CASE STUDIES Z PRŮMYSLOVÉ PRAXE

Zpráva o řešení praktických úloh vycházejících ze zadání průmyslové praxe formou Case studies

CASE STUDY č. 2

Název projektu:	**Zkvalitnění technického vzdělávání strojařů**
Kód projektu:	403401DYG5
Operační program:	Interreg VI-A Slovensko – Česko
Vedoucí partner:	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Hlavní přeshraniční partner:	Žilinská univerzita v Žilině

Téma řešené case study:	**Efektivita měření Kaplanovy lopatky**
Mentor za VŠB-TUO:	Ing. Ondřej Mizera, Ph.D.
Firemní mentor:	Jakub Strachota
Konzultant za ŽU v Žilině:	Ing. Richard Joch, PhD.
Zapojení studenti VŠB-TUO:	Michal Diviš Matěj Bittner Ondřej Vašíček
Zapojení studenti ŽU v Žilině:	Adam Daňa Milan Kaník

Popis řešeného problému v praxi:

V současné době je počítačová a digitální technika neodmyslitelnou součástí moderní výroby, zejména v oblasti strojírenství. Neustálý tlak na zvyšování přesnosti, spolehlivosti a efektivity výroby vede k postupnému ústupu tradičních měřidel a ručních kontrolních metod, které již nedokážou plně vyhovět současným nárokům průmyslu. Tyto konvenční přístupy jsou proto stále častěji nahrazovány automatizovanými souřadnicovými měřicími stroji (CMM – Coordinate Measuring Machines). CMM představují moderní nástroj metrologie, který se vyznačuje vysokou přesností, rychlostí a univerzálností. Díky svým pokročilým funkcím a schopnosti provádět měření jak kontaktním, tak i bezkontaktním způsobem se staly nezbytnou součástí výrobních podniků, které kladou důraz na kvalitu a přesnost svých produktů.

Velkou výhodou těchto měřicích systémů je jejich integrace s analytickými softwarovými nástroji, které umožňují komplexní zpracování naměřených dat, tvorbu protokolů a následné vyhodnocení geometrických odchylek. CMM tak přispívají nejen k řízení kvality, ale také k optimalizaci výrobních procesů a snižování zmetkovitosti.

Tento projekt je zaměřen na měření geometrických tolerancí funkčních ploch reálné lopatky Kaplanovy turbíny. Kaplanova turbína představuje axiální typ vodní turbíny, která přeměňuje tlakovou a kinetickou energii vody na energii mechanickou. Je určena pro menší až střední spády (do 100 metrů) a vyznačuje se schopností zpracovávat velké průtoky vody, dosahující až hodnoty 1000 $m^3 \cdot s^{-1}$. Díky natáčitelným lopatkám oběžného kola je schopna udržet vysokou účinnost i při proměnlivém průtoku vody, což ji činí velmi univerzálním strojem. Voda prochází turbínou rovnoběžně s její osou, přičemž interakce s lopatkami způsobuje rotaci oběžného kola a tím vznik mechanické energie.

Hlavní důraz práce bude kladen na metrologickou část, konkrétně na určení možností měření geometrických přesností lopatek a jejich vzájemných souvislostí. Experimentální část se zaměří na tvorbu vhodné metodiky měření, porovnání technologických postupů obrábění, vyhodnocení vlivu hloubky úběru na přesnost tvaru a analýzu drsnosti povrchu jednotlivých vzorků. Závěrečná část projektu se bude věnovat ekonomickému zhodnocení celého procesu měření a posouzení jeho finanční náročnosti ve vztahu k dosažené přesnosti a kvalitě měřených dílů.

Shrnutí realizace za období 04/2025 – 10/2025

04/2025 – 06/2025

Realizace projektu v daném období probíhala převážně na teoretické bázi formou systematického vyhledávání a analýzy odborných informací z aktuálních vědeckých článků, technických publikací a specializovaných webových zdrojů. Při zpracování byly využívány především práce ne starší než pět let, které reflektují současné trendy v oblasti metrologie a zabývají se principy i metodologií procesů měření. Studium dostupné literatury ukázalo, že v současné výrobní praxi není možné dosáhnout absolutně ideálních tvarů a rozměrů součástí. Každý vyrobený díl nese určitou míru geometrické odchylky, která je výsledkem kombinace různých vlivů – od omezené přesnosti výrobních zařízení, přes technologické a materiálové faktory, až po vliv lidského činitele. Aby bylo možné tyto odchylky omezit a zároveň zajistit funkčnost, spolehlivost a dlouhou životnost výrobků, stanovují se ve výkresové dokumentaci příslušné tolerance tvaru, rozměrů a polohy. Geometrické tolerance tak představují nezbytný nástroj řízení kvality, který umožňuje zachovat vzájemnou zaměnitelnost dílů a zaručit správnou funkci sestavy. S rostoucími požadavky na přesnost, efektivitu a standardizaci výroby se význam správného stanovení i měření těchto tolerancí neustále zvyšuje, což podtrhuje potřebu moderních metod a měřicích zařízení schopných zajistit vysokou úroveň přesnosti a reprodukovatelnosti výsledků.

07/2025 – 10/2025

Realizace projektu byla zaměřena na návrh a modelování vlastní lopatky Kaplanovy turbíny v moderních konstrukčních softwarech s cílem jejího využití pro vědecké a výzkumné účely. Každá Kaplanova lopatka je do určité míry jedinečná, neboť její geometrie se přizpůsobuje specifickým provozním podmínkám turbíny, jako jsou průtok, spád či požadovaný výkon. Tato variabilita představuje významnou výzvu při hodnocení geometrické přesnosti a efektivity měření, a proto byl vyvinut originální model lopatky, který slouží jako referenční vzorek pro experimentální analýzy. V rámci řešení projektu byl vytvořen trojrozměrný CAD model s definovanými funkčními plochami a

charakteristickými geometrickými prvky umožňujícími detailní studium procesu měření. Tento model je následně využíván pro simulace efektivity a přesnosti měření v prostředí specializovaných simulačních programů v off-line režimu, které umožňují testování různých přístupů bez nutnosti fyzické manipulace s reálnou součástí. Výsledky ze simulačních měření budou následně porovnány s daty získanými reálnými experimenty na souřadnicovém měřicím stroji (CMM) umístěném na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – Technické univerzity Ostrava. Tento přístup umožní ověřit správnost simulačních metod, optimalizovat měřicí postupy a posoudit vliv jednotlivých parametrů měřicího procesu na dosaženou přesnost, čímž přispěje k efektivnějšímu a spolehlivějšímu měření složitých tvarových součástí, jakými jsou lopatky vodních turbín.

Popis výsledku:

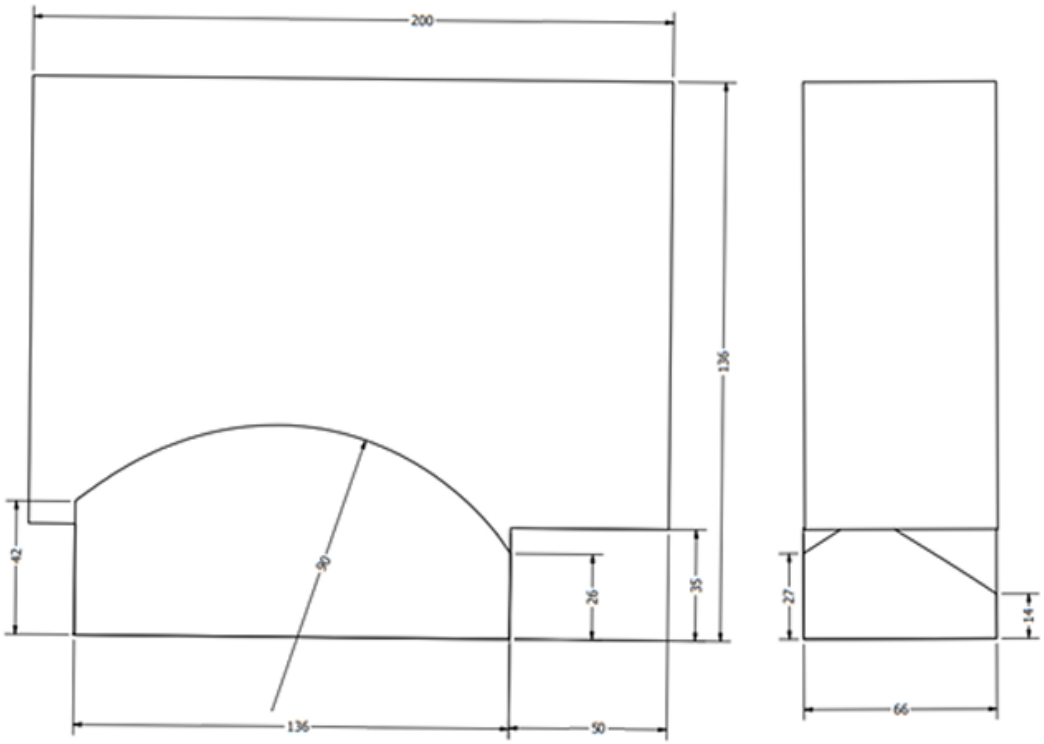
Experimentální vzorky lopatky Kaplanovy turbíny byly zhotoveny ze slitiny EN AW-7075, jejíž chemické složení je uvedeno v Tabulce č. 1. Tato hliníková slitina obsahuje příměsi hořčíku, křemíku a mědi, které přispívají ke snížení náchylnosti ke vzniku vrubů a zároveň omezují sklon k atmosférické korozi. Materiál se vyznačuje velmi dobrou obrobitelností i svařitelností a je dodáván ve stavu T6, tedy jako tepelně vytvrzený.

Slitina EN AW-7075 se uplatňuje v celé řadě průmyslových odvětví. V automobilovém průmyslu se používá například při výrobě nárazníků, další využití nachází v letectví a kosmonautice. Uplatnění má rovněž při výrobě šnekových převodů, ozubených kol a dalších obdobných strojních součástí. Mezi její nejvýznamnější vlastnosti patří především vysoká pevnost v tahu, která dosahuje hodnot 450-520 MPa, při tvrdosti 135-161 HBW. Ve specifických případech lze vhodným legováním zvýšit pevnost v tahu až na 600 MPa.

Tab. č. 1 - Chemické složení slitiny EN AW-7075

Značka	Si	Fe	Cu		Mn	Mg		Cr		Zn		Ti	Ostatní
Jednotka	Max	Max	Min	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Max	Max
[%]	0,4	0,5	1,2	2,0	0,3	2,1	2,9	0,18	0,28	5,1	6,1	0,2	0,15

Polotovar pro finální lopatku byl použit polotovar v rozměrech 200x136x66 dle výkresové dokumentace viz obr. 1.



Obr. č. 1 – polotovar

Porovnávané CAM softwary Hyper MILL a WorkNC jsou z technologického hlediska schopny obrábět v pěti osách souběžně. Dále mají podporu soudečkových nástrojů a možnost úpravy modelu v CAD prostředí. Frézovací operace mají tzv. „globální hodnotu tolerance“. Jedná se o hodnotu, kterou je uživatel schopen nastavit před procesem obrábění. Hodnota je doporučována pro hrubovací operaci 0,2 mm a pro operace dokončovací 0,02 mm. Zvolená velikost odchylky nám určuje o kolik se můžu nástroj během řezného procesu odklonit oproti naprogramované křivce. Tolerance je určována především pro plynulost chodu a zvýšení kvality povrchu.

Podporu metod PPC nabízí například **CAM software hyperMILL**. Tento software bezproblémově spolupracuje s nástroji skupiny PPC a podporuje souběžné pětiosé obrábění, které je pro tuto metodu téměř nezbytné. Součástí programu je také integrovaný CAD systém, díky němuž lze model upravovat přímo v softwaru; CAM prostředí následně automaticky přepočítá dráhy nástrojů. Nevýhodou hyperMILLu je však vyšší uživatelská náročnost, která může být pro méně zkušenou obsluhu bez předchozí praxe komplikovaná.

Dalším **CAM softwarem** podporujícím frézování metodou PPC je **WorkNC**. Jedná se o program zaměřený především na frézování, který byl pro experiment také využit. Z praktického hlediska byl WorkNC vyhodnocen jako přehlednější a uživatelsky příznivější. Stejně jako hyperMILL nabízí integrované CAD prostředí, skupiny příkazů i podskupiny obráběcích strategií. Obsahuje také speciální strategie určené pro obrábění lopatek, jejichž efektivní využití však vyžaduje odpovídající zaškolení a technickou podporu.

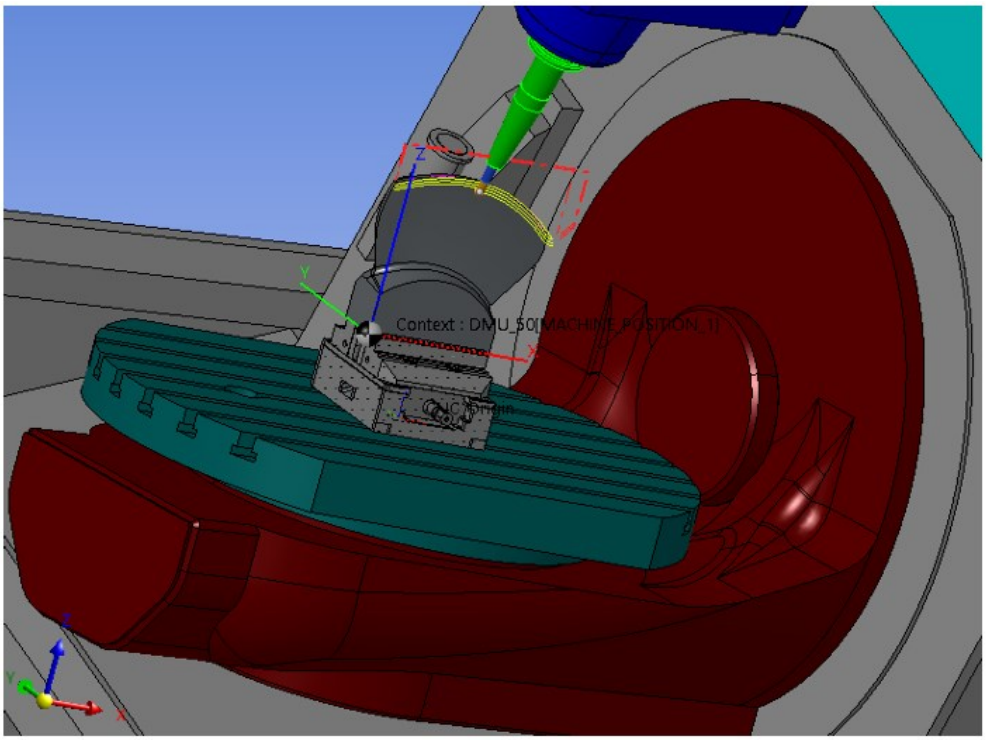
Tvorba programu v CAM softwaru začínala importem modelu ve formátu STP a jeho následnou kontrolou. Po nastavení nulového bodu byl model převeden do CAM prostředí, kde byla provedena kontrola součásti a nastavení přídavků materiálu. Následně byl vytvořen obráběcí program s využitím předdefinovaných funkcí. Na Obrázku č. 2 je znázorněn průběh obrábění metodou PPC v softwaru WorkNC. Ukázka obrábění lopatky Kaplanovy turbíny použité pro experiment je doplněna Tabulkou č. 3, která blíže specifikuje jednotlivé nástroje.

Technologie výroby byla navržena v několika krocích. Nejprve proběhlo hrubování nástrojem č. 1, kdy byla lopatka obrobena z první strany a následně po otočení i z druhé strany. Poté následovalo hrubování, respektive dohrubování nástrojem č. 2, jehož cílem bylo upravit plochy obrobené prvním nástrojem a zachovat konstantní přídavek 0,3 mm na plochách určených pro experimentální testování. Další operace zahrnovaly experimentální obrábění funkčních ploch lopatky kulovou frézou a metodou PPC. V závěrečné fázi byly vybrané plochy, například podstava, dokončeny nástrojem č. 5.

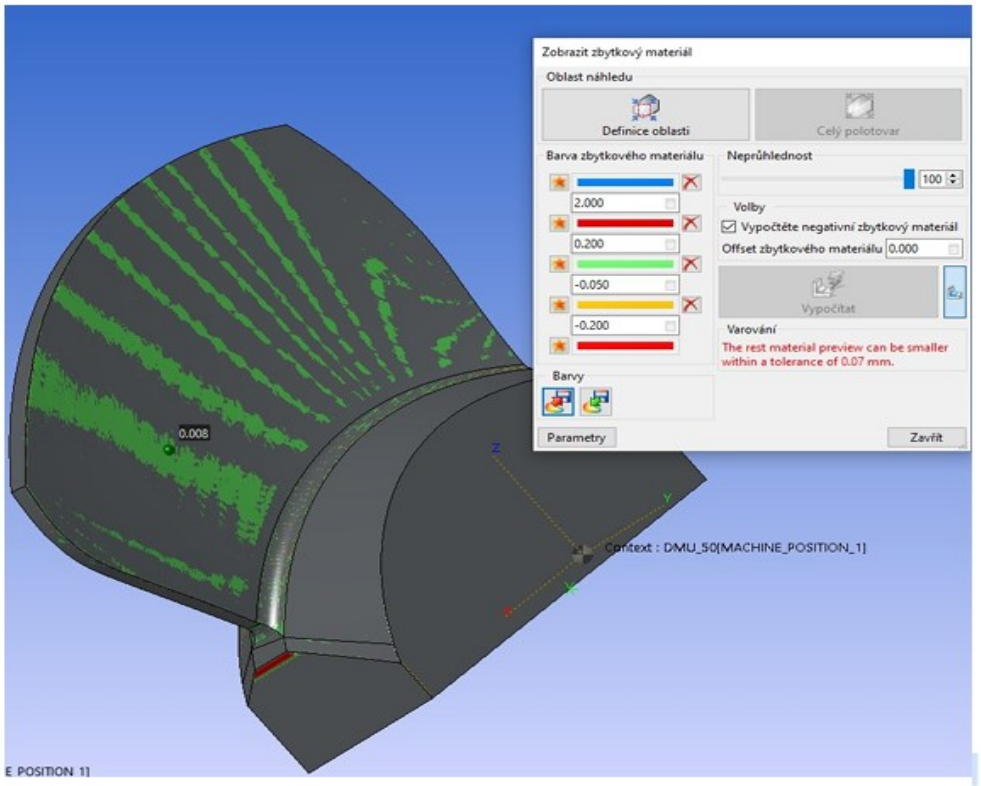
Tab. č. 2 – nástroje pro obrábění

Značení nástroje	Druh nástroje
Hrubovací nástroj č. 1	Monolitní ostrohranná stopková fréza Ø 12 mm
Hrubovací/dohrubovací nástroj č. 2	Frézovací hlava s kruhovými VBD R= 5 mm
Dokončovací nástroj č. 5	Monolitní fréza s kulovým čelem Ø 10 mm

Nastavení přídavku před experimentálním obrobením ploch lopatek byl 0,3 mm. Přídavek byl zvolen dle doporučení výrobce nástrojů, který uvedl rozsah přídavku pro nástroje v rozmezí 0,2–0,4 mm. Díky možnosti „Zobrazit zbytkový materiál“ bylo možné zjistit přídavky na obráběném dílci, odchylky od požadovaného rozměru a rozměr hotového výrobku. Pro přehlednost je možné nastavení barevného rozlišení u přídavků podle požadavků uživatele, a to velmi oceňuji. Experiment byl proveden na ploše lopatky, která je označena zeleno-šedou barvou na Obrázku č. 3, a poté na zrcadlově otočené straně.



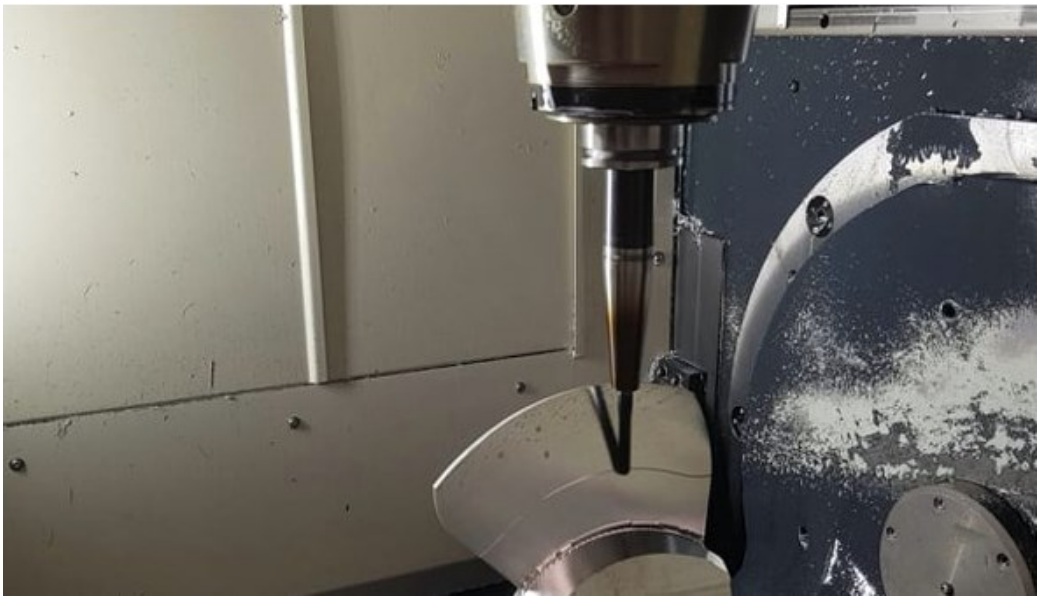
Obr. č. 2 - dráhy nástroje při obrábění PPC metodou v CAM softwaru WorkNC



Obr. č. 3 - zbytkový materiál v CAM softwaru WorkNC

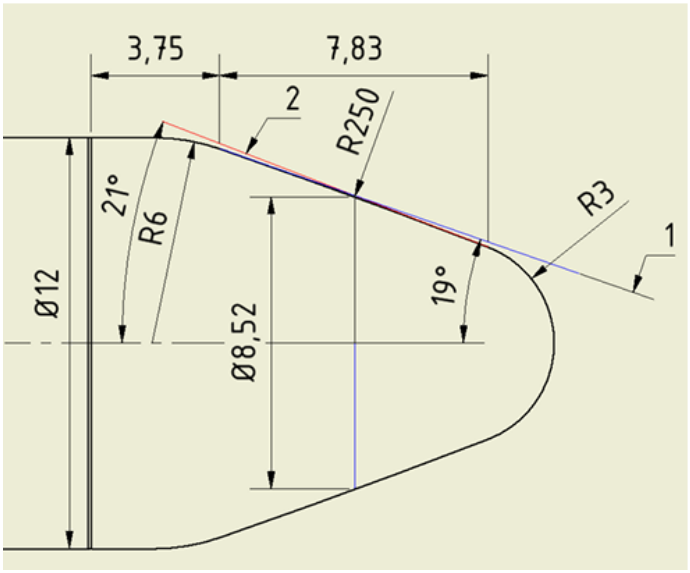
Při pětiosém obrábění byl nástroj nakloněn a naklopen, čímž se eliminovalo neefektivní obrábění. Naklonění kulové frézy vedlo ke zvětšení efektivního průměru nástroje a tím i ke zvýšení produktivity obrábění. Zvolen byl způsob vedení s pevnou orientací nástroje kolmo k ploše a s odklonem o úhel $\beta_f = 20° \pm 1°$. Tento postup byl zvolen tak, aby nedocházelo k rozdílnému odklonu kulové a soudečkové frézy vůči obráběné ploše.

Kulová stopková fréza byla upnuta v tepelném upínači, který zajišťuje vysokou přesnost i dostatečnou tuhost upnutí. Zvolený způsob upnutí je znázorněn na Obrázku č. 4. Tepelný upínač má zúžený profil, aby se zabránilo kolizi mezi obráběnou plochou lopatky a tělem upínače.



Obr. č. 4 – upnutí nástroje tepelného upínače

Pro obrábění lopatky Kaplanovy turbíny byl výrobcem Emuge-Franken doporučen soudečkový nástroj kónického tvaru. Toto provedení bylo zvoleno zejména s ohledem na možnost odklonu nástroje o $20°$ při obrábění a zároveň na využití největšího efektivního poloměru řezné části z nabízených variant. Nástroj je vhodný nejen pro obrábění ploch nepravidelných tvarů, mezi které patří i dříve zmíněná lopatka. Řezná geometrie byla navržena pro obrábění neželezných kovů a jejich slitin. Nástroj byl opatřen povlakem AlCr.



Obr. č. 5 – schéma použitelného soudečkového nástroje.

Pro experimentální porovnání byla zvolena soudečková fréza s postranním poloměrem R_2 = 250 mm a průměrem těla nástroje D = 12 mm, znázorněná na Obrázku č. 5. Na stejném obrázku je patrný také efektivní průměr nástroje d_{ef} = 8,52 mm, stanovený při sklonu $20°$ od osy nástroje. Tento rozměr je vymezen dvěma tečnami k postrannímu poloměru nástroje a byl určen numerickým výpočtem. Současně tyto tečny určují toleranci odklonu nástroje od osy v rozsahu $\pm 1°$, která byla následně použita jako parametr v CAM softwaru WorkNC.

Soudečková fréza byla pro experimentální obrábění upnuta v tepelném upínači, jehož princip je založen na rozdílné teplotní roztažnosti kovů. Upínač byl vybaven adaptérem Coromant Capto C4 a vnitřním průměrem 12 mm pro upnutí těla nástroje. Zvolen byl užší profil těla upínače, aby během naklápění a natáčení stolu s obrobkem nedošlo ke kontaktu s materiálem.

Tab. č. 3 – řezné parametry

Řezné parametry	Soudečková fréza	Kulová fréza
v_c [m · min^{-1}]	450	350
f_z [mm]	0,064	0,100
D_{eff} [mm]	8,52	6,90
f [mm·min^{-1}]	2148	2228
krok dokončení (a_p) [mm]	1,7	0,2
n [min^{-1}]	16812	16146

Výpočet řezných podmínek

Výpočet efektivního neboli skutečného průměru nástroje, který je vykloněn o úhel βf, dán vztahem pro frézu s kulovým čelem.

- $deff = D \cdot sin[arccos(D-2 \cdot ap\ /d\ ) \pm \beta f]$ [mm]
- $deff = 12 \cdot sin[arccos(12-2 \cdot 0{,}2\ /\ 12\ ) \pm 20]$ [mm]
- $\boldsymbol{deff = 6{,}85 \sim 6{,}9\ mm}$

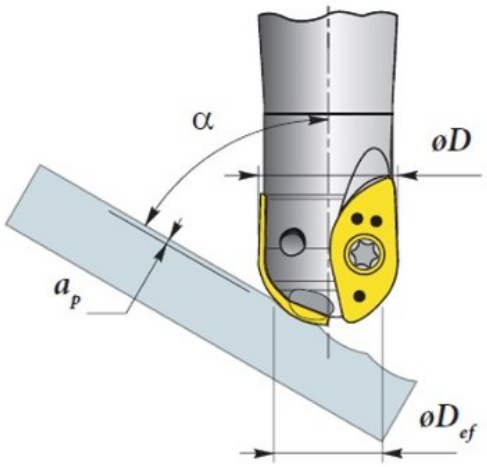
Kde:

a_p – axiální hloubka řezu [mm]

d_{eff} – efektivní průměr kulové frézy [mm]

D – průměr řezné části nástroje [mm]

β_f – úhel vyklonění nástroje a volím 20°



Obr. č. 6 - schéma parametrů pro výpočet efektivního průměru kulové frézy.

Výpočet efektivní neboli skutečné řezné rychlosti je dána vztahem.

- Pro kulovou frézu:

$$v_o = \frac{\pi \cdot d_{eff} \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot \left\{D \cdot sin\left[arccos\left(\frac{D-2 \cdot a_p}{d}\right) \pm \beta_f\right]\right\} \cdot n}{1000} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$v_o = \frac{\pi \cdot \left\{6{,}9 \cdot sin\left[arccos\left(\frac{6{,}9-2 \cdot 0{,}2}{12}\right) \pm 20\right]\right\} \cdot 16146}{1000} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$\boldsymbol{v_o = 350\ \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}}$$

kde:

v0 – skutečná řezná rychlost [mm·min-1]

n – otáčky [min-1]

• Pro soudečkový nástroj:

$$v_o = \frac{\pi \cdot d_{ef} \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot \left\{D \cdot sin\left[arccos\left(\frac{D-2 \cdot a_p}{d}\right) \pm \beta_f\right]\right\} \cdot n}{1000} \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$v_o = \frac{\pi \cdot \left\{8{,}52 \cdot sin\left[arccos\left(\frac{8{,}52-2 \cdot 1{,}8}{12}\right) \pm 20\right]\right\} \cdot 16812}{1000} \; [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$\boldsymbol{v_o = 450 \text{ mm.min}^{-1}}$$

kde:

def –efektivní průměr soudečkové frézy [mm]

Výpočet efektivního neboli skutečného posuvu na zub je dána vztahem:

- Pro kulovou frézu:

$$f_{z1} = h \cdot \sqrt{\frac{D_{eff}}{a_p}} \quad [mm]$$

$$f_{z1} = 0{,}017 \cdot \sqrt{\frac{6{,}9}{0{,}2}} \quad [mm]$$

$$\boldsymbol{f_{z1} = 0{,}1\ mm}$$

kde:

fz1 – posuv na zub pro kulovou frézu [mm]

– tloušťka třísky [mm]

• Pro soudečkový nástroj :

$$f_{z2} = 2 \cdot \sqrt{\left\langle R_x + \left[\left[R_x - \sqrt{R_x^2 - \left(\frac{f_{z2}}{2}\right)^2}\right] \cdot 1000\right]\right\rangle^2 - R_x^2} \quad [mm]$$

(3.2)

$$f_{z2} = 2 \cdot \sqrt{\left\langle 4{,}26 + \left[4{,}26 - \sqrt{4{,}26^2 - \left(\frac{0{,}064}{2}\right)^2}\right] \cdot 1000\right\rangle^2 - 4{,}26^2} \quad [mm]$$

$$\boldsymbol{f_{z2} = 0{,}064\ mm}$$

kde:

fz2 – posuv na zub pro soudečkovou frézu [mm]

Rx – efektivní poloměr nástroje [mm]

Výpočty předpokládaných drsnosti povrchu lopatky

Parametr teoretické drsnosti povrchu si můžeme zvolit nebo vypočítat podle parametrů kulové frézy a soudečkového nástroje v závislosti na našich požadavcích. Výpočet má stejný postup, a proto uvádím pouze výpočet soudečkového nástroje. Teoretická drsnost lze vypočíst podle vzorce:

$$R_{th} = [R_2 - \sqrt{R_2^2 - (\frac{a_{p2}}{2})^2}] \cdot 1000\ [\mu m]$$

$$R_{th} = [250 - \sqrt{250^2 - (\frac{1,7}{2})^2}\,] \cdot 1000\ [\mu m]$$

$$\boldsymbol{R_{th} = 1,45 \sim 1,5\ [\mu m]}$$

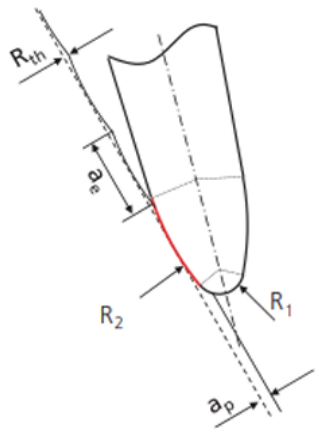
Porovnání teoretické efektivity nástrojů v závislosti na drsnosti obrobené plochy.

Schéma soudečkového nástroje s potřebnými parametry pro výpočet je zobrazen na Obrázku č. 13. Výpočet volby hloubky řezu pro soudečkovou frézu při zadaném parametru drsnosti R_{th} = 1,5 µm:

$$a_{p2} = 2 \cdot \sqrt{R_{th}(2 \cdot R_2 - R_{th})}\ [\text{mm}]$$

$$a_{p2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,5}{1000}(2 \cdot 250 - \frac{1,5}{1000})}\ [\text{mm}]$$

$$\boldsymbol{a_{p2} = 1,73 \sim 1,7\ \text{mm}}$$



Obr. č. 7 – Soudečkový nástroj při obrábění

Frézovací operace

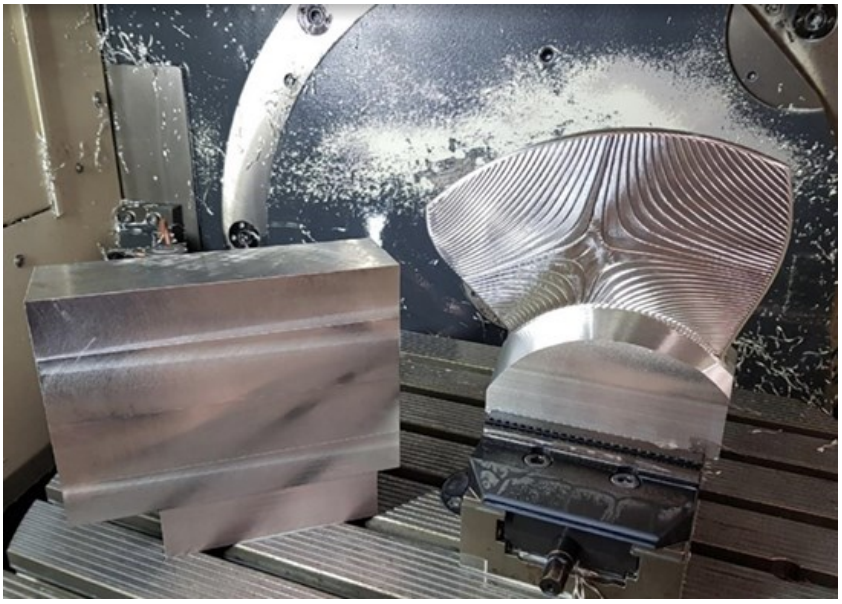
Hrubování nástrojem č.1

Pro hrubování byla použita ostrohranná stopková fréza průměr 12 mm, 1P330-1200XA 1620 se strategií Waveform hrubování. Metoda využívá velkou hloubku záběru a_p a malý radiální přísuv a_e, přičemž směrem ke středu obrobku vzniká kaskádovitý povrch. Řezné parametry jsou uvedeny v Tabulce č. 4.

Obrábění probíhalo ve třech osách s natočením stolu v ose B o $90°$. Po obrobení první strany byl stůl otočen v ose C o $180°$ a stejná strategie byla použita i pro druhou stranu.

Tab. č. 4 - řezné parametry pro hrubovací operaci:

Řezný parametr	Hodnota
v_c [m·min^{-1}]	350
f_z [mm]	0,108
f [mm·min^{-1}]	3000
a_p [mm]	25
n [min^{-1}]	9284



Obr. č. 8 - obrobek po hrubování prvním nástrojem

Hrubování nástrojem č.2

Druhá operace byla provedena frézovací hlavou o průměru D = 20 mm osazenou kruhovými VBD s rádiusem 5 mm. Řezné parametry jsou uvedeny v Tabulce č. 5. Operace byla určena k dohrubování povrchu s konstantním přídavkem 0,3 mm na plochách určených pro experimentální obrábění a byla realizována strategií „Globální hrub./dohrub.“ v softwaru WorkNC. Tento přídavek byl zvolen dle doporučení výrobce, aby byly zajištěny vhodné podmínky

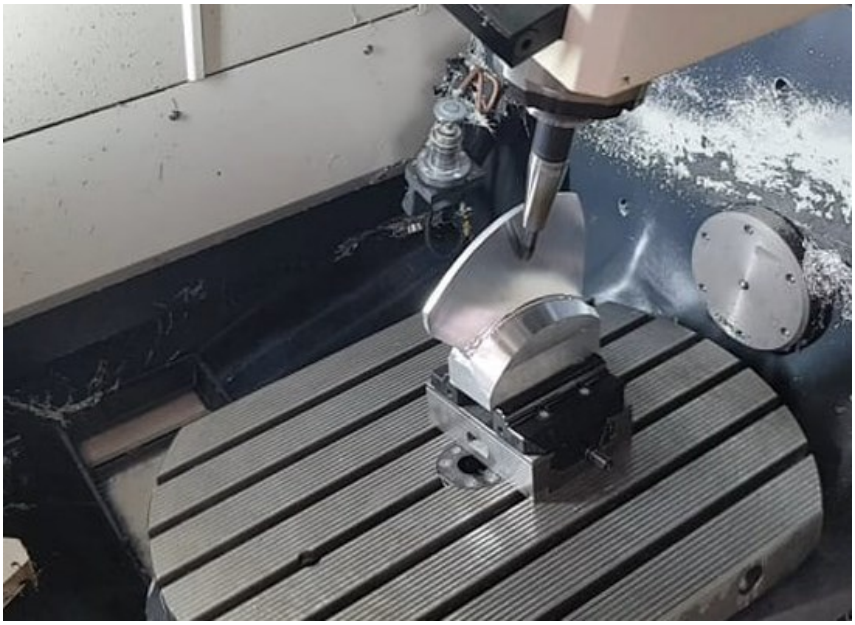
pro následné dokončovací operace a současně se předešlo stopám po předchozím obrábění.

Tab. č. 5 - řezné parametry pro hrubovací/dohrubovací operaci:

Řezný parametr	Hodnota
v_c [m·min^{-1}]	350
f_z [mm]	0,2
f [mm·min^{-1}]	2228
a_p [mm]	1
n [min^{-1}]	5570

Metoda výroby PPC

Experimentální obrábění soudečkovou frézou bylo v CAM softwaru realizováno strategií „5-axis Offset Obrábění“. Nástroj byl odkloněn o úhel $\beta_f = 20° \pm 1°$, aby bylo obráběno nejefektivnější částí jeho řezné oblasti; problematika této volby je popsána v kapitole 2.6. Geometrická tolerance byla, stejně jako při obrábění kulovou frézou, nastavena na 0,02 mm. Průběh obrábění plochy lopatky metodou PPC je znázorněn na Obrázku č. 18, kde je rovněž patrná malá vzdálenost mezi tepelným upínačem a plochou obrobku.



Obr. č. 9 - experimentální obrábění PPC metodou

Dokončení nástrojem č. 5

Pro dokončovací operace byla použita fréza s kulovým čelem o průměru D = 10 mm. Řezné parametry jsou uvedeny v Tabulce č. 6. Dokončovány byly plochy mimo oblast experimentálního obrábění, konkrétně podstava, boční a horní strana lopatky, zobrazené na Obrázku č. 10. Tyto tvarové plochy

nejsou pro ostrohranné frézy vhodné, zejména z hlediska dosažení požadované kvality povrchu a geometrické přesnosti.

Tab. 6 - řezné parametry pro dokončovací operaci

Řezný parametr	Hodnota
v_c [m·min^{-1}]	350
f_z [mm]	0,08
f [mm·min^{-1}]	1782
a_p [mm]	0,2
n [min^{-1}]	11140



Obr. č. 10 - Plochy pro dokončení kulovou frézou

Porovnání obráběcích časů

Při programování v CAM systému byl zjištěn výrazný rozdíl v obráběcích časech mezi kulovou frézou a soudečkovým nástrojem. Software WorkNC uváděl při použití kulové frézy téměř osminásobně delší čas oproti soudečkovému nástroji. V Tabulce č. 7 jsou uvedeny hodnoty z WorkNC, simulace řídicího systému Heidenhain iTNC 530 i skutečně naměřené časy. Uvedené výsledky se vztahují pouze k experimentálnímu obrábění jedné strany lopatky.

Tab. č. 7 - časy při obrábění jedné strany lopatky

	Soudečkový nástroj	Kulová fréza
WorkNC [s]	420	3 600
Odhadovaný čas simulace v Softwaru Heidenhain [s]	510	4 260
Skutečný (naměřený) čas [s]	540	4 380

Z Tabulky č. 7 vyplývá výrazný rozdíl v obráběcích časech mezi soudečkovým nástrojem a kulovou frézou. Ve skutečně naměřeném čase byl při použití kulové frézy zaznamenán více než osminásobný nárůst. Tento výrazný rozdíl potvrdily také hodnoty získané ze simulací v softwarech WorkNC a Heidenhain. Podrobnější vyhodnocení časů je uvedeno v kapitole 4.1.

Odchylka mezi časem odhadovaným simulací v softwaru Heidenhain a skutečně naměřenou hodnotou byla pravděpodobně způsobena obsluhou stroje. Při prvním nájezdu bylo nutné snížit rychloposuv a průběh obrábění kontrolovat, aby se předešlo případné kolizi nástroje s obrobkem nebo upínače s natáčecím stolem stroje.

Rozdíl mezi skutečně naměřeným časem a hodnotou odhadovanou softwarem WorkNC činil přibližně 20%, přičemž WorkNC uváděl kratší čas. Tuto odchylku lze pravděpodobně přičíst nepřesnému započtení přejezdů nástroje mimo řezný proces. Při dalším využití softwaru WorkNC je proto vhodné počítat s přibližně 20% navýšením oproti uváděnému času. Přesnější stanovení této odchylky by však vyžadovalo vyhodnocení většího počtu operací.

Hodnocení drsnosti

Před měřením bylo nutné povrch důkladně očistit a nechat obrobek teplotně ustálit. Následovalo nasvětlení součásti, zaostření plochy a nastavení základních parametrů měřicího cyklu. Samotné měření pak probíhalo automaticky bez zásahu obsluhy. Na každé experimentálně obrobené straně lopatky bylo měření provedeno v devíti místech o velikosti 5 x 5 mm, přičemž v každé oblasti byla pro statistické vyhodnocení provedena ještě tři dílčí měření o rozměru 2,5 x 2,5 mm.

		Parametr				
		Ra [µm]	*Sa* [µm]	*Rz* [µm]	*Sz* [µm]	*RSm* [mm]
Číslo pozice měření	1	0,936	0,991	6,233	11,331	0,058
	2	0,845	0,885	5,855	10,213	0,073
	3	1,196	1,290	6,010	14,282	0,051
	4	0,933	0,940	6,547	12,322	0,051
	5	0,803	0,852	5,005	13,664	0,073
	6	0,966	1,003	6,352	12,711	0,049
	7	0,955	1,050	6,392	16,186	0,051
	8	0,769	0,783	4,880	11,771	0,064
	9	0,855	0,915	6,810	17,250	0,058
Průměrná aritmetická úchylka	X	**0,918**	**0,968**	**6,01**	**13,3**	**0,059**

Obr. č. 10 - vyhodnocení drsnosti první obrobené strany kulovou frézou

		Parametr				
		Ra [µm]	*Sa* [µm]	*Rz* [µm]	*Sz* [µm]	*RSm* [mm]
Číslo pozice měření	1	0,852	0,943	5,610	13,683	0,050
	2	0,945	0,965	6,419	14,010	0,057
	3	1,216	1,212	6,590	16,521	0,053
	4	0,896	0,956	6,065	15,654	0,061
	5	0,967	1,001	6,453	15,472	0,055
	6	1,312	1,278	9,115	14,774	0,060
	7	0,826	0,876	5,270	12,933	0,055
	8	0,884	0,957	6,574	14,895	0,063
	9	0,959	1,031	7,251	14,751	0,046
Průměrná aritmetická úchylka	X	**0,984**	**1,024**	**6,590**	**14,740**	**0,056**

Obr. č. 11 - vyhodnocení drsnosti druhé obrobené strany kulovou frézou

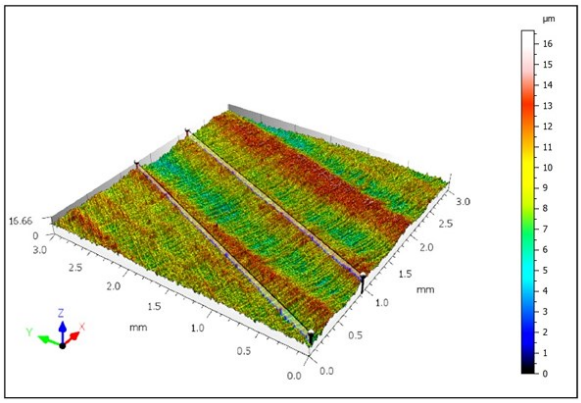
		Parametr				
		Ra [µm]	*Sa* [µm]	*Rz* [µm]	*Sz* [µm]	*RSm* [mm]
Číslo pozice měření	1	0,881	0,981	6,485	13,571	0,038
	2	0,945	0,726	4,644	16,163	0,060
	3	0,631	0,985	5,101	12,364	0,040
	4	0,753	0,935	5,889	11,565	0,041
	5	0,824	0,802	6,011	15,711	0,049
	6	0,932	1,156	7,394	13,162	0,041
	7	0,811	0,938	6,222	13,510	0,036
	8	0,482	0,585	2,981	9,745	0,066
	9	0,720	0,800	5,384	12,722	0,042
Průměrná aritmetická úchylka	X	**0,775**	**0,879**	**5,57**	**13,16**	**0,046**

Obr. č. 12 - vyhodnocení drsnosti obrobené strany soudečkovou frézou

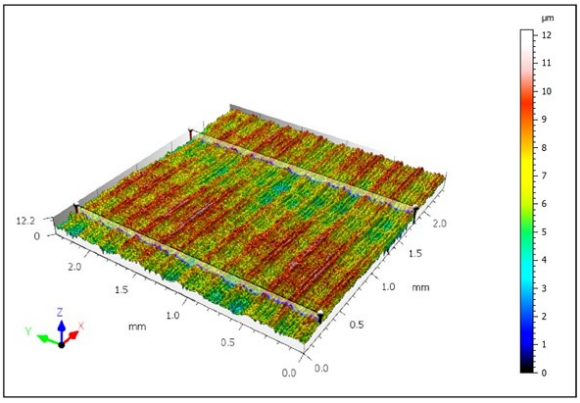
		Parametr				
		Ra [µm]	*Sa* [µm]	*Rz* [µm]	*Sz* [µm]	*RSm* [mm]
Číslo pozice měření	1	0,864	1,060	7,547	15,001	0,041
	2	1,262	1,250	8,858	14,810	0,045
	3	1,176	1,305	7,640	15,012	0,043
	4	0,864	1,088	6,646	15,631	0,041
	5	0,917	1,104	8,373	14,070	0,051
	6	0,941	1,025	7,419	14,103	0,037
	7	0,583	0,752	4,871	13,274	0,049
	8	0,541	0,656	4,304	12,037	0,044
	9	0,788	0,905	5,945	16,051	0,039
Průměrná aritmetická úchylka	X	**0,882**	**1,016**	**6,84**	**14,44**	**0,043**

Obr. č. 13 - vyhodnocení drsnosti obrobené strany soudečkovou frézou

Povrch byl vyhodnocen podle normy ČSN EN ISO 4288, konkrétně na základě pravidla 16% . Toto pravidlo je splněno, pokud méně než 16% naměřených hodnot parametru na měřené délce překročí stanovenou horní mez. Dolní mez se určuje obdobným způsobem.



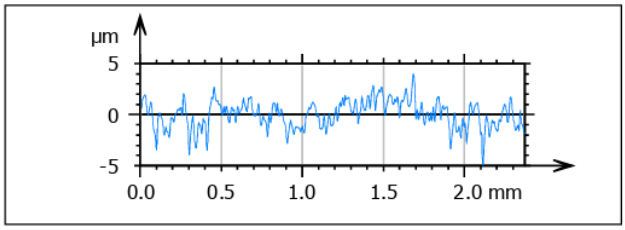
Obr. č. 14 - 3D grafické znázornění obrobeného povrchu soudečkovou frézou



Obr. č. 15 - 3D grafické znázornění obrobeného povrchu kulovou frézou

Na Obrázku č. 15 je zobrazena struktura povrchu po obrábění kulovou frézou. Povrch tvoří vrcholky, znázorněné červenou až bílou barvou, a krátery v tmavě modré oblasti. Zřetelně jsou patrné také stopy po nástroji, tedy takzvané řádkování, přičemž odchylky se vyskytují téměř v každé stopě. Kolmo ke směru obrábění jsou vedeny profily povrchu, podle nichž bylo provedeno další vyhodnocení.

Grafická textura povrchu po soudečkové fréze je zobrazena na Obrázku č. 14. Ve srovnání s kulovou frézou je na první pohled patrný nižší počet přejezdů nástroje. Maximální hodnoty vrcholků se u kulové frézy pohybují přibližně kolem 0,01 mm, zatímco u soudečkového nástroje dosahují až 0,016 mm. Rozdíl mezi minimálními a maximálními hodnotami může být způsoben odchylkou od nastaveného úhlu, nižší plynulostí pohybu natáčeného a naklápěného stolu vlivem stáří stroje, nevhodně generovanými drahami v CAM softwaru, chvěním nástroje nebo obrobku při úběru materiálu i délkou vyložení nástroje a upínače.

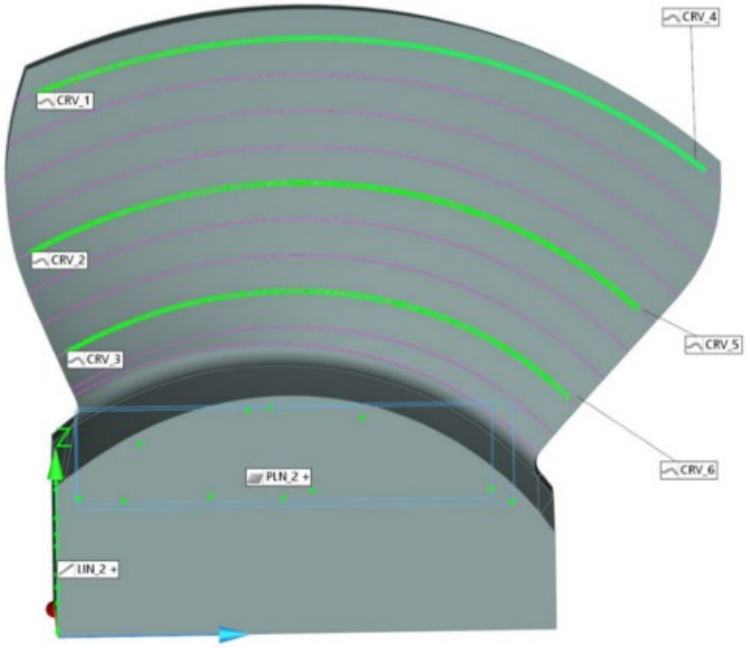


Obr. č. 16 - průběh drsnosti povrchu v místě řezu měřené plochy

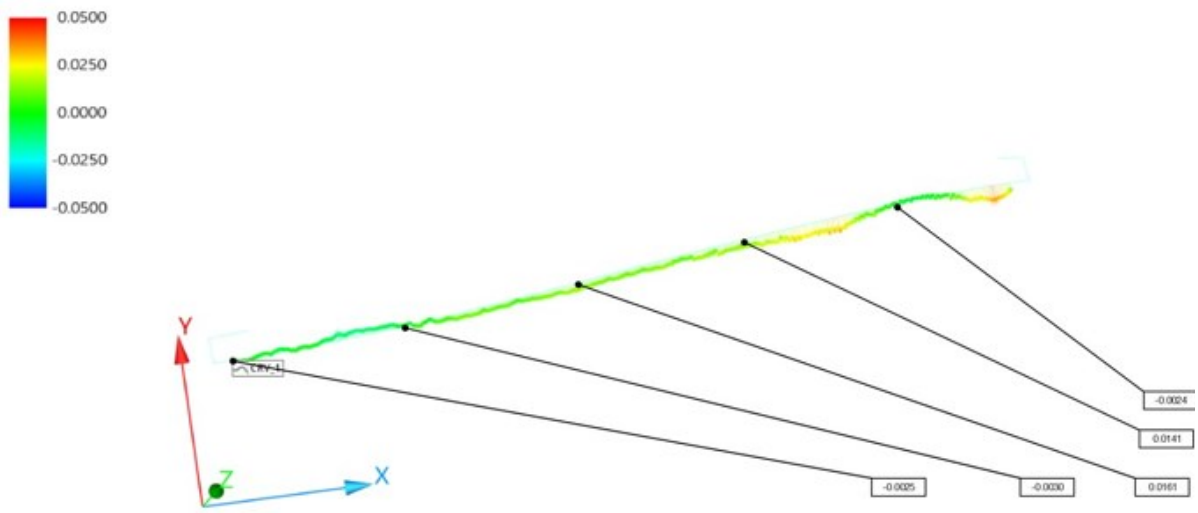
Měření na CMM

Souřadný systém byl zvolen v levém rohu dna podstavy při pohledu na levou stranu lopatky. Vyhodnocovaná strana byla snímána ve třech úrovních pomocí křivek, které byly následně porovnávány s nominálním modelem. Pro ukotvení souřadného systému byl na křivkách použit lokální Bestfit, čímž se omezil vliv nepřesností při ustavení vůči podstavě. Zvolené křivky byly vyhodnoceny snímáním bodů po celé jejich délce a v tabulce jsou uvedeny naměřené minimální a maximální hodnoty. Poloha křivek i nulového bodu je znázorněna na Obrázku č. 17.

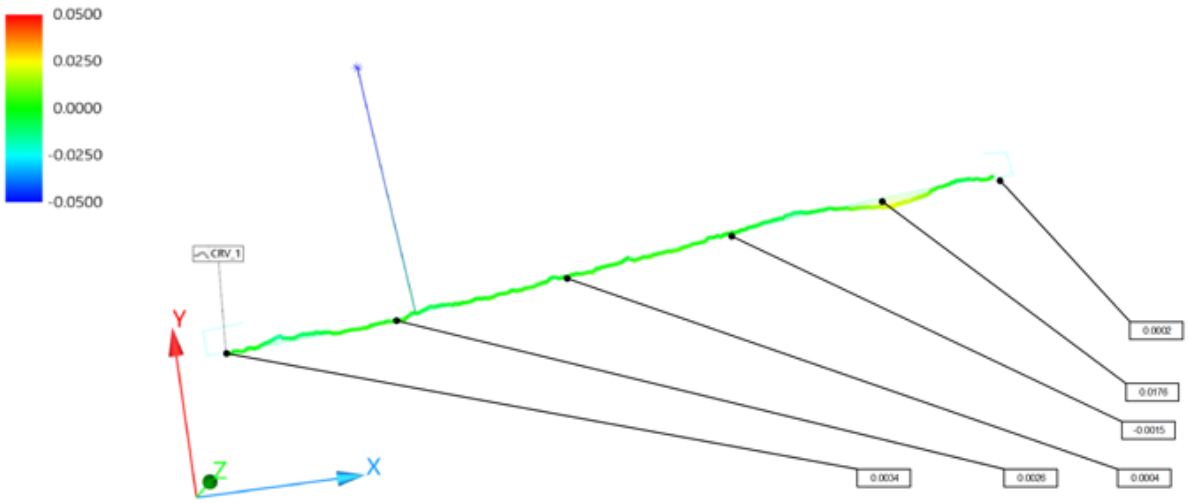
Číslo křivky	Rozmezí hodnot	Kulovka levá strana	Soudeček levá strana	Kulovka pravá strana	Soudeček pravá strana
1	min.	-0,009	-0,015	0,059	0,030
	max.	0,0234	0,034	0,085	0,064
2	min.	-0,009	-0,009	0,044	0,030
	max.	0,008	0,007	0,136	0,091
3	min.	-0,001	-0,012	-0,005	-0,010
	max.	0,015	0,009	0,008	0,007



Obr. č. 17 - levá strana modelu lopatky s křivkami pro měření



Obr. č. 18 - první měřená křivka lopatky obrobená soudečkovou frézou



Obr. č. 19 - první měřená křivka lopatky obrobená kulovou frézou

Na Obrázku č. 19 můžete vidět první měřenou křivku „CRV_1“ kulové frézy, kdy v 1/3 křivky se vyskytla nahodilá nízká hodnota. Povrch byl poškozen neopatrným zacházením obsluhy při manipulaci mezi měřícími operacemi, kdy na povrchu vytvořila vryp. Povrch ve zmíněném místě vykázal hodnotu -0,5768 mm, a to považuji za jednoznačnou hrubou chybu, a proto ji do Tabulky neuvádím. Na Obrázku č. 18 je uvedena první křivka po soudečkové fréze a Obrázek č. 19 zobrazuje pro porovnání prvotní křivku frézy kulové. Křivky jsou podobného mírně vlnitého průběhu, který po celé délce kolísá kolem nuly. Podobný průběh křivek naznačují minima a maxima uvedena v obrázku č. 17.

Vyhodnocení úspory času

Jedním ze způsobů, jak ve strojírenské výrobě zlepšit ekonomické výsledky, je zkrácení výrobních časů. Tím se zvyšuje efektivita procesu a současně i počet vyrobených kusů za stejný čas. Tato kapitola se zaměřuje na vyhodnocení reálných výsledků obrábění lopatky, pro běžnou výrobu čtyř lopatek pro jednu turbínu s oběžným průměrem náboje 500 mm, stejně jako výpočty pro větší počet turbín.

Rozdíl ve výrobním čase funkčních ploch jedné lopatky přesáhl 80% ve prospěch soudečkové frézy oproti kulové. Při hodinové sazbě 1500kč/h představovala úspora při výrobě první lopatky 3150kč. Již při výrobě prvního kusu se tak téměř vyrovnal rozdíl v pořizovací ceně nástrojů. Při výrobě dalších lopatek pak dochází k výrazné úspoře času i nákladů. Vzhledem k možnosti využití soudečkové frézy na většině tvarových ploch lze očekávat její pozitivní ekonomický přínos pro výrobní proces.

Tab. č. 8 – čas a ceny výroby lopatek

Počet vyráběných kusů lopatek [ks]	1	4	8	25	50
Soudečková fréza [h]	0,3	1,2	2,4	7,5	15
Kulová fréza [h]	2,4	9,7	19,5	60,75	121,5
Úspora času při použití soudečkové frézy oproti kulové [h]	2,1	8,5	17,1	53,25	106,5
Finanční úspora použitím soudečkové frézy [Kč]	3 150	12 600	25 200	78 750	157 500

Vyhodnocení drsnosti povrchu

V Tabulce č. 9 jsou uvedeny aritmetické průměry vyhodnocených parametrů drsnosti R_z, R_a, S_z, S_a a R_{Sm}, zvolených pro vzájemné porovnání. Parametr R_z byl měřen v příčném směru, tedy kolmo na směr posuvu. U obou nástrojů vyšlo první měření lépe než měření na druhé ploše, což lze přičíst vyššímu chvění lopatky při obrábění užšího profilu. Další možnou příčinou bylo otupení nástroje, které mohlo zvýšit vibrace nástroje i obrobku.

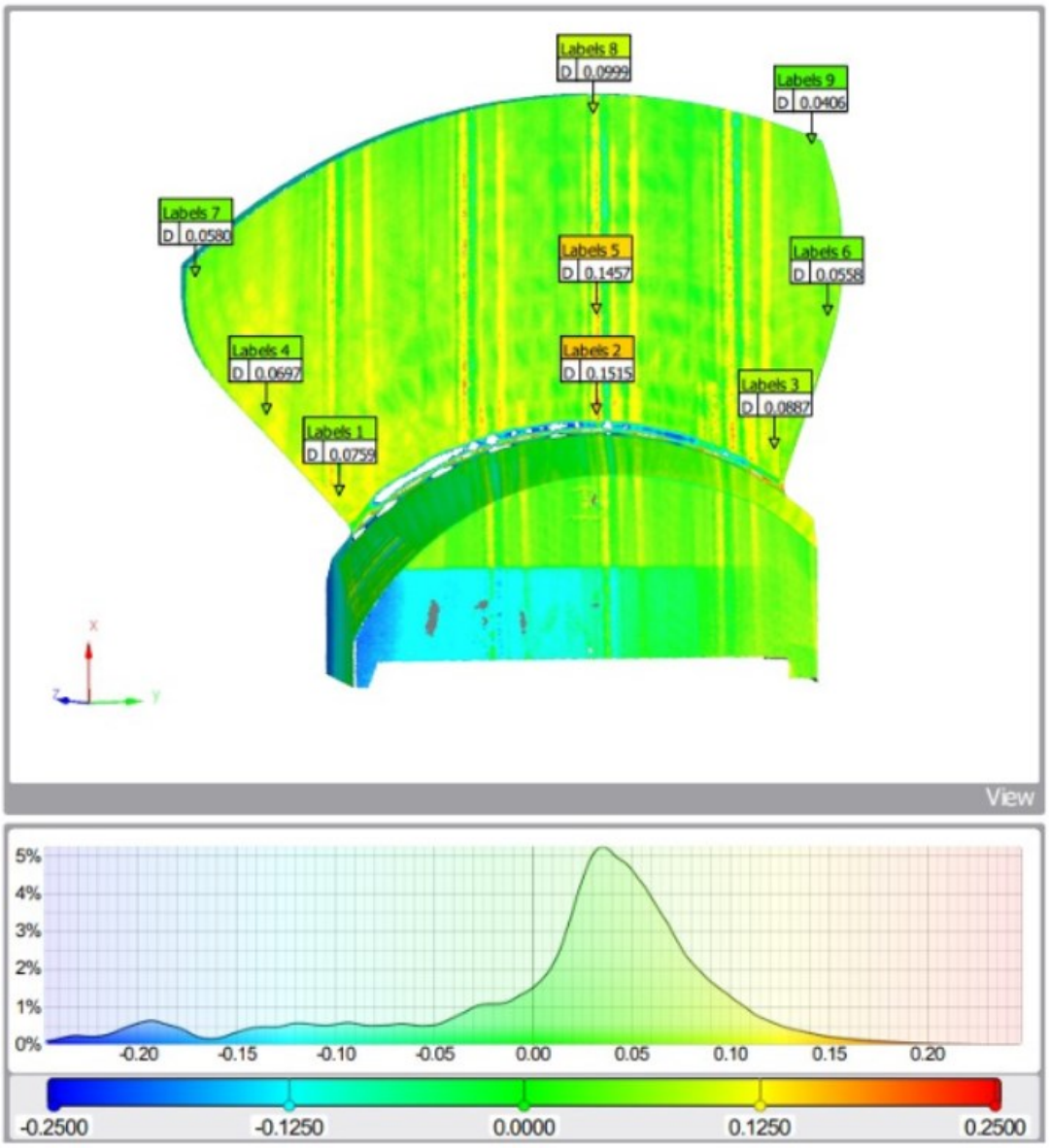
Při porovnání výsledků po obrábění kulovou a soudečkovou frézou byla mírně lepší kvalita povrchu zjištěna u soudečkové frézy. Rozdíly v jednotlivých parametrech však dosahovaly pouze jednotek procent. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že oba nástroje poskytují z hlediska kvality obrobeného povrchu srovnatelné výsledky.

Tab. č. 9 - porovnání průměrné aritmetické úchylky naměřených hodnot

Parametr	Soudečková fréza první měření	Soudečková fréza druhé měření	Kulová fréza první měření	Kulová fréza druhé měření
Ra [µm]	0,775	0,882	0,918	0,984
Rz [µm]	5,570	6,840	6,010	6,590
Sa [µm]	0,879	1,016	0,968	1,024
Sz [µm]	13,160	14,440	13,301	14,740
RSm [µm]	0,046	0,043	0,059	0,056

Vyhodnocení lopatek

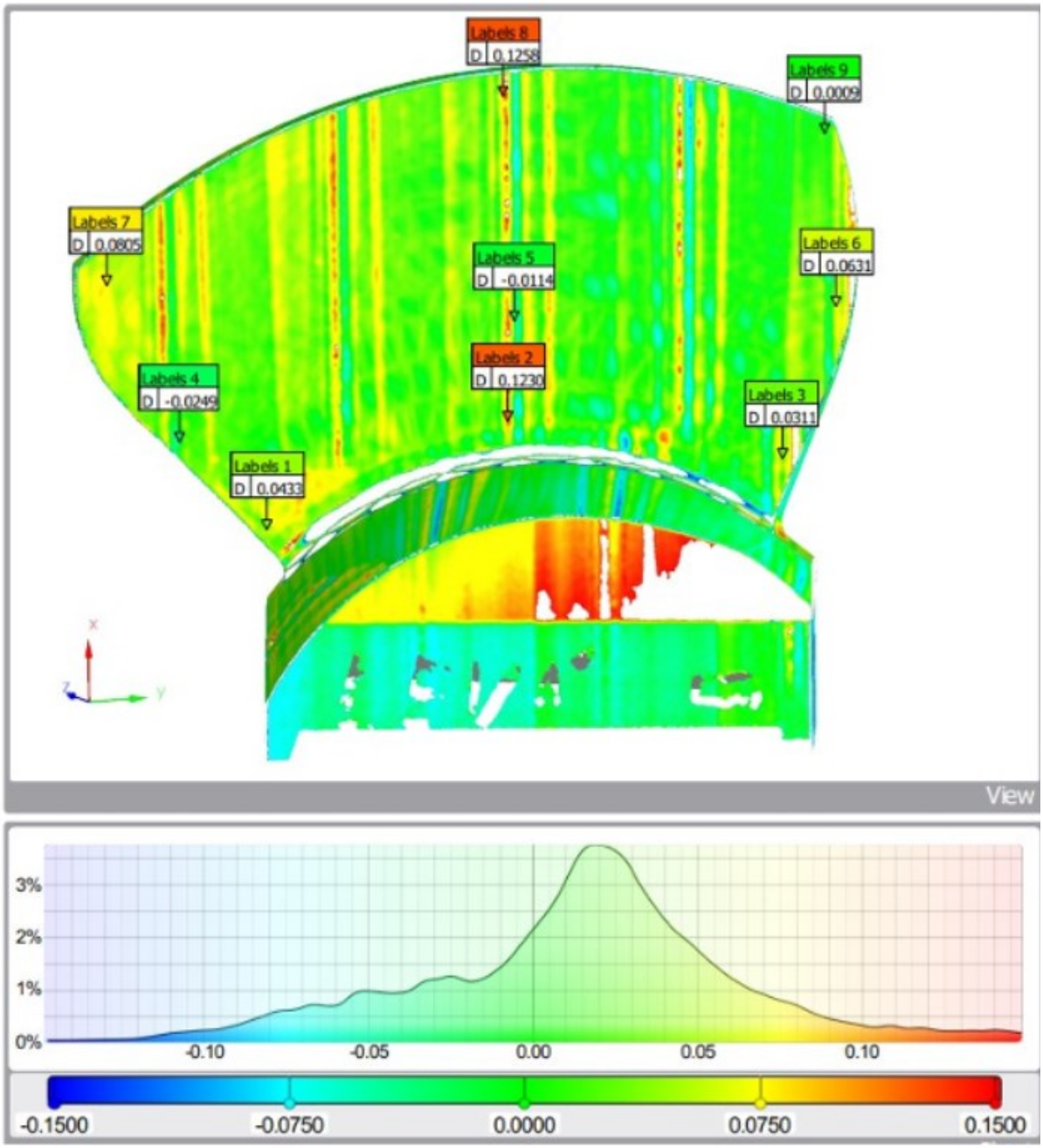
Pomocí CAD modelu s promítnutým skenem bylo možné vyhodnotit nepřesnosti vzniklé při výrobě. Ty byly způsobeny například vibracemi nástroje a obrobku nebo pohybem stolu při jeho naklápění a natáčení během obrábění. Pro vyhodnocení byla u kulové frézy zvolena tolerance 0,25 mm, zatímco u soudečkové frézy 0,15 mm. Přestože skeny působí v barevném spektru velmi podobně, byly hodnoceny při odlišných tolerancích, aby byla zřetelněji patrná minima a maxima obrobené plochy.



Obr. č. 20 - sken obrobené levé strany lopatky kulovou frézou.

V dolní části Obrázků č. 20 a 21 je zobrazena Gaussova křivka charakterizující velikost a četnost vzniklých nepřesností. Toto grafické vyjádření umožňuje přehledně posoudit rozložení naměřených odchylek a určit oblast jejich nejčastějšího výskytu. Křivka má typický průběh s patrným maximem.

U kulové frézy se nejvyšší četnost nepřesností pohybuje v rozmezí 0,01 – 0,08 mm, kde se soustřeďuje největší množství naměřených hodnot. Při nepřesnostech vyšších než 0,01 mm četnost výskytu výrazně klesá na jednotky procent. V oblasti záporných hodnot křivka od 0,01 mm dále mírně kolísá, avšak nepřekračuje hranici 0,01 mm četnosti výskytu.



Obr. č. 21 - sken obrobené levé strany lopatky soudečkovou frézou

Závěr vyhodnocení

Experiment byl proveden na lopatce Kaplanovy turbíny, jejíž funkční plochy byly obráběny kulovou a soudečkovou frézou při stejném pevném náklonu nástroje. Kulová fréza měla efektivní průměr d_{ef} = 6,9 mm, zatímco soudečková fréza d_{ef} = 8,2 mm. Hlavní rozdíl spočíval v kroku dokončení a řezných podmínkách, díky čemuž byla soudečková fréza výrazně produktivnější. Časová úspora při obrábění jedné lopatky činila 2,1h. ve prospěch soudečkové frézy, což představuje významný ekonomický přínos zejména při výrobě více kusů.

Přestože soudečková fréza vykazovala vyšší řezný odpor a vibrace, dosáhla srovnatelných nebo lepších hodnot drsnosti povrchu než fréza kulová. Porovnání bylo provedeno pomocí plošných parametrů S_a a S_z a profilových parametrů R_{Sm}, R_a a R_z, doplněných o skenování ploch a jejich porovnání s modelem. Výsledky ukázaly celkově srovnatelnou kvalitu povrchu po celé ploše lopatky, přičemž lepších hodnot bylo u obou nástrojů dosaženo na první straně lopatky. Soudečkovou frézu lze proto doporučit jako efektivnější variantu všude tam, kde to technologické podmínky umožňují.