

## 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. 13: Přehled aditivních technologií – 2. část



Ing. Petr Keller, Ph.D.

# Aditivní výroba

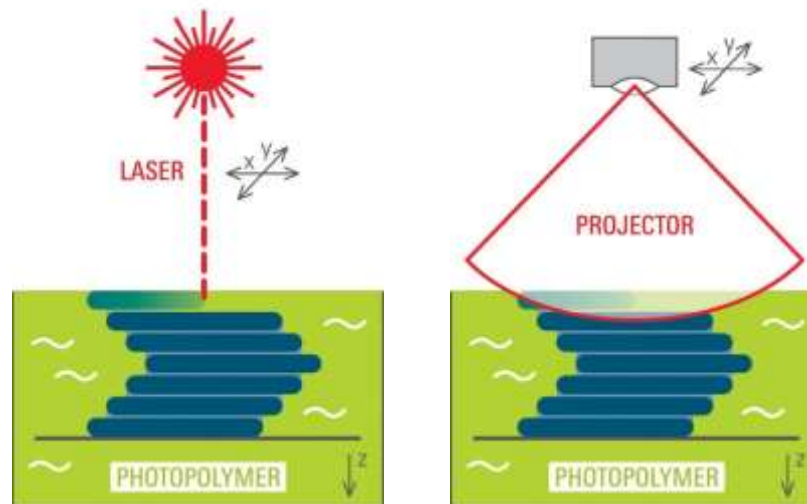
**Norma ISO/ASTM 52900 uvádí schválené kategorie a názvy procesů aditivních technologií, které jsou uvedeny v následujícím seznamu:**

- 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

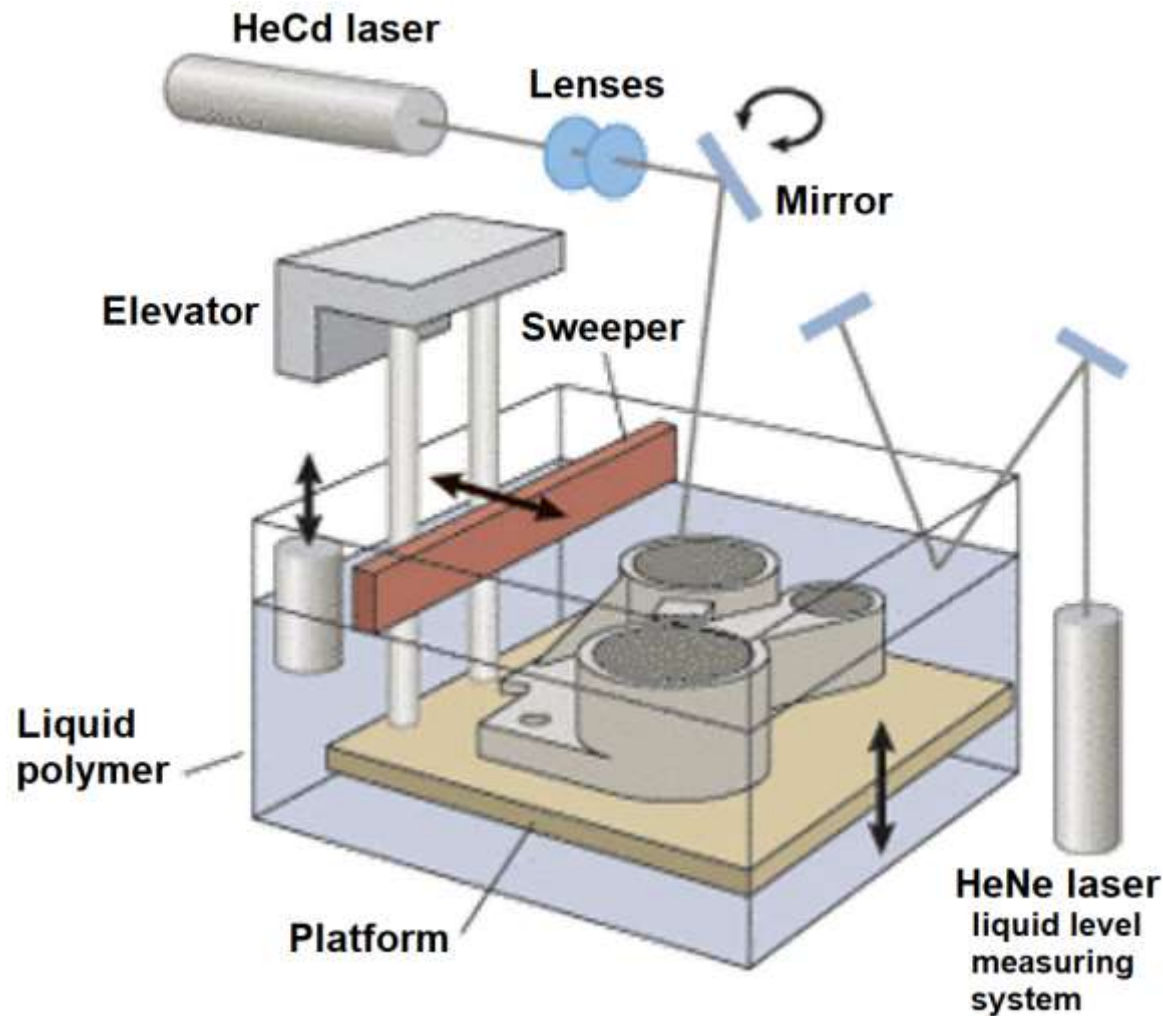
## – fotopolymerizace ve vaně

- fotopolymerizace ve vaně – proces aditivní výroby, při kterém je kapalný fotopolymer v nádobě selektivně vytvrzován polymerizací aktivovanou světlem
- vat photo-polymerization – an additive manufacturing process in which liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization



Zdroj: [matca.cz/technologie/aditivni-technologie/](http://matca.cz/technologie/aditivni-technologie/)

# Fotopolymerizace ve vaně

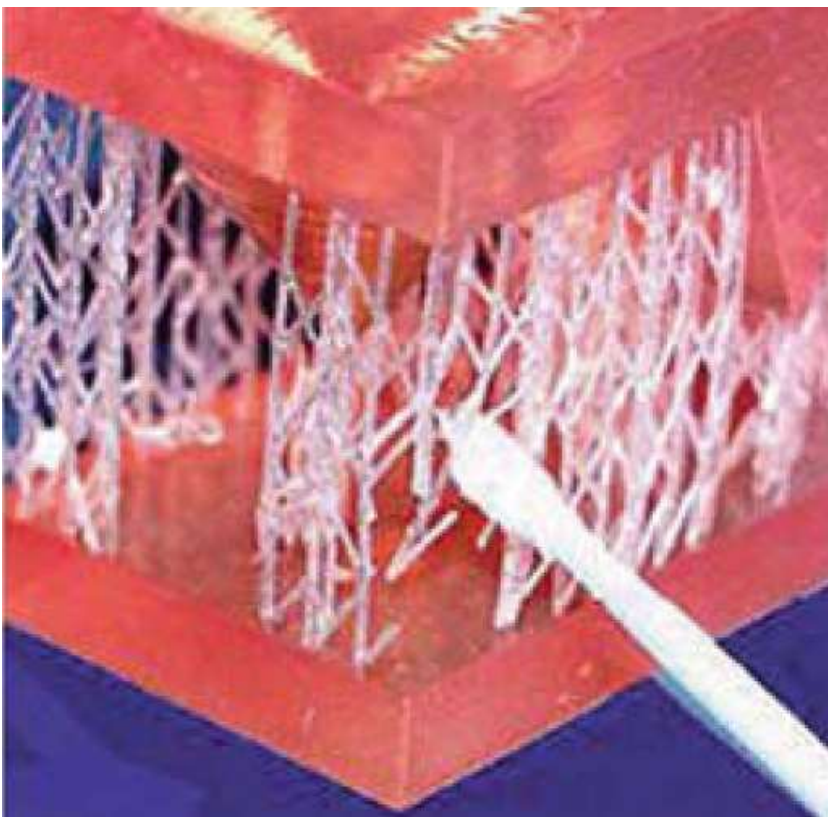


- vytvrzování fotopolymeru ve vaně selektivně pomocí UV světla v tenkých vrstvách
- tekutý nezpracovaný fotopolymer slouží částečně jako podpora, přesto je nutné stavět řídké podpory pro fixování dílu na platformě
- nezpracovaný fotopolymer ve vaně je možné opětovně použít

Aditivní technologie

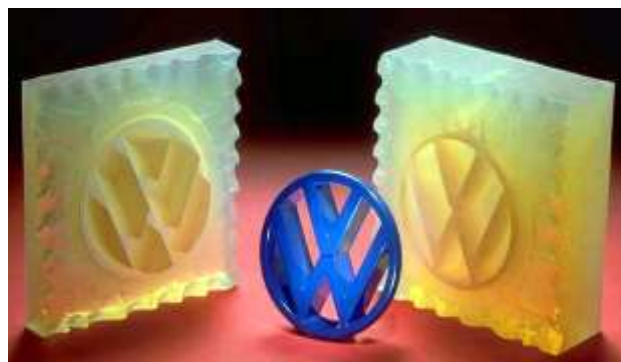
Fotopolymerizace

# Fotopolymerizace ve vaně



- podpory jsou ze stejného materiálu jako vlastní model (jsou velmi tenké, proto vypadají jako čiré)
- k povrchu dílu jsou připojeny velmi malou plochou, lze je snadno mechanicky odstranit bez zanechání stop
- díl je po vyjmutí z vany „lepkavý“, je třeba následného dotvrzení v UV světle

Zdroj: [turkcam.net](http://turkcam.net)



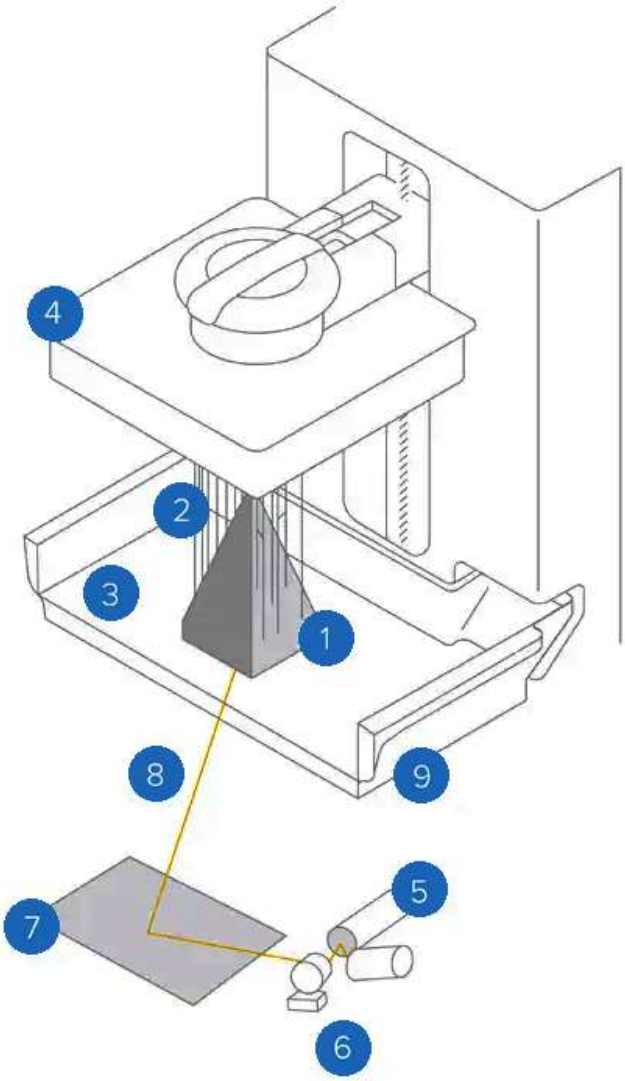
# Fotopolymerizace ve vaně

## Typické technologie:

- **SLA** (Stereolithography Aparatus)
  - 3D Systems, Stratasys, Formlabs
- **DLP** (Digital Light Processing) – Stratasys, Formlabs, 3D Systems

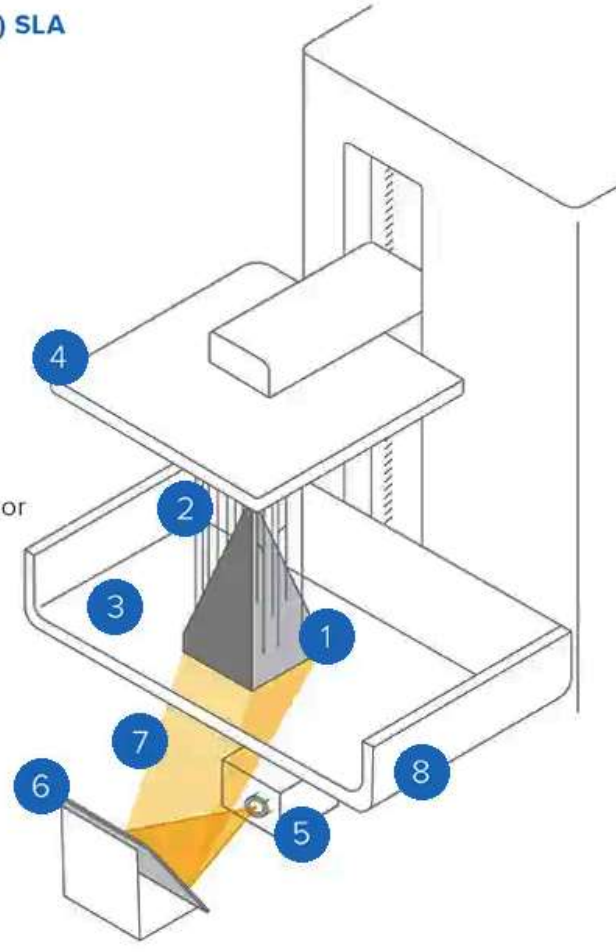
# Fotopolymerizace ve vaně

## Porovnání SLA a DLP



Upside-Down (Inverted) SLA

- 1 Printed Part
- 2 Supports
- 3 Resin
- 4 Build Platform
- 5 Laser
- 6 Galvanometers
- 7 X-Y Scanning Mirror
- 8 Laser Beam
- 9 Resin Tank



DLP

- 1 Printed Part
- 2 Supports
- 3 Resin
- 4 Build Platform
- 5 Projector
- 6 Mirror
- 7 Light
- 8 Resin Tank

Zdroj: [formlabs.com/eu/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp](https://formlabs.com/eu/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp)



# Fotopolymerizace ve vaně

## Porovnání SLA a DLP



Zdroj: [formlabs.com/eu/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp](https://formlabs.com/eu/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp)

# Výhody fotopolymerizace ve vaně

- **Hladký povrch**
- Dobrá rozměrová přesnost dílů
- Při použití reverzního principu – malá spotřeba fotopolymeru (stačí, když je hladina výš, než tloušťka vrstvy)
- Použití i pro hobby tisk
- **Možnost kompozitního tisku (např. fotopolymer + keramika, příp. fotopolymer + kovový prášek)**

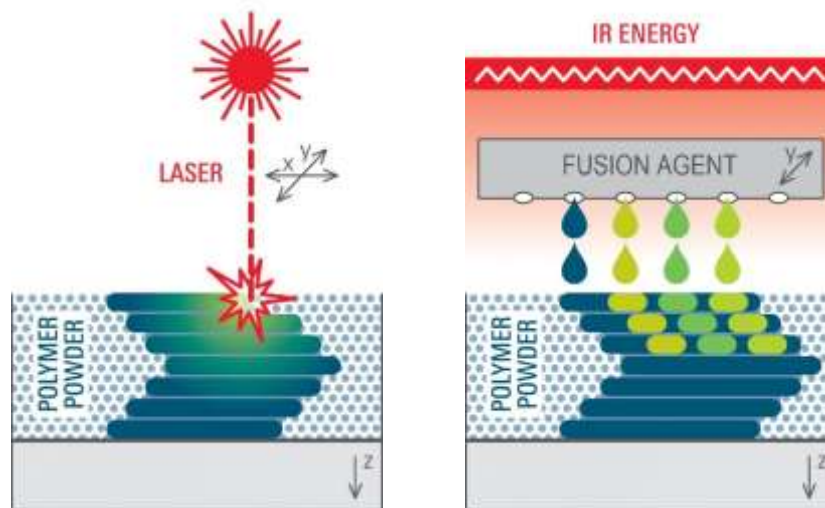
# Nevýhody fotopolymerizace ve vaně

- Poměrně velká cena fotopolymerů
- Obvykle malá tepelná a mechanická odolnost vzniklého modelu (*neplatí pro nové materiály – BASF, Henkel – cena!*)
- Omezená životnost drahé tekuté pryskyřice (tekutá pryskyřice je velmi hygroskopická)
- Tekutá pryskyřice je potenciální riziko pro životní prostředí

# Aditivní technologie

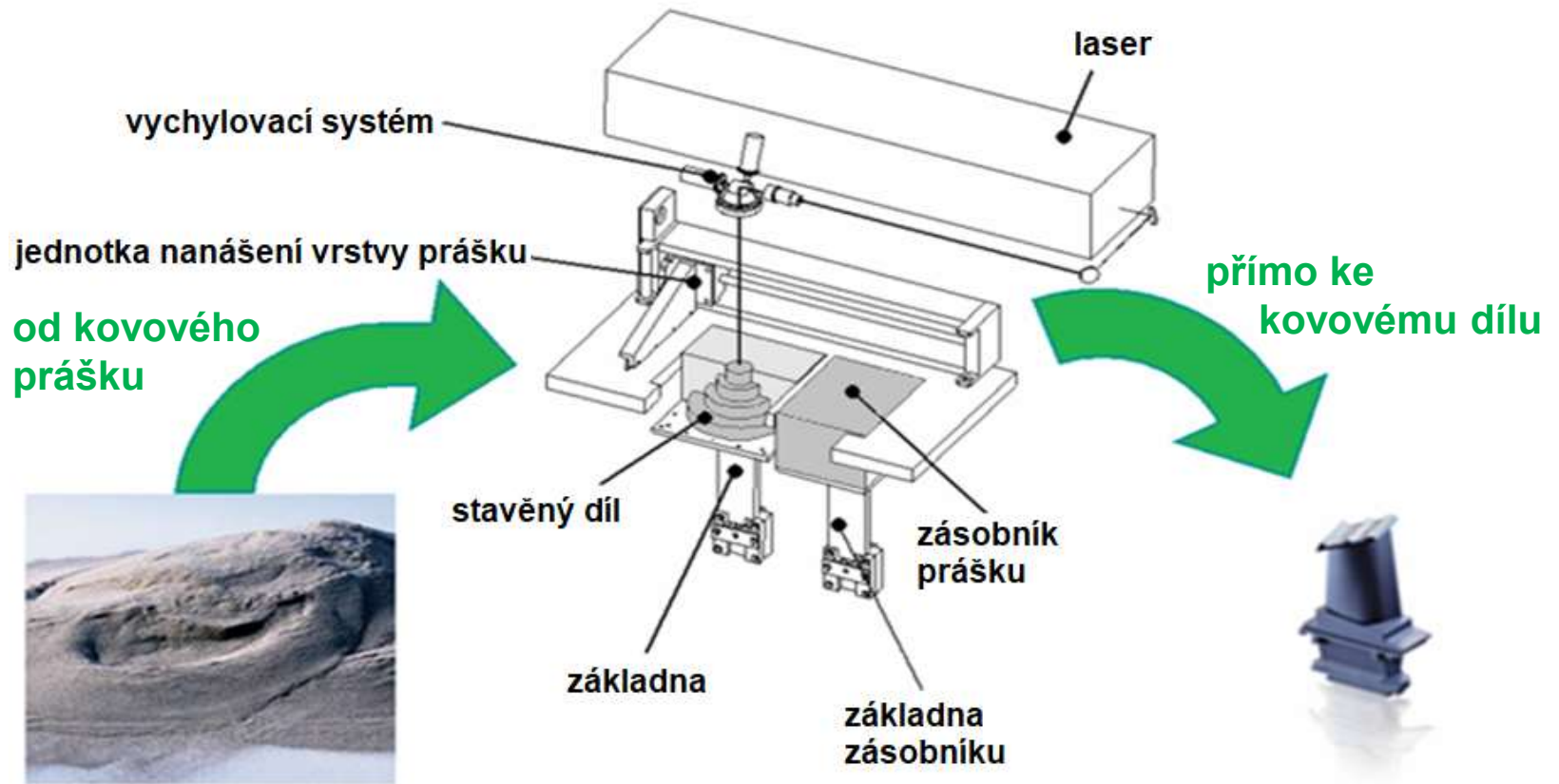
## – spojování prášku ve vrstvách teplem

- spojování prášku ve vrstvách teplem – proces aditivní výroby, při kterém tepelná energie selektivně spojuje oblasti ve vrstvě prášku
- powder bed fusion – an additive manufacturing process in which thermal energy selectively fuses regions of powder bed



Zdroj: [matca.cz/technologie/aditivni-technologie/](http://matca.cz/technologie/aditivni-technologie/)

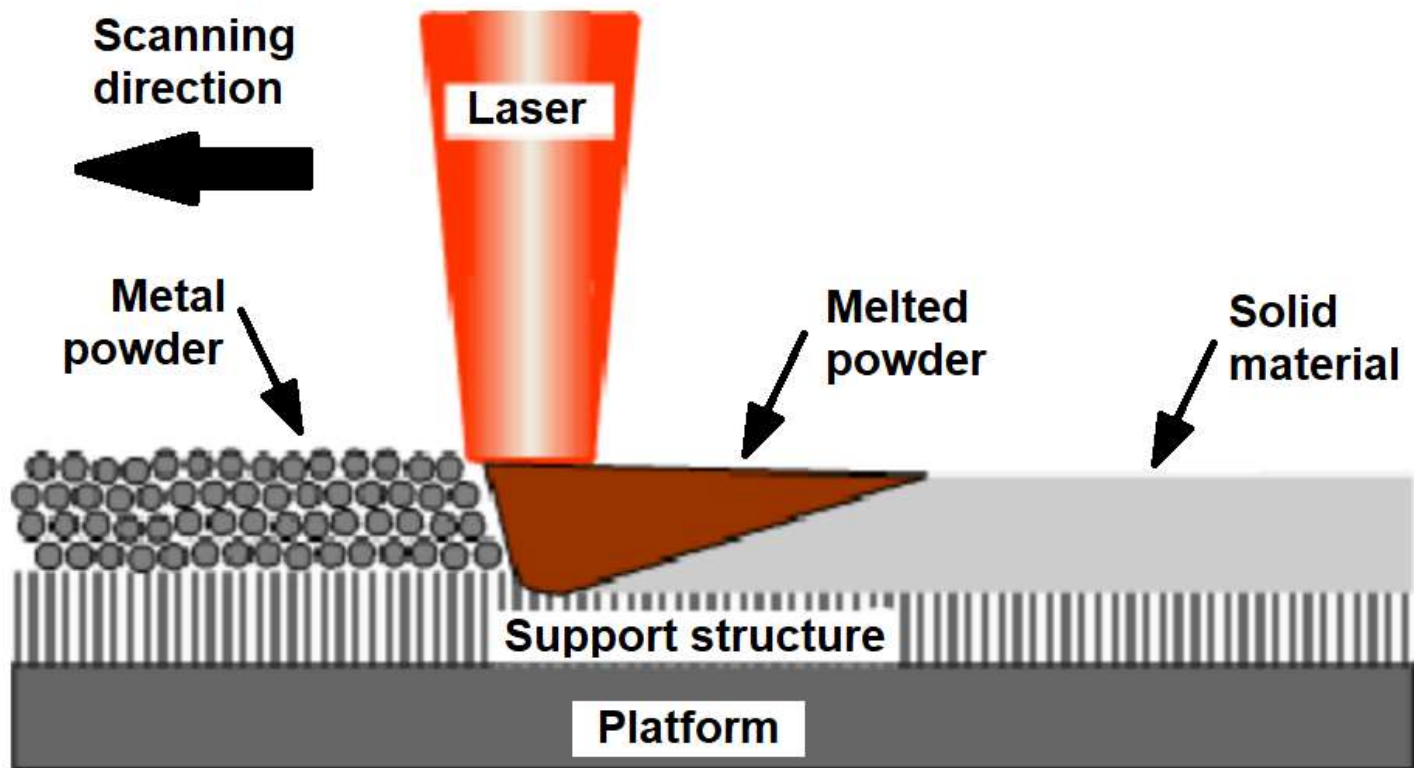
# Spojování prášku ve vrstvách teplem



Zdroj: *Technologie zpracování plastů. speciální příloha časopisu Technický týdeník. 09/2013. [www.technickytydenik.cz](http://www.technickytydenik.cz)*

- Řada technologií na různých principech:
  - sintrování plastových prášků
  - tepelná fúze plastových prášků
  - tavení kovových prášků pomocí výkonného laseru

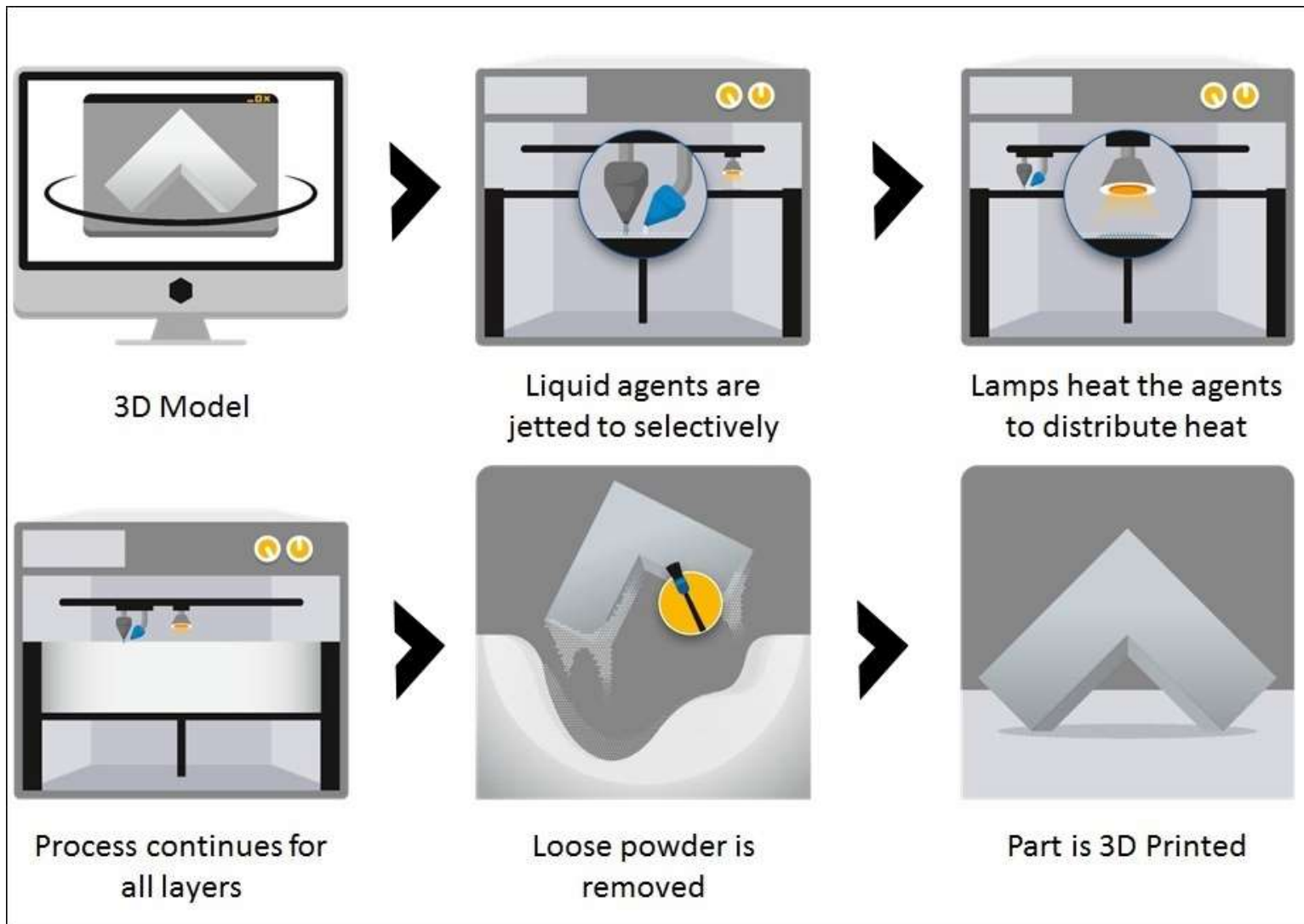
# Spojování prášku ve vrstvách teplem



Zdroj: DOI: 10.1117/12.907292

princip stavby jedné vrstvy – tavení materiálu (kovy)

# Spojování prášku ve vrstvách teplem – HP MultiJet Fusion



Zdroj: <https://www.hp.com/us-en/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>

**3D tisk z PA nebo TPU bez použití laseru**

# Spojování prášku ve vrstvách teplem

Aditivní technologie

Spojování prášku ve vrstvách  
teplem

# Spojování prášku ve vrstvách teplem

## Typické technologie:

- **SLS** – Selective Laser Sintering – 3D Systems, EOS GmbH
- **SLM** – Selective Laser Melting – SLM Solutions Group AG
- **DMLS** (Direkt Metall Laser Schmelzen = Direct Metal Laser Melting)  
– EOS GmbH, Concept Laser, 3D Systems
- **EBM** (Electron Beam Melting) – Arcam EBM
- **MJF** (MultiJet Fusion) – HP
- **SAF** (Selective Absorption Fusion) – Stratasys



# Výhody spojování prášku ve vrstvách teplem

- Funkční díly, výborné mechanické vlastnosti
- Dobrá kvalita povrchu výsledného dílu, nízká porozita
- Možné vytvářet odlehčené struktury (zejména pro kovové díly) ↔ topologická optimalizace dílů (nový směr konstrukce)

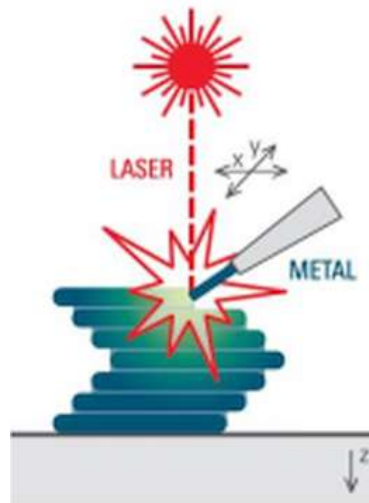
# Nevýhody spojování prášku ve vrstvách teplem

- U kovových tisků složitější post-processing – díl musí být přivařen k platformě, jinak by se vlivem vnitřního pnutí zdeformoval → odstranění podpor je náročné (jsou ze stejného materiálu, jako díl), nutné žíhání pro odstranění vnitřního pnutí
- Některé prášky mohou být rizikové ze zdravotního nebo bezpečnostního hlediska, složitější manipulace, nutná speciální výbava (ochranný oblek, respirátor, speciální vysavač, ...)
- Relativně drahý tisk

# Aditivní technologie

## – řízená energie natavování

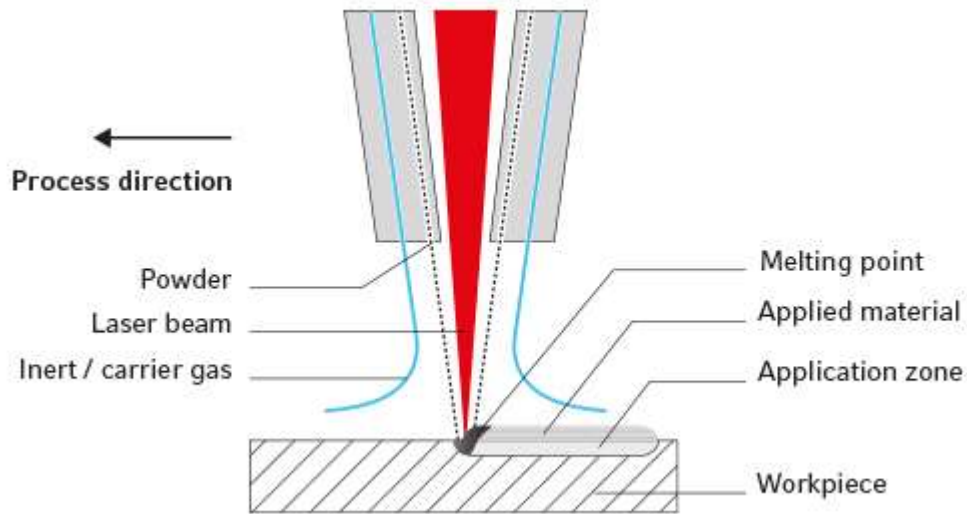
- řízená energie natavování – proces aditivní výroby, při němž je tepelná energie soustředěna na spojení materiálů tavením v okamžiku nanášení
- directed energy deposition – an additive manufacturing process in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited



# Řízená energie navařování

viz též hybridní technologie v závěru prezentace

Laserové navařování kovového prášku výkonným laserem, včetně adaptivní regulace výkonu laseru.



Zdroj: [www.dmgmori.com/webspecial/journal\\_2014\\_1/en/lasertec-65.htm](http://www.dmgmori.com/webspecial/journal_2014_1/en/lasertec-65.htm)

Též navařování technologií MIG / MAG – levnější, ale větší tloušťka vrstev, tzn. Obvykle ve spojení s obráběním → hybridní technologie

# Řízená energie natavování

## Typické technologie:

- **DED** – souhrnná zkratka (Directed Energy Deposition)
- **Laser Cladding** – DMG Mori
- **MIG/MAG** navařování – Kovosvit MAS (WeldPrint)
- **MPA** (Metal Powder Application) – Hermle

# Výhody technologie řízené energie natavování

- Funkční kovové díly, výborné mechanické vlastnosti
- Je třeba pouze takové množství materiálu, které se spotřebuje na vlastní stavbu dílu
- Možnost kombinovat více materiálů v rámci jednoho dílu

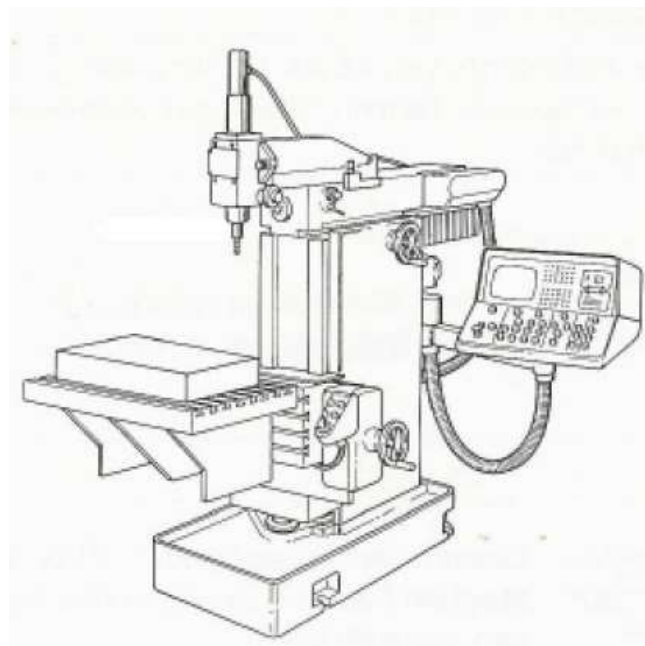
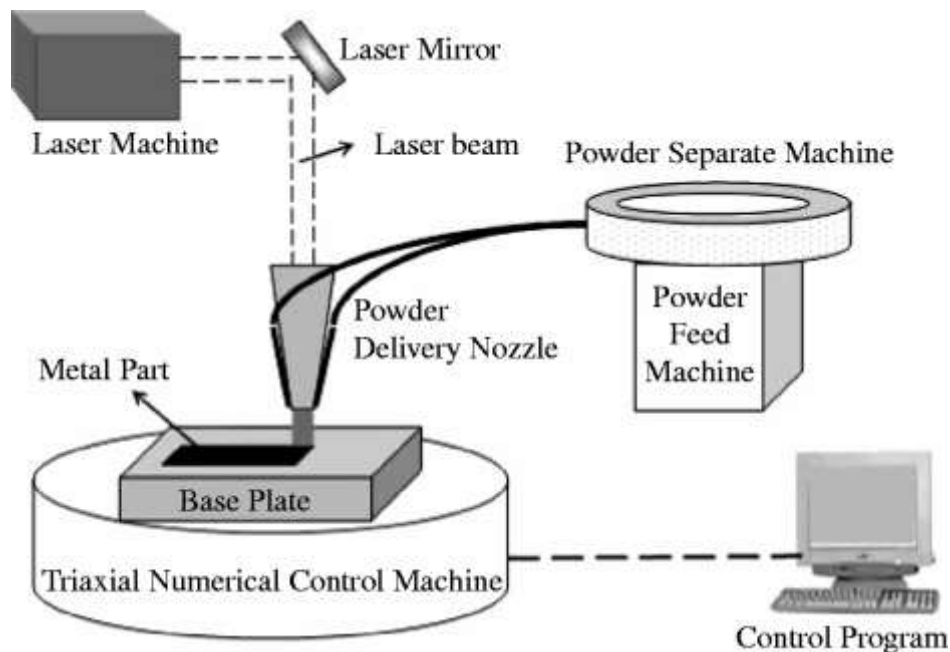
# Nevýhody technologie řízené energie natavování

- Vnitřní pnutí v dílech, obvykle nutné žíhání pro odstranění vnitřního pnutí
- Víceosé stroje, pokud se chceme vyhnout stavbě podpor
- Obvykle nutné dokončování, nejčastěji pomocí obrábění (→ vývoj hybridních technologií)
- Relativně málo rozšířená, drahá technologie

# Hybridní technologie

## Aditivní + subtraktivní technologie

dnes obvykle DED + víceosé frézování



# Hybridní technologie – DMG Mori

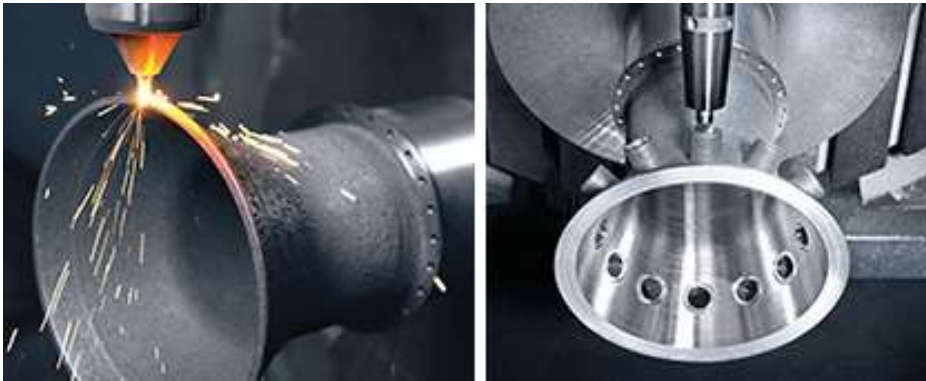
Laser deposition + pětiosé frézování



Zdroj: [dmgmori.com](http://dmgmori.com)

# Hybridní technologie

- stroje umožňující výrobu dílů kombinací obráběcích technologií s jinými technologiemi, často právě s aditivními technologiemi
- integrace svařovací hlavy (např. technologie laser cladding) do pětiosých frézovacích center nebo multifunkčních obráběcích center





# Hybridní technologie – DMG Mori



# Hybridní technologie

Kovosvit MAS ve spolupráci s ČVUT vyvinul již druhý, tzv. hybridní stroj pod obchodním názvem **WeldPrint**. Jde o technologii 3D tisku z kovu, která byla plně vyvinuta v České republice a patří do kategorie Hybrid Manufacturing (HM).

Umožňuje vytvářet kovové dílce navařováním pomocí elektrického oblouku a jejich obrábění v jednom pracovním prostoru s výrazně menšími náklady než u jiných technologií 3D tisku z kovu.

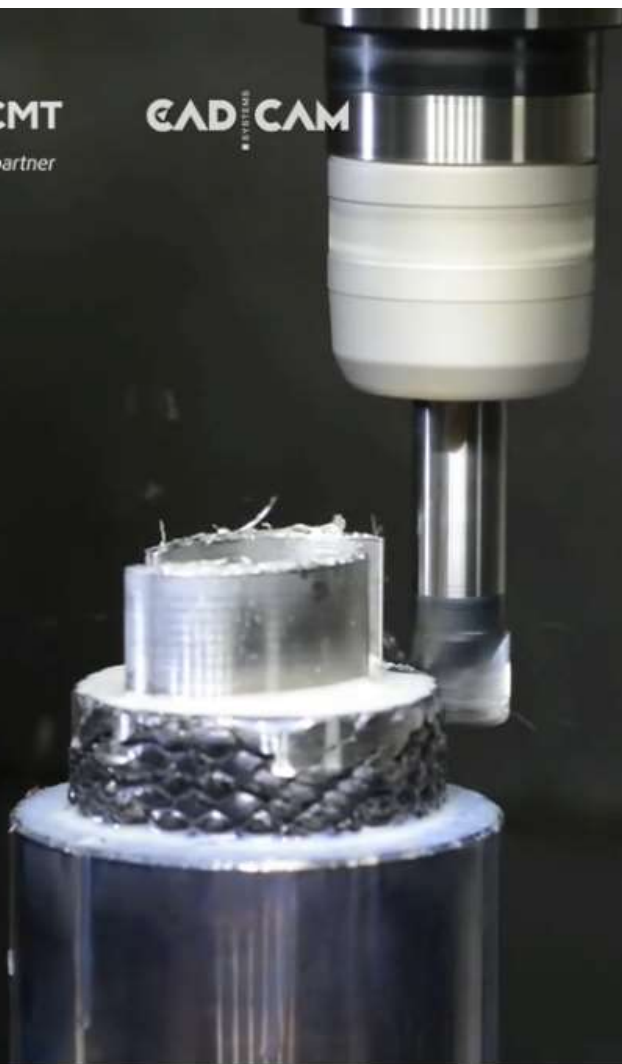
Stroj WeldPrint 2 vychází z koncepce nového frézovacího pětiosého stroje MCU 450 s portálovou nosnou strukturou.



# Hybridní technologie – WeldPrint



[www.kovosvit.cz](http://www.kovosvit.cz)



# Hybridní technologie – WeldPrint

## Vlastnosti technologie WAAM

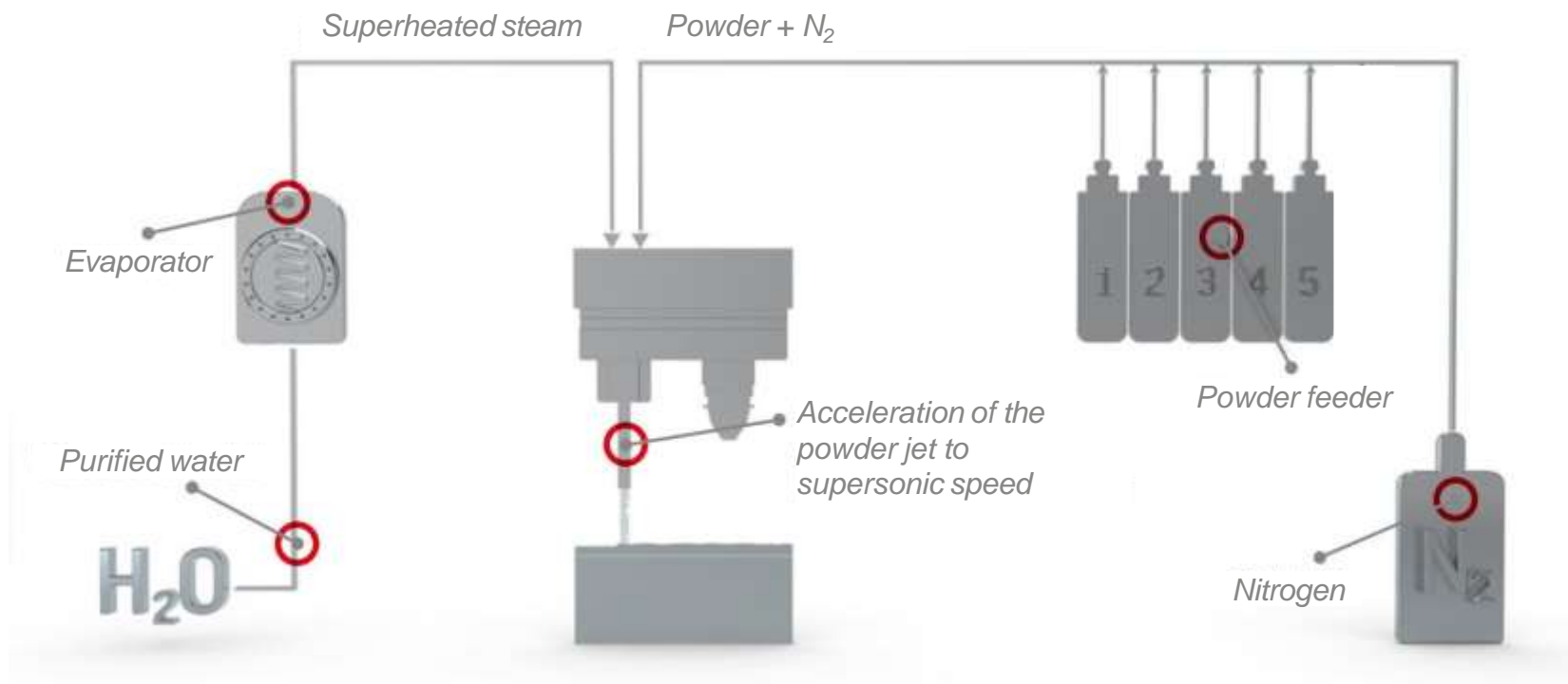
(Wire and arc additive manufacturing)

- Levnější až o 70% oproti laserovým hybridním technologiím
- Kombinace aditivní a subtraktivní výroby v jednom pracovním prostoru
- Rychlá tvorba dílů díky vysoké rychlosti procesu
- Komplexní díly cca  $\varnothing$ 500 mm a výšce 480 mm (max. hmotnost 400 kg)
- Možnost stavby odlehčených vnitřních struktur
- Možnost výroby nových dílů i opravy (repase) starších opotřebovaných
- Vývoj od r. 2013 (Kovosvit MAS + ČVUT)

# Hybridní technologie

## Metal-Powder-Application (MPA) by Hermle

### Schéma stroje



5/26/2023

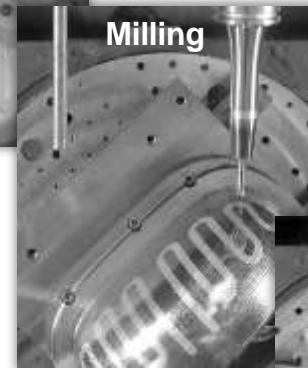
# Hybridní technologie

## Metal-Powder-Application (MPA) by Hermle

### Příklad aplikace – chladicí kanál

Ve vodě rozpustný výplňový materiál

- Zpracování pomocí MPA
- Dobrá obrobiteľnosť
- Umožňuje výrobu dutin / chladicích kanálů

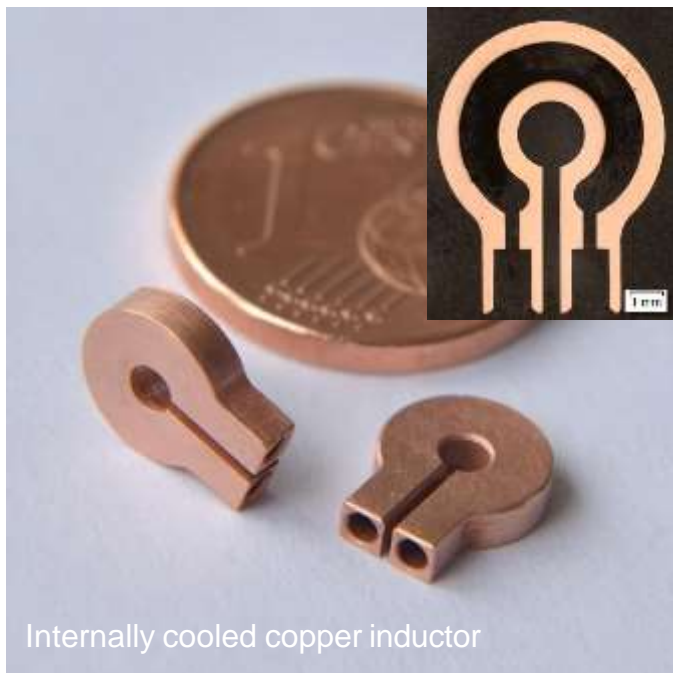


# Hybridní technologie

## Metal-Powder-Application (MPA) by Hermle

### Příklady použití - velikosti komponent

pár gramů



stovky kilogramů

Tool for press hardening



# Hybridní technologie

Metal-Powder-Application (MPA) by Hermle

## Vlastnosti technologie MPA

- Služba poskytovaná společností Hermle
- Kombinace aditivní a subtraktivní výroby
- Rychlá tvorba dílů díky vysoké rychlosti procesu
- Komplexní komponenty od 2x10 mm do cca 650x650 mm
- Konformní chladič kanály a dutiny
- Komponenty z více materiálů
- Vynikající tepelný management
- Od výroby jednotlivých dílů až po sériovou výrobu
- Optimální vlastnosti materiálu
- Neustálý vývoj díky odborným znalostem v oblasti výzkumu a vývoje



# Výhody hybridních technologií

- kovové díly
- kombinace obrábění a nanášení → „neomezené“ tvary a vysoká přesnost a kvalita povrchu
- možnost kombinovat více materiálů v rámci jednoho dílu
- **možnost opravy vrstvy / dílu, pokud je třeba**

# Nevýhody hybridních technologií

- problém s vnitřním pnutím v materiálu u technologií navařujících vrstvy pomocí zdroje tepla (laser, oblouk)
- zatím velmi drahé technologie
- vývoj softwarového vybavení mělo výrazné zpoždění proti vývoji technologie – pár let po uvedení prvního stroje na trh neexistoval SW kombinující podporu obrábění (CAM) i nanášení materiálu

**Děkuji za pozornost!**

Ing. Petr Keller, Ph.D.

TU v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů a automatizace

[petr.keller@tul.cz](mailto:petr.keller@tul.cz)