



FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE

RCMT váš partner pro výzkum a vývoj

# Produktivní a efektivní technologie NC obrábění s podporou dat a digitálních modelů

M. Sulitka, P. Kolář, P. Zeman, J. Švéda, J. Smolík

veletrh Výroba forem 2021

---

[www.rcmt.cvut.cz](http://www.rcmt.cvut.cz)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení | RCMT

Horská 3 | 128 00 Praha 2 | Česká republika | tel.: +420 221 990 914 | email: info@rcmt.cvut.cz



# Obsah

- **Příprava CNC obrábění a možné zdroje chyb**

---
- **Volba nástroje, strategií a řezných podmínek**

---
- **Nastavení řízení pohonů**

---
- **Vliv parametrů CNC řídicího systému**

---
- **Přídavné systémy**

---
- **Digitální dvojčata pro podporu efektivních výrobních technologií**

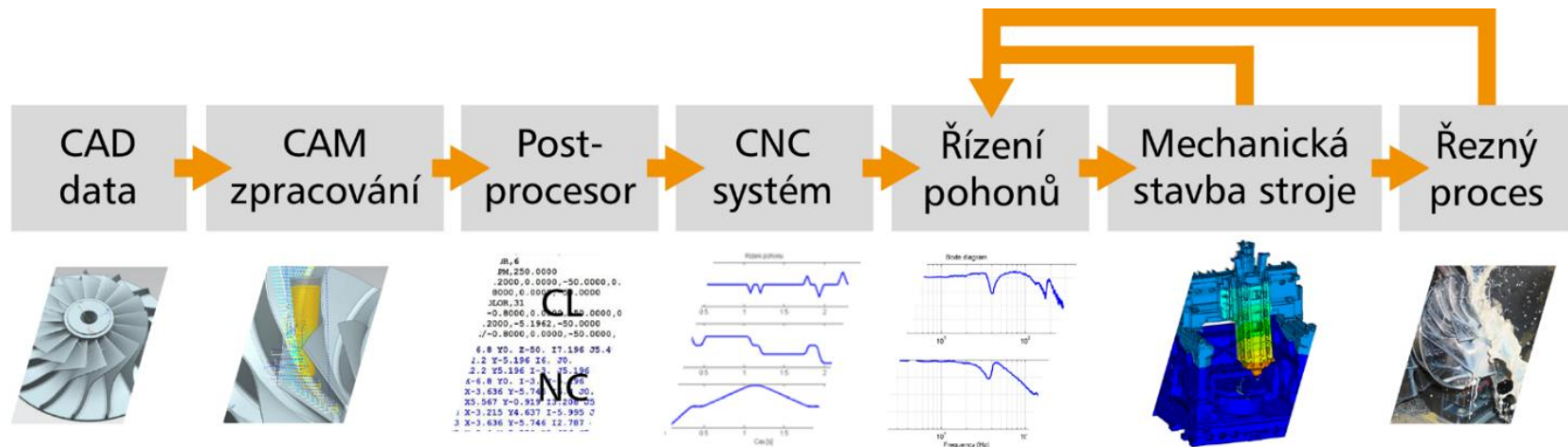
---
- **Výrobní náklady**

---
- **Monitoring procesů**

---
- **Laserové a aditivní technologie**

# Od CAD modelu k hotovému dílci...

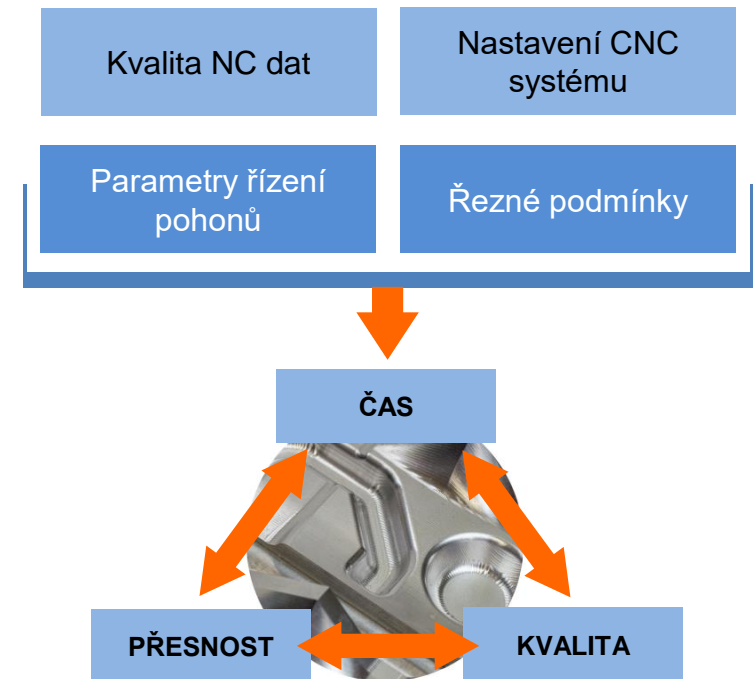
... je cesta dlouhá a o komplikace tu není nouze:



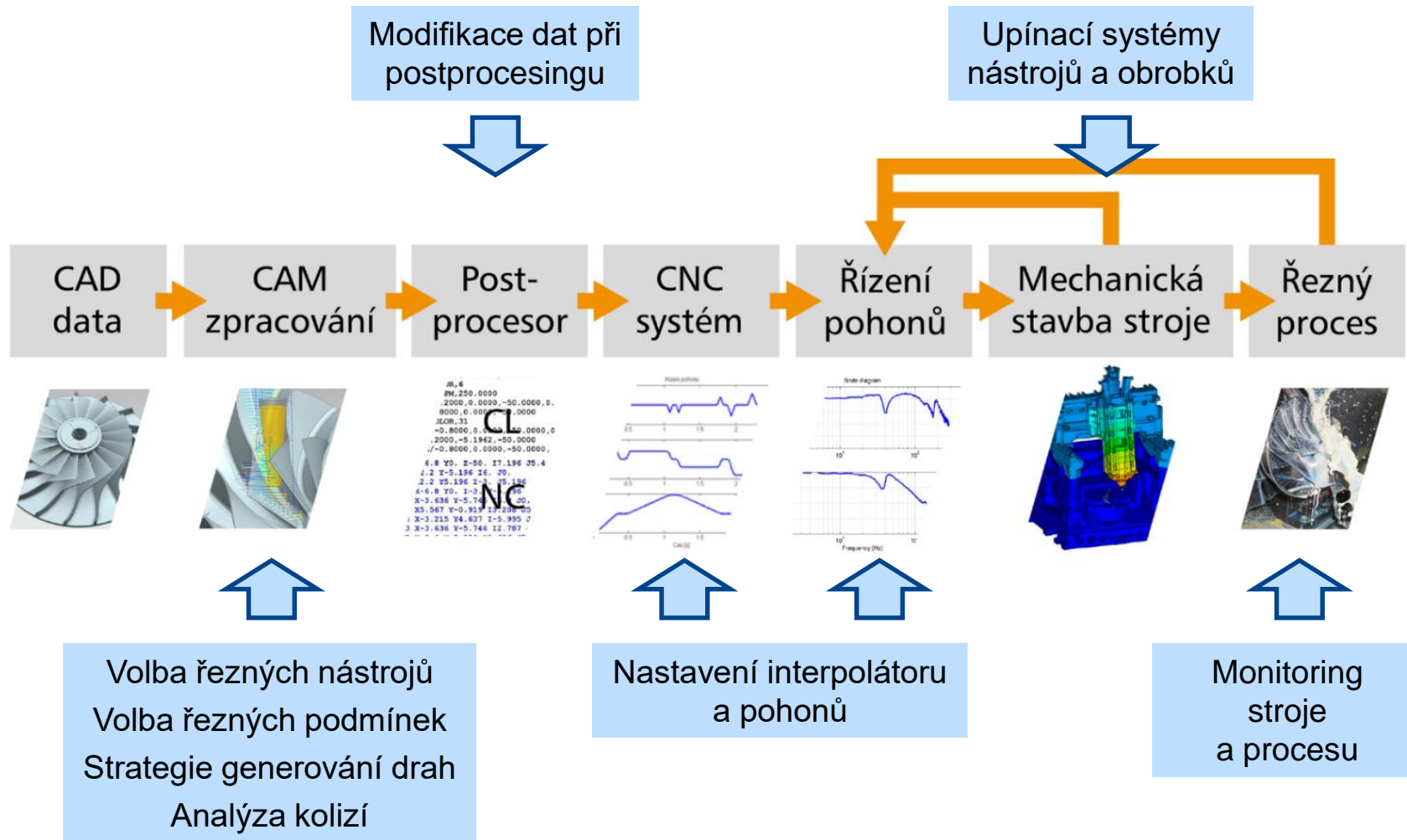
Na druhou stranu, v každé části řetězce je možno zasáhnout a ovlivnit přesnost, jakost a produktivitu výroby součásti.

## Příprava procesu CNC obrábění

- Běžné postupy přípravy obrábění **nevyužívají plně potenciálu možností nastavení CNC řízení stroje a dynamických vlastností**
- Odladění technologií obrábění probíhá jen prostřednictvím **zkušebních testů**
  - Při daném NC kódu testování nastavení rezných podmínek, případně nastavení parametrů pohonů a některých parametrů CNC interpolátoru
  - **Vliv dynamiky systému stroj – nástroj – obrobek není předem znám**



# Místa s potenciálem zvýšení efektivity obrábění



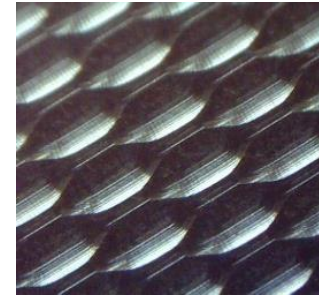
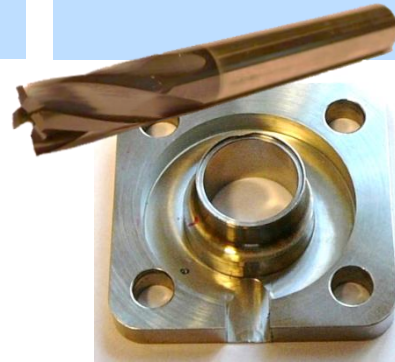
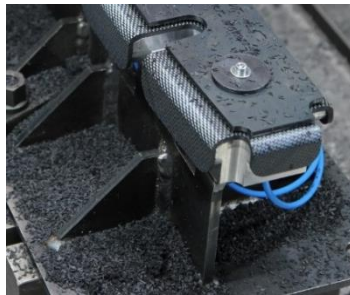
# Co lze v návrhu řezného procesu zvažovat

## Řezné podmínky:

- řeznou rychlost a posuv nástroje lze nastavit tak, aby došlo k optimální rychlosti opotřebení nástroje a tím k minimalizaci celkových nákladů obrábění

## Volba nástroje:

- speciální a sdružené nástroje jsou v sériové výrobě krokem k razantnímu zvýšení produktivity
- strukturované povrchy nástrojů zlepšují chlazení, upravují otěr na čele a modifikují utváření třísky



## Řezné prostředí:

- vysokotlaké chlazení, kryogenické chlazení, MQL...
- správné nastavení řezného prostředí má významný dopad na produktivitu a náklady

## Upnutí dílců:

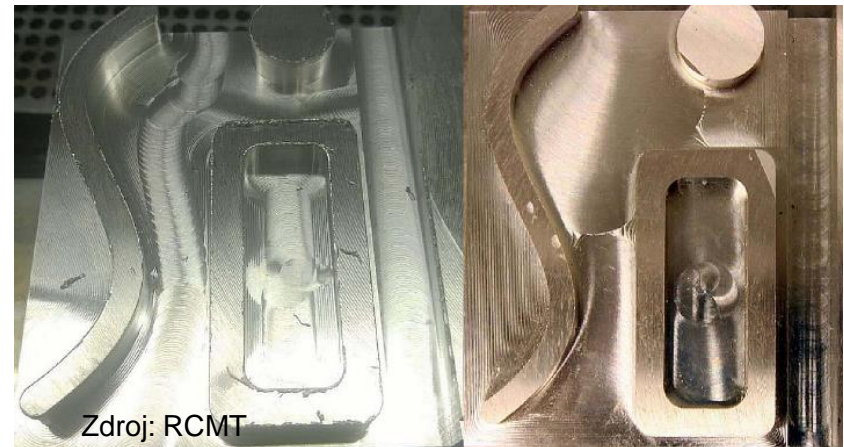
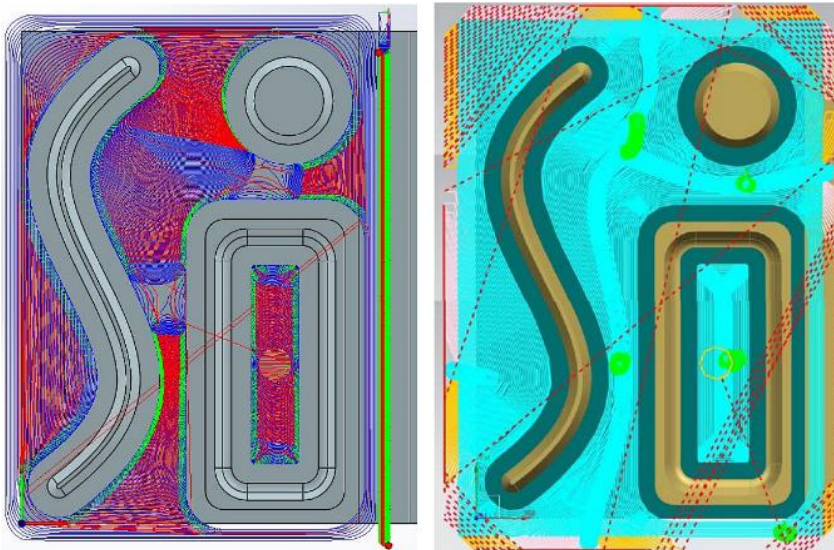
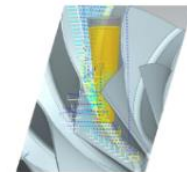
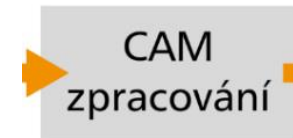
- správné upnutí dílce umožňuje snížit omezit vibrace při obrábění a počet přeupnutí dílce
- důsledkem je zlepšení produktivity obrábění a jakosti dílce

## Inprocesní monitoring:

- měření vibrací a řezných sil při obrábění umožňuje plně využít životnost nástroje a předejít poškození nástroje nebo obrobku při nestandardních situacích

## Volba strategie generování dráhy nástroje

- Cílem je navrhnout dráhy nástroje s konkrétním tvarem tak, aby tvar dílce bylo možno obrobit při minimálním množství ujetých drah.
- Vhodná strategie při obrábění těžko obrobitelných materiálů (nerezové oceli, slitiny Ti a Ni) vede k ochraně břitu před jeho tepelným nebo silovým přetížením.

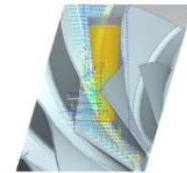


**Příklad: Ukázka generování dráhy různými CAM SW. Úprava dráhy pro konstantní silové zatížení břitu pomocí trochoidního frézování bylo dosaženo při frézování slitiny Nimonic 80A k nárůstu produktivity o 6 % proti dříve optimalizované technologii.**

## Volba řezných podmínek a řezného prostředí

- Pro každou aplikaci je nutné zvolit ze široké nabídky správnou kombinaci **řezného materiálu, ochranného povlaku, geometrie břitu, řezných podmínek a řezného prostředí** (obrábění nasucho, MQL, kryogenní, záplavové nebo vysokotlaké chlazení), způsob upnutí obrobku.
- Především pro oblast sériové výroby se vyplatí provést optimalizaci řezných podmínek, která zajistí nastavením vhodných řezných parametrů konkrétní intenzitu opotřebení nástroje a tedy i trvanlivost jeho břitu tak, aby došlo k **minimalizaci celkových nákladů obrábění** vzhledem k ceně nástrojů a hodinové sazbě stroje.

CAM  
zpracování



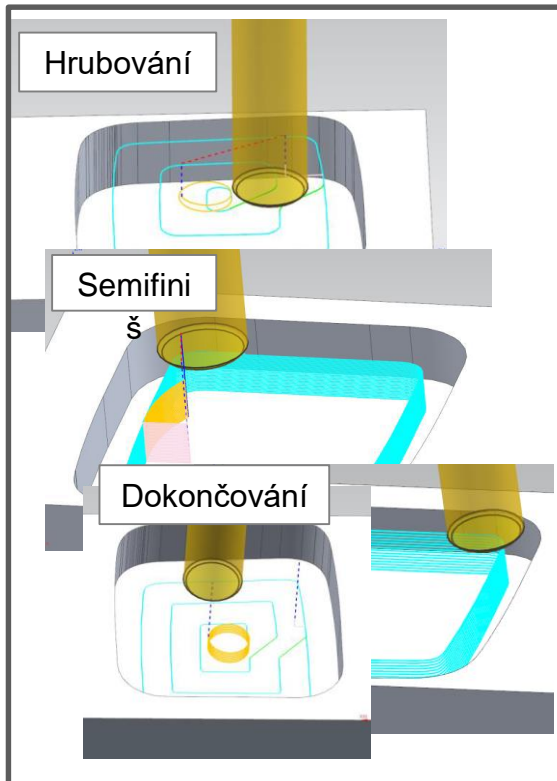
Příklad: Vhodnou volbou nástroje a úpravou řezných podmínek došlo například v partnerské firmě v sériové výrobě menších dílců z Al slitiny frézováním k **úspoře 25 % výrobních nákladů** na jeden dílec.



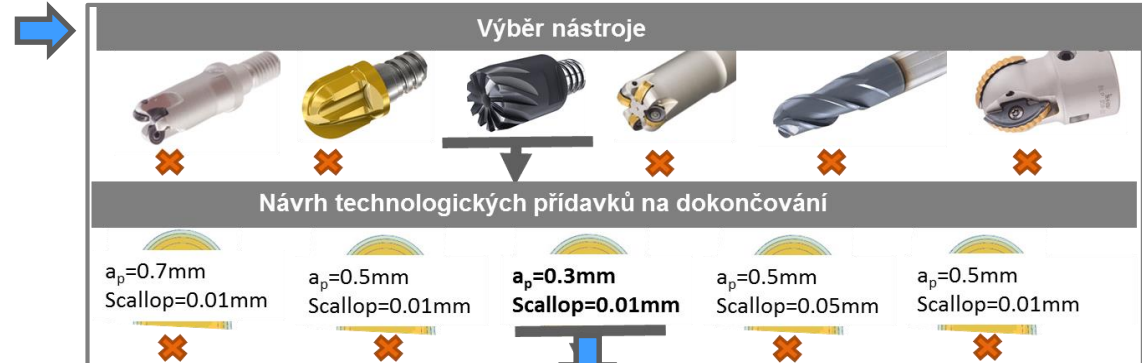
# Optimalizace volby nástroje, strategií a podmínek

- Návrh vhodných strategií pro efektivní obrábění a využití potenciálu nástroje
- Volba nástroje (materiál, typ, geometrie břitu, ...) ovlivňuje zásadně výsledek procesu
- Optimalizace řezných podmínek (hledisko: max. produktivity, min. výrobních nákladů)

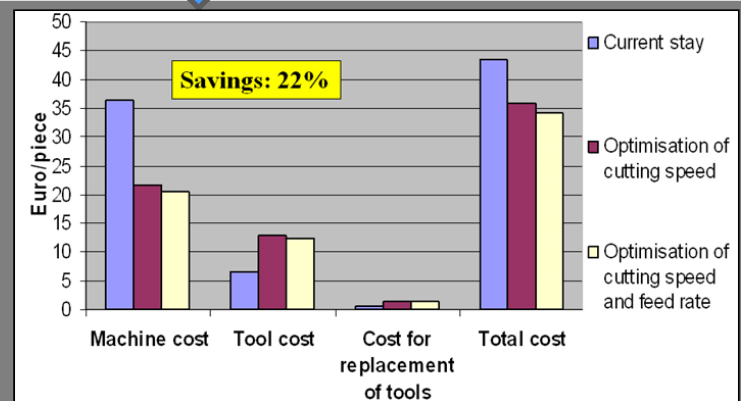
## Návrh strategie obrábění



## Volba nástroje a pracovních podmínek



## Optimalizace řezných podmínek ( $f_z$ , $v_c$ )



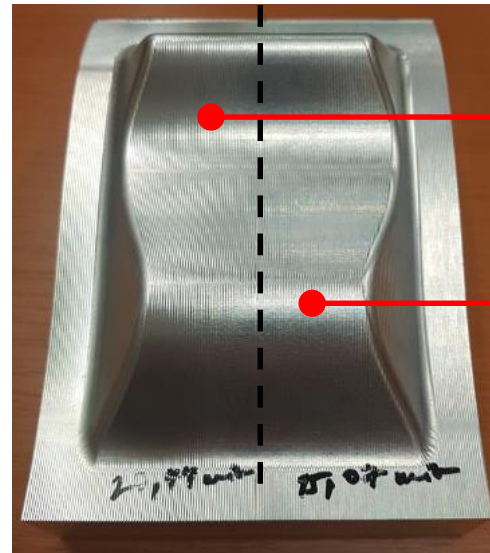
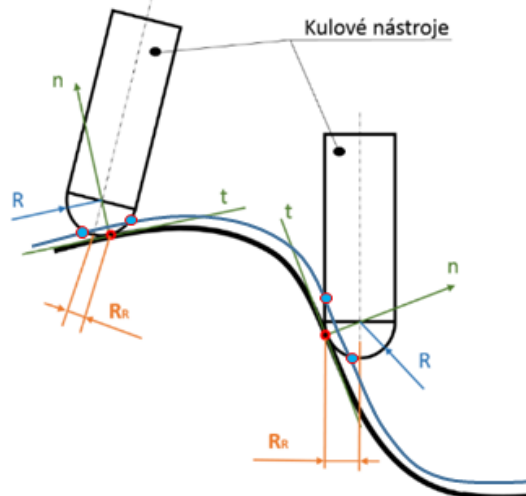
# Nové přístupy pro dodržení řezných podmínek

- Postprocesor řeší překlad popisu technologie (dráhy, nástroje, řezné podmínky) z nativního formátu CAM SW do konkrétní podoby NC kódu.
- Postprocesor respektuje kinematiku konkrétního stroje, tak jeho technologické cykly a další konkrétní specifikace stroje.
- Postprocesorem lze korigovat některé funkce, např. řídit posuvovou rychlost nebo otáčky vřetena a tak zlepšit i jakost povrchu.



```

M46
RN,250.0000
Z000,0.0000,-50.0000,0.
R000,0.0000,0.0000
JG00,31
-0.8000,0.0000,0.0000,0.
,2000,-5.1962,-50.0000
,/-0.8000,0.0000,-50.0000,
6.8 Y0. Z=50. I7.196 25.4
2.2 Y=0.196 26. 25.
2.2 Y2.196 26. 25.196
6-6.8 Y0. I=3
X=3.636 Y=0.746 I=10.
25.567 I=0.915 I=10.915
I X=3.215 Y4.637 I=5.955
3 X=3.636 Y=0.746 I2.787
    
```



čas obrábění:  
20.46 min

čas obrábění:  
15.04 min

Zdroj: RCMT

Příklad: Úprava otáček nástroje a posuvové rychlosti při tříosém obrábění kulovým nástrojem vedla ke zvýšení produktivity téměř o 25 %.

# Nové přístupy pro dodržení řezných podmínek

- Dodržení řezné rychlosti a posuvu při frézování kulovými a toroidními nástroji
- Patent (CZ 307463)
- **Současný nárůst produktivity a kvality** při výrobě dutin a forem.

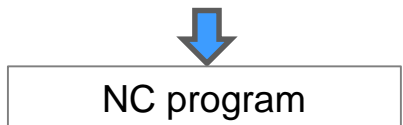
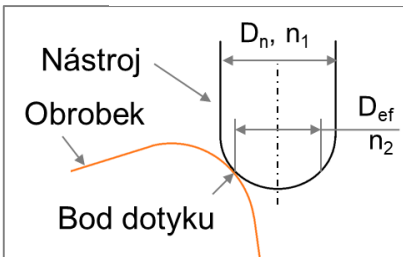
$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{D \cdot \pi} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$v_f = f_z \cdot z_{\text{eff}} \cdot n \text{ [mm/min]}$$

Příklad použití: Dutina z duplexní korozivzdorné oceli



|   | Standardní přístup | Optimalizace |
|---|--------------------|--------------|
| Doba obrobení jednoho dílce [min]       | 53                 | 28           |
| Počet dílců na trvanlivost nástroje [-] | 8                  | 23           |
| Trvanlivost břitu [min]                 | 424                | 644          |
| Nárůst trvanlivosti [%]                 | -                  | 52           |



```

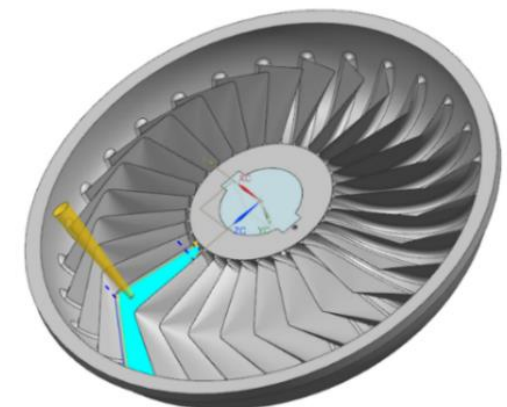
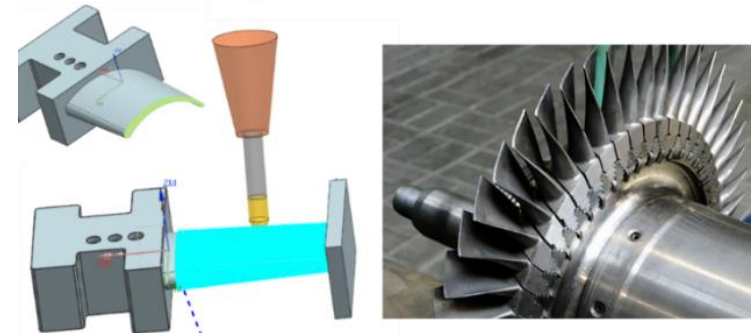
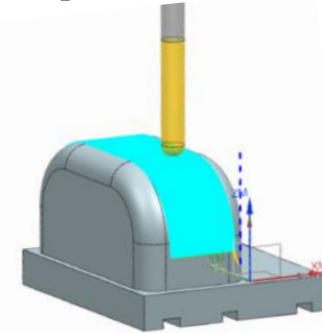
N0220 X-5.081 Y-10.869 Z31.812 A326.937 B.118 P=6370
N0230 X-1.13 Y-1.236 P=6382
N0240 X-5.067 Y-29.781 Z0.429 A326.749 B.473 P=6429
N0250 X-4.143 Y-31.146 Z42.429 A326.625 B.711 P=6507
N0260 X-3.553 Y-31.194 Z43.95 P=6618
N0270 X-3.899 Y-33.517 Z44.404 A326.377 B1.189 P=6763
N0280 X-3.187 Y-34.707 Z46.95 A326.254 B1.428 P=6943
    
```

**Technologie:**  
 Dokončovací frézování – 3 osé  
 Kulová fréza - pr. 12 mm  
 (povlakovaný SK)  
 Frézovací centrum (15 kRPM; 18 kW)

- + Zvýšení produktivity
- + Snížení drsnosti povrchu
- + Snížení výrobních nákladů

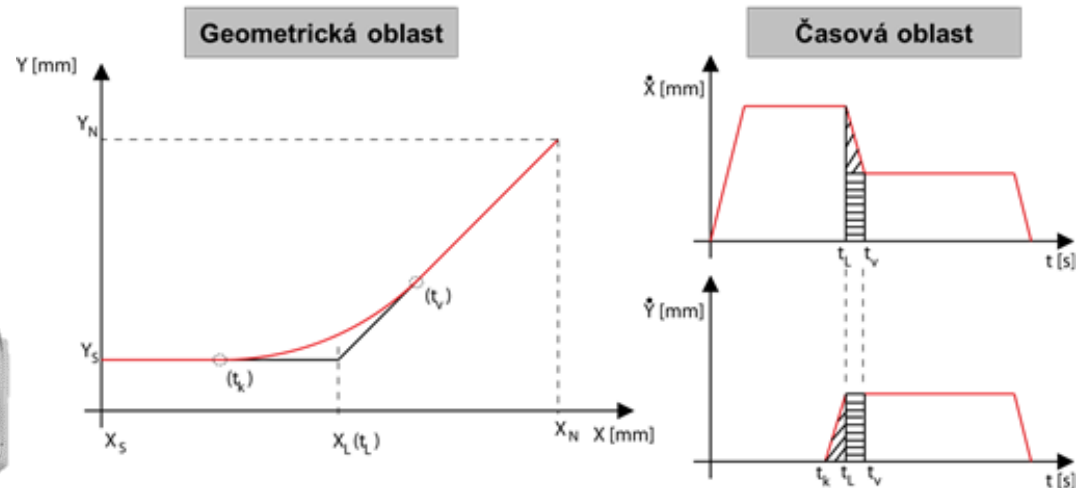
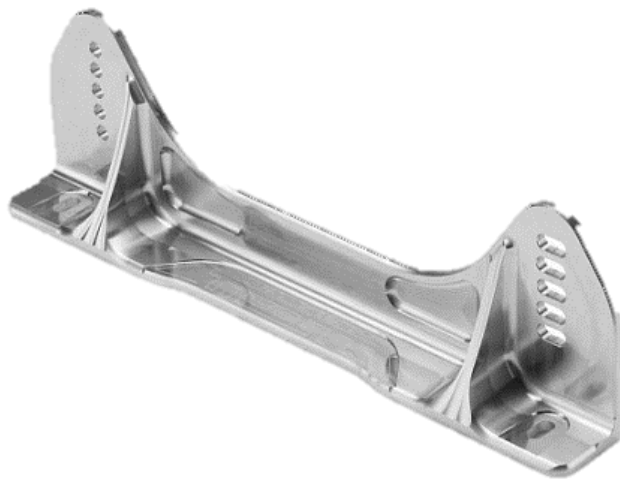
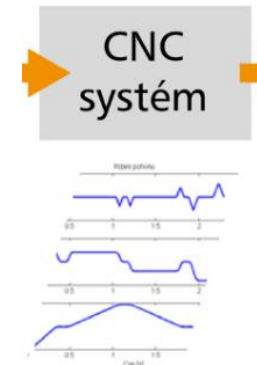
## Další příklady uplatnění při frézovacích operacích

- **Dílec typu forma:**
  - **Tříosé řádkování kulovým nástrojem**
  - Původní čas obrábění: 14 minut
  - Čas obrábění po optimalizaci: 9 min 42 s
  - **Časová úspora cca 31 %**
- **Dílec typu lopatka:**
  - **Čtyřosé řádkování toroidním nástrojem**
  - Původní čas dokončování plochy: 15 m 18 s,
  - Čas obrábění po optimalizaci: 10 m 6 s
  - **Časová úspora cca 33 %**
- **Dílec typu lopatkové kolo:**
  - **Pětiosé řádkování kuželovým nástrojem**
  - Původní čas dokončování plochy lopatky: 6 m 30 s
  - Čas obrábění po optimalizaci: 3 m a 42 s
  - **Časová úspora cca 43 %**



# Řídicí systém řídí pohybové osy stroje

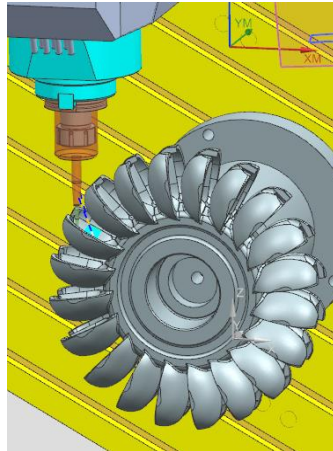
- Hlavním úkolem ŘS, resp. interpolátoru, je převod dat z NC kódu z geometrické do časové oblasti. Tím získáme požadované vstupy pro zpětnovazební řízení pohonů jednotlivých pohybových os stroje.
- Tento převod je matematická operace, jejíž průběh lze ovlivnit řadou nastavení (např. použití funkce *look ahead*, *compresor*, různé filtry aj.)



Příklad: Nastavením interpolátoru a pohonů stroje se podařilo ve firmě AXA CNC STROJE zkrátit výrobní čas konkrétního dílce z 35 minut na 28 minut. Zkrácení cyklového času firmě umožnilo při paralelní výrobě na dvou strojích ušetřit kapacitně jednu směnu.

# Špatný odhad času při zanedbání vlivu interpolátoru

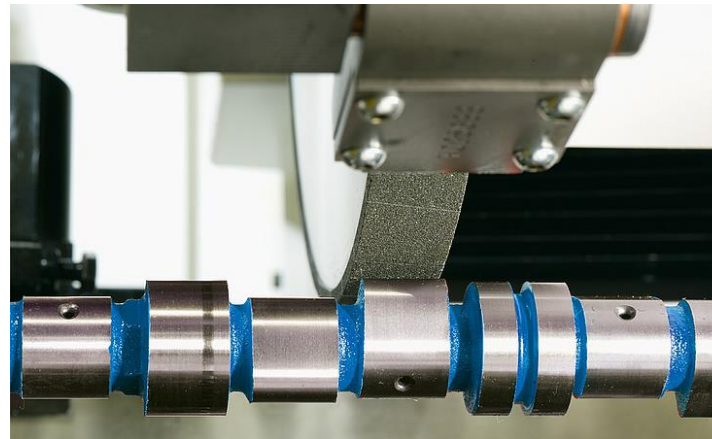
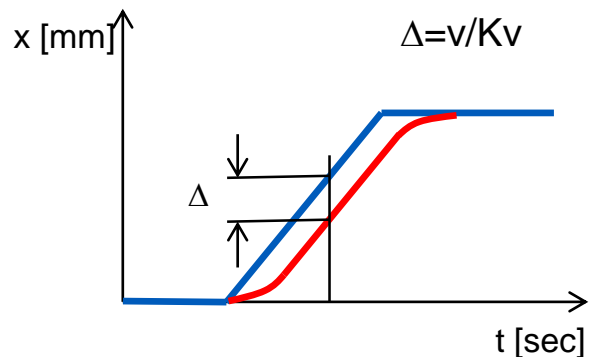
- Interpolátor zajišťuje reálný pohyb stroje, tj. zrychlení a zpomalení pohybů. Toto zanedbávají predikce v CAM, proto je odlišný čas predikce obrábění v CAM a skutečný čas obrábění.
- Aplikace: frézování Peltonovy turbíny na stroji Kovosvit MAS MCU 1100



|                                 |   | Čas obrábění | Časová úspora |
|---------------------------------|---|--------------|---------------|
| Předpokládaný čas z CAM systému | NC programy bez optimalizace  | 6.30 hod     |               |
|                                 | NC programy <b>bez optimalizace</b> , odbavené ve stanici iTNC                        | 9.16 hod     |               |
| Skutečný čas z řídicího systému | NC programy <b>s optimalizací technologických podmínek</b> , odbavené ve stanici iTNC | 7.35 hod     | <b>-18,2%</b> |

## Zpětnovazební řízení pohonů

- Pro řízení pohonů se používá **kaskádní regulace**. U té lze nastavit řadu parametrů jednotlivých regulačních smyček (proudová, rychlostní, polohová) a též pracovat s dalšími filtry vstupních dat
- Maximální možnosti nastavení jsou mj. dané dynamickými vlastnostmi struktury stroje. Zde **konstrukce stroje ovlivňuje produktivitu a přesnost výroby**



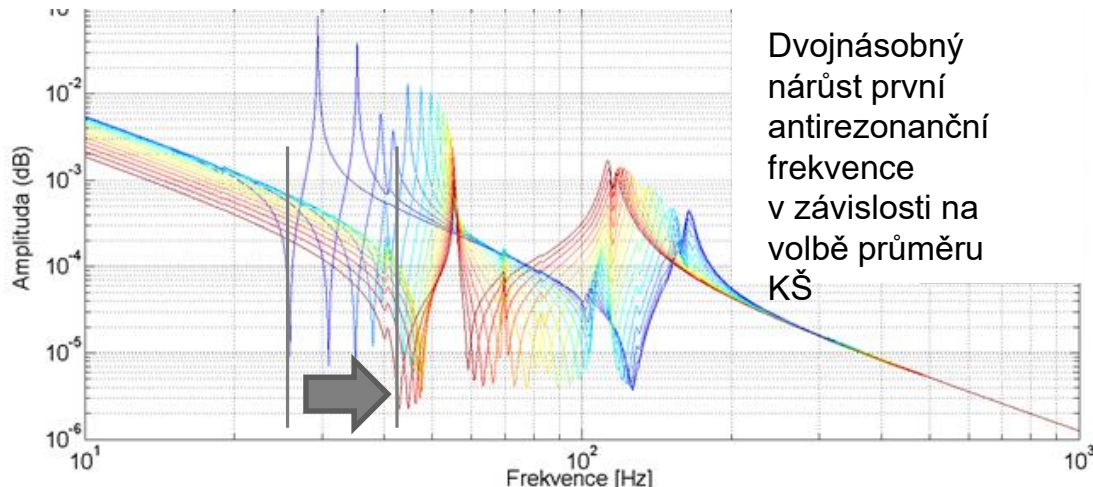
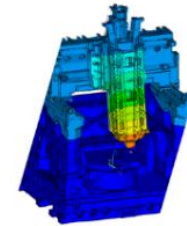
Zdroj:  
 Erwin Junker

Příklad: Vhodně připravený NC kód a naladění parametrů rotační osy C a přísmuvové osy X umožnilo při definovaném cyklovém čase obrobít tvarovou vačku s přesností  $\pm 0,015$  mm. Při požadavku přesnosti tvaru  $\pm 0,03$  mm je tedy prostor pro další zvýšení produktivity výroby.

# Mechanická stavba struktury a pohonů stroje

- Z pohledu přesnosti a produktivity obrábění nejde jen o statickou tuhost, ale i hodnoty vlastních frekvencí a tlumení celé struktury.
- Při návrhu stroje sledujeme např. první antirezonanční frekvenci  $\omega_M^*$  pohonu pohybové osy. Bezpečné nastavení  $K_v$  je přibližně  $K_{vBEZP} [m/min/mm] = 0,044 \omega_M^* [Hz]$

Mechanická stavba stroje

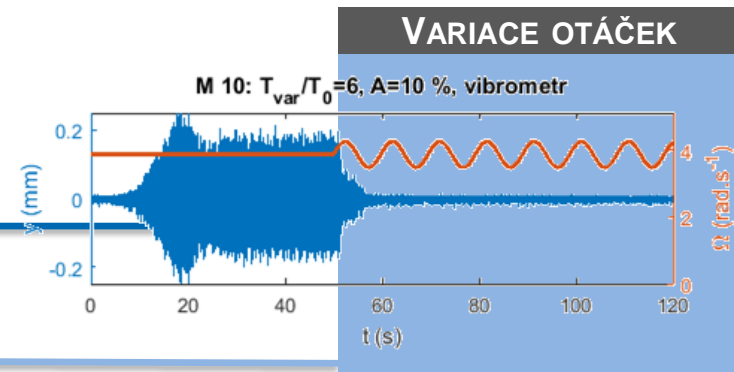
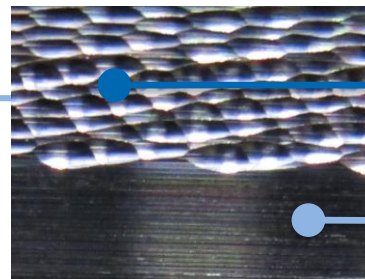
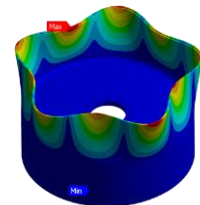


Příklad: Příkladem je horizontální vyvrtávací stroj WHT110, u kterého byly mechanické komponenty pohonů voleny tak, aby umožnily vysoké hodnoty naladění  $K_v$  na pohonech. To je klíčové zejména u víceosého interpolovaného obrábění, např. forem a zápustek.



# Interakce řezného procesu se strojem a obrobkem

- Řezný proces je zdrojem řady vibrací, které ovlivňují finální jakost a přesnost obrobku. Interakce procesu je daná dynamickou poddajností stroje, nástroje nebo obrobku.
- V této oblasti přichází ke slovu simulace chování stroje a procesu. Během vlastního obrábění potom vhodná inprocesní diagnostika pro zajištění potřebných zásahů do procesu.



Příklad: Variace otáček vřetena je možností, jak potlačit samobuzené kmitání při soustružení. Správné nastavení kolísání otáček je významné např. při obrábění tenkostěnných dílců.

# Upínání velkých obrobků jako potenciál produktivity

- Obráběcí stroj a integrované inteligentní upínky obrobku



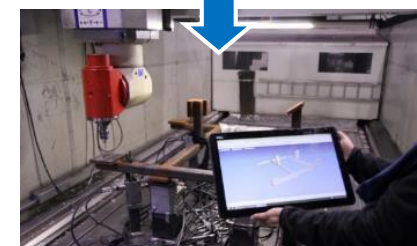
Současná situace  
(manuální příprava dílce)



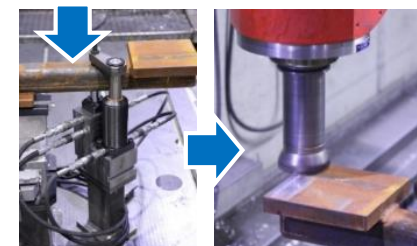
Klíčové technologie  
(přídavný HW & SW)



Kontrola pozice dílce



Vyrovnávání obrobku



Upnutí

Obrábění

Obsluha systému  
(poloautomatická)

## Měření obrobku ve stroji

- Zjištění skutečného tvaru dílce, využití ke korekci následného obrábění
- Proč je výhodné měřit obrobek ve stroji
  - Není nutné manipulovat
  - Obrobek zůstává ustavený
  - Nevzniká deformace jiným upnutím
- Integrace obráběcího stroje a CMM
  - Implementace metrologického sw do řídicího systému stroje (TouchDMIS)
  - Dotyková sonda
  - Zvýšení přesnosti během měření
- Zvýšení přesnosti
  - Korekce souřadnice dotyku
  - Integrované přídavné odměřování TCP
  - Nebo externí odměřování (např. laser tracker)

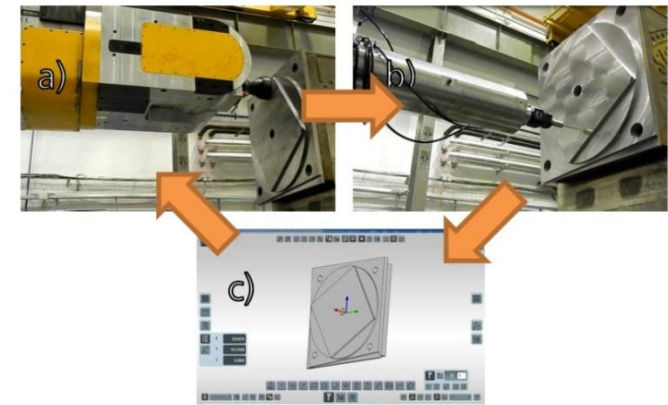


Schéma měření obrobku na stroji s integrovaným metrologickým softwarem



Zdroj: TOS Varnsdorf

Přídavné odměřování laser trackerem

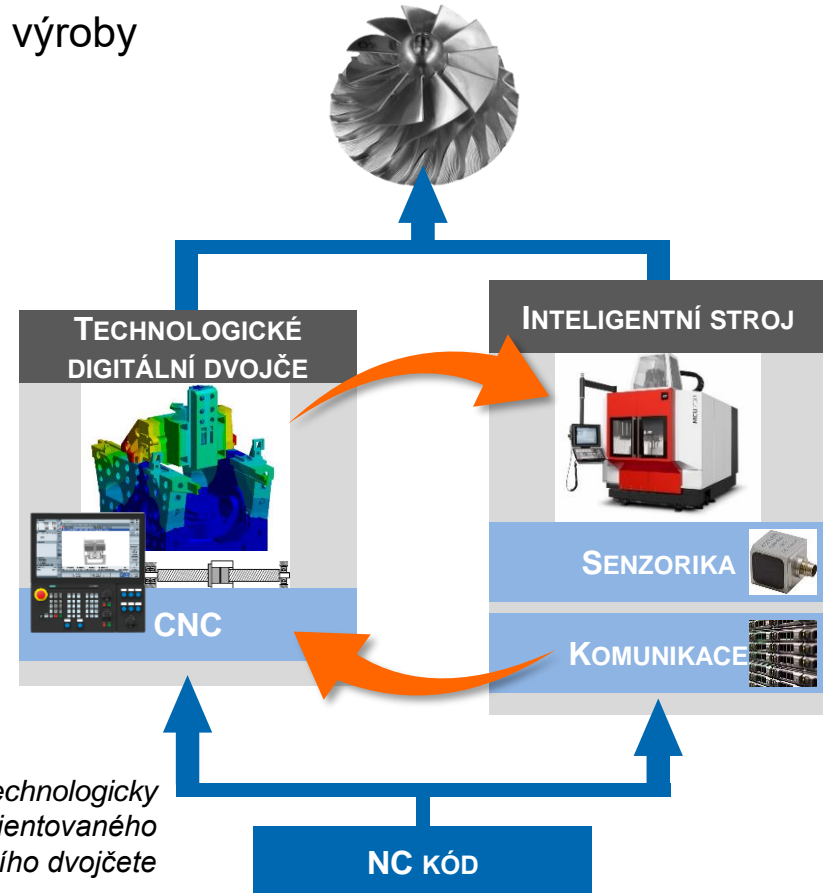
# Digitální modely pro podporu realizace výroby

- Různé zaměření digitálních modelů podle jejich uplatnění
- Modely **virtuálního zprovoznění** pro testování kinematické funkčnosti strojů a PLC řízení
- **Digitální dvojčata** pro podporu bezchybové výroby



Ověření a odladění funkčnosti PLC na kinematickém modelu stroje

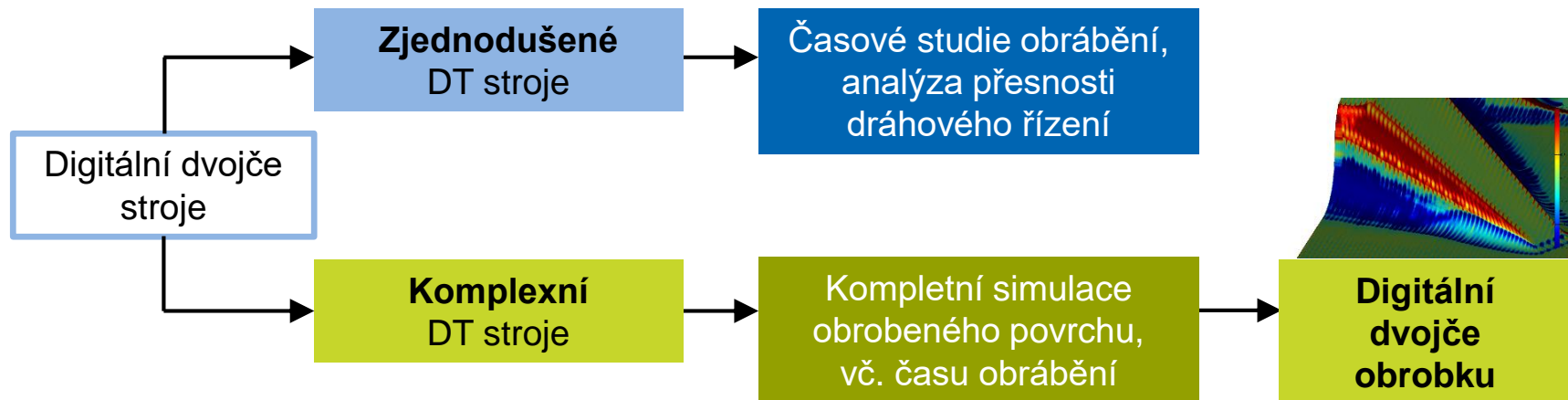
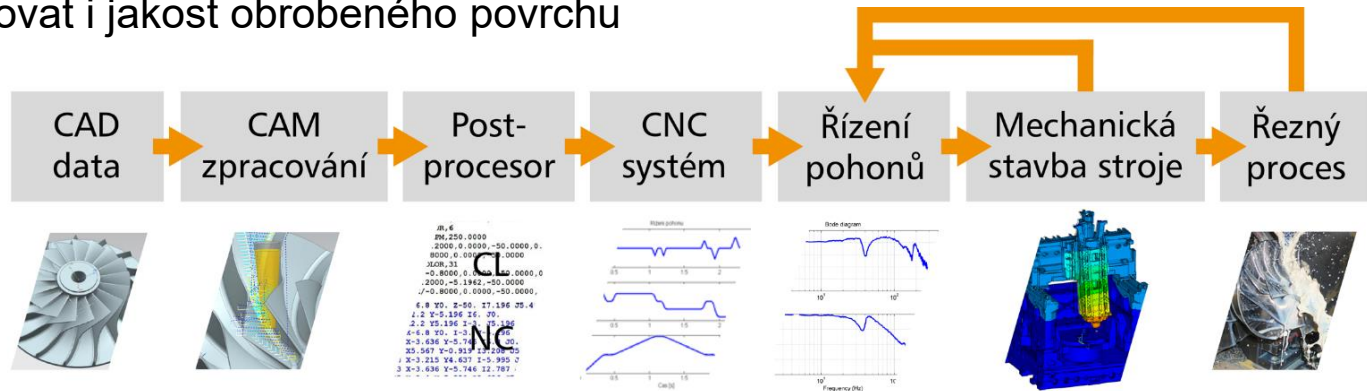
*Koncepce modelu virtuálního zprovoznění*



*Koncepce technologicky orientovaného digitálního dvojčete*

# Technologicky orientované digitální dvojče stroje

- Digitální dvojče stroje lze sestavit:
  - ve zjednodušené podobě jako nástroj pro analýzu času a přesnosti obrábění
  - v komplexní podobě, kdy výstupem je digitální dvojče obrobku, u kterého lze posuzovat i jakost obrobeného povrchu



# Využití digitálního dvojčete stroje pro analýzu kvality NC dat

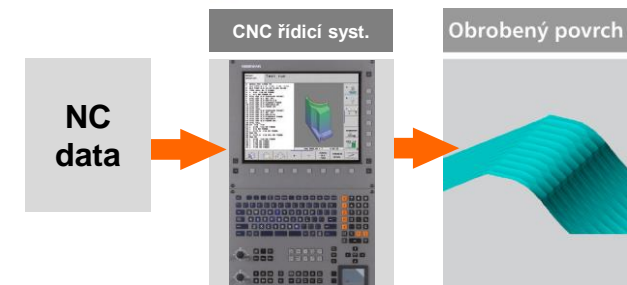
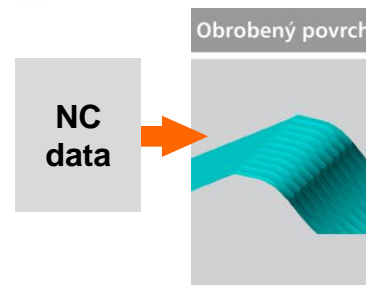
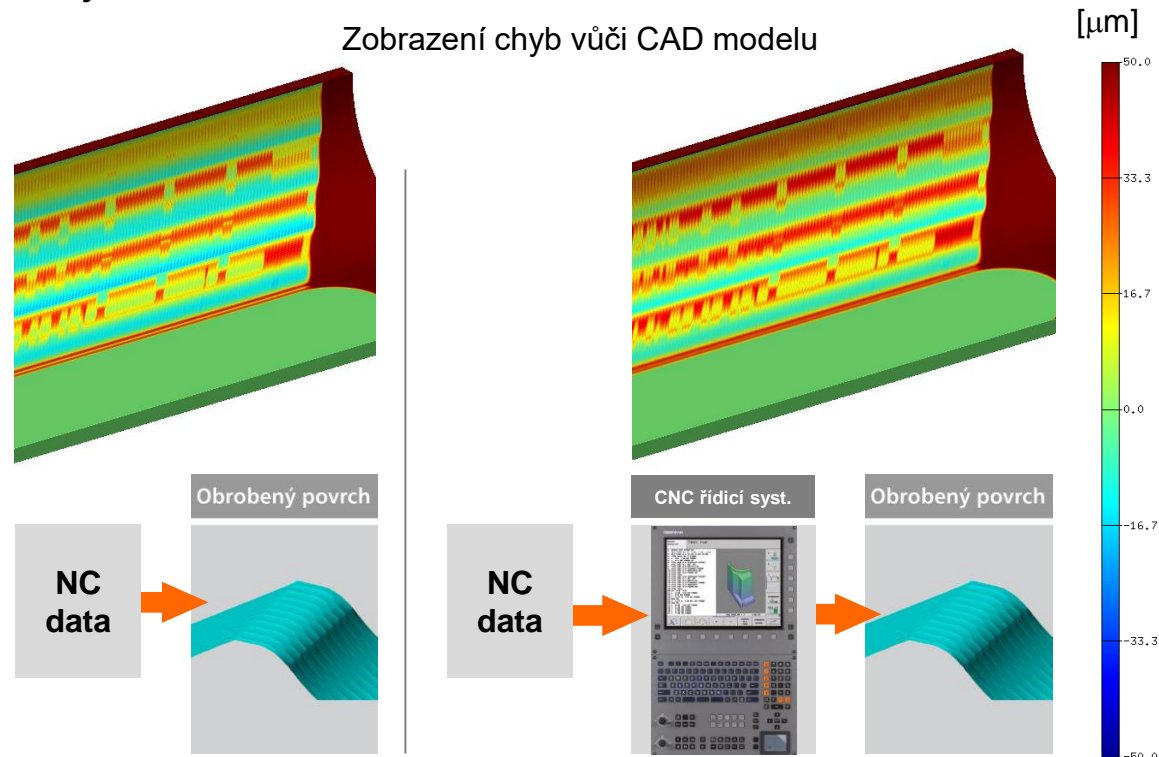
- Analýza zdrojů chyb dokončovacího obrábění
- Aplikace virtuálního modelu stroje

Zdroj: TGS



Chyby na skutečném obrobku

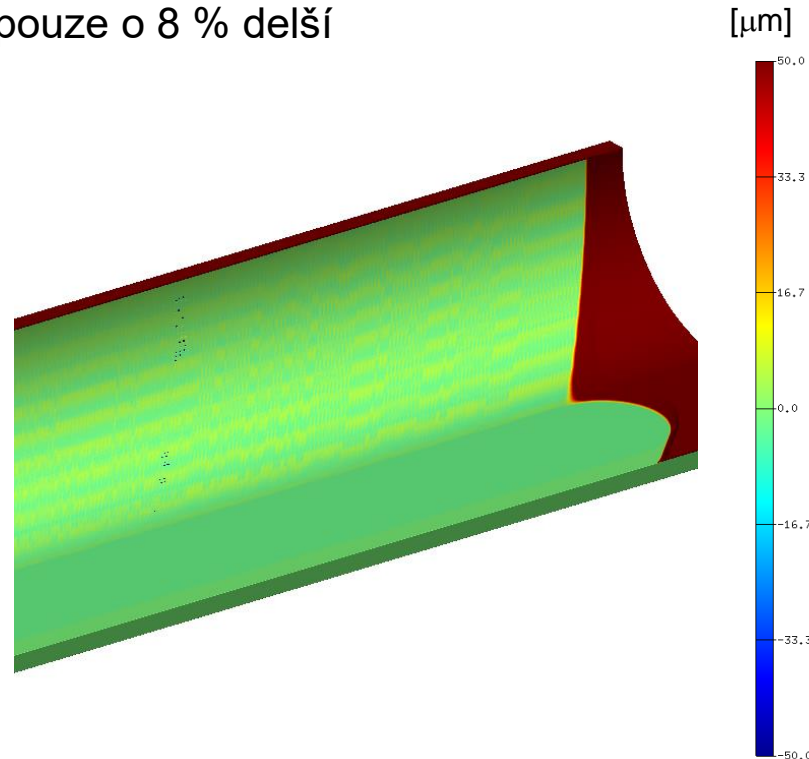
Zobrazení chyb vůči CAD modelu



Simulace virtuálního obrábění

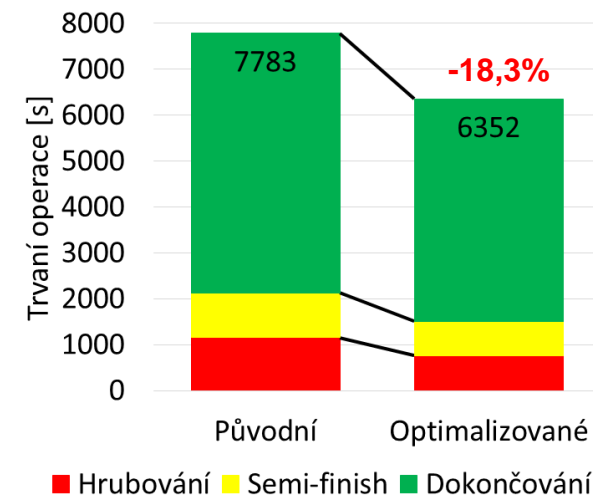
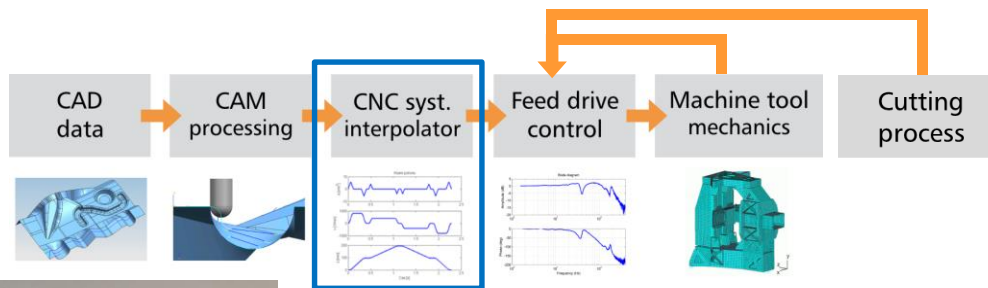
## Využití digitálního dvojčete stroje pro analýzu kvality NC dat

- Pomocí virtuálního modelu stroje odhalen zdroj chyb v kvalitě NC dat
- Vygenerována nová data s 10 x nižší geometrickou tolerancí ( $5 \mu\text{m}$ )
- Čas obrábění pouze o 8 % delší

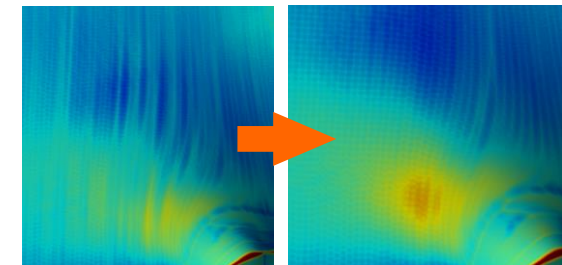
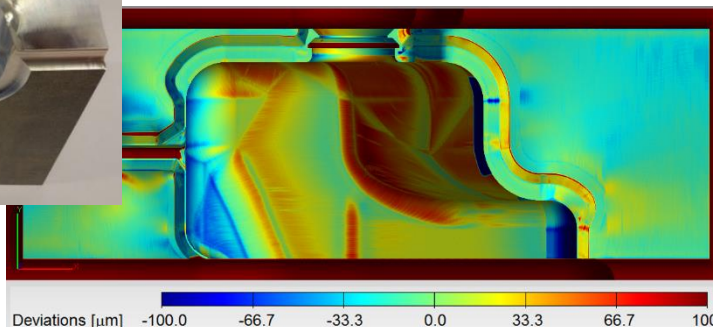


# Využití digitálního dvojčete stroje pro úpravu nastavení CNC interpolátoru

- Optimalizace nastavení CNC interpolátoru – zvýšení produktivity při zachování jakosti a přesnosti obrábění
- Pomocí digitálního dvojčete stroje nalezeno nastavení vybraných parametrů (ryv, cut-off frekvence) splňující definovanou přesnost  $\pm 0,1$  mm



**Zkrácení času obrábění o 18 %**



*S úsporou času byla zvýšena i kvalita povrchu*



# Zpřesněné kalkulace výrobních nákladů

- Model výrobních nákladů založený na zpřesněném stanovení HRS pracoviště
- Kalkulace pro různé operační úseky
- Vizualizace skladby časů a nákladů obrábění a různých variant



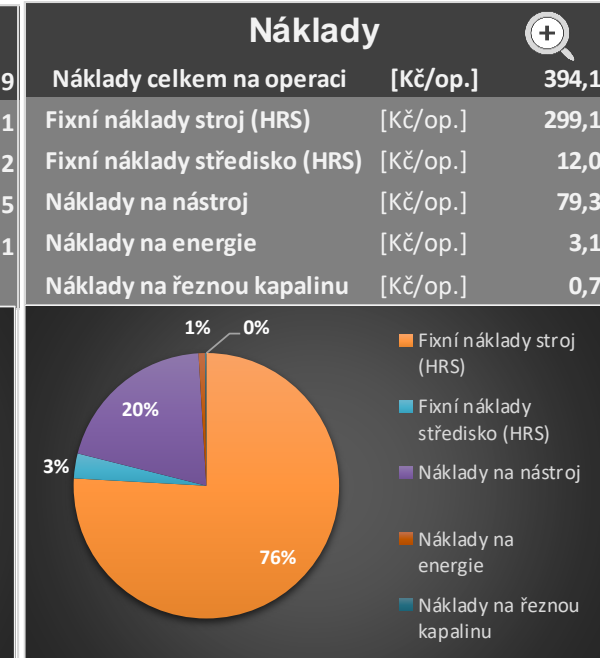
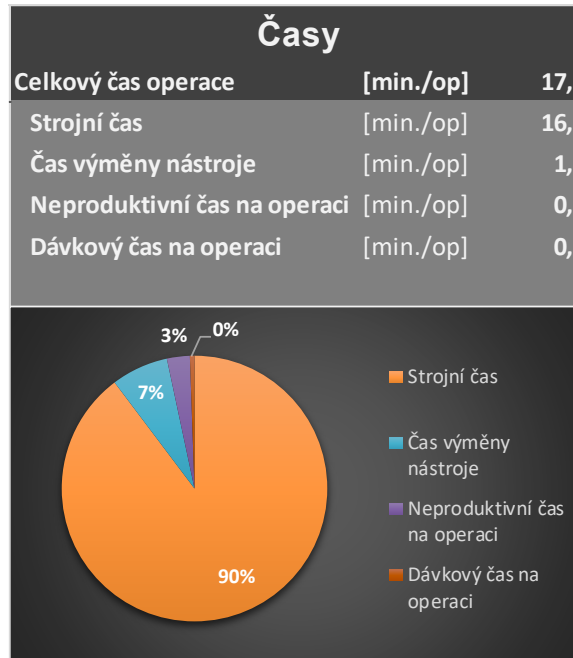
## Vstupy do modelu kalkulace:

Stroj a jeho kapacita; Obsluha; Fixní náklady; Údaje o operaci (nástroj, řezné podmínky, chlazení,..)

## Výstupy kalkulace:

HRS stroje/pracoviště; Skladba časů v operačním úseku; Skladba výrobních nákladů na operační úsek

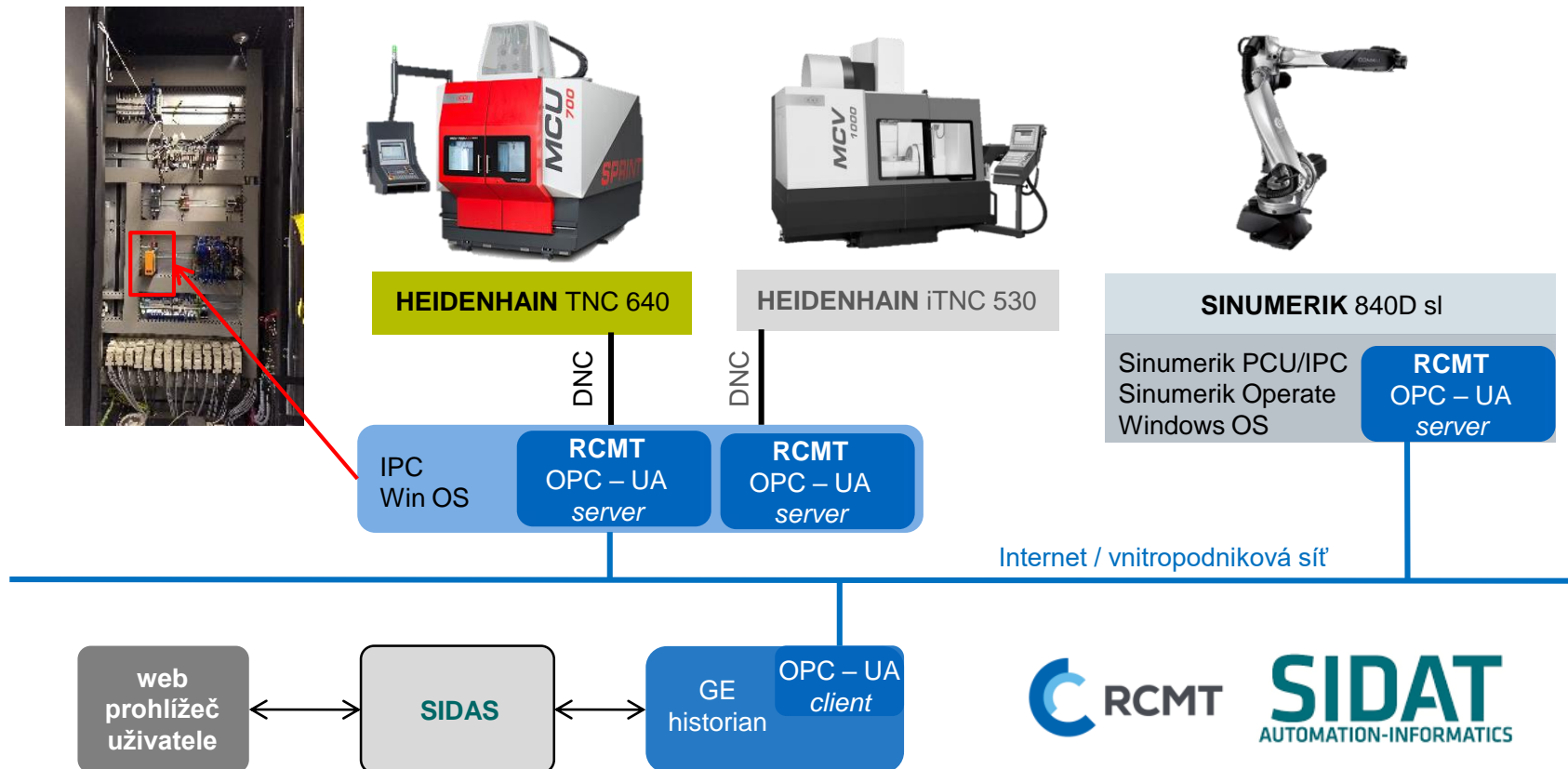
| STROJ           |                                   |   |                  |
|-----------------|-----------------------------------|---|------------------|
|                 | Jedn.                             | Vstupy                                      |                  |
| <b>OBSLUHA</b>  | Náklady obsluhy                   | [Kč/rok]                                    | 456 958          |
|                 | <b>FIXNÍ NÁKLADY</b>              |   |                  |
|                 | Pořizovací cena                   | [Kč]  | 4 200 000        |
|                 | Životnost                         | [roky]                                      | 5                |
|                 | Odpisy                            | [Kč/rok]                                    | 840 000          |
|                 | Finanční náklady                  | [Kč/rok]                                    | 130 000          |
|                 | Pojištění                         | [Kč/rok]                                    | 42 000           |
|                 | Údržba                            | [Kč/rok]                                    | 220 000          |
|                 | Náklady prostoru                  | [Kč/rok]                                    | 36 000           |
|                 | Zabraná plocha                    | [m <sup>2</sup> ]                           | 30               |
|                 | Náklady na m <sup>2</sup>         | [Kč/m <sup>2</sup> .rok]                    | 1 200            |
|                 | <b>Celkové fixní náklady</b>      | [Kč/rok]                                    | <b>1 724 958</b> |
| <b>KAPACITA</b> | Počet směn                        | [směny]                                     | 1                |
|                 | Teoretická kapacita               | [hod./rok]                                  | 2 000            |
|                 | Prostoje                          | [hod./rok]                                  | 410              |
|                 | Dovolená                          | [hod./rok]                                  | 60               |
|                 | Plánovaná údržba v prac. době     | [hod./rok]                                  | 50               |
|                 | Neplánované opravy                | [hod./rok]                                  | 200              |
|                 | Technicko-organizační prostoje    | [hod./rok]                                  | 100              |
|                 | Přesčasy                          | [hod./rok]                                  | 100              |
|                 | Disponibilní kapacita             | [hod./rok]                                  | 1 690            |
|                 | Koeficient využití disp. kapacity | [%]   | 80%              |
|                 | [hod./rok]                        | <input checked="" type="radio"/> Doporučená | 1 352            |
|                 | [hod./rok]                        | <input type="radio"/> Vlastní               | 3 000            |
|                 | [hod./rok]                        |   | 1 352            |
|                 | [Kč/hod.]                         |   | 1 276            |



**HRS stroje = 1276 Kč/hod**

# Provozní monitoring a sběr dat ze strojů

- Důležitou součástí zvyšování efektivity je monitoring reálného provozu strojů.
- Získaná data je nutno transformovat na informace a podle tohoto realizovat další vhodné zásahy do výroby.

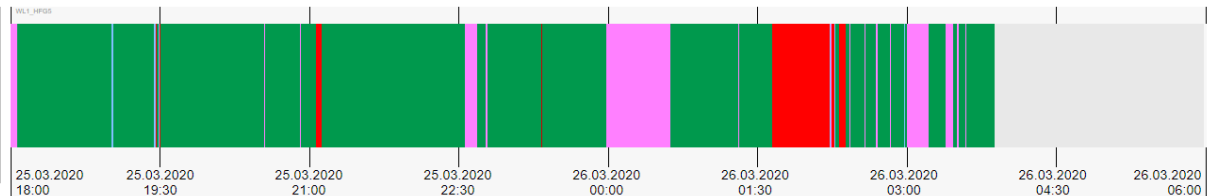


# Ukázky reportu – vytíženost strojů

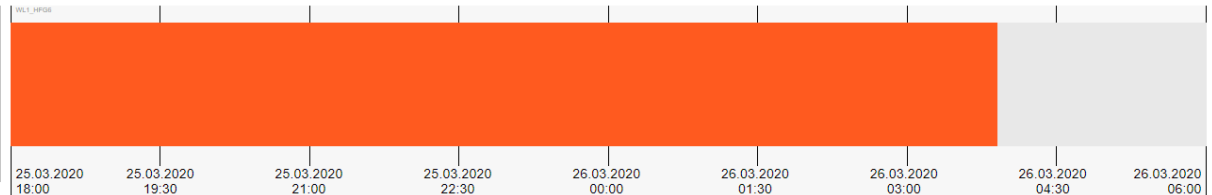
**SIDAT**  
AUTOMATION-INFORMATICS

|              |  |            |  |            |  |                         |  |
|--------------|--|------------|--|------------|--|-------------------------|--|
| <b>Linky</b> | Vyrobeno 15307 ks<br>Norma 20000 ks<br><b>77 %</b> | <b>HFG</b> | Vyrobeno 15345 ks<br>Norma 21000 ks<br><b>73 %</b> | <b>AJS</b> | Vyrobeno 12872 ks<br>Norma 15000 ks<br><b>86 %</b> | <b>Finální produkce</b> | Vyrobeno 0 ks<br>Norma 56 ks<br><b>0 %</b> |
|--------------|--|------------|--|------------|--|-------------------------|--|

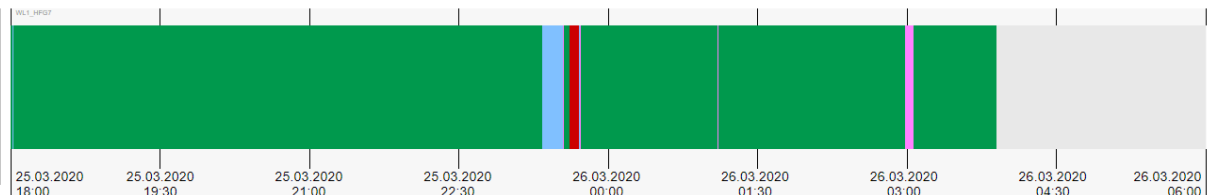
|                  |                  |                       |
|------------------|------------------|-----------------------|
| <b>HFG5</b>      | 26.03.2020 03:54 | V provozu             |
| Vyrobeno 2163 ks | 0.22%            | Chyba sběru dat 00:01 |
| Norma 3000 ks    | <b>78.34 %</b>   | V provozu 07:45       |
|                  | 0.73%            | Příprava výroby 00:04 |
|                  | 7.62%            | Porucha stroje 00:45  |
|                  | 13.09%           | Čekání na povel 01:17 |
| <b>72 %</b>      |                  |                       |



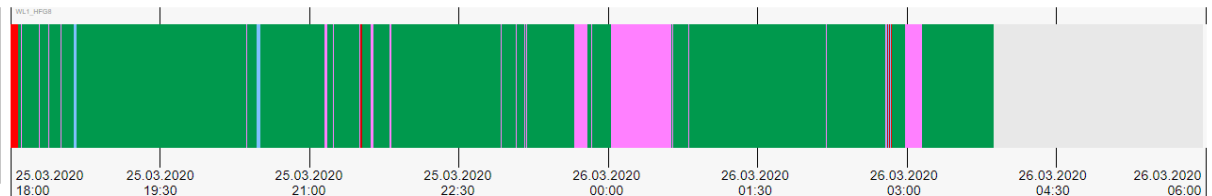
|               |                  |                          |
|---------------|------------------|--------------------------|
| <b>HFG6</b>   | 26.03.2020 03:54 | Neplánovaný servis       |
| Vyrobeno 0 ks | 100.00%          | Neplánovaný servis 09:54 |
| Norma 3000 ks |                  |                          |
| <b>0 %</b>    |                  |                          |



|                  |                  |                       |
|------------------|------------------|-----------------------|
| <b>HFG7</b>      | 26.03.2020 03:54 | V provozu             |
| Vyrobeno 3054 ks | 1.00%            | Chyba sběru dat 00:05 |
| Norma 3000 ks    | <b>95.68 %</b>   | V provozu 09:28       |
|                  | 2.22%            | Příprava výroby 00:13 |
|                  | 1.11%            | Čekání na povel 00:06 |
| <b>100 %</b>     |                  |                       |



|                  |                  |                       |
|------------------|------------------|-----------------------|
| <b>HFG8</b>      | 26.03.2020 03:54 | V provozu             |
| Vyrobeno 2742 ks | 0.51%            | Chyba sběru dat 00:03 |
| Norma 3000 ks    | <b>85.69 %</b>   | V provozu 08:29       |
|                  | 1.01%            | Příprava výroby 00:06 |
|                  | 0.81%            | Porucha stroje 00:04  |
|                  | 11.98%           | Čekání na povel 01:11 |
| <b>91 %</b>      |                  |                       |



## Možné smart aplikace monitoringu strojů

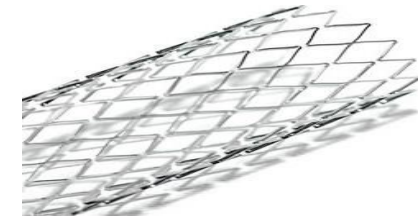
- Prediktivní údržba:
  - bez doplňkových snímačů: sledování motohodin kritických komponent vč. nepřímého měření zatížení >> odhad opotřebení („elektronická servisní knížka“)
  - s přídatnými snímači (akcelerometry, ballbar aj.) a specifickými servisními cykly: plánování servisních odstávek stroje na základě sledování stavu opotřebení včetně pohybových os, sledování změn přesnosti stroje (lze spojit s plánem výroby)
  
- Prediktivní kontrola kvality:
  - inprocesní snímání vibrací a proudů na pohonech pro identifikaci nestandardních stavů
  - sledování silového přetížení nástroje, opotřebení nástroje
  - odhad ovlivnění kvality obráběného dílce s ohledem na jeho budoucí funkci.



# Laserové technologie pro strojírenskou výrobu

- Výroba mikro-komponent a gravírování tvrdých a těžko-otecovatelných materiálů
- Strukturování povrchu pro: snížení koeficientu tření; změnu optických vlastností; změnu smáčivosti; možnost replikace struktury z formy na výrobek
- Navařování kovu a jemné řezání a svařování (vč. plastů)

## Strukturování formy - QR kód na výrobky



## Svařování:

Materiál Nitinol (Ni-Ti)  
Drát průměru.: 0,28 mm  
Délka svaru: 0,15 mm

## Gravírování:

Struktura pro retenci  
maziva na tvrdých  
kluzných plochách



## 3D tisk kovu z drátu

Ocel, nerez, titan

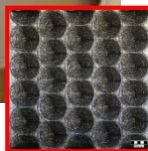


## Nanesení kovových otěruvzdorných vrstev



## Strukturování:

Tvářecí nástroj pro  
zvýšení životnosti



# Hybridní technologie výroby na základě WAAM

- Navařování kovu z drátu pomocí elektrického oblouku WAAM (Wire Arc Additiv Manufacturing)
- 5osé obrábění standardními postupy a nástroji



5osá frézka s možností navařování



Pracovní prostor s hořákem i frézou

Testovací kus: 6ti lopatkové kolo s 6ti mezilopatkami.  
 Materiál: **1.4301**  
 Průměr kola: **160 mm**  
 Výška lopatek: **20 mm**  
 Hmotnost navařených lopatek – hrubý objem : **1.3 kg**  
 Čas potřebný pro navaření lopatek: cca 4 hodiny, mezioperační frézování: 3 hodiny



Navařená základová vrstva na soustružený polotovár



Vyfrézované základny pro kladení lopatek



První vrstva paty lopatek



Lopatky v průběhu generování



Konečné obrábění lopatek

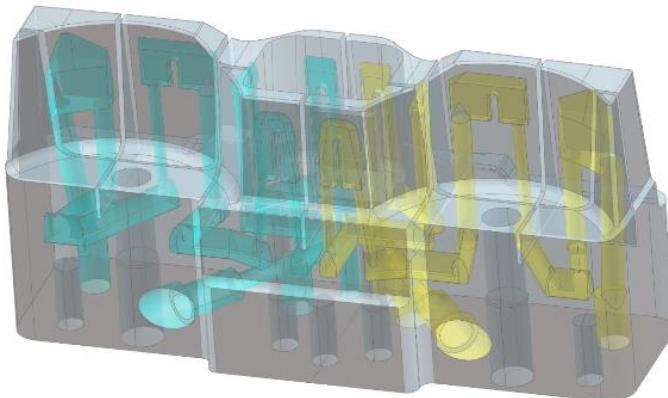
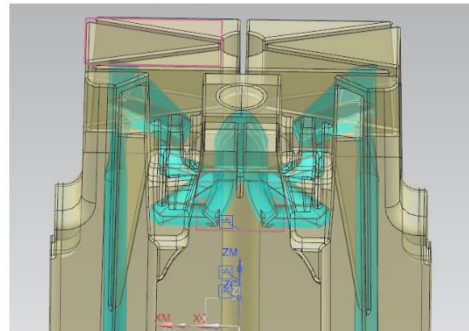
# Hybridní technologie výroby na základě WAAM

- Aplikace



# Hybridní technologie výroby na základě WAAM

- Aplikace
  - Vložka formy s vnitřním chlazením
  - Čas výrobního cyklu díky chlazení se zkrátil o téměř 30 %



Zdroj: Isolit BRAVO



# Shrnutí

- Zvyšování **produktivity a spolehlivosti** výsledků obrábění: **předcházení nežádoucímu chování stroje a procesu**
- Volba nastavení procesů, procesních parametrů a jejich monitorování:
  - **Řezný proces:**
    - Volba nástroje, řezných podmínek, řezného prostředí, strategie obrábění, tvorba NC kódu
  - **Stroj a jeho řízení:**
    - Ladění parametrů pohonů a řídicích systémů
    - Digitální dvojčata pro kontrolu strojů a technologií
  - **Data a systémy řízení výroby:**
    - Sběr informací o chování systému
    - Napojení stroje na nadřazené systémy řízení výroby

# Děkuji za pozornost

**Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.**

**Vedoucí pracoviště**

T: + 420 605 205 927

E: [m.sulitka@rcmt.cvut.cz](mailto:m.sulitka@rcmt.cvut.cz)