů
- množství materiálů stejné jako vstřikování plastů – na počátku stejný proces
- **otevřený systém** – lze vybavit větším počtem hlav pro **kombinaci více materiálů v jednom tisku**
- speciální podpůrné materiály pro neobvyklé nebo složité 3D geometrie rozpustné chemicky

Nevýhody technologie APF

- malá pevnost dílů ve srovnání se vstřikovanými
- relativně pomalý tisk

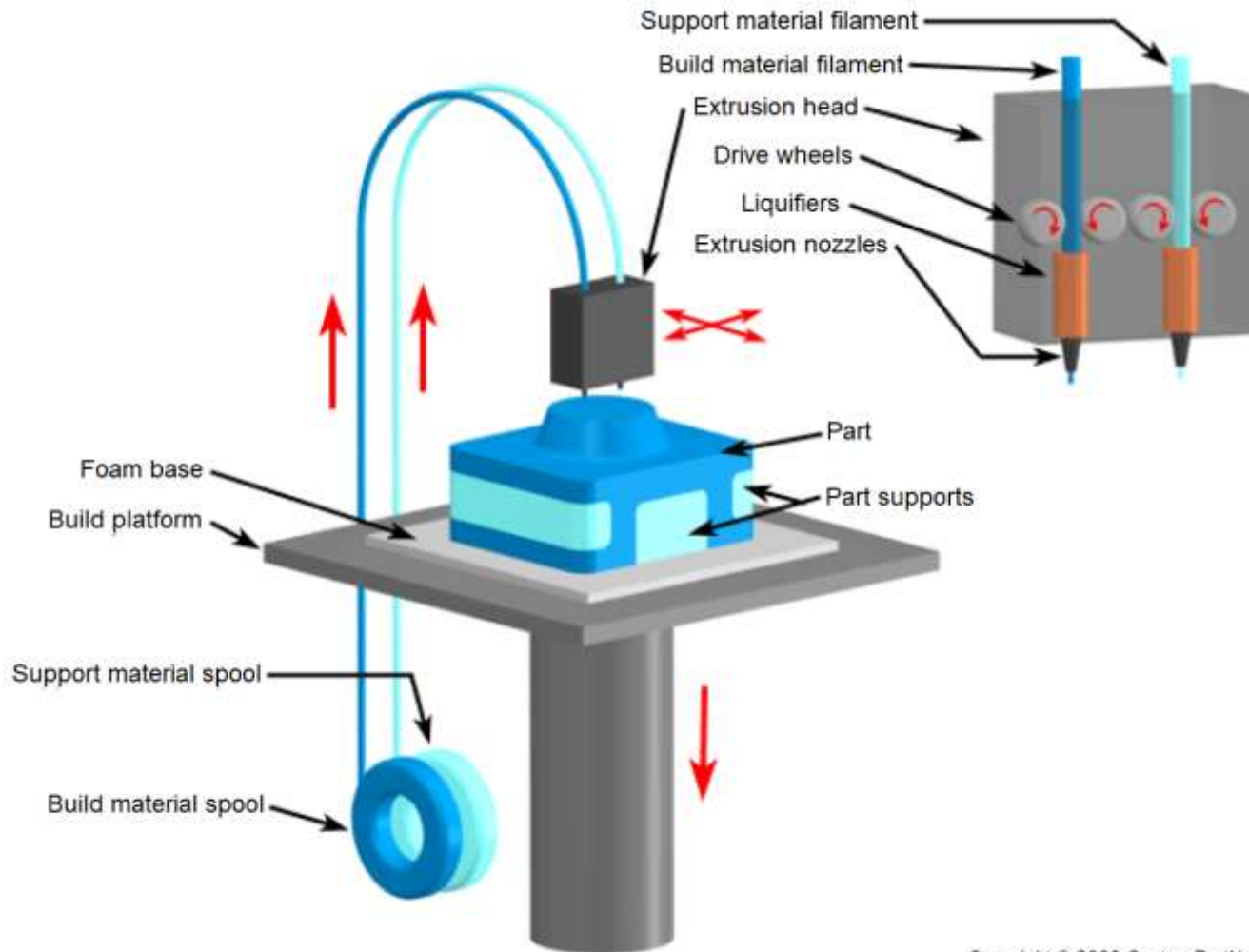
Aditivní technologie – extrudování materiálu

- vytlačování (extrudování) materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém je materiál selektivně dávkován tryskou nebo otvorem
- material extrusion – an additive manufacturing process in which material is selectively dispensed through a nozzle or orifice

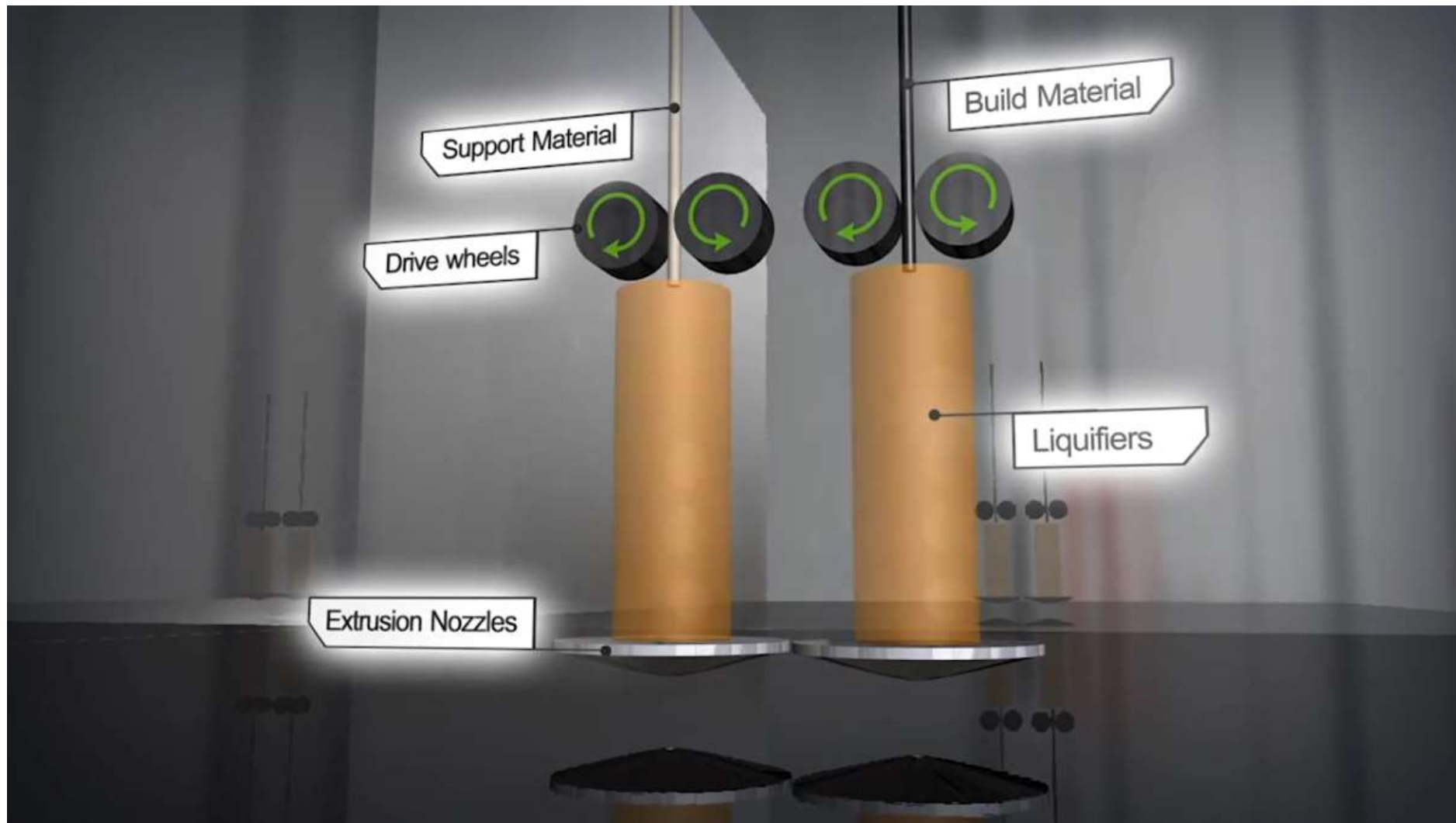


Extrudování materiálu – Fused Deposition Modelling (Fused Layer Modelling, Fused Filament Fabrication)

- vstupní materiál ve formě „drátu“ z termoplastu - filament
- je třeba stavět podpory pod vlastní součásti

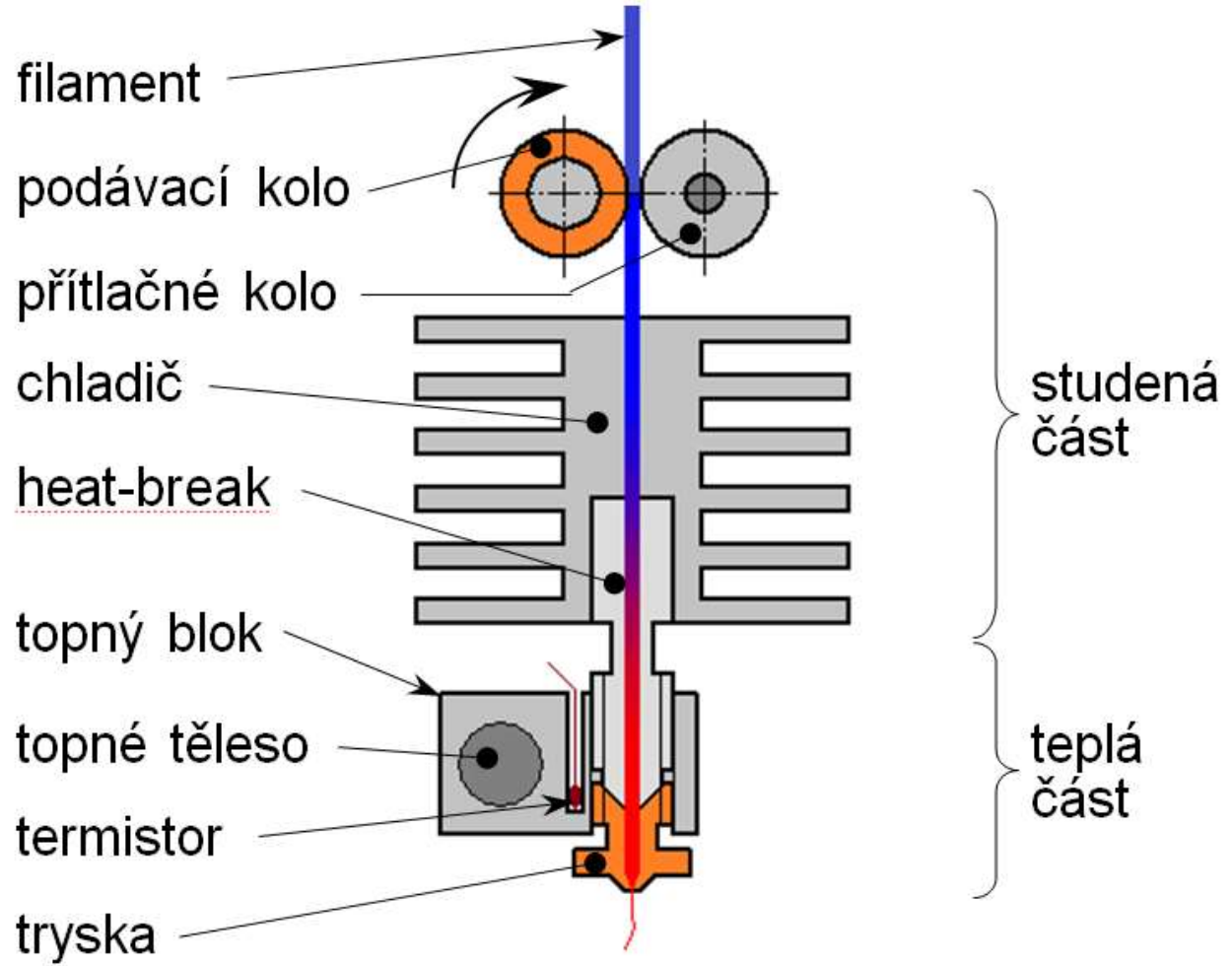


Extrudování materiálu – Fused Deposition Modelling



Extrudování materiálu – Fused Deposition Modelling (Fused Layer Modelling, Fused Filament Fabrication)

Princip tiskové hlavy:

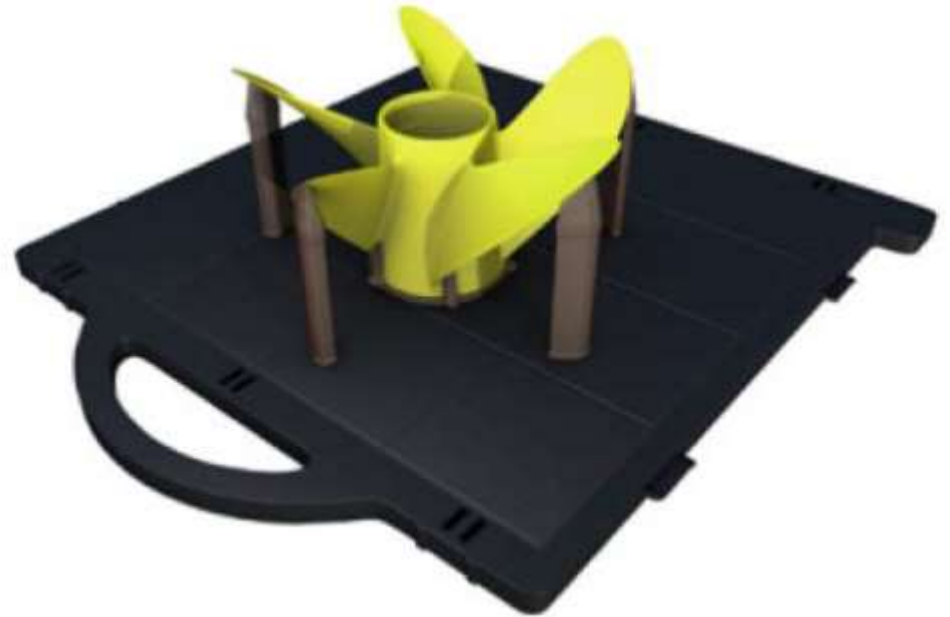


Fused Deposition Modelling

- Dimension

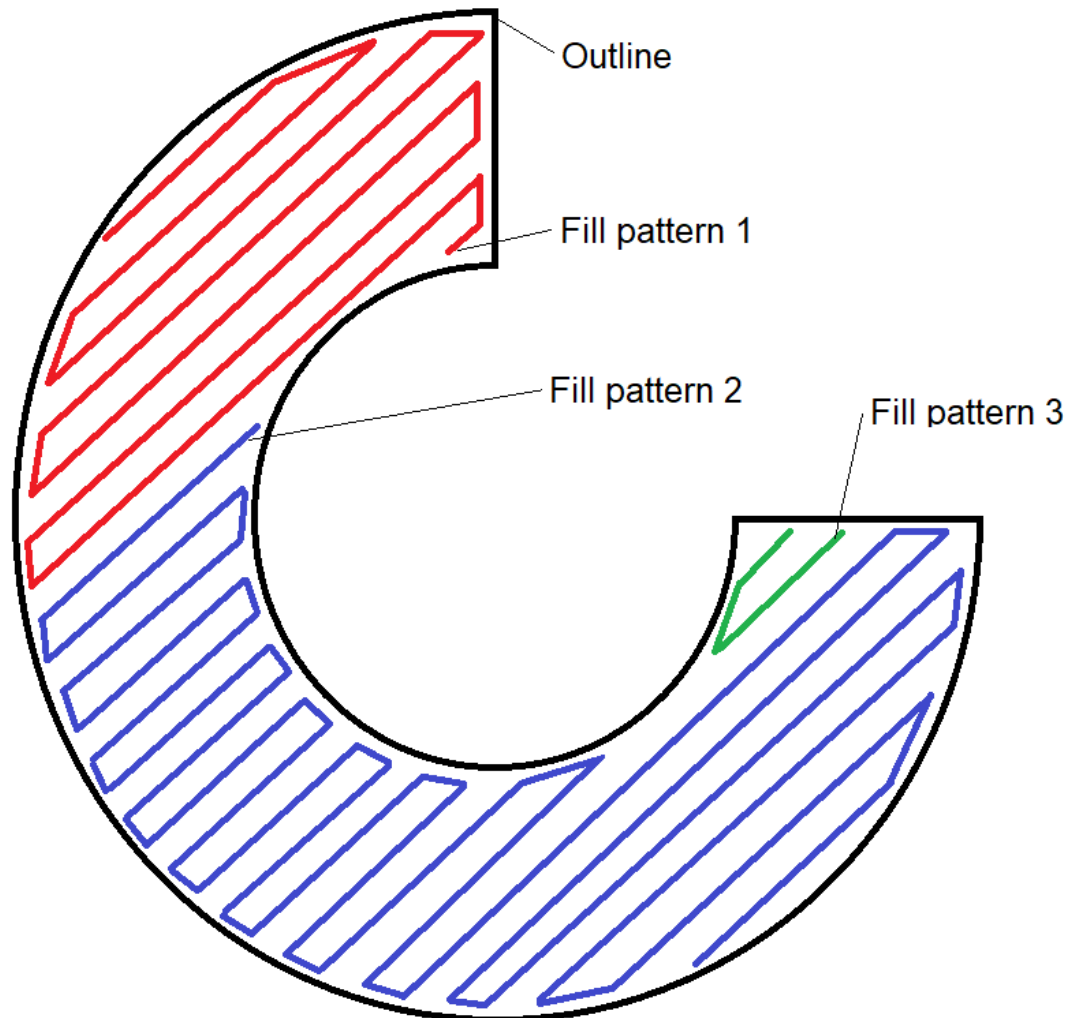


- 3D objekty jsou stavěny po vrstvách zdola nahoru
- spolu s dílem se hned staví i podpory
- podpory je poté možné odstranit chemicky – jsou rozpustné



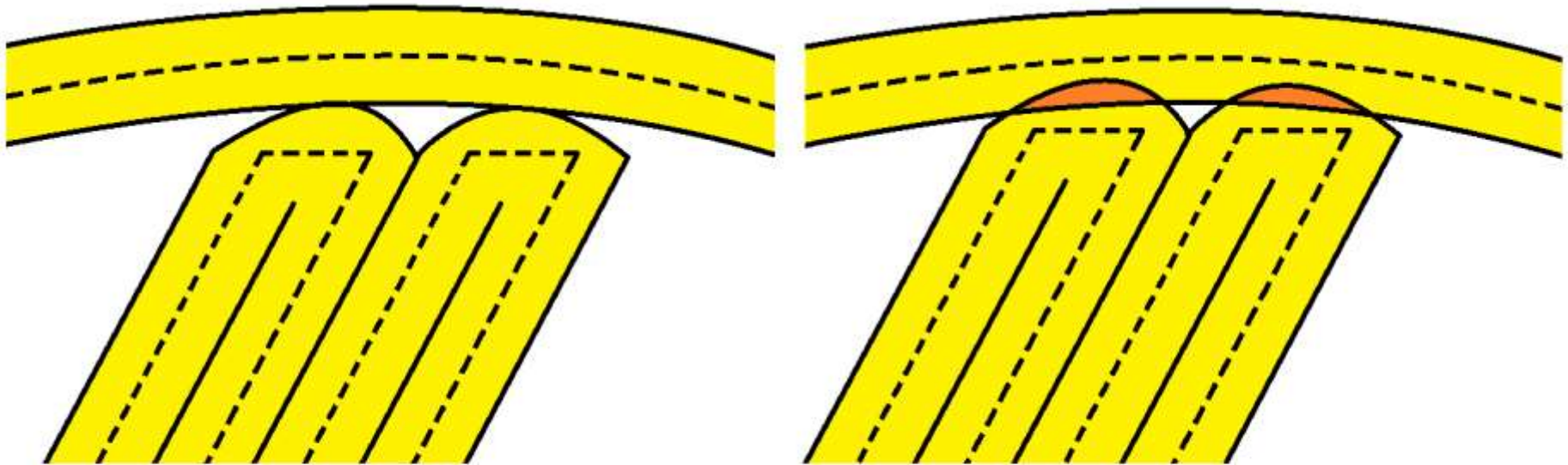
Fused Deposition Modelling

Princip tisky jedné vrstvy:



Fused Deposition Modelling

Přesnost tisku vrstvy:



--- Actual tool path

— Deposited material boundary

Fused Deposition Modelling

Stratasys

Dimension



Mojo



Fortus 900



uPrint



Fortus 250

HYDRAULIC PUMP BODY



Material **cm³**:

Model: 90

Supports: 34

TIME: 9:50'

Scan SFING
ATOS
TRITOP

Mesh 3 mil.



SFING SCULPTURE



2009 – expirace prvního patentu firmy Stratasys => nástup hobby tisku



US005121329A

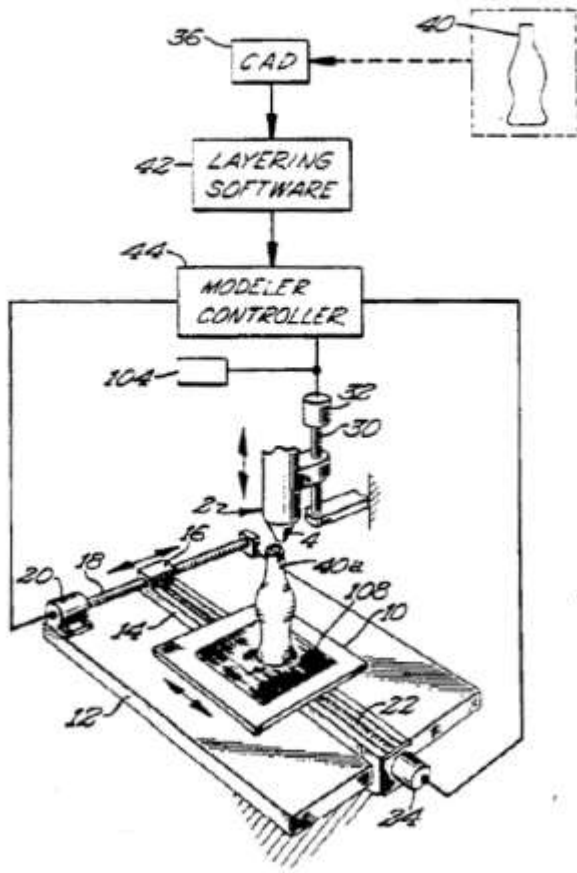
United States Patent [19]
Crump

[11] **Patent Number:** 5,121,329
[45] **Date of Patent:** Jun. 9, 1992

- [54] **APPARATUS AND METHOD FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS**
- [75] **Inventor:** S. Scott Crump, Minnetonka, Minn.
- [73] **Assignee:** Stratasys, Inc., Minneapolis, Minn.
- [21] **Appl. No.:** 429,012
- [22] **Filed:** Oct. 30, 1989
- [51] **Int. Cl.⁵** G06F 15/46
- [52] **U.S. Cl.** 364/468; 364/474.24; 364/477; 264/239; 264/25; 425/174.4
- [58] **Field of Search** 364/472, 473, 477; 264/308, 113; 425/174.4; 427/8, 52; 164/94; 239/75, 82, 83, 84, 132

[56] **References Cited**
U.S. PATENT DOCUMENTS

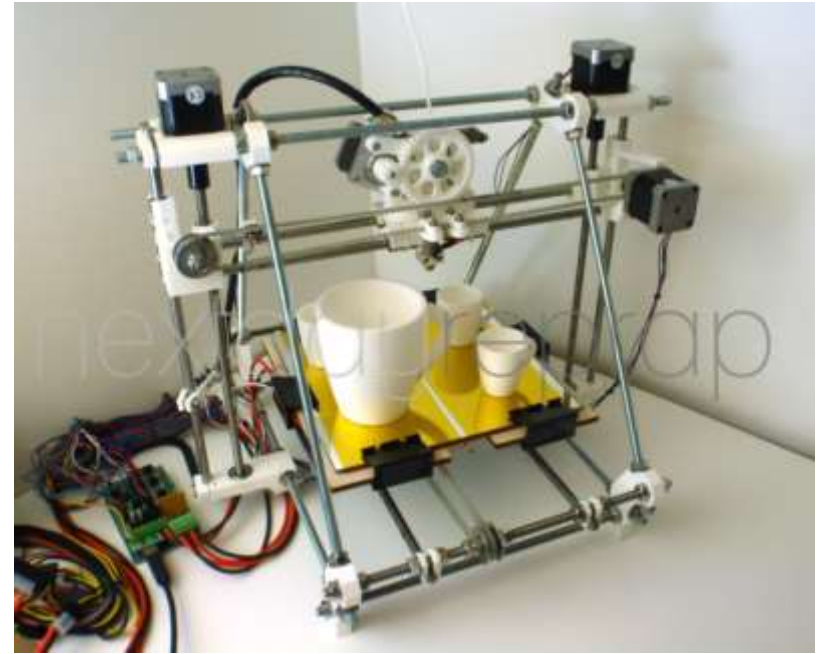
1,934,891	11/1933	Taylor	239/83
3,749,149	7/1973	Paton et al.	164/94
4,071,944	2/1978	Chuss et al.	427/8
4,247,508	1/1981	Housholder	264/221
4,293,513	10/1981	Langley et al.	264/308
4,545,529	10/1985	Tropecano et al.	239/75
4,575,330	3/1986	Hull	364/473
4,595,816	6/1986	Hall et al.	364/477
4,665,492	5/1987	Masters	364/474.02
4,681,258	7/1987	Jenkins et al.	239/83
4,863,538	9/1989	Deckard	
4,938,816	7/1990	Beaman et al.	
4,944,817	7/1990	Bourell et al.	



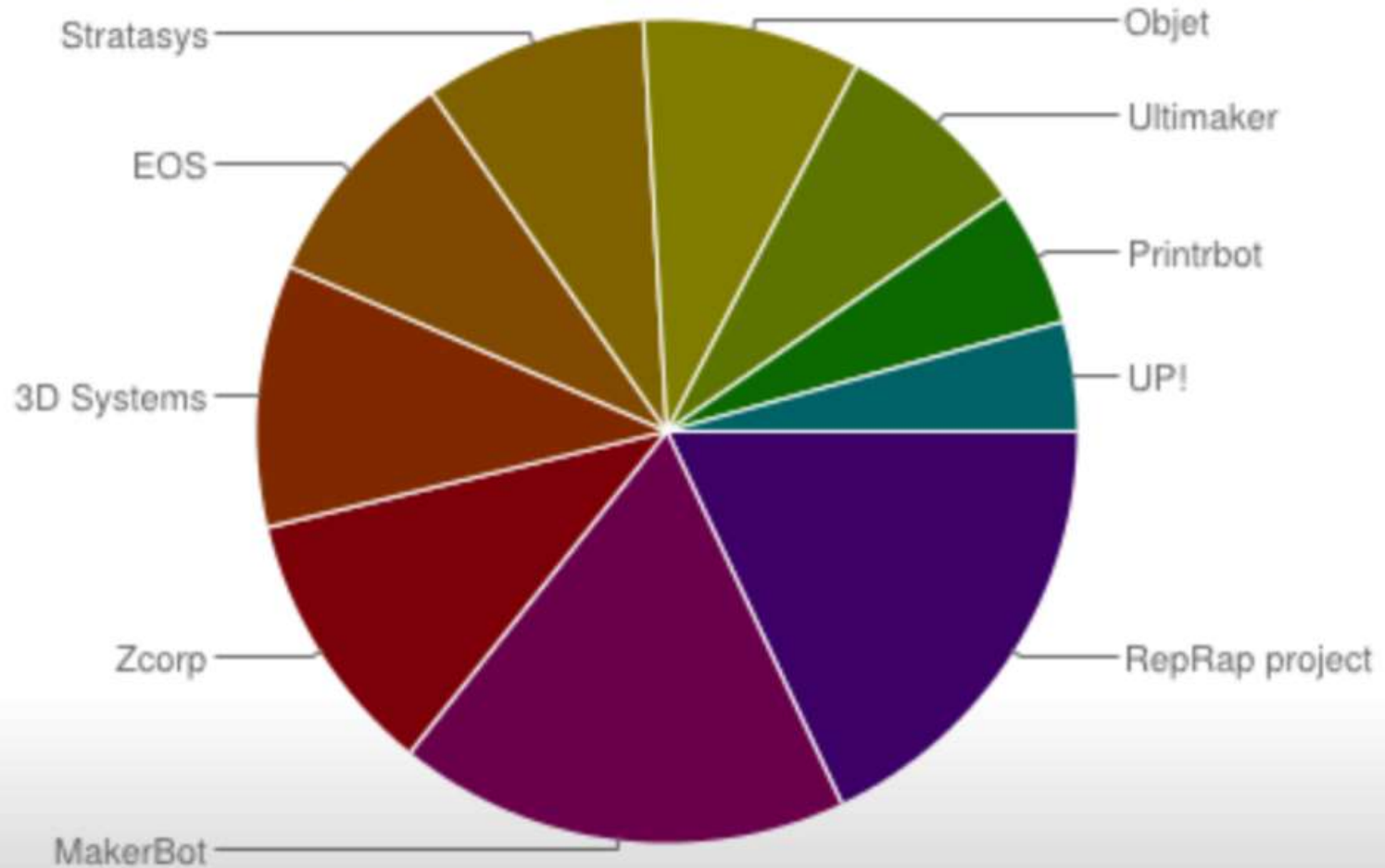
Fused Filament Fabrication (Fused Layer Modelling)

RepRap

- University of Bath
- založeno v roce 2005
- open source komunita
- rozšířeno po celém světě během pár let
- filozofie výroby některých součástí tiskáren tiskárnami (self replicating)
- cena první stavebnice byla £499
- dnes cena stavebnic na trhu od 5000,-Kč výše (převážně z Číny)
- v ČR firma Prusa Research (Josef Průša) – vyšší cena vyvážena filozofií „kup, sestav a tiskni“



2013: Which printers (which manufacturer) have you used?



Source: Moilanen, J. & Vadén, T.: Manufacturing in motion: first survey on the 3D printing community, [Statistical Studies of Peer Production](#)

Výhody extrudování materiálů

- **relativně jednoduchý proces** – velké rozšíření této technologie (FFF, FLM)
- poměrně levný tisk
- snadná dostupnost množství termoplastických materiálů (PLA, ABS, TPU, PETG, PA, kompozity PA-C, PA-GF...)

Nevýhody extrudování materiálů

- výrazná nehomogenita tištěných dílů v různých směrech
- relativně pomalý tisk
- **toxicita některých materiálů při tisku** v otevřeném pracovním prostoru

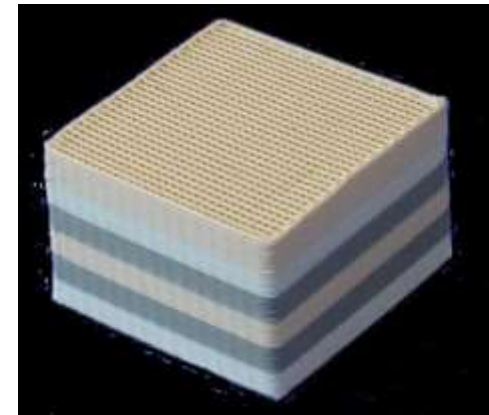
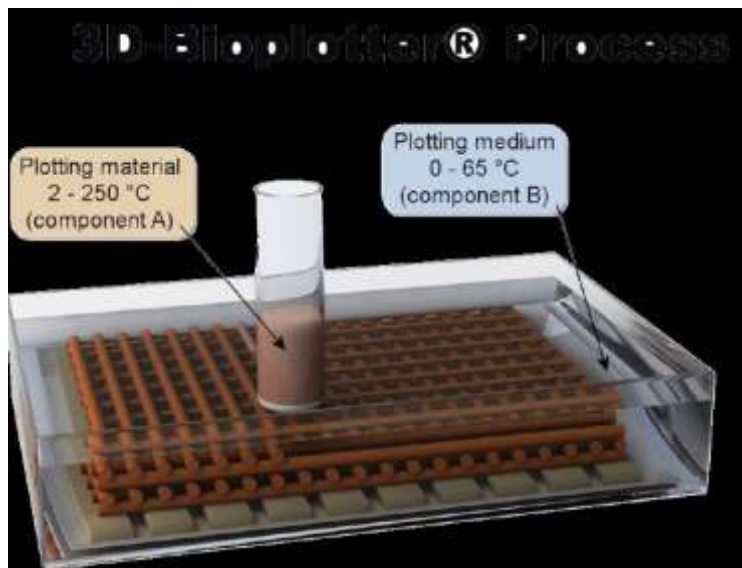
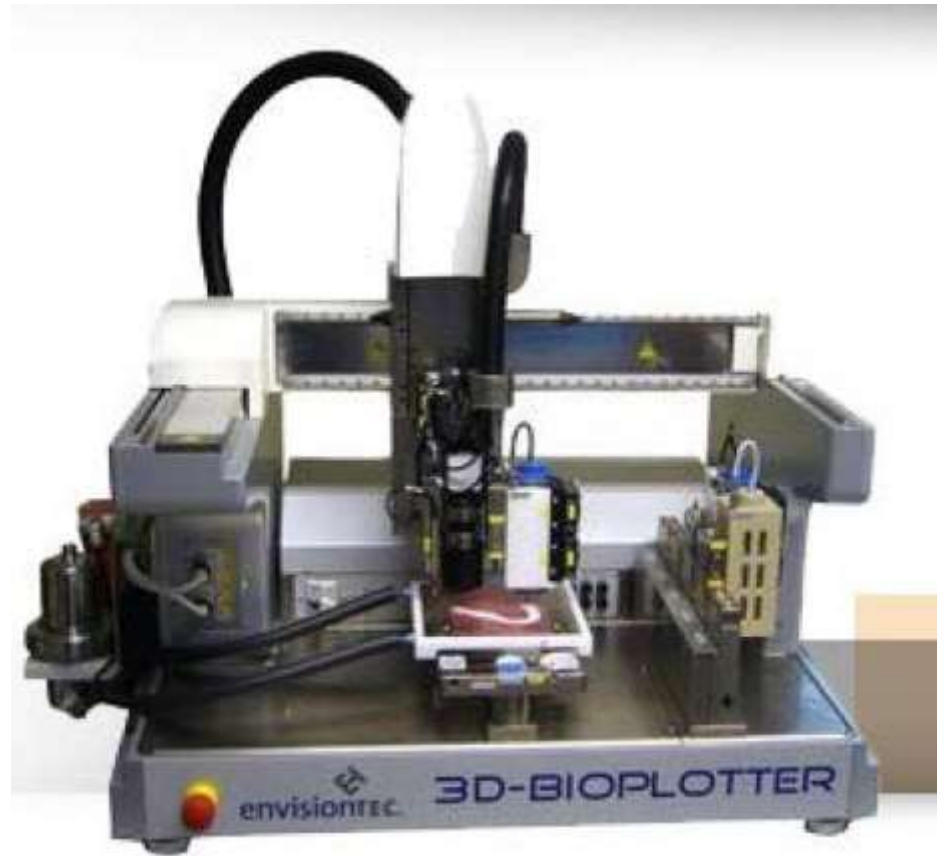
Extrudování materiálů

Díky jednoduchosti procesu a díky projektu RepRap (Adrian Bowyer MBE z University of Bath) vznikla celá řada variací technologie extrudování materiálů pro řadu odvětví:

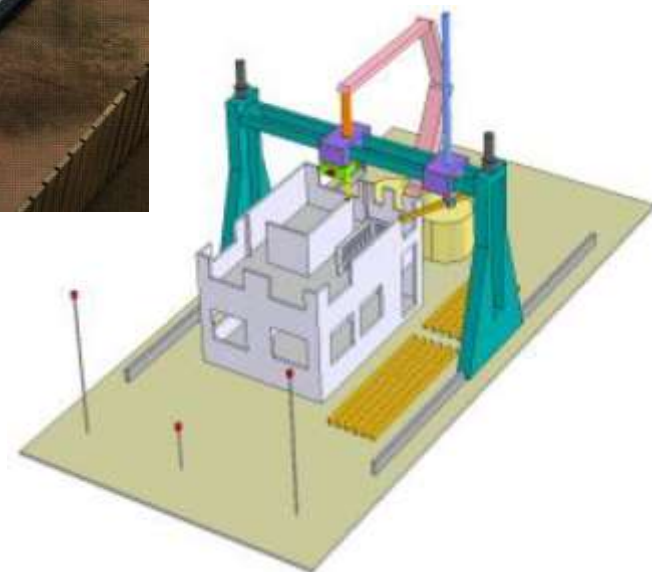
- zdravotnictví
- stavebnictví
- potravinářský průmysl
- nepřímý 3D tisk z kovů, keramiky aj.

Envisiontec Bioplotter

- 3D tisk bio-materiálů
- biokompatibilní polymery pro tisk skeletu
- „tisk“ živých buněk díky několika různým druhům systémů dodávky materiálu



3D tisk budov – extrudování betonu apod.



Projekt TUL – 3D tisk ve stavebnictví a architektuře (3D STAR)

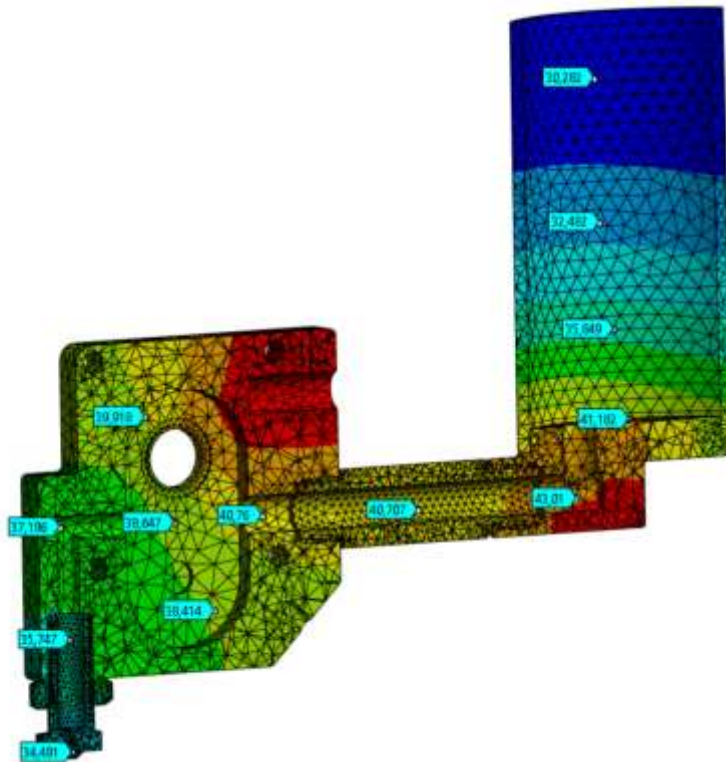
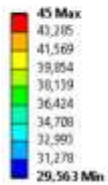


Projekt TUL – 3D tisk ve stavebnictví a architektuře (3D STAR)

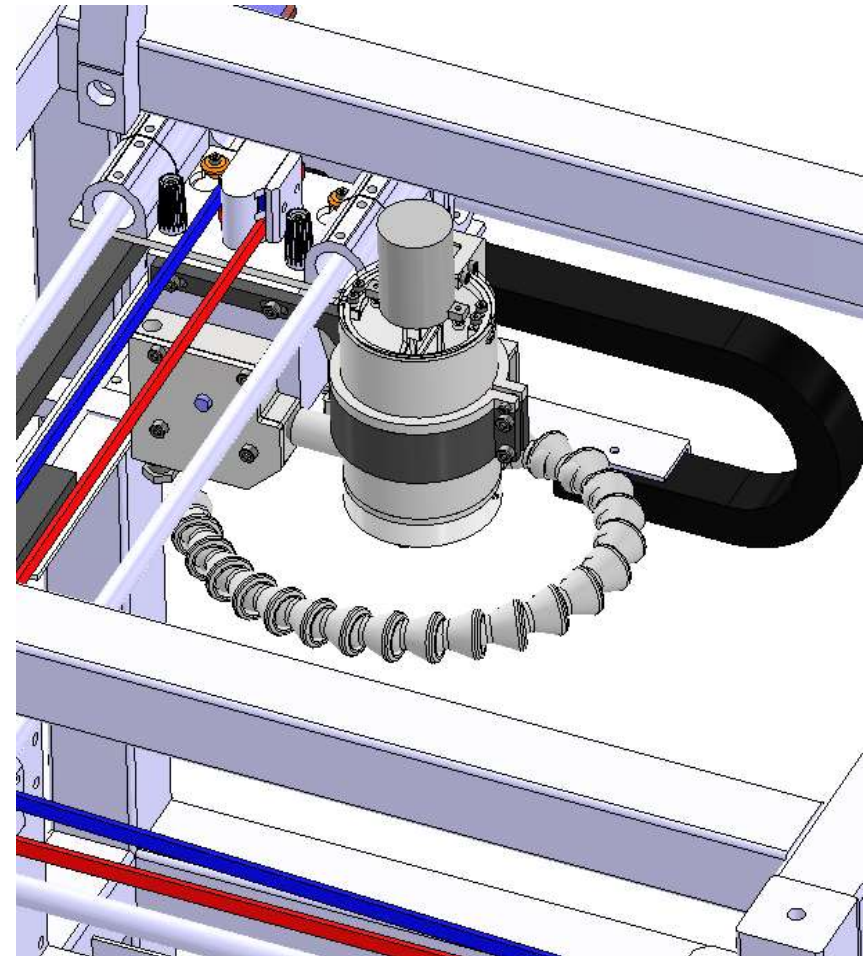


Výzkum na KSA – 3D tisk z čokolády

A: Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1000 s
18.01.2023 22:05



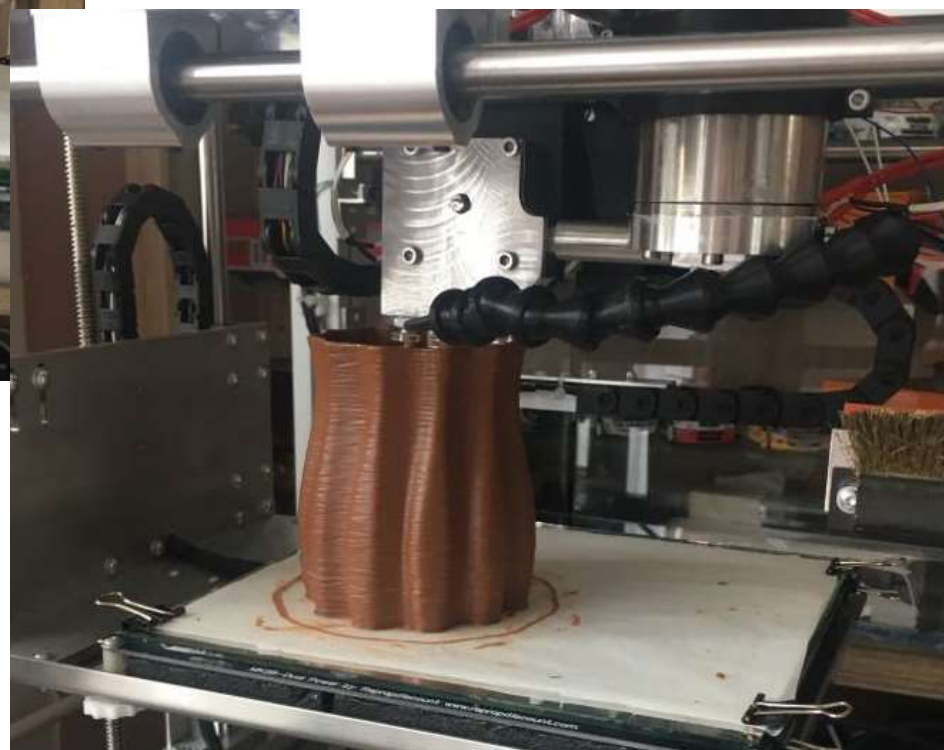
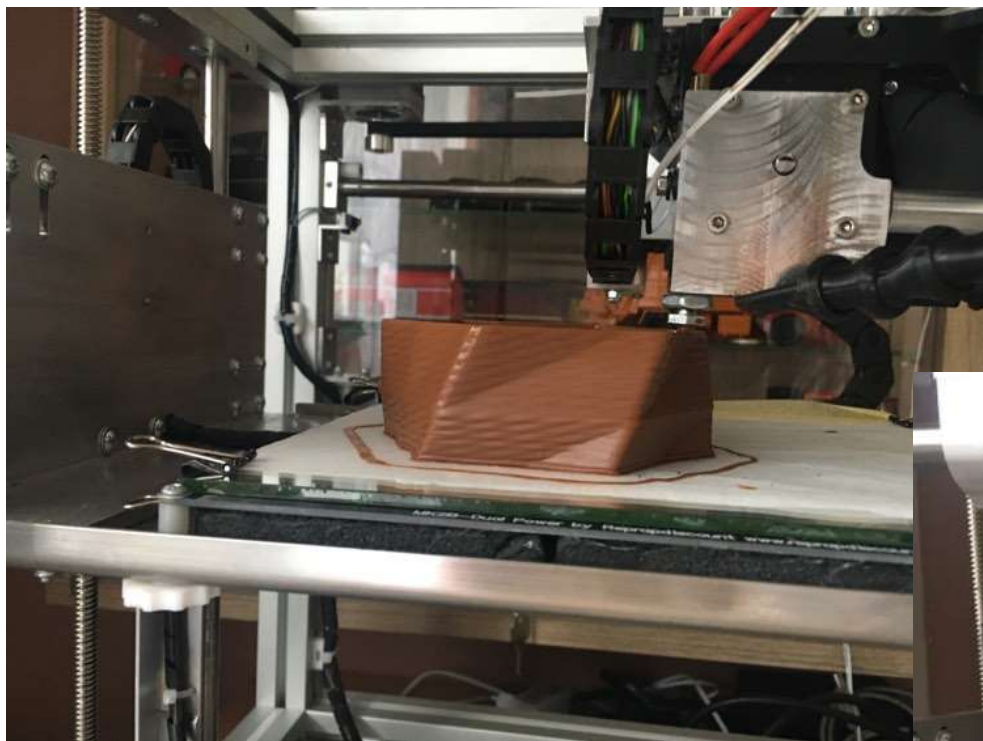
MKP teplotní analýza



CAD návrh tiskové hlavy

Výzkum na KSA – 3D tisk z čokolády

ukázka vlastního tisku

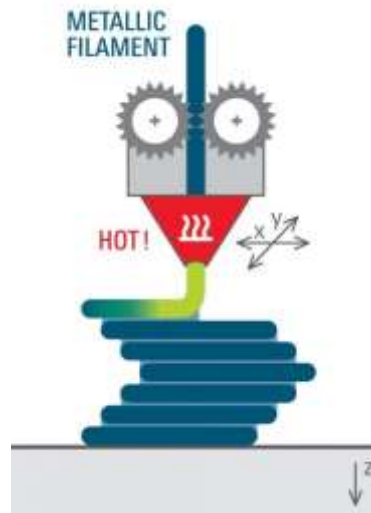


Aditivní technologie

– extrudování materiálu pro kovové díly

- vytlačování (extrudování) materiálu – proces aditivní výroby, ve kterém je materiál selektivně dávkován tryskou nebo otvorem

Proces tisku je shodný jako u tisku termoplastů. Rozdíl je v použitém filamentu a dokončovacích operacích. Výroba kovových součástí pomocí technologie FDM vyžaduje filament, který obsahuje kovový prášek a dva druhy pojiv. Vytisknutou součást je třeba podrobit dokončovacím operacím pro získání požadovaných mechanických vlastností. Vytisknutá součást se nazývá „zelený díl“, z kterého je nutné katalytickým procesem odstranit jedno z pojiv. Tímto procesem vznikne „hnědý díl“, který se umístí do pece, která za vysokých teplot odstraní druhé pojivo a speče kovové částice. Výsledkem je homogenní kovová součást.

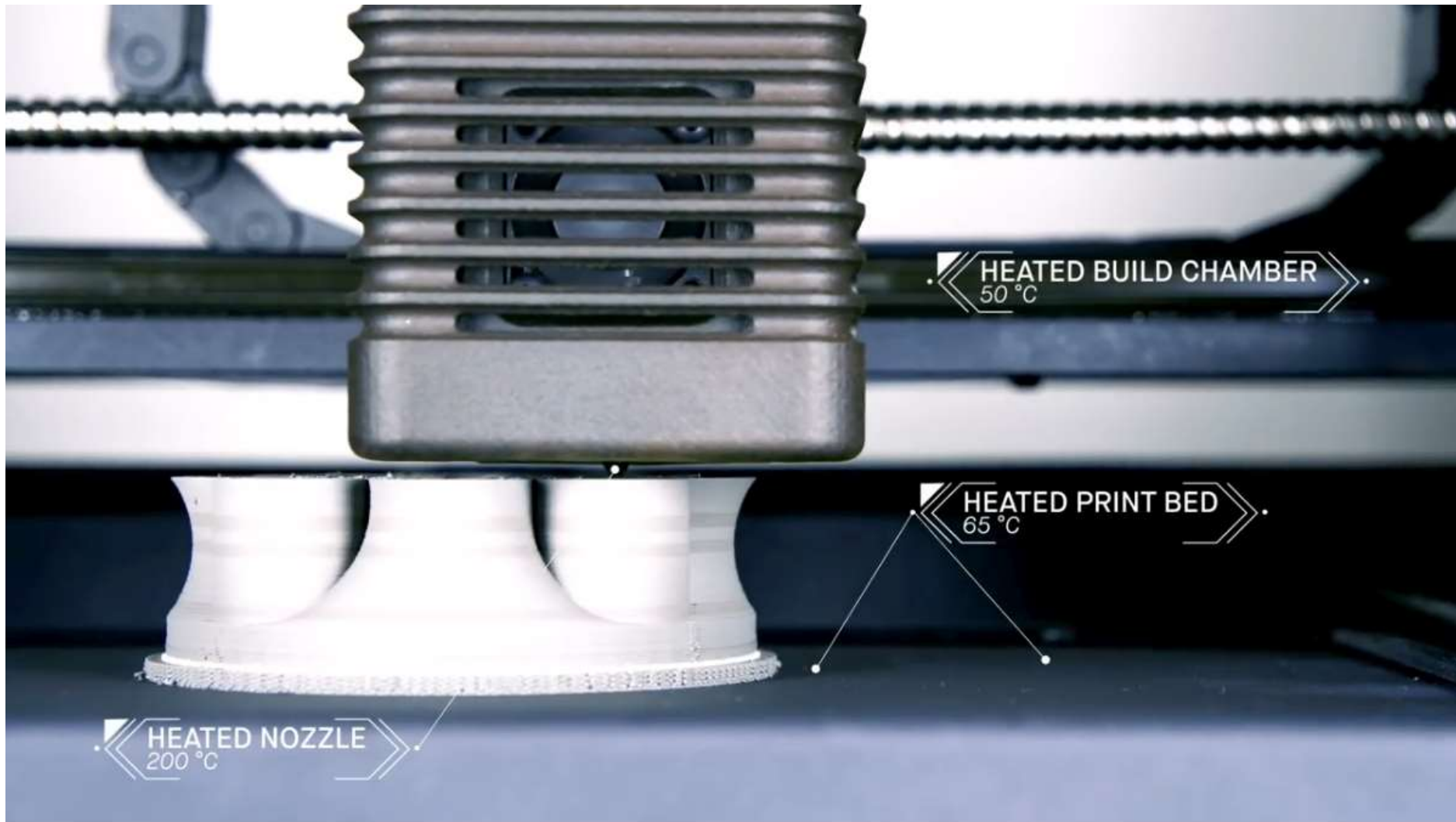


Desktop Metal

- Technologie na trh uvedena v roce 2019 pod názvem Studio System+
- 10 x levnější než laserové systémy
- kancelářský systém ↔ bezpečné
- materiálem jsou pruty z kovového prášku stmelené polymerem
- nutný tzv. debinding – proces pro odstranění pojiva (polymeru) a následná sintrace pro získání funkčního kovového modelu



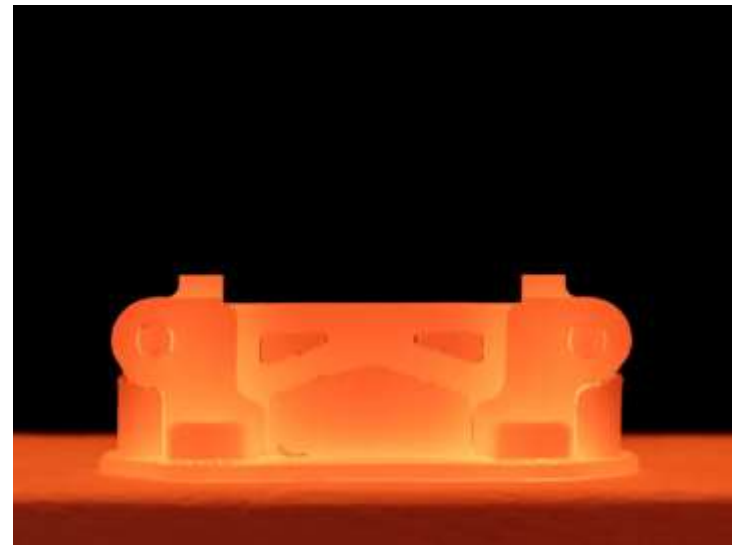
3D tisk z kovů extrudováním materiálu – Studio System+



Desktop Metal

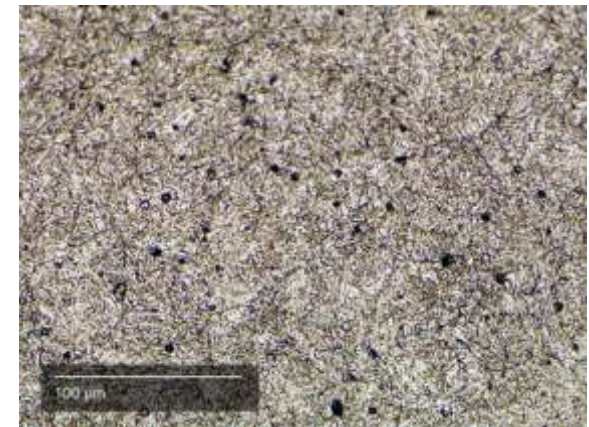
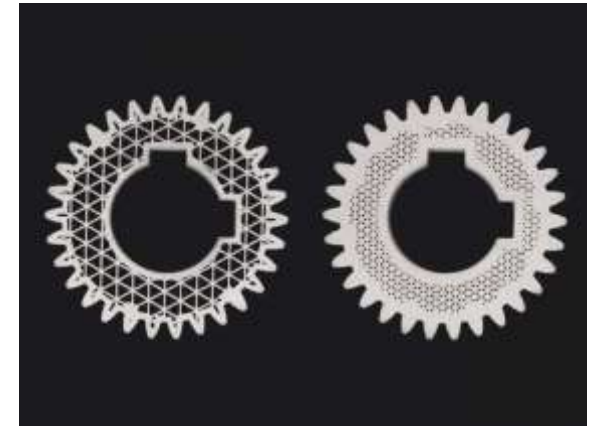
Aktuálně dostupné materiály:

- Ocel 17-4PH – nerezová ocel – pevná a odolná proti korozi
- Ocel 4140 – nízkolegovaná slitina, střední uhlíková ocel s vysokou pevností a houževnatostí
- Ocel 316 L – nerezová ocel – odolnost proti korozi při vysokých teplotách
- Měď – tepelná a elektrická vodivost
- Inconel 625 – superslitina – pevná a odolná proti korozi při vysokých teplotách
- Ocel H13 – nástrojová ocel – tvrdá a odolná proti otěru při zvýšených teplotách



Desktop Metal

- 3D tisk s vysokým rozlišením – velikost detailu 0,4 mm (standard), 0,25 (high-res)
- tloušťka vrstvy od 50 μ m
- možnost tisku lehkých struktur a stěn až do tloušťky 4 mm, max. tloušťka plné části dílu až 8 mm
- hustota dílů až 98% – podobně jako u litých dílů pomocí vysokotlakého frakčního média, vysokotlakého vytlačování a vakuového slinování při teplotách až 1400 ° C



Výhody 3D tisku z kovů extrudováním

- relativně levný nepřímý 3d tisk kovových dílů
- kancelářský systém = čistý proces
- volba mikrostruktury materiálu je volitelná pomocí softwaru ovládajícího pec (např. austenitická / bainitická struktura)
- snadné odstranění podpor díky keramické mezivrstvě

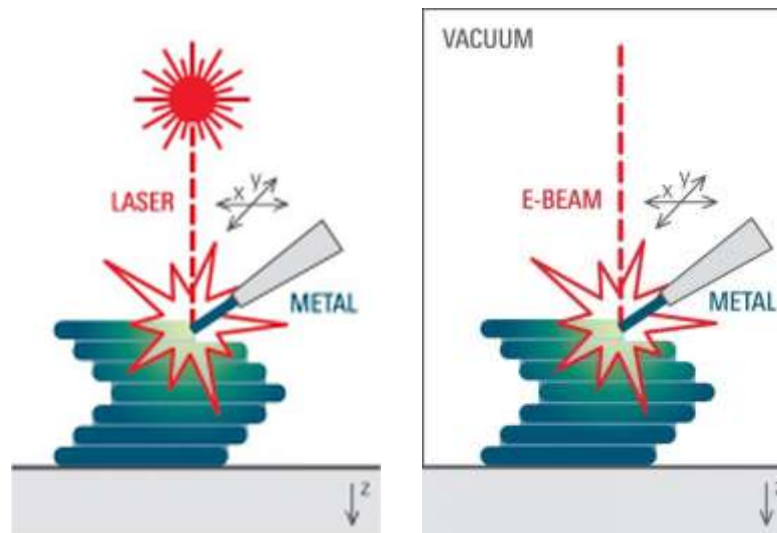
Nevýhody 3D tisku z kovů extrudováním

- postprocessing – nutný debinding a sintrování pro získání výsledného dílu z kovu
- pouze tenkostěnné díly (tl. stěny do 8 mm)
- relativně malé díly, pracovní prostor 240 x 150 x 155 mm, doporučení max. 150 x 150 x 110 mm

Aditivní technologie

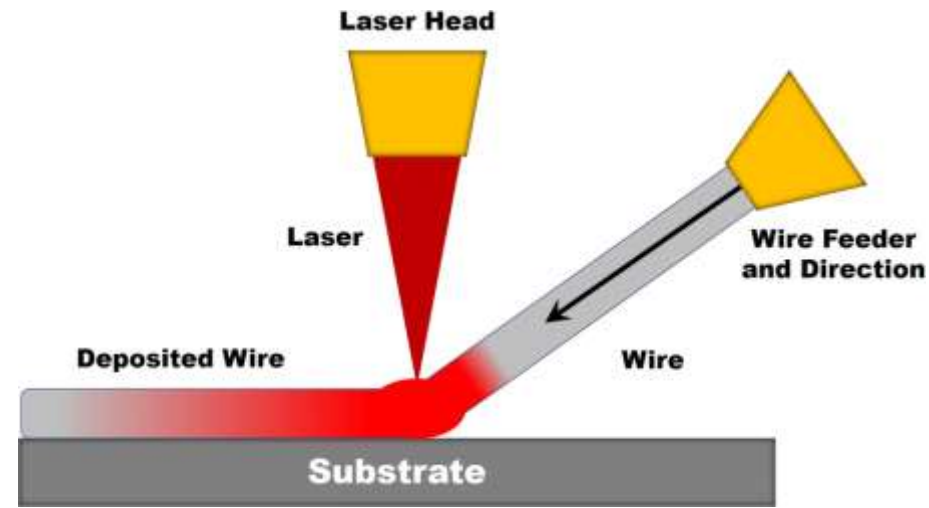
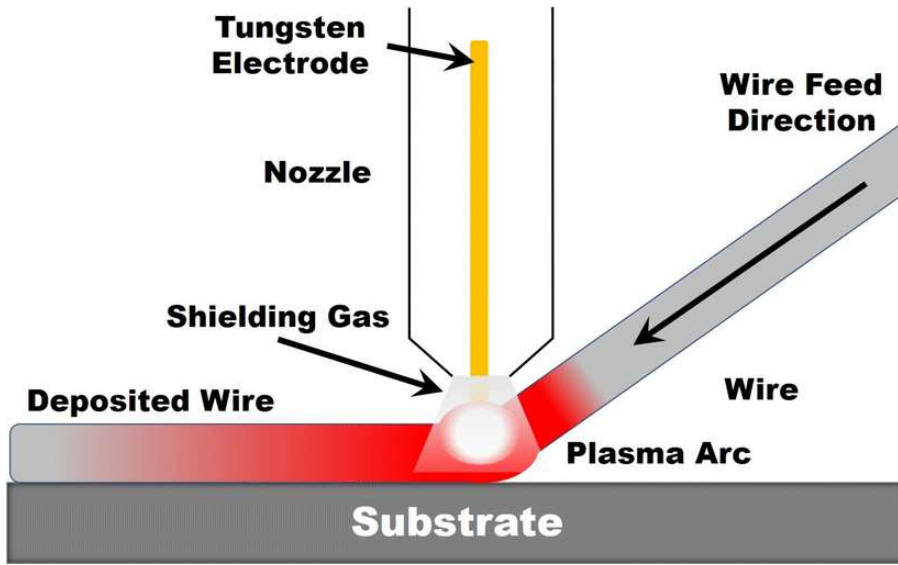
– řízená energie natavování

- řízená energie natavování – proces aditivní výroby, při němž je tepelná energie soustředěna na spojení materiálů tavením v okamžiku nanášení
- directed energy deposition – an additive manufacturing process in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited



Zdroj: matca.cz/technologie/aditivni-technologie/

Řízená energie natavování



Procesy DED mohou využívat buď pulzní plazmový oblouk, pulzní laser nebo elektronový paprsek ve vakuu. Do dráhy zdroje tepla se přivádí materiál ve formě drátu, který se lokálně natavuje na substrát nebo předchozí vrstvy. Průměry drátů se pohybují od 0,2 do 4 mm, přičemž menší průměr drátů se nanáší pomocí laserového zdroje tepla a větší pomocí pulzního plazmového oblouku.

LENS – vstupní surovinou pro tento typ tisku může být buď kovový prášek nebo souvislý kovový drát. Laser vytvoří na stavební platformě lázeň roztaveného kovu, do které je dopraven kovový prášek nebo drát. Vysoká přesnost této technologie snižuje potřebu dalšího obrábění výtisku. Díky nižším nárokům na inertizaci atmosféry a absenci práškového lože dokáže tato metoda vyrobit relativně velké díly při minimální produkci odpadního materiálu.

Řízená energie natavování

Typické technologie:

- **DED** – souhrnná zkratka (Directed Energy Deposition)
- **WAAM** – Wire and arc additive manufacturing (aditivní metoda navařování pomocí el. oblouku a drátového přídavného materiálu)
– obecný název procesů obloukového navařování pro AM
- **MIG / MAG / TIG** navařování
- **LENS** – navařování prášku nebo drátu pomocí laseru

Aditivní výroba

Rozdělení aditivních technologií dle normy ISO/ASTM 52900:

- | | |
|---|--------------------|
| 1. vytlačování (extrudování) materiálu: | SLA |
| | DLP |
| 2. tryskání materiálu: | PolyJet |
| | SLS |
| 3. tryskání pojiva: | SLM, DMLS |
| | EBM |
| 4. laminování deskového materiálu: | 3DP |
| | MJF |
| 5. fotopolymerizace ve vaně: | LENS |
| | Laser cladding |
| 6. spojování prášku ve vrstvách teplem: | LOM |
| | DOD, TIJ |
| 7. řízená energie natavování | APF |
| | FLM, FDM, FFF |
| | MIG/MAG navařování |

Aditivní výroba

Shrnutí:

Technologie:

Materiály:

Vhodnost použití:

Nutnost stavby podpor:

Další vlastnosti: