



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. Smolík

Virtuální veletrh Výroba forem 2020 | 25. 11. 2020

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**

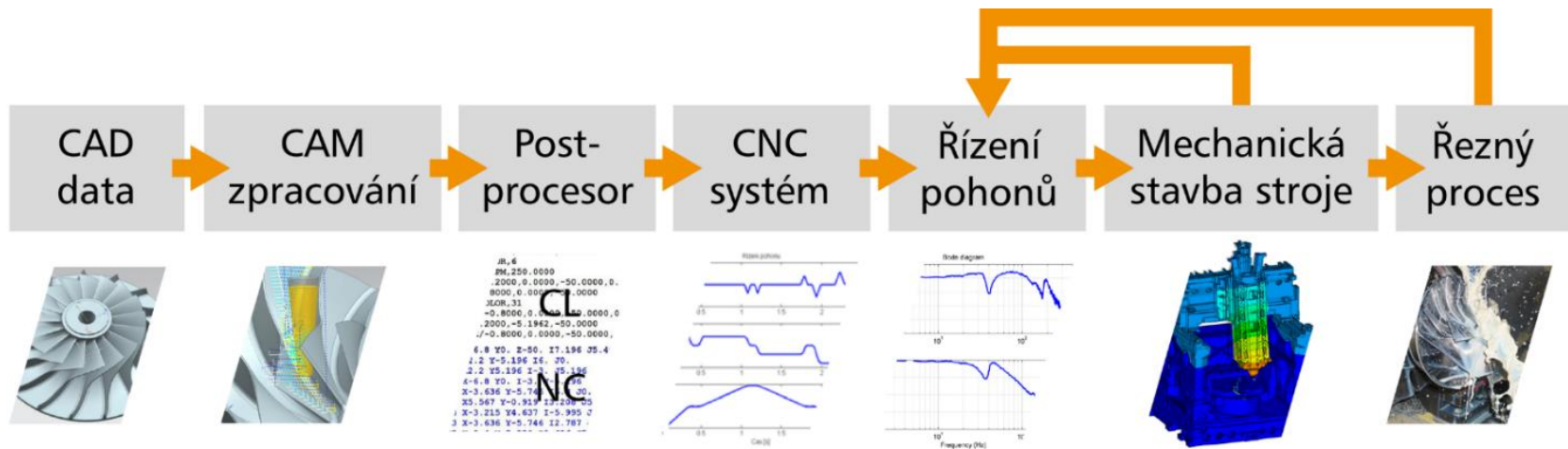
- **Výrobní náklady**

- **Monitoring procesů**

- **Laserové a aditivní technologie**

Od CAD modelu k hotovému dílci...

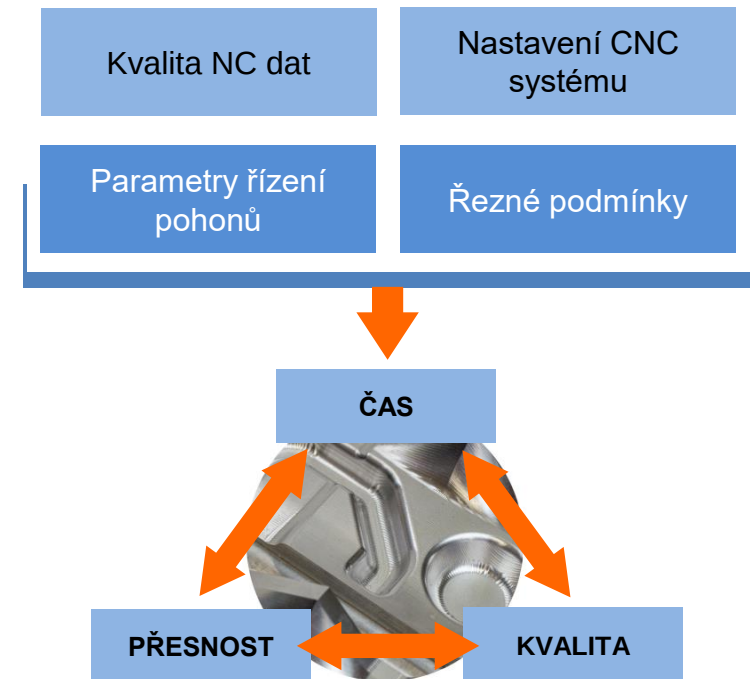
... je cesta dlouhá a o komplikace tu není nouze:



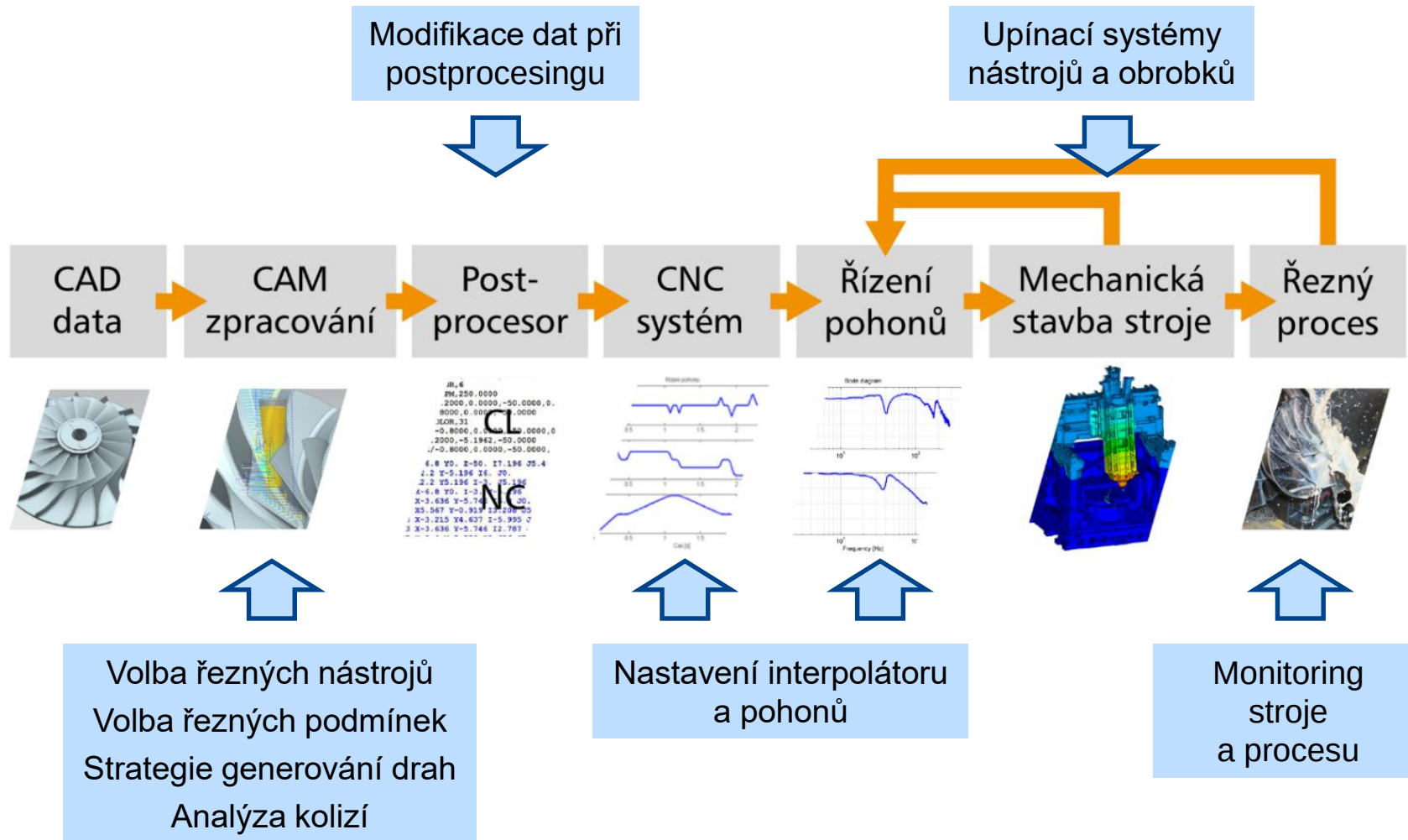
Na druhou stranu, v každé části řetězce je možno zasáhnout a ovlivnit přesnost, jakost a produktivitu výroby součástí.

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 řezných 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



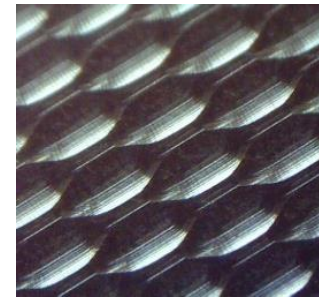
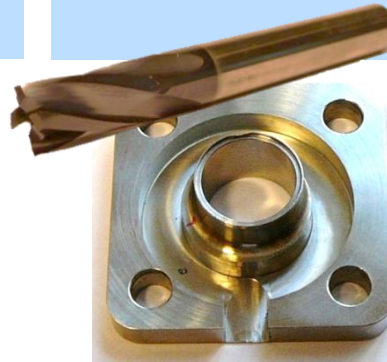
Co lze v návrhu řezného procesu zvažovat

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:

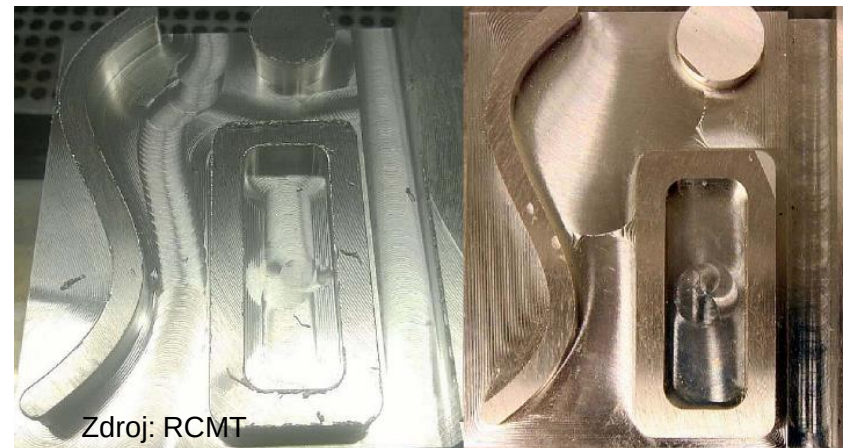
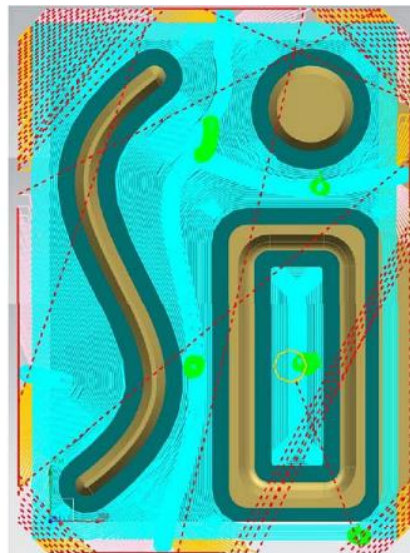
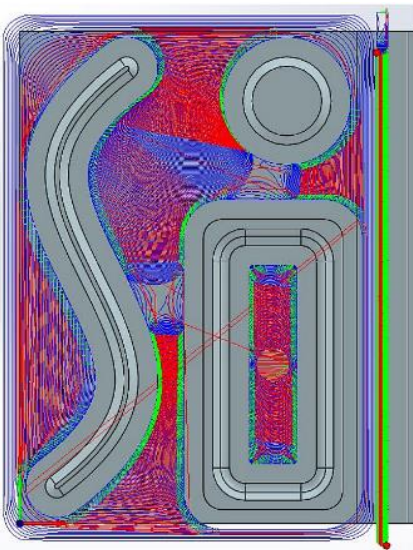
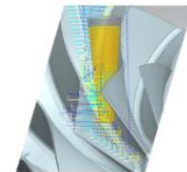
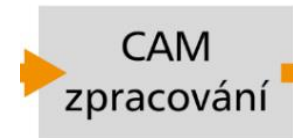
- správné upnutí dílce umožňuje snížit omezit vibrace při obrábění a počet přeupnutí dílce
- důsledkem je zlepšení produktivity obrábění a jakosti dílce

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.

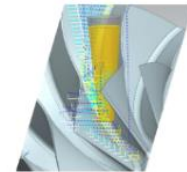


Zdroj: RCMT

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.

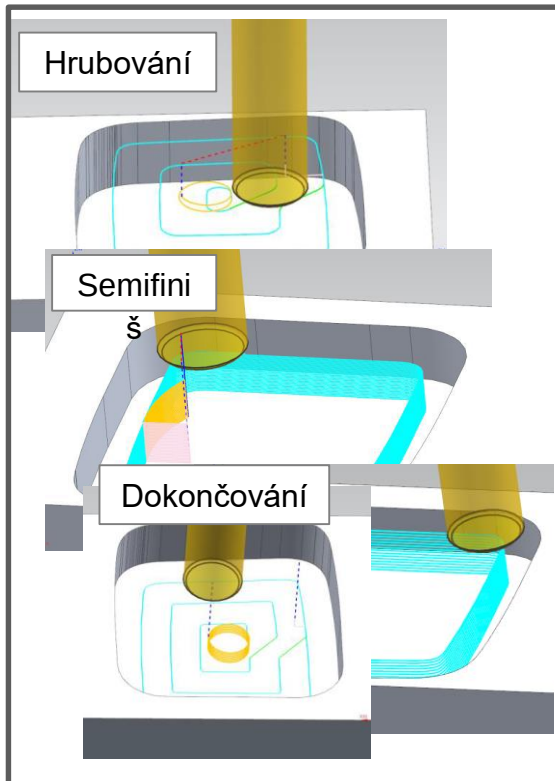


Příklad: Vhodnou volbou nástroje a úpravou řezných podmínek došlo například v partnerské firmě v sériové výrobě menších dílců z Al slitiny frézováním k **úspoře 25 % výrobních nákladů** na jeden dílec.

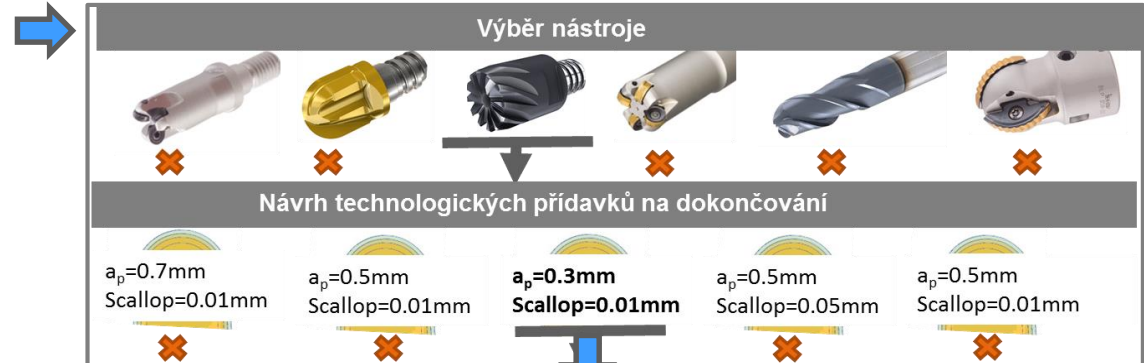
Optimalizace volby nástroje, strategií a podmínek

- 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)

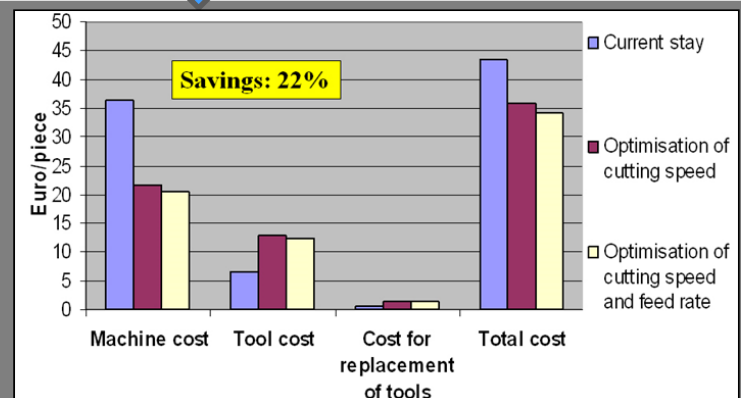
Návrh strategie obrábění



Volba nástroje a pracovních podmínek



Optimalizace řezných podmínek (f_z , v_c)



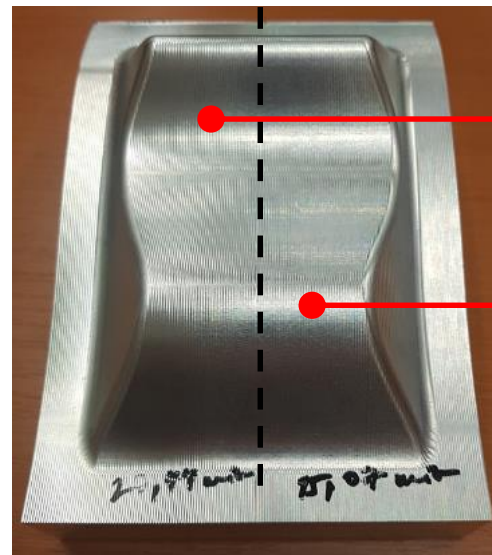
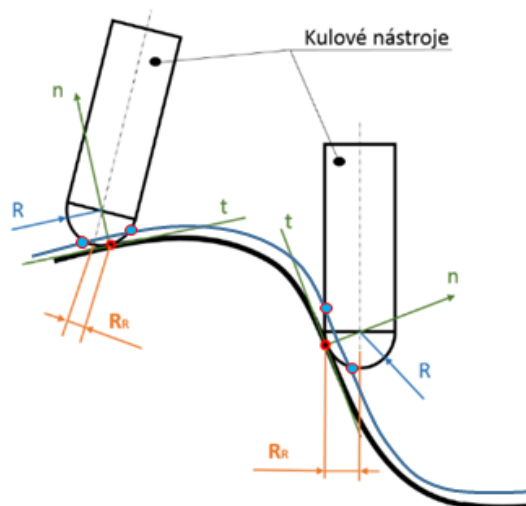
Nové přístupy pro dodržení řezných podmínek

- 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
PM,250.0000
Z000,0.0000,-50.0000,0.
R000,0.0000,0.0000
JG00,31
-0.8000,0.0000,0.0000,0.
Z000,-5.1962,-50.0000
J-0.8000,0.0000,-50.0000,
6.8 Y0. Z=50. I7.196 25.4
2.2 Y=5.196 26. 20.
2.2 Y5.196 I=3. 25.126
6-6.8 Y0. I=3
X-3.636 Y=5.746 I=1.100
35.967 Y=0.918 I=1.100
I X-3.215 Y4.637 I=5.955
3 X-3.636 Y=5.746 I2.787
  
```



čas obrábění:
20.46 min

čas obrábění:
15.04 min

Zdroj: RCMT

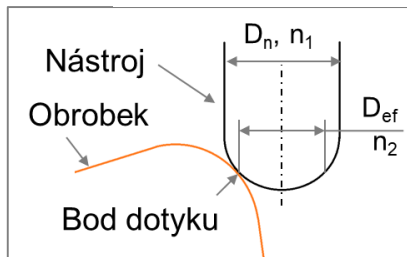
Příklad: Úprava otáček nástroje a posuvové rychlosti při tříosém obrábění kulovým nástrojem vedla ke zvýšení produktivity téměř o 25 %.

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.

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

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



POSTPROCESOR
Def, vc, fz → n, vf

NC program

~~n = S / konst.~~
~~vf = F / konst.~~

Příklad použití: Dutina z duplexní korozivzdorné oceli



Technologie:

Dokončovací frézování – 3 osé

Kulová fréza - pr. 12 mm

(povlakovaný SK)

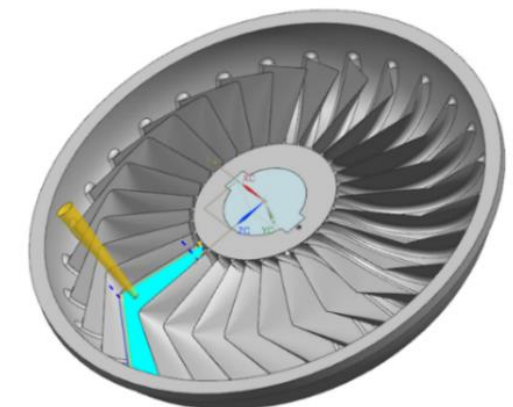
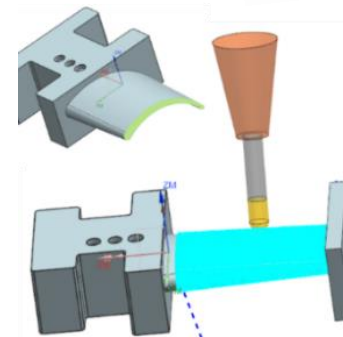
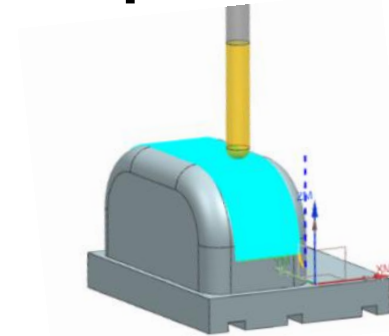
Frézovací centrum (15 kRPM; 18 kW)

	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

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

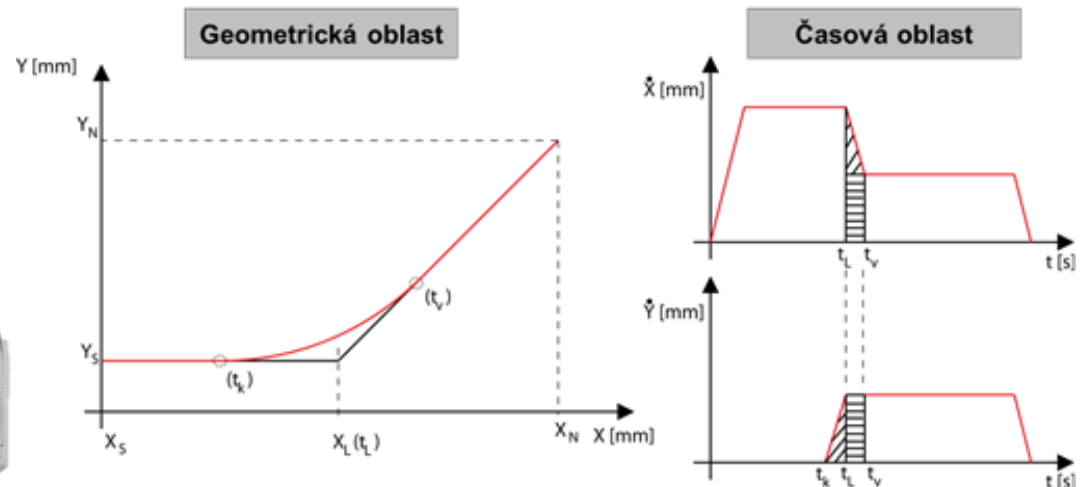
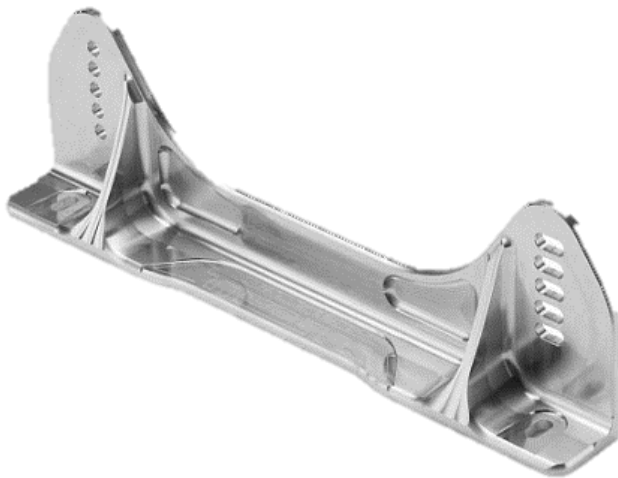
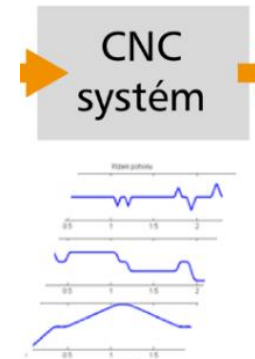
Další příklady uplatnění při frézovacích operacích

- 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

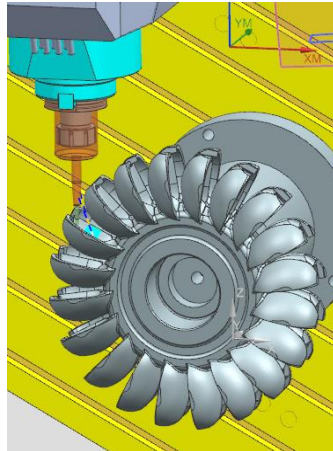
- Hlavním úkolem ŘS, resp. interpolátoru, je převod dat z NC kódu z geometrické do časové oblasti. Tím získáme požadované vstupy pro zpětnovazební řízení pohonů jednotlivých pohybových os stroje.
- Tento převod je matematická operace, jejíž průběh lze ovlivnit řadou nastavení (např. použití funkce *look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

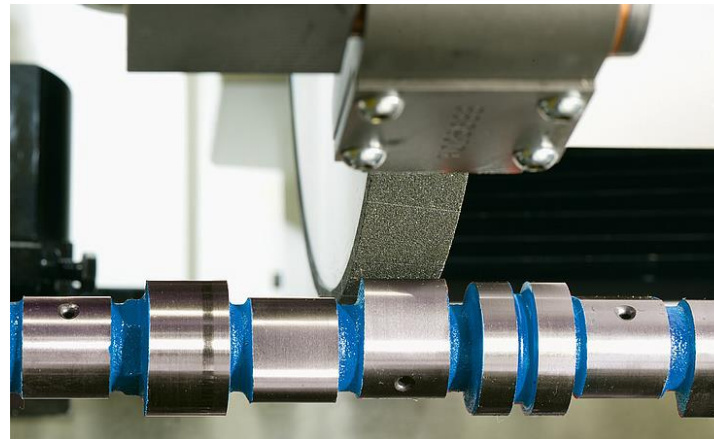
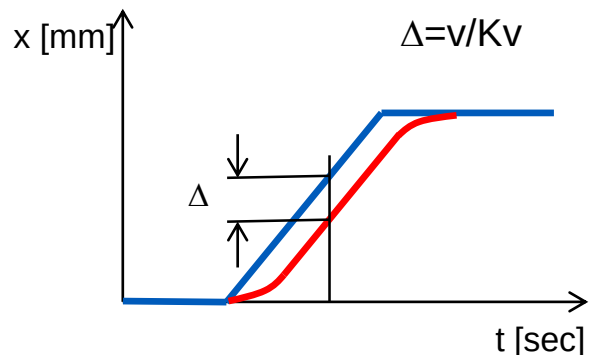
- Interpolátor zajišťuje reálný pohyb stroje, tj. zrychlení a zpomalení pohybů. Toto zanedbávají predikce v CAM, proto je odlišný čas predikce obrábění v CAM a skutečný čas obrábění.
- Aplikace: frézování Peltonovy turbíny na stroji Kovosvit MAS MCU 1100



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

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**



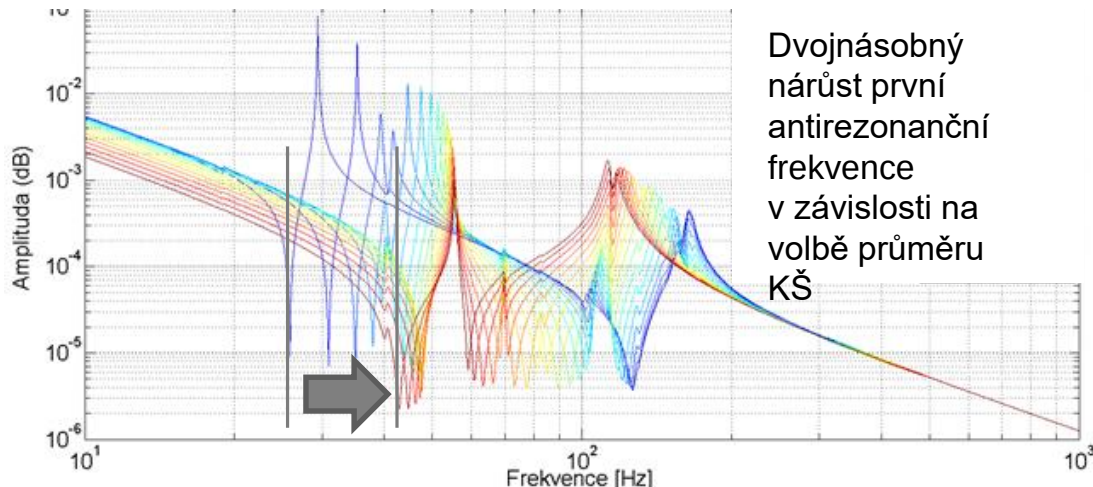
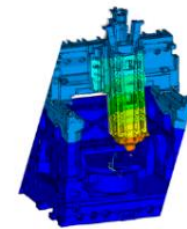
Zdroj:
Erwin Junker

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 ω_M^* pohonu pohybové osy. Bezpečné nastavení K_v je přibližně $K_{vBEZP} [m/min/mm] = 0,044 \omega_M^* [Hz]$

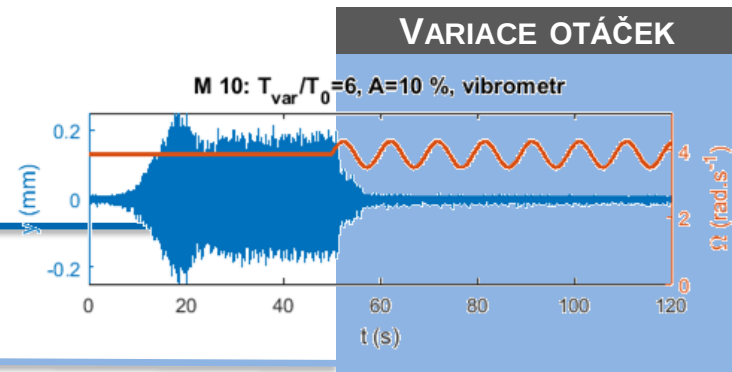
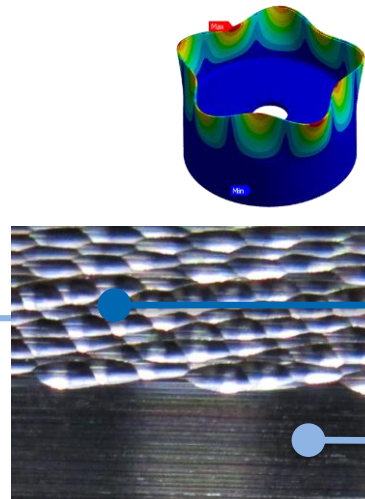
Mechanická
stavba stroje



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



- vyrovnání dílce
- upnutí dílce
- určení nulového bodu

Přenosná obrazovka pro obsluhu

Se SW pro řízení upínacího
přípravku a komunikaci s ním



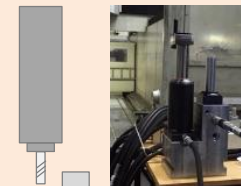
Řídicí systém
obráběcího stroje



NC code



Průmyslový PC se
speciálním SW



obrobek

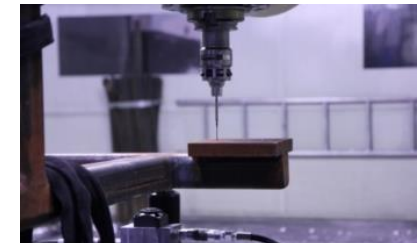
upínací
přípravky

Příprava
a optimalizace
technologie

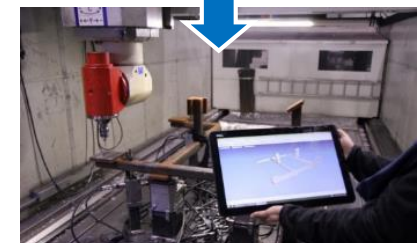
**75% úspora
vedlejšího času**

Současná situace
(manuální příprava dílce)

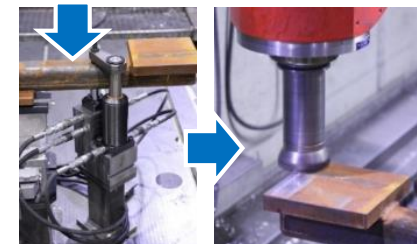
Klíčové technologie
(přídavný HW & SW)



Kontrola pozice dílce



Vyrovňování 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 přídatné odměřování TCP
 - Nebo externí odměřování (např. laser tracker)

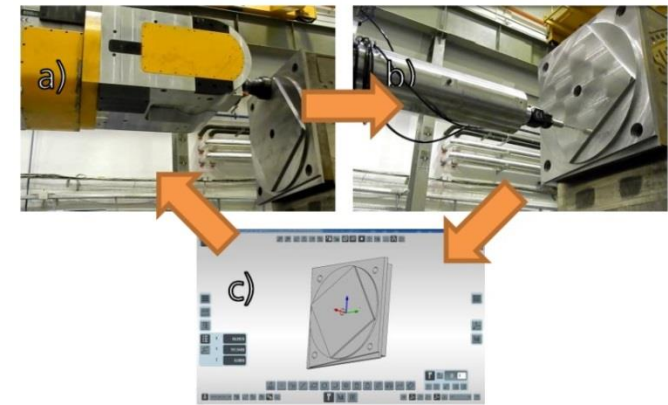


Schéma měření obrobku na stroji s integrovaným metrologickým softwarem

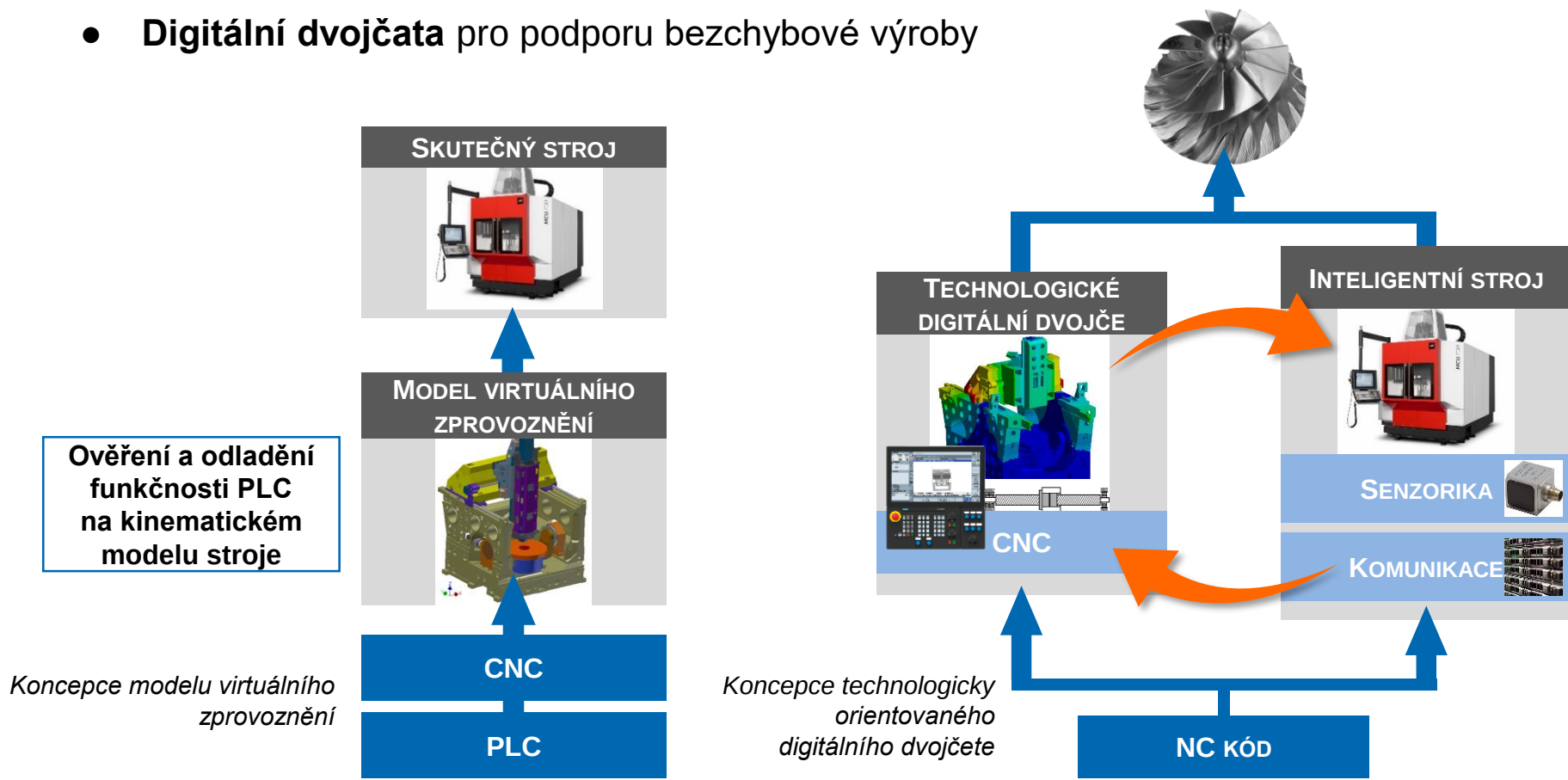


Zdroj: TOS Varnsdorf

Přídavné odměřování laser trackerem

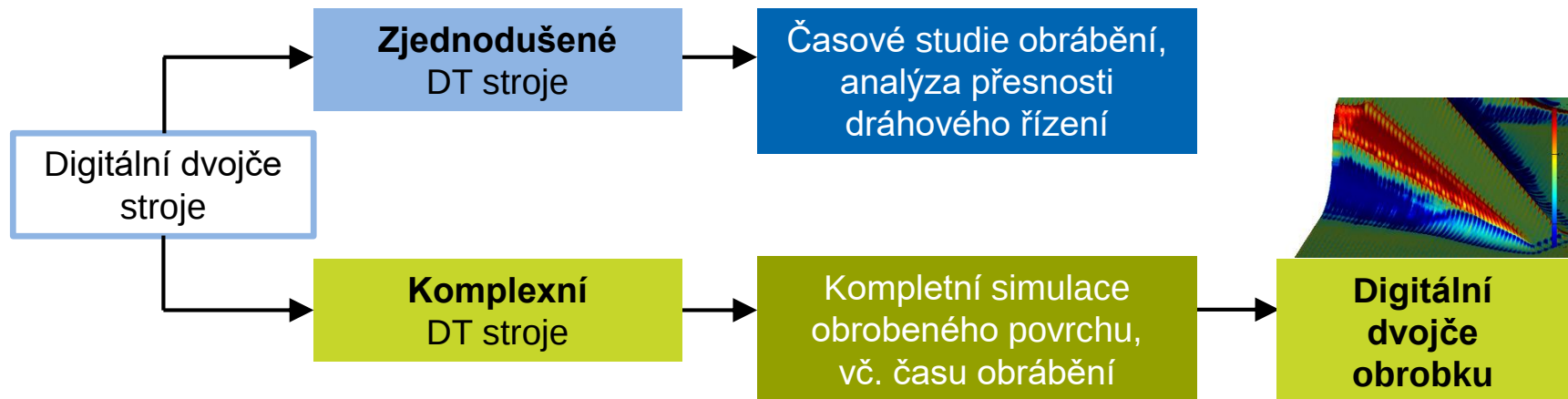
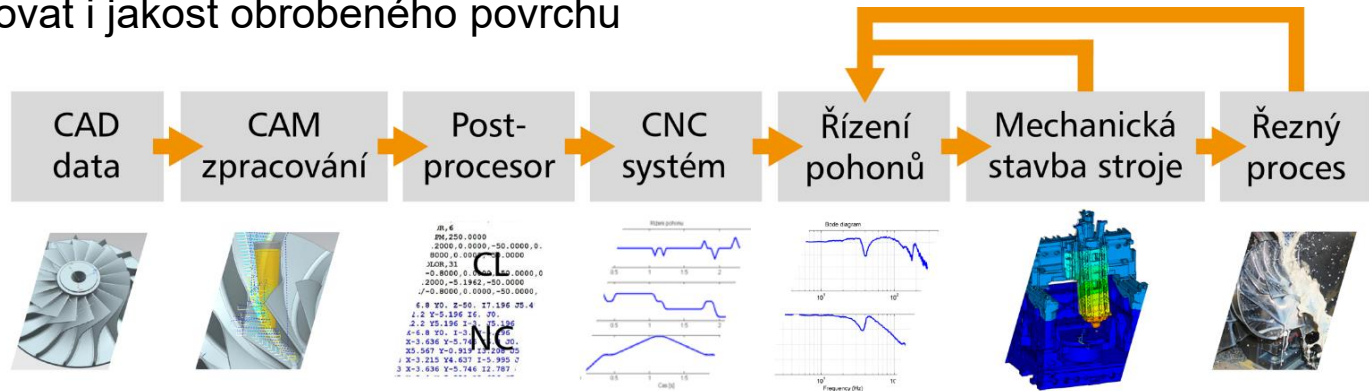
Digitální modely pro podporu realizace výroby

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



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

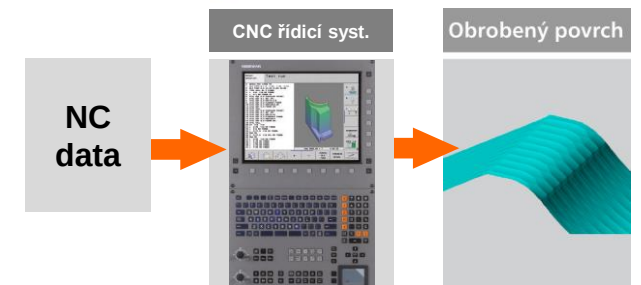
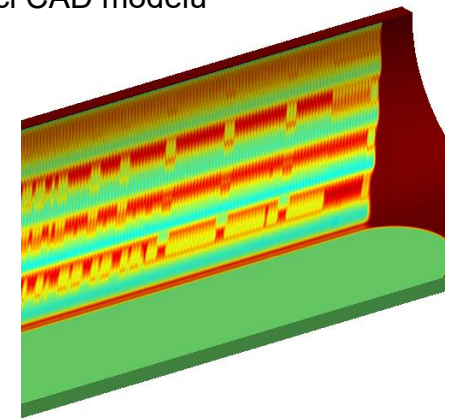
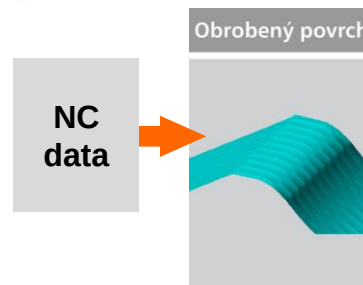
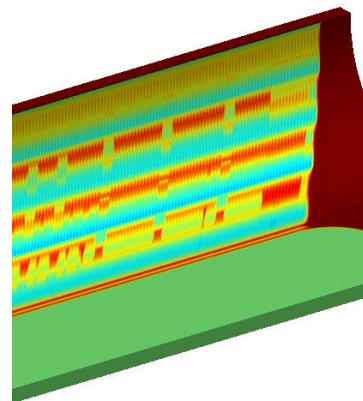
- Analýza zdrojů chyb dokončovacího obrábění
- Aplikace virtuálního modelu stroje

Zdroj: TGS

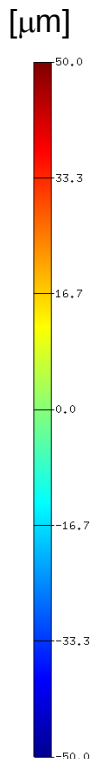


Chyby na skutečném obrobku

Zobrazení chyb vůči CAD modelu

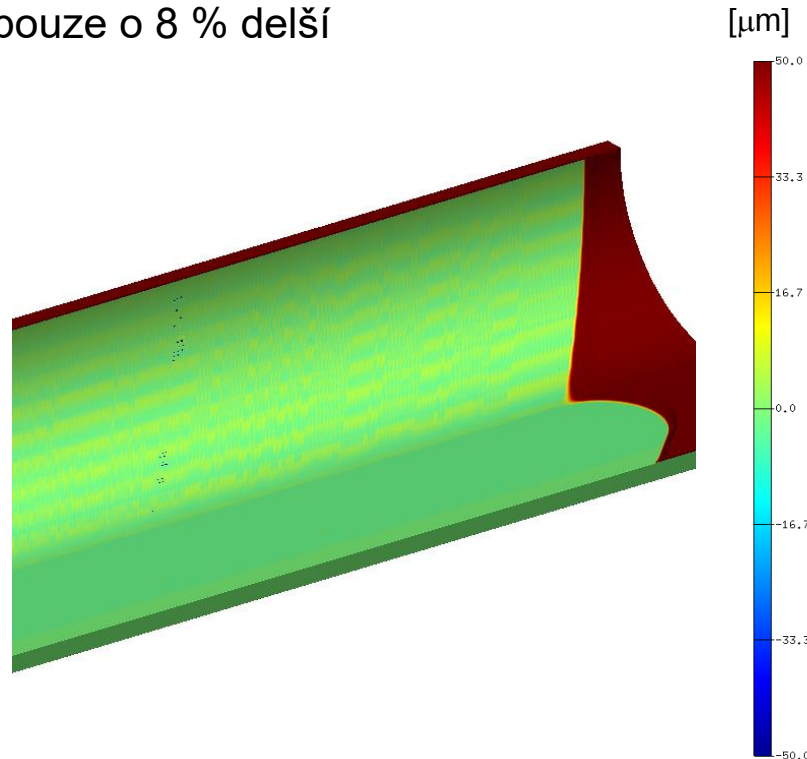


Simulace virtuálního obrábění



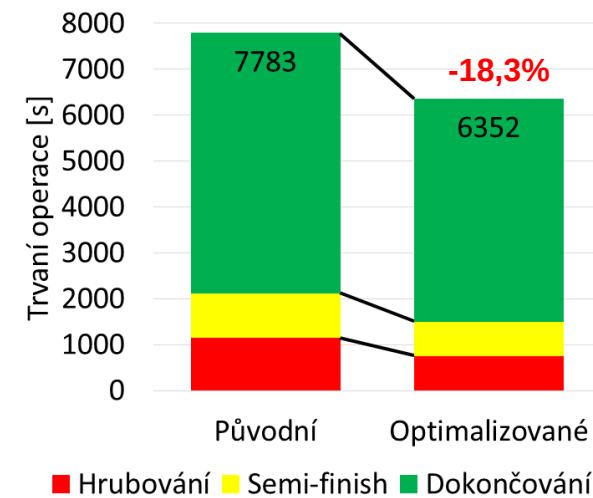
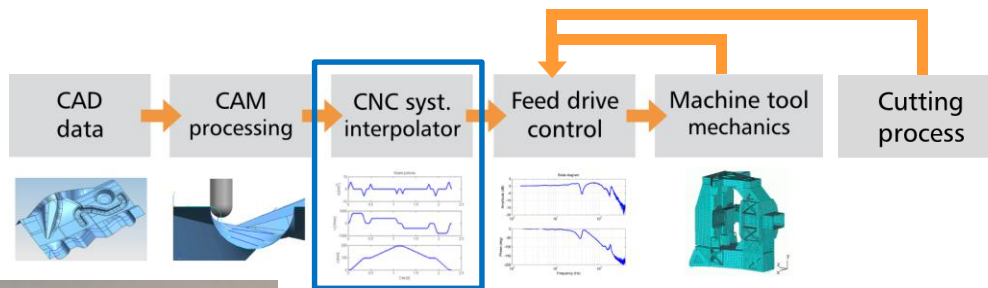
Využití digitálního dvojčete stroje pro analýzu kvality NC dat

- 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

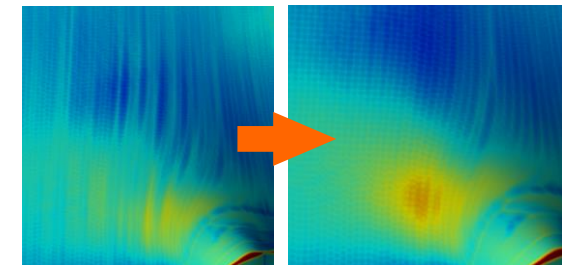
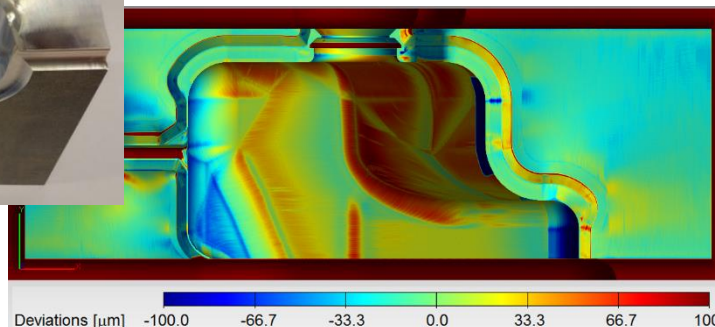


Využití digitálního dvojčete stroje pro úpravu nastavení CNC interpolátoru

- 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



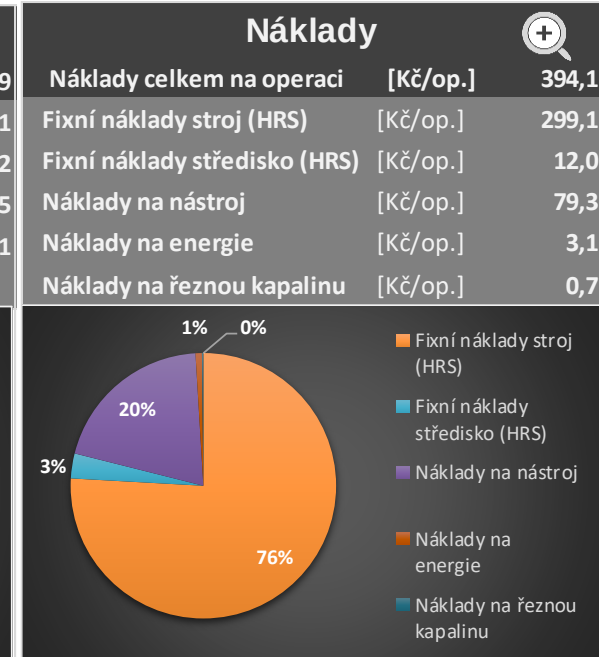
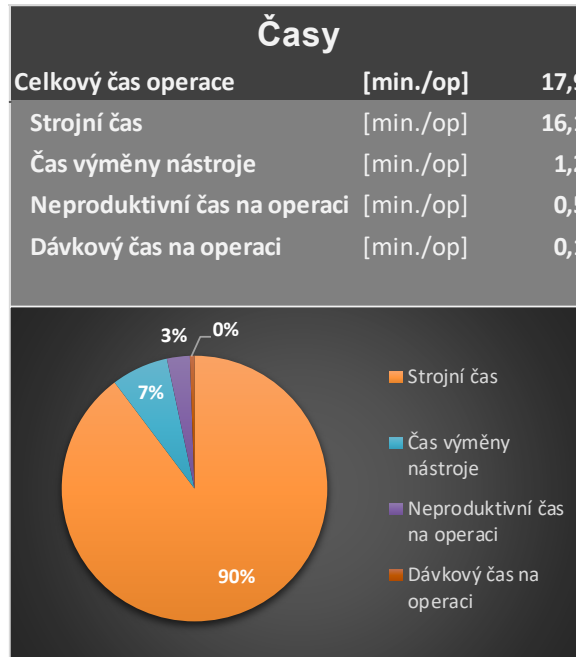
Vstupy do modelu kalkulace:

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

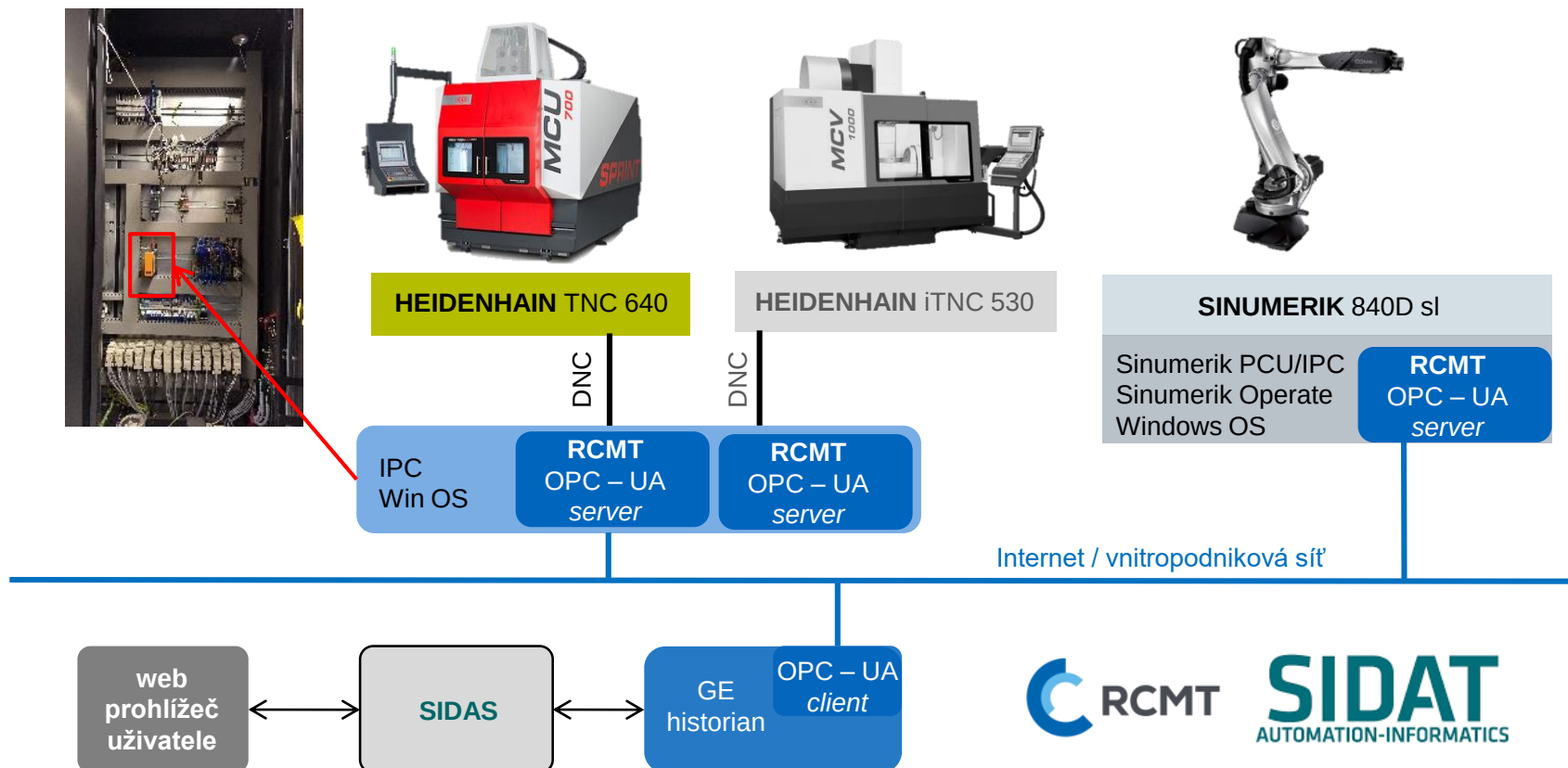
	STROJ	
	Jedn.	Vstupy
OBSLUHA	Náklady obsluhy	[Kč/rok] 456 958
FIXNÍ NÁKLADY	Pořizovací cena	[Kč] 4 200 000
	Životnost	[roky] 5
	Odpisy	[Kč/rok] 840 000
	Finanční náklady	[Kč/rok] 130 000
	Pojištění	[Kč/rok] 42 000
	Údržba	[Kč/rok] 220 000
	Náklady prostoru	[Kč/rok] 36 000
	Zabraná plocha	[m ²] 30
	Náklady na m ²	[Kč/m ² .rok] 1 200
	Celkové fixní náklady	[Kč/rok] 1 724 958
KAPACITA	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
	Přesčas	[hod./rok] 100
	Disponibilní kapacita	[hod./rok] 1 690
	Koeficient využití disp. kapacity	[%] 80%
		[hod./rok] 1 352
	Využitá kapacita	[hod./rok] 3 000
		[hod./rok] 1 352
	Hodinová režijní sazba	[Kč/hod.] 1 276



HRS stroje = 1276 Kč/hod

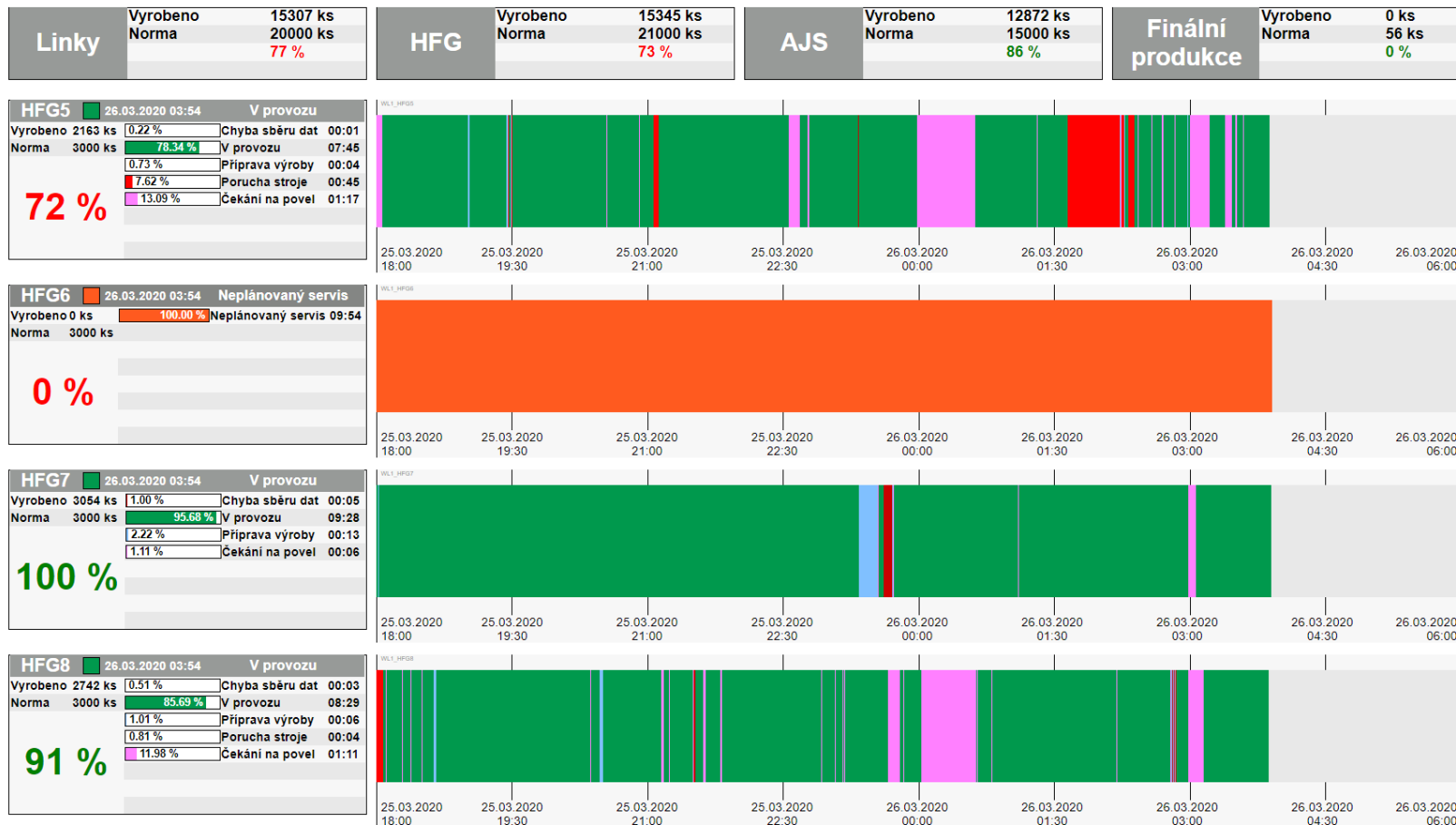
Provozní monitoring a sběr dat ze strojů

- 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



Možné smart aplikace monitoringu strojů

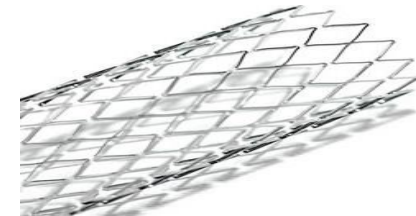
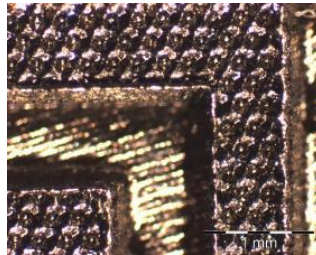
- Prediktivní údržba:
 - bez doplňkových snímačů: sledování motohodin kritických komponent vč. nepřímého měření zatížení >> odhad opotřebení („elektronická servisní knížka“)
 - s přídatnými snímači (akcelerometry, ballbar aj.) a specifickými servisními cykly: plánování servisních odstávek stroje na základě sledování stavu opotřebení vřeten a 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-opracovatelných 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:

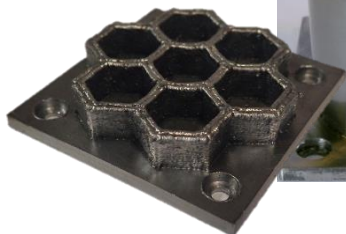
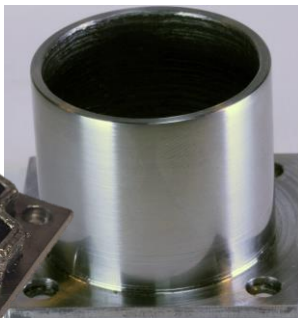
Materiál Nitinol (Ni-Ti)
Drát průměru.: 0,28 mm
Délka svaru: 0,15 mm

Gravírování:

Struktura pro retenci
maziva na tvrdých
kluzných plochách

**3D tisk kovu
z drátu**

Ocel, nerez, titan

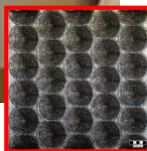


Nanesení kovových otěruvzdorných vrstev



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 lopátkové kolo s 6ti mezilopátkami.
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

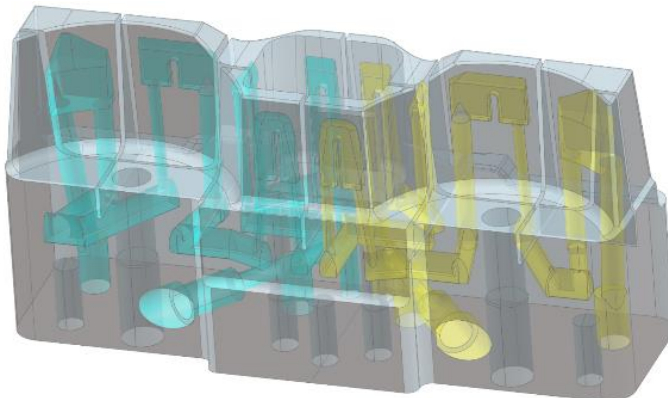
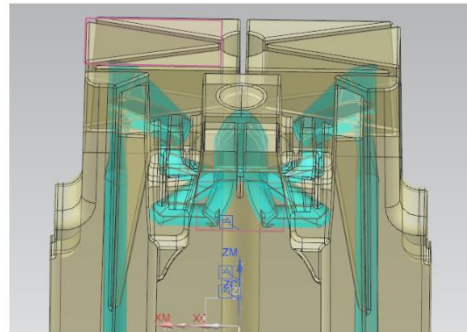
Hybridní technologie výroby na základě WAAM

- 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