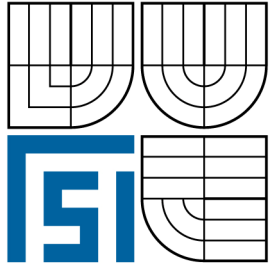




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE OBRÁBĚNÍ OBĚŽNÝCH LOPATEK PARNÍ TURBÍNY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK CHROMÝ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2011

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na řešení problematiky optimalizace obrábění oběžných lopatek parní turbíny. Hlavním cílem je vyhodnocení cenových nákladů břitových destiček hrubovacího nástroje ve vztahu na použitou řeznou rychlost.

Klíčová slova

Optimalizace obrábění, cenové náklady břitových destiček, řezná rychlost

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on optimization of steam turbine rotor blades machining. Main goal is evaluate spending cost of the roughing mill cutting inserts in relation to cutting speed.

Key words

Machining optimization, spending cost, cutting inserts, cutting speed

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHROMÝ MAREK. *Optimalizace obrábění oběžných lopatek parní turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 37s., 1 příloha. Vedoucí bakalářské práce. Doc. Ing. Anton Humár CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma optimalizace obrábění oběžných lopatek parní turbíny vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Marek Chromý

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Antonovi Humárovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod	8
1 Siemens Industrial Turbomachinery ¹	9
1.1 Historie společnosti.....	9
1.2 Oblast výroby	10
2 HodnoCeNí technologičnosti konstrukce výroby oběžných lopatek.....	11
2.1 Dodržení tvaru a geometrie součástí	11
2.2 Dodržení výrobních úchylek rozměrů	12
2.3 Zvýšení produktivity práce a efektivnosti výroby	12
3 Návrh polotovaru a výpočet normy spotřeby materiálu	12
3.1 Polotovar	12
3.2 Výpočet normy spotřeby materiálu.....	12
4 Původní technologie výroby oběžné lopatky	13
4.1 Technologický postup.....	14
4.1.1 Řezání, přenesení atestu materiálu	14
4.1.2 Frézování tvaru lopatky	14
4.1.3 Broušení, odjehlení lopatky	14
4.1.4 Kontrola prvního kusu, konečná kontrola	14
4.2 Strojní zařízení	15
Pětiosé obráběcí CNC centrum:	15
Brusírna lopatek:.....	16
Měření lopatek:	16
4.3 Nástroje	16
4.3.1 Upínače fréz	16
4.3.2 Frézy.....	17
4.3.3 Měřidla	18
4.4 Opatření výměnných břitových destiček	18
5 návrh nové technologie opracování.....	19
5.1 Změna technologického postupu	19
5.2 Změna nástrojů, dodavatele.....	19
5.3 Změna rezných podmínek.....	20
6 Analýza opotřebenění destičkových nástrojů	20
6.1 Popis měření opotřebenění VBD	20
6.2 Výsledky měření.....	21
6.2.1 První operace hrubování.....	21
6.2.2 Shrnutí výsledků měření první operace hrubování lopatky	24
6.2.3 Druhá operace hrubování	25
6.2.4 Shrnutí výsledků měření druhé operace hrubování lopatky	28
7 Porovnání původní a nové technologie.....	29
7.1 Vyhodnocení hřbetního opotřebenění.....	29
7.2 Bezpečný počet opracovaných kusů lopatek	30
7.3 Snížení spotřeby vyměnitelných břitových destiček.....	30
7.4 Úspora času operace hrubování	30

Závěr	32
Seznam použitých zdrojů	33
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	34
Seznam příloh	35

ÚVOD

Oběžné lopatky jsou jednou ze základních částí parní turbíny. Jejich tvar, velikost, počet a způsob uchycení v rotoru je závislé na vstupních parametrech páry, celkového výkonu zařízení, či požadovanému zpracování páry.

Velké množství oběžných lopatek, časová a technologická náročnost výroby přímo ovlivňuje cenu zařízení. Správnou volbou technologie výroby lze tato cena optimalizovat. Jedním z hlavních cenových nákladů je cena použitých nástrojů a výrobní cena.

Právě u parních turbín pro průmyslové využití, kde se neopakují stejné typy oběžných lopatek, není možno lopatky vyrábět z jiného polotovaru, než je válcovaná tyč obdélníkového průřezu. Tím ale vznikají vysoké nároky na efektivní hrubování tvaru s velkými náklady na nástroje, či vyměnitelné břitové destičky.

Pro obrábění oběžných lopatek z materiálu X22CrMoV12-1 je klíčovým parametrem řezná rychlost, která ovlivňuje trvanlivost břitu nástrojů, v případě hrubování, trvanlivost břitových destiček.

Dlouhodobou zkušeností firmy Siemens Industrial Turbomachinery s.r.o. se přišlo k závěru, že hrubovací výměnné břitové destičky kruhového tvaru jsou právě tou správnou volbou. Pro analýzu, optimalizaci byly zvoleny nové nástroje určené pro frézování korozivzdorných materiálů od firmy SECO. Výchozí parametry pro analýzu trvanlivosti jsou posuv na zub $f_z = 0,3$ mm a řezná rychlost $v_c = 250-310$ m.min⁻¹.

Testy trvanlivosti břitových destiček byly provedeny na pětiosém obráběcím centru StarragHeckert, typ HX 151.

1 SIEMENS INDUSTRIAL TURBOMACHINERY¹

Siemens Industrial Turbomachinery s.r.o. (dále jen SIT s.r.o.) nabízí široké spektrum průmyslových parních turbín <150 MW pro všechny typy aplikací. Našim zákazníkům nabízí taková řešení, která splňují vysoké nároky na účinnost a spolehlivost, stejně jako požadavky na procesní páru.

Za vývoj turbínové řady SST300 obdržela společnost čestné uznání v soutěži Inovace roku 2007. Za dobu více než stoleté historie firma dodala více než 4240 parních turbín do 66 zemí světa.

Zákazníkům nabízí kompletní služby od technické pomoci při plánování investic, přes konstrukční řešení, výrobu, montáž, expedici, uvedení do provozu, zaškolení personálu až po záruční i pozáruční servis.

1.1 Historie společnosti

Hlavní milníky v historii společnosti:

- 1814 malá strojírna ve Šlapanicích u Brna
- 1824 první parní stroj - Jindřich Luz
- 1872 založena akciová společnost První brněnská strojírna
- 1901 licence na výrobu Parsonsovy parní turbíny
- 1925 první vysokotlaká turbína na světě - celosvětové patenty barelové skříně
- 1930 zahájen provoz v novém strojírenském závodě na Olomoucké ulici
- 1992 privatizace PBS
- 1994 transfer technologie G+V ze závodu ABB Turbinen Norimberk
- 1996 vývoj technologie ATP
- 1999 vznik společnosti ABB Alstom Power
- 2001 vznik společnosti Alstom Power
- 2003 prodej divize turbín Alstom Power společnosti Siemens - Demag Delaval Industrial Turbomachinery
- 2004 vznik společnosti Siemens Industrial Turbomachinery s.r.o. Brno

Vybrané reference:

- Projekt SAKO CZ – Inovovaný typ SST300 o výkonu 21,5MW.
- Projekt Shakopee USA – SST300 o výkonu 23,4MW.
- Projekt Olomouc – SST300, o výkonu 8MW.
- Projekt Tanir Bavi Jižní Korea – SST600 pro elektrárnu o výkonu 55MW.
- Projekt Kuusankoski – SST600, papírenský průmysl, výkon 84MW.
- Projekt TLP Cogen Japonsko - SST400 pro elektrárnu, výkon 41MW.
- Projekt BASF Čína – SST600, petrochemický průmysl, výkon 65MW.
- Projekt Kelenföld Maďarsko – SST600 pro teplárnu, výkon 50MW.
- Projekt Siekierki Polsko – 2x SST600 pro teplárnu, výkon 110MW.
- Projekt Dolphin Katar – SST400, pohon generátoru, výkon 35MW.
- Projekt Magnitogorsk Rusko – 2x SST300, výkon 7,4MW.

1.2 Oblast výroby

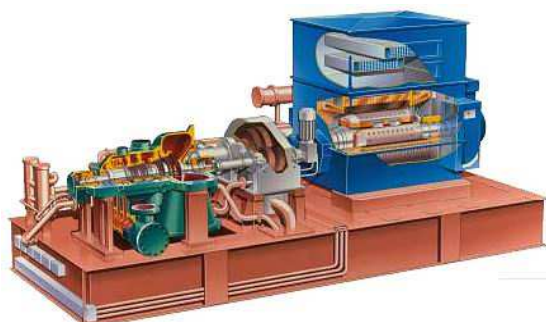
Typické aplikace SIT s.r.o.:

- průmyslové a městské teplárny
- spalovny odpadu a biomasy
- těžba ropy a plynu (pohony generátorů a kompresorů)
- chemický a petrochemický průmysl (pohony generátorů a kompresorů)
- papírenský průmysl
- cukrovary
- paroplynové cykly
- kogenerace
- elektrárny

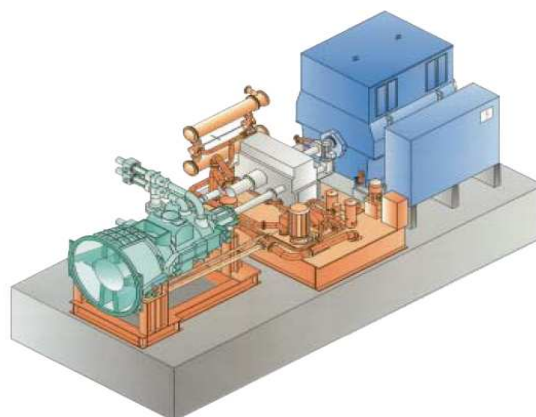
Hlavní výroba je zaměřena na produktové typy SST-300 a SST-400.

SST-300 a SST-400

Jednoskříňová turbína, zpřevodovaná pro pohon generátoru. Kompaktní, pružná konstrukce turbíny s vysokým stupněm standardizace základních prvků. Pro průmyslové využití a výrobu elektrické energie.



Obr. 1 - 3D model SST-300



Obr. 2 - 3D model SST-400

Mimo hlavní výroby SIT s.r.o. zajišťuje také servis parních turbín, kompresorů a plynových turbín. Hlavní činnosti Servisu SIT s.r.o. jsou:

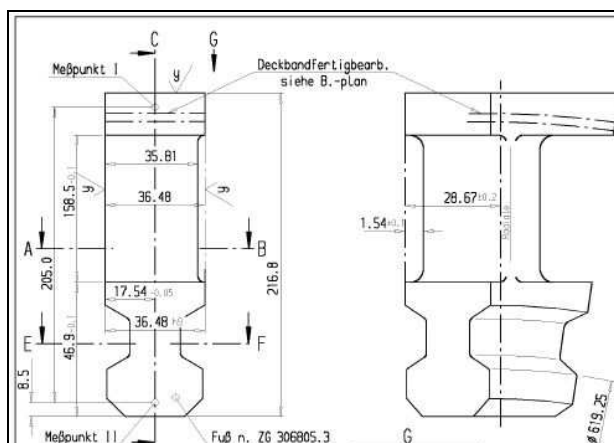
- pozáruční a dlouhodobý servis
- opravy zařízení, odstraňování poruch a havárií
- technické expertízy, retrofity, revize
- diagnostika, měření
- výměny a dodávky náhradních dílů
- demontáž, montáž a uvedení do provozu.

2 HODNOCENÍ TECHNOLOGIČNOSTI KONSTRUKCE VÝROBY OBĚŽNÝCH LOPATEK

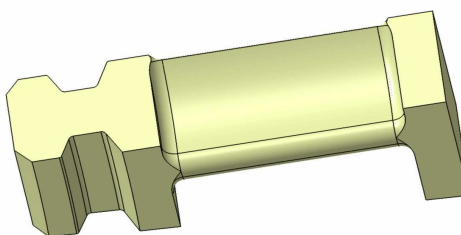
Před samotným započítáním přípravy výroby je nutné zhodnotit technologičnost součásti a to se provádí z hlediska hospodárné výroby, zda je součást vyrobitelná, jak ji vyrobit nejproduktivnější metodou aby dosáhla předepsaného tvaru, jakosti a ceny.

Oběžná lopatka:

- Klíčový prvek parní turbíny, určuje základní provozní parametry
- Různé typy, velikosti, počty kusů, materiál, zpracování
- Až tisíce kusů osazených na jednom rotoru
- Návrh lopatek dle požadavků na provoz, odběry, výkon...
- Závěs lopatky – slouží k pevnému uchycení do těla rotoru
- Profil listu lopatky – svou geometrií
- Bandáž lopatky – zpevňuje list lopatky, brání vibracím, usměrňuje páru.



Obr. 3 – Detail výkresu oběžné lopatky



Obr. 4 – 3D model lopatky

2.1 Dodržení tvaru a geometrie součásti

Základní materiálové charakteristiky jsou dány pracovním prostředím, kde se bude dílec nacházet. Poněvadž se jedná o průtočnou část parní turbíny, oběžnou lopatku, hlavním parametrem je teplota a pracovní tlak. Výpočtem byl určen jako pevnostně dostačující cenově nejvýhodnější materiál, válcovaný sochor z materiálu X22CrMoV12-1. Pro určení rozměrů jsou na výkrese uvedeny kóty s příslušnými tolerancemi.

2.2 Dodržení výrobních úchylek rozměrů

Základní rozměry jsou voleny konstruktérem zejména s ohledem na funkčnost a vyměnitelnost součástí. Hodnoty úchylek musí být optimální z hlediska funkce výrobku i z hlediska jeho výroby. Zbytečně úzká tolerance a jakost povrchu klade vyšší nároky na volbu metody obrábění, počet operací a zapříčiňuje vyšší náklady na výrobu. Výrobní rozměry, tolerance a stanovené drsnosti povrchu lze provést třískovým obráběním na běžně dostupných strojních zařízeních.

2.3 Zvýšení produktivity práce a efektivnosti výroby

Produktivitu práce lze mimo technologičnosti součástí ovlivnit i typem použitých nástrojů, volbou řezných podmínek a správným výběrem strojního zařízení. U dílců v opakovaných malých sériích (lopatky v sadě 50 – 100 ks) je velmi důležitá volba řezných podmínek, a to tak, že musí být zajištěno dodržení jakostí povrchu, tolerancí na celém tvaru lopatky a optimální řezné podmínky s ohledem na cenu nástrojů a výrobních časů. Při volbě strojního zařízení musí technolog zvažovat jeho hodinovou sazbu. S velikostí stroje roste i pořizovací cena, tudíž hodinová sazba bývá vyšší.

3 NÁVRH POLOTOVARU A VÝPOČET NORMY SPOTŘEBY MATERIÁLU

3.1 Polotovar

Základní rozměry, parametry a použitý materiál je dán vstupními parametry páry zákazníka, nebo jeho technologií zpracování páry. Vzhledem k různým požadavkům na provoz parní turbíny a tím široký sortiment rozměrů oběžných lopatek nelze předem určit jaká velikost, typ nebo materiál bude v budoucnu použit. Z tohoto důvodu je cenově nejvýhodnější volba polotovaru sochor z domluvených standardizovaných rozměrů.

Volba materiálu je dána pevnostním výpočtem a dostupností materiálu na trhu. Pro různé parametry se používají různé materiály, většinou X22CrMoV12-1. Cílem použití více rozměrů materiálů je rozdílná využitelnost. V případě oběžných lopatek řešeném v tomto projektu může nesprávně určený rozměr materiál znamenat navýšení ceny.

Správná volba polotovaru a materiálu tedy podstatně určuje celkovou cenu součásti.

3.2 Výpočet normy spotřeby materiálu

Stanovení rozměru polotovaru je dáno celkovou velikostí oběžné lopatky.

Přídavky na opracování, výchozí polotovar, rozměr sochoru je zvolen dle zkušeností a to minimálně 4 mm na vnější plochu tvaru lopatky. Délka polotovaru vychází z výkresové délky oběžné lopatky navýšené o přídavek pro upnutí do svěráku stroje a technologický přídavek pro odfrézování konce.

Výpočet objemu je dán součtem objemů elementárních tvarů součástí. Proces výpočtu objemu a hmotností polotovaru a obrobku je automatizován pomocí AutoCAD 2010. Hmotnost polotovaru a obrobku, m_p a m_o se stanoví podle vztahů:

$$m = V \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (3.1)$$

Kde: V [m^3] - objem polotovaru / obrobku
 ρ [$kg \cdot m^{-3}$] hustota materiálu

$$m_p = 0,0009 \cdot 7850 = 7,1 \text{ kg}$$

$$m_o = 0,00036 \cdot 7850 = 2,8 \text{ kg}$$

Stupeň využití materiálu je dán jako poměr hmotnosti obrobku a polotovaru:

$$k_m = \frac{Q_s}{N_m} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.2)$$

Kde: $Q_s = m_o$ [m^3] - hmotnost obrobku
 $N_m = m_p$ [m^3] - hmotnost polotovaru

$$k_m = \frac{2,8}{7,1} \cdot 100 = 39,4 \text{ %}$$

Malý stupeň využití materiálu je dán složitým tvarem oběžné lopatky a použitím válcovaného sochoru.

Velké množství odebraného materiálu je hlavním důvodem efektivního hrubování, důvodem optimalizace výroby oběžných lopatek parních turbín, zaměřením této bakalářské práce.

4 PŮVODNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY OBĚŽNÉ LOPATKY

Návrh technologického postupu vychází z dlouhodobých praktických zkušeností pro opracování oběžných lopatek. Hlavní aspekty zvolené technologie je shoda dílce s výkresovou dokumentací, celkový výsledný čas opracování. Důležitým požadavkem je dodržování bezpečnosti práce, vlivů na ekologii a integrovaný systém kvality².

Při navrhování výrobního postupu je potřeba řada informací, které jsou čerpány z následujících podkladů:

- Konstrukční dokumentace (výkresy součástí, sestav, kusovníky...).
- Rozměr polotovaru.
- Technické přejímací podmínky (údaje o zkouškách, atesty...).
- Výrobní program (plány výroby, údaje o počtech součástí...).
- Základní výrobní fond (přehled výrobních strojů, karty strojů...).
- Náradí (katalogy a normy nástrojů, měřidel, upínačů...).
- Údaje o celkové organizaci firmy.
- Kooperativní vztahy.
- Normy a normativy.

4.1 Technologický postup

Technologický postup je vypracován v předvýrobním procesu pracovníkem technologie. Po kompletaci s výkresovou dokumentací je předán na řídicí pracoviště či pracoviště první výrobní operace.

Technologický postup skládá se z upozornění o dodržování předpisů firmy a jednotlivých pracovních operací na daných výrobních pracovištích. Definuje použité strojní zařízení, nástroje a měřidla. Detailní technologický postup je v příloze č.1.

4.1.1 Řezání, přenesení atestu materiálu

Polotovar se nařeže na požadovanou délku z předepsaného profilu. Délka polotovaru je daná délkou lopatky, přídávku na upnutí a přídávku na podepření středícím hrotem na CNC stroji.

Současně je za účasti pracovníka kvality přenesena krycí značka materiálu. Značka je unikátní, specifikuje použitý materiál. Krycí značka nese informace o druhu materiálu, tavby a atestu. Po celou dobu se krycí značka nachází na obrobku, tzv. přenáší se.

4.1.2 Frézování tvaru lopatky

Frézování - je strojní třískové obrábění kovů vícebřítým nástrojem, kde hlavní pohyb (rotační) koná nástroj a vedlejší pohyb (přisuv, posuv) obrobek.

Polotovar je upnut do čelistí a podepřen hrotem na druhé straně. Polohou čelistí a osou hrotu podepření je dána poloha upnutí polotovaru. Správná, stejná poloha polotovaru všech lopatek dané série je nutná k zabránění kolize nástroje s polotovarem a správné orientaci polotovaru.

Operace frézování je rozdělena do dvou hlavních částí. Hrubování tvaru profilu a závěsu lopatky a dokončení tvaru profilu a závěsu lopatky. Pro hrubování jsou použity nástroje s výměnnými břitovými destičkami, pro dokončovací operace jsou použity monolitní karbidové tvarové válcové frézy.

4.1.3 Broušení, odjehlení lopatky

Ruční zámečnická práce – broušení žlábků a hřbetu profilu listu, broušení přechodových poloměrů a odjehlení závěsu a bandáže lopatky.

4.1.4 Kontrola prvního kusu, konečná kontrola

Základním pravidlem výroby lopatek je kontrola prvního kusu. Vždy po dokončení prvního kusu v dané výrobní operaci je tento kus kompletně proměřen a pracovníkem kvality potvrzena shoda s výkresovou dokumentací. V případě odchylky pracovník kvality zaznamená neshodu, odchylku do protokolu o kontrole prvního kusu a předá obsluze CNC stroje či odpovědnému mistrovi. Ten zajistí opravu CNC programu či kontrolu seřízení stroje. Postup se opakuje do doby, dokud není kus se shodou s dokumentací. Kontrola prvního kusu se vždy provádí také po výměně speciálních nástrojů (tvarové nástroje pro kompletní frézování stromečkových závěsů), či v případě seřízení CNC stroje.

Po dokončení všech výrobních operací je provedena konečná kontrola. Je opakovaně kontrolována shoda s výkresovou dokumentací, kvalita povrchu lopatky, kontrola druhu materiálu (spektrální analýza), přenesení krycí značky, a kompletnost výrobní zakázky (počet lopatek).

4.2 Strojní zařízení

Kromě obráběcích strojů jsou pro výrobu oběžných lopatek používány i jiné zařízení:

- Manipulační technika – paletové a manipulační vozíky...
- Zvedací zařízení – jeřáby mostové, otočné, zvedací a vázací přípravky...
- Kontrolní zařízení – pětiosé měřicí CNC stroje, spektrometry, výškoměry...

Pětiosé obráběcí CNC centrum:

Vertikální pětiosé CNC (Obr. 5) centrum je určeno speciálně pro výrobu lopatek. Výrobcem je švýcarsko-německá firma StarragHeckert, která má dlouhodobé zkušenosti s technologií pro výrobu energetických komponentů. Vřeteno stroje je umístěno do vertikální polohy s možností naklápění v ose B v rozsahu od +50° do -50°. Upínací sklíčidlo polotovaru je v horizontální poloze, na pravé straně stroje. Proti sklíčidlu je umístěn řízený koník pro podepření polotovaru (Obr. 6). Upínací sklíčidlo umožňuje rotaci v ose A celých 360°. Provedení stroje je s třiceti místným zásobníkem nástrojů s kuzelem HSK A-63 a s plnou podporou měřících cyklů. Stroj nabízí uživateli možnost efektivního obrábění s velkým řezným výkonem a vysokou přesností.



Obr. 5 – HX151³



Obr. 6 – Pracovní prostor stroje HX151³

Základní technické parametry stroje HX151:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------|
| • Maximální vzdálenost mezi hroty: | 837 mm |
| • Maximální průměr polotovaru: | 400 mm |
| • Maximální výkon vřetene: | 23 kW |
| • Maximální otáčky vřetene: | 8 000 min ⁻¹ |
| • Upínací kužel vřetene: | HSK A-63 |
| • Řídicí systém: | Sinumeric 840D |

Brusírna lopatek:

Strojním vybavením pracoviště broušení lopatek jsou pásové brusky firmy Loeser (Obr. 7) s volitelným přítlačným kotoučem. Dle rozměrů listu, či přechodových poloměrů se volí druh a rozměr přítlačných kotoučů. Z důvodu prašnosti a hluchosti, musí být pracoviště odhlučněno a prach z pracovního prostoru od-sáván.



Obr. 7 – Pásová bruska⁴



Obr. 8 – 3D měřicí stroj Wenzel⁵

Měření lopatek:

Pro rychlé měření opracované lopatky, shody s výkresovou dokumentací slouží 3D měřicí zařízení firmy Wenzel (Obr. 8). Pracovník kvality ručně, pomocí ovládacího panelu stroje, nebo dle CNC programu provede proměření lopatky a následně porovnání s 3D modelem. CNC stroj vyhodnotí odchylky a ty jsou zapsány do protokolu o měření.

4.3 Nástroje

Veškeré nástroje v SIT jsou značeny dle firemního standardu, evidovány a vyhodnocovány pohyby v elektronickém systému TDM. Data z TDM slouží pro nastavení minimálních stavů ve výdejně, zajištění objednávání, doplňování stavů dle skutečné potřeby a současně kontrolu použití na určených pracovištích.

4.3.1 Upínače fréz

Systém upínání nástrojů na CNC strojích pro výrobu lopatek je HSK 63. Renovovaní výrobci poskytují široký sortiment upínačů. Pro opracování oběžných lopatek byly zvoleny dva základní upínače firmy Schunk, upínač čelních nástrčných fréz (Obr. 9) a hydraulický upínač 204056 D20 24102510 pro válcové celokarbidové frézy (Obr. 10).

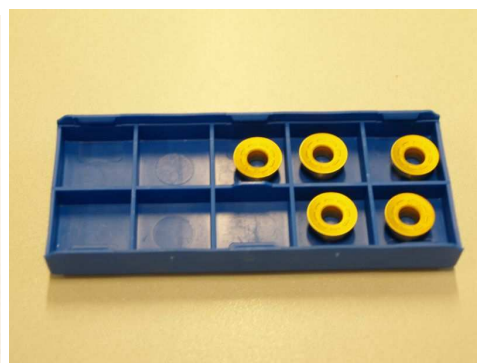


Obr. 9 – Upínač čelních fréz Obr. 10 – Hydraulický upínač D20

4.3.2 Frézy

Frézování lopatek se provádí ve dvou základních krocích. Hrubování, kdy se používají čelní nástrčné frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami firmy Steltram (Obr. 11 a Obr. 12) a tvarové monolitní válcové frézy s průměrem stopky 16mm. Frézy pro dokončení tvaru listu mají označení R3_8° (Obr. 13), frézy pro frézování tvaru závěsu jsou broušené na zakázku a mají označení D16_30° (Obr. 14):

- Hrubování profilu lopatky:



Obr. 11 – Fréza 7710VR12-1052Z05R Obr. 12 – VBD RPHT1204M08-422-X4

- Dokončování listu a závěsu lopatky:



Obr. 13 – Fréza R3_8° Obr. 14 – Fréza D16_30°

4.3.3 Měřidla

Na CNC obráběcích strojích jsou měřené základní rozměry lopatky posuvným měřítkem (Obr. 15) či výškoměrem (Obr. 16). Měřidla podléhají pravidelné kontrole a kalibrace. Používání kalibrovaných měřidel je kontrolováno mistry středisek a interním auditorem.



Obr. 15 – Digitální posuvné měřítko⁶ Obr. 16 – Digitální výškoměr

4.4 Opatření výměnných břitových destiček

Měření opotřebení a trvanlivost VBD byla měřena za plného chodu výroby. Řezná rychlost a posuv na zub byl již dříve nastaven dle doporučení dodavatele nástrojů. Způsob frézování byl generován pomocí CAM softwaru RCS, speciálně vytvořený pro frézování lopatek. Bylo použito nové těleso frézy. Frézování probíhalo bez použití procesních kapalin.

Otáčky vřetene byly stanoveny dle vztahu:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (4.1)$$

Rychlost posuvu ze vztahu:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \quad (4.2)$$

Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 1927 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 2890 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímek opotřebení VBD:



Obr. 17 – Opatření VBD, původní technologie

Opotřebení všech osazených destiček tělesa frézy bylo zcela rovnoměrné (Obr. 17). Chod stroje byl během frézování klidný, bez vibrací. Velké opotřebení na řezné hraně VBD neumožňuje frézování dalšího kusu lopatky. VBD musí být vyměněny či otočeny do jiné polohy.

Trvanlivost břitových destiček pro opotřebení $VB = 2,8$ mm byla $T = 14,5$ min. Tyto hodnoty jsou výchozí pro porovnání a návrhem nové technologie.

5 NÁVRH NOVÉ TECHNOLOGIE OPRACOVÁNÍ

Hlavním důvodem nové technologie je velká spotřeba výměnných břitových destiček a velmi krátká trvanlivost břitu.

Při celkovém počtu 4 CNC strojů na výrobu oběžných lopatek byla původní průměrná spotřeba břitových destiček v rozmezí 2000 – 2500 ks za měsíc. Výsledkem jsou vysoké pořizovací náklady břitových destiček a nutnost velkých skladových zásob.

Optimalizace byla zaměřena:

- na změnu čelní frézy a vyměnitelných břitových destiček
- optimální řezná rychlost
- rozdělení hrubovací operace na dvě samostatné části, kdy každá část je frézována samostatným, ale stejným typem nástroje (zuhlování povrchu polotovaru a hrubování tvaru profilu a závěsu).

Z důvodu velké trvanlivosti celokarbidových nástrojů pro frézování závěsu oběžné lopatky, $T = 100$ min a pro frézování listu lopatky, $T = 80$ min, byla technologie dokončení celokarbidovými frézami ponechána.

5.1 Změna technologického postupu

Základní změna technologického postupu byla provedena rozdělením základní operace hrubování na dvě operace, s použitím dvou stejných nástrojů. Dle CAM softwaru připadalo na první operaci 55% řezného času, na druhou operaci 45% času. Dva nové nástroje byly sestaveny, změřeny a založeny do výměníku nástrojů. CNC program byl upraven a nahrán do stroje.

5.2 Změna nástrojů, dodavatele

Původně používané čelní nástrčné frézy a VBD byly nahrazeny nástroji firmy SECO (Obr. 18 a Obr. 19). Typ frézy a VBD byla určena technikem dle zkušeností z předešlých testů na podobných komponentech.

- Nový nástroj – RM-06S99-15608, průměr 50mm, $z = 5$, pro VBD – NI-RP12
- Nové VBD – NI-RP12-15635-4F-M12 MS2500, pro korozivzdorné oceli



Obr. 18 – Fréza RM-06S99-15608



Obr. 19 – VBD NI-RP12-15635

5.3 Změna řezných podmínek

Dle katalogu nástrojů a doporučení technika firmy SECO byla určena řezná rychlost a posuv na zub. Řezná rychlost byla doporučena v rozsahu $v_c = 250 - 310 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Posuv na zub $f_z = 0,3 \text{ mm}$. Frézování probíhalo bez použití procesních kapalin, na sucho.

Minimální řezná rychlost $v_c = 250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ se neměla podkročit z důvodu nízké teploty při obrábění a tím k zvětšení tvoření nárůstků na hřbetě VBD, následně k snížení trvanlivosti (toto bylo analýzou prokázáno). Hodnota posuvu na zub byla doporučena pro dosažení maximální rychlosti posuvu, zkrácení čistého řezného času a tím možnosti použití VBD pro obrábění více kusů lopatek. Hodnoty vycházely z předešlého opracování lopatek v dceřiné společnosti SIEMENS.

Oproti původní řezné rychlosti došlo k navýšení až o 35%.

6 ANALÝZA OPOTŘEBENÍ DESTIČKOVÝCH NÁSTROJŮ

Pro potvrzení správné volby řezné rychlosti a rozdělení hrubovacích operací byla provedena analýza trvanlivosti břitů vyměnitelných břitových destiček.

Experimentální metodou byla hledána optimální řezná rychlost, kdy hlavním parametrem bylo opotřebenění na hřbetu destičky VB. Maximální povolené opotřebenění bylo stanoveno na $VB_{\max} = 2,8 \text{ mm}$ za současné podmínky dokončení celé hrubovací operace.

6.1 Popis měření opotřebenění VBD

Měření opotřebenění VBD bylo provedeno při sériově vyráběné oběžné lopatce, na stroji HX151 za použití nových fréz a upínačů.

Měření bylo rozdělena do sad dle druhu operace a řezné rychlosti:

- Sada A – první operace hrubování, $v_c = 310 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- Sada B – první operace hrubování, $v_c = 280 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- Sada C – první operace hrubování, $v_c = 250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- Sada D – druhá operace hrubování, $v_c = 310 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- Sada E – druhá operace hrubování, $v_c = 280 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
- Sada F – druhá operace hrubování, $v_c = 250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Měření opotřebení VB (viz Tab.1 a Tab. 2) bylo prováděno následovně:

- Měření č.0 – Před započítáním operace byla zkontrolováno osazení nové VBD.
- Měření č.1, 3, 5 a 7 – V polovině každé operace byl stroj zastaven a přímo na stroji bylo změřeno opotřebení pomocí lupy s rastrem.
- Měření č.2, 4, a 6 – Po dokončení operace byla VBD vyjmuta z tělesa frézy a byl pořízen snímek pomocí digitální kamery (snímky opotřebení VB). Následně vrácena do tělesa frézy.
- Pokud $VB < 2,8$ mm, opakovalo se na další lopatce. Po překročení limitu $VB = 2,8$ mm, či v případě velkých vibrací apod. bylo měření a sada ukončena.

Měření se provádělo vždy na stejné VBD (poloha lůžka byla označena nesmazatelnou fixou). Opotřebení ostatních VBD bylo vždy velmi podobné.

6.2 Výsledky měření

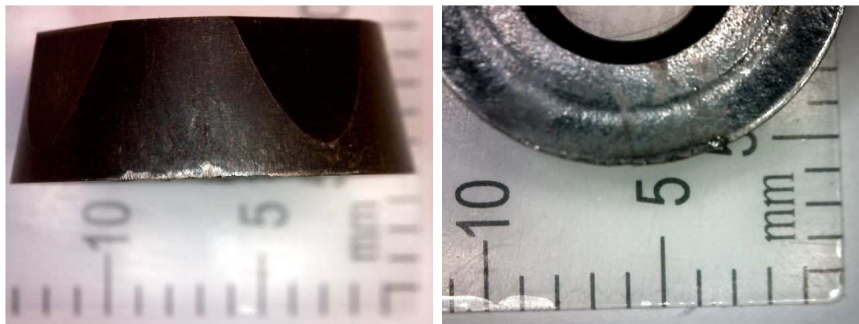
6.2.1 První operace hrubování

Operace první, hrubování polotovaru lopatky, odstranění povrchové vrstvy (povrchové vady po válcování, koroze, rozměrové odchylky).

- Sada A – výchozí řezná rychlost:

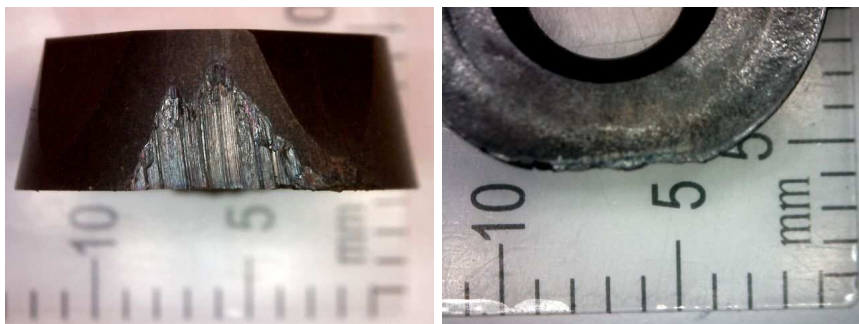
Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 2597 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 310 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 3895 \text{ mm.min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímky opotřebení VB:



Obr. 20 - Sada A, měření č.2 (po dokončení 1. kusu)

$VB_{A/2} = 0,5 \text{ mm}$



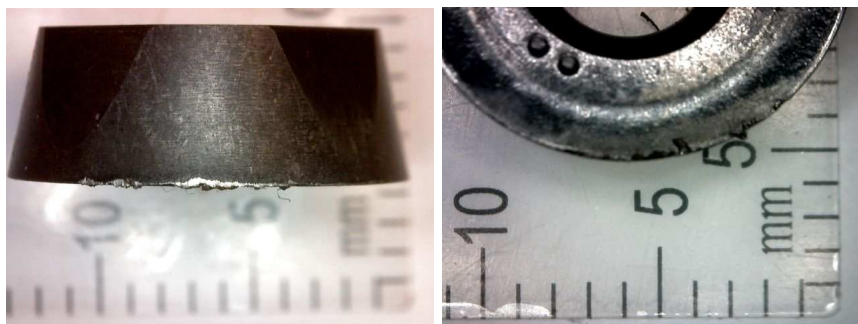
Obr. 21 – Sada A, měření č.4 (po dokončení 2. kusu)

$VB_{A/4} = 4,2 \text{ mm}$

- Sada B – redukováná řezná rychlost:

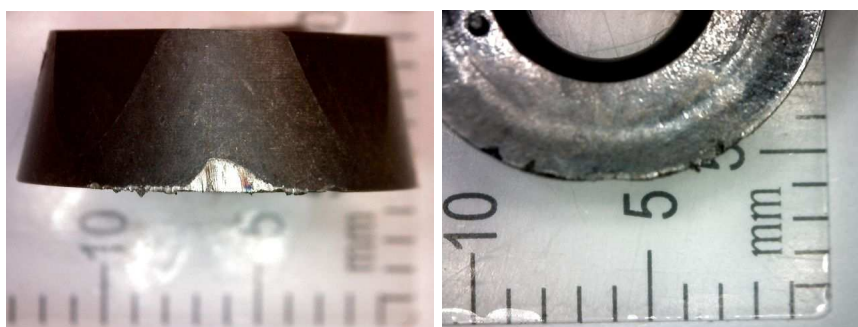
Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 2345 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 280 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 3518 \text{ mm.min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímky opotřebení VB:



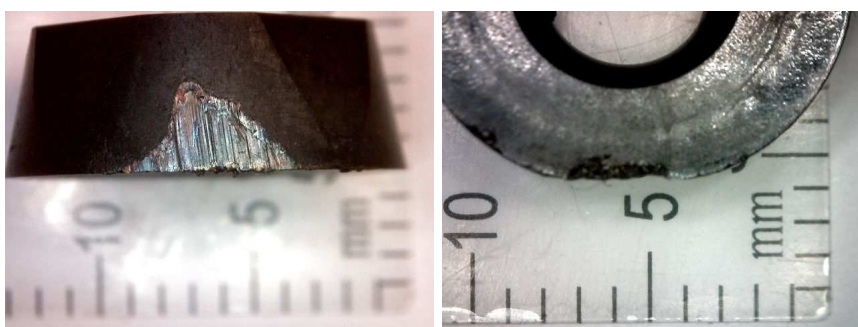
Obr. 22 – Sada B, měření č.2 (po dokončení 1. kusu)

$VB_{B/2} = 0,3 \text{ mm}$



Obr. 23 – Sada B, měření č.4 (po dokončení 2. kusu)

$VB_{B/4} = 1,0 \text{ mm}$



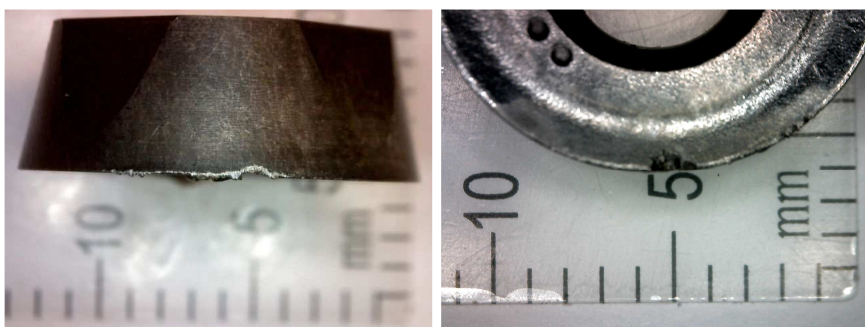
Obr. 24 – Sada B, měření č.6 (po dokončení 3. kusu)

$VB_{B/6} = 2,8 \text{ mm}$

- Sada C – redukována řezná rychlost:

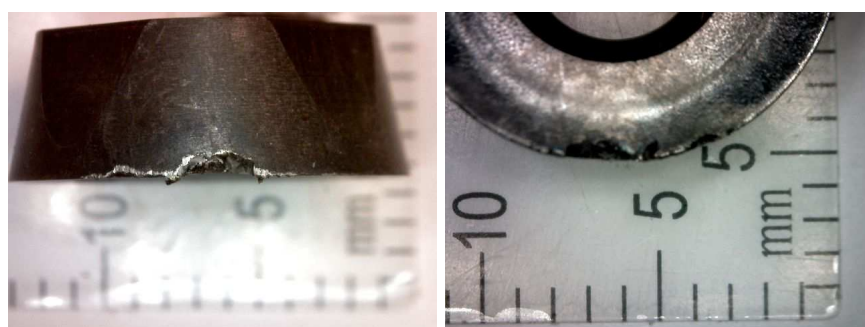
Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 2094 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 3141 \text{ mm.min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímky opotřebení VB:



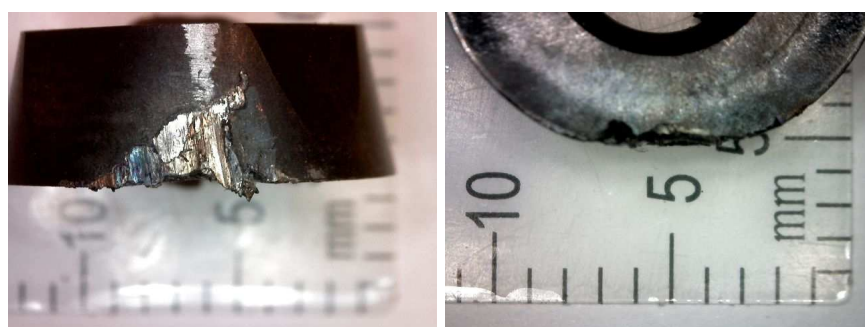
Obr. 25 – Sada C, měření č.2 (po dokončení 1. kusu)

$VB_{C/2} = 0,3 \text{ mm}$



Obr. 26 – Sada C, měření č.4 (po dokončení 2. kusu)

$VB_{C/4} = 0,8 \text{ mm}$



Obr. 27 – Sada C, měření č.6 (po dokončení 3. kusu)

$VB_{C/6} = 2,5 \text{ mm}$

6.2.2 Shrnutí výsledků měření první operace hrubování lopatky

Tab.1 - Naměřené hodnoty opotřebení VB první operace hrubování lopatky

Měření č.	0	1	2 (1. kus)	3	4 (2. kus)	5	6 (3. kus)	7
Sada A	-	*Lupa	Obr. 20	*Lupa	Obr. 21			
T [min]	0,00	2,43	6,07	8,50	12,13			
VB [mm]	0	0,3	0,5	2,1	4,2			
Sada B	-	*Lupa	Obr. 22	*Lupa	Obr. 23	*Lupa	Obr. 24	
T [min]	0,00	2,82	7,03	9,83	14,05	16,87	21,08	23,88
VB [mm]	0	0,1	0,3	0,7	1	1,7	2,8	4
Sada C	-	*Lupa	Obr. 25	*Lupa	Obr. 26	*Lupa	Obr. 27	
T [min]	0,00	3,20	7,98	11,18	15,97	19,17	23,95	
VB [mm]	0	0,3	0,4	0,6	0,8	1,4	2,5	

*Lupa – bylo měřeno na stroji pomocí lupy s rastrem

- Sada A – $v_c = 310 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$:

Po dokončení prvního kusu lopatky bylo opotřebení VB = 0,5 mm, po dokončení druhé lopatky bylo opotřebení VB = 4,2 mm.

Z důvodu velkého opotřebení VBD po dokončení druhého kusu lopatky, není možné tuto řeznou rychlost doporučit pro bezpečné opracování dvou kusů lopatek. VBD se musí již po dokončení prvního kusu vyměnit. Tím je celková trvanlivost VBD snížena na $T = 6,07 \text{ min}$.

- Sada B – $v_c = 280 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$:

Po dokončení prvního kusu lopatky bylo opotřebení VB = 0,3 mm, po dokončení druhé lopatky bylo opotřebení VB = 1 mm, po dokončení třetí lopatky bylo opotřebení VB = 2,8 mm.

Trvanlivost VBD po snížení řezné rychlosti byla několikanásobně prodloužena. Je možné bezpečně opracovávat až tři kusy lopatek. Touto změnou v_c jsme bezpečně dosáhli $T = 21,08 \text{ min}$.

- Sada C – $v_c = 250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$:

Po dokončení prvního kusu lopatky bylo opotřebení VB = 0,4 mm, po dokončení druhé lopatky bylo opotřebení VB = 0,8 mm, po dokončení třetí lopatky bylo opotřebení VB = 2,5 mm.

Snížením řezné rychlosti na $250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ se opět prodloužila trvanlivost VBD, ale změnil se druh opotřebení. Na čele VBD se projevilo vylamování částí bříty, na hřbetě se začaly objevovat po dokončení třetího kusu lopatky nárůstky. Zvýšily se vibrace stroje, opracování třetího kusu nebylo bezpečné. VBD se musela měnit po dokončení druhé lopatky, tím byla trvanlivost $T = 15,97 \text{ min}$.

Porovnáním výsledků měření Sady A, B a C bylo konstatováno, že pro bezpečné opracování oběžné lopatky je vhodné nastavit rychlost na $280 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, výsledky sady B (Tab. 1). Touto řeznou rychlostí je možno bezpečně opracovat tři kusy lopatek.

Trvanlivost bříty u první operace hrubování byla 1 až 3 kusy lopatek, dle zvolené řezné rychlosti.

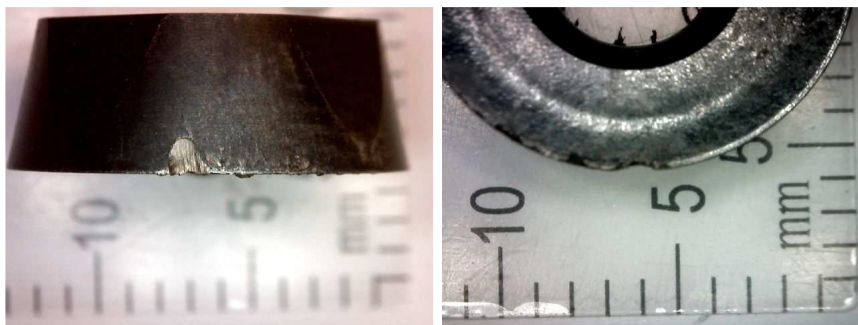
6.2.3 Druhá operace hrubování

Operace druhá, hrubování tvaru závěsu lopatky, hřbetová a žlábková strana.

- Sada D – výchozí řezná rychlost:

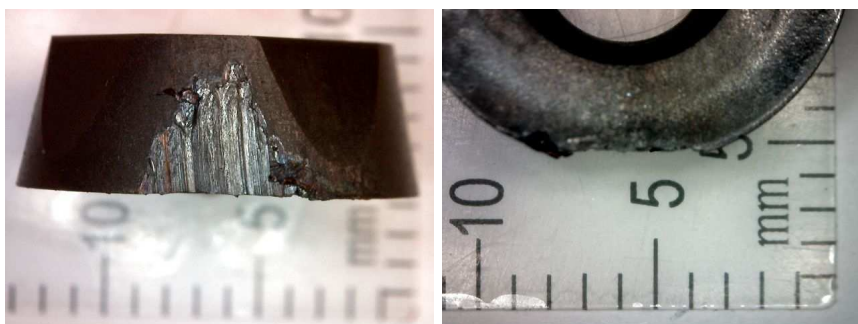
Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 2597 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 310 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 3895 \text{ mm.min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímky opotřebení VBD:



Obr. 28 – Sada D, měření č.2 (po dokončení 1.kusu)

$$VB_{D/2} = 1,0 \text{ mm}$$



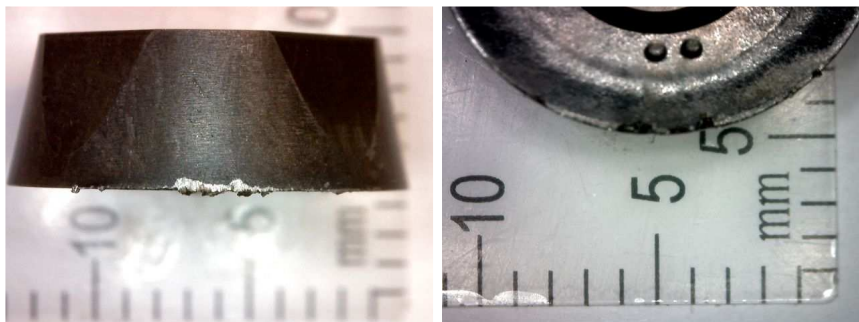
Obr. 29 Sada D, měření č.4 (po dokončení 2.kusu)

$$VB_{D/4} = 4,1 \text{ mm}$$

- Sada E – redukováná řezná rychlost:

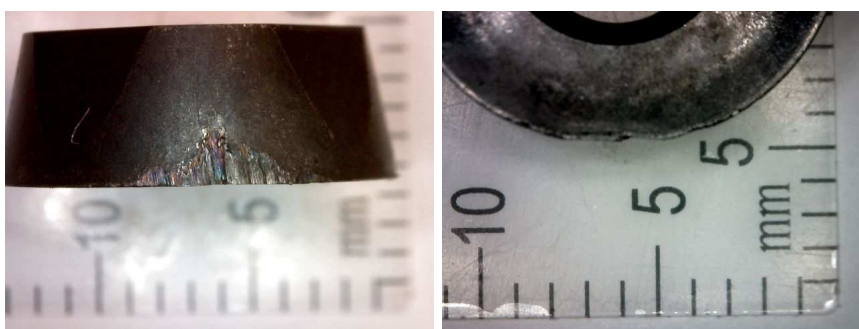
Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 2345 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 280 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 3518 \text{ mm.min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímky opotřebení VBD:



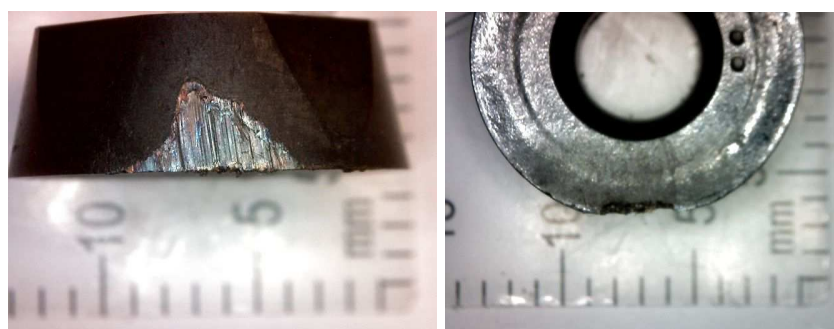
Obr. 30 – Sada E, měření č.2 (po dokončení 1.kusu)

$VB_{E/2} = 0,4 \text{ mm}$



Obr. 31 – Sada E, měření č.4 (po dokončení 2.kusu)

$VB_{E/4} = 1,7 \text{ mm}$



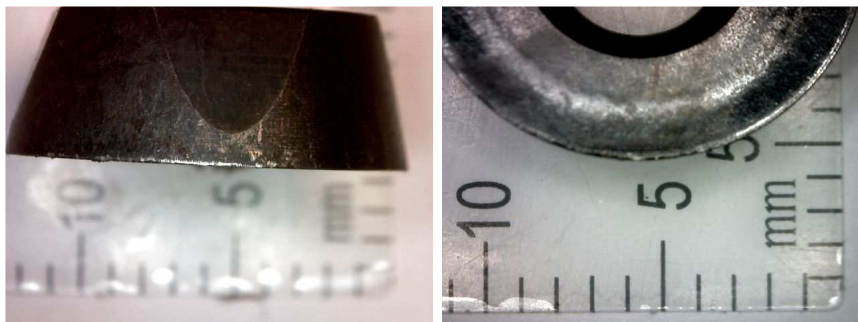
Obr. 32 – Sada E, měření č.6 (po dokončení 3.kusu)

$VB_{E/6} = 3,8 \text{ mm}$

- Sada F – redukováná řezná rychlost:

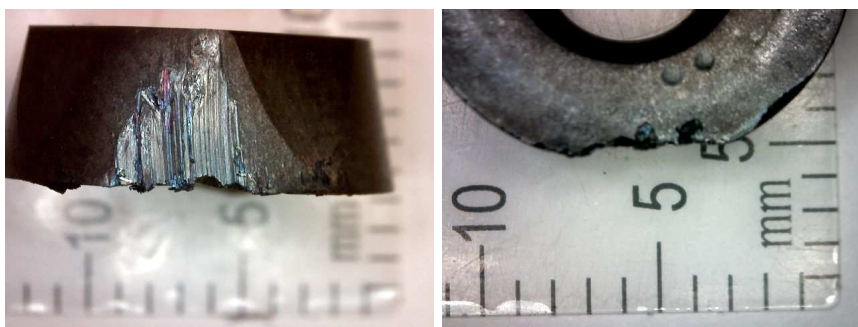
Dle vztahů (4.1) a (4.2) byly určeny otáčky vřetene a rychlost posuvu: $n = 2094 \text{ min}^{-1}$, $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,3 \text{ mm}$, $v_f = 3141 \text{ mm.min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $a_e = 20\text{-}40 \text{ mm}$ (proměnlivé dle tvaru lopatky).

Snímky opotřebení VBD:



Obr. 33 – Sada F, měření č.2 (po dokončení 1.kusu)

$VB_{F/2} = 0,4 \text{ mm}$



Obr. 34 – Sada F, měření č.4 (po dokončení 2.kusu)

$VB_{F/4} = 4,4 \text{ mm}$

6.2.4 Shrnutí výsledků měření druhé operace hrubování lopatky

Tab.2 Naměřené hodnoty opotřebení VB druhé operace hrubování lopatky:

Měření	0	1	2 (1. kus)	3	4 (2. kus)	5	6 (3. kus)	7
Sada D	-	*Lupa	Obr. 28	*Lupa	Obr. 29			
T [min]	0,00	1,87	4,67	6,55	9,35			
VB [mm]	0	0,5	1	2,3	4,1			
Sada E	-	*Lupa	Obr. 30	*Lupa	Obr. 31	*Lupa	Obr. 32	
T [min]	0,00	2,17	5,42	7,58	10,82	12,97	16,23	
VB [mm]	0	0,2	0,4	1,1	1,7	2,3	3,8	
Sada F	-	*Lupa	Obr. 33	*Lupa	Obr. 34			
T [min]	0,00	2,47	6,15	8,62	12,30			
VB [mm]	0	0,1	0,4	2,4	4,4			

*Lupa – bylo měřeno na stroji pomocí lupy s rastrem

- Sada D – $v_c = 310 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$:

Po dokončení prvního kusu lopatky bylo opotřebení VB = 1 mm, po dokončení druhé lopatky bylo opotřebení VB = 4,1 mm.

Pro velké opotřebení VBD po dokončení druhé opracované lopatky, není možné doporučit pro bezpečné nasazení pro opracování dvou kusů lopatek. VBD se musí po dokončení prvního kusu vyměnit. Tím je celková trvanlivost VBD snížena na $T = 4,67 \text{ min}$.

- Sada E – $v_c = 280 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$:

Po dokončení prvního kusu lopatky bylo opotřebení VB = 0,4 mm, po dokončení druhé lopatky bylo opotřebení VB = 1,7 mm, po dokončení třetí lopatky bylo opotřebení VB = 3,8 mm.

Trvanlivost VBD po snížení řezné rychlosti byla prodloužena, je možné bezpečně opracovávat dva kusy lopatek. Touto změnou v_c jsme dosáhli trvanlivost $T = 10,82 \text{ min}$.

- Sada F – $v_c = 250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$:

Po dokončení prvního kusu lopatky bylo opotřebení VB = 0,4 mm, po dokončení druhé lopatky bylo opotřebení VB = 4,4 mm.

Opotřebení VBD se nijak výrazně nezměnilo po prvním kusu opracování lopatky oproti předchozímu měření, ale po opracování druhého kusu lopatky bylo změřeno enormní opotřebení na hřbetu. Bezpečné opracování je tedy jen pro jeden kus lopatky, tím trvanlivost VBD je $T = 6,15 \text{ min}$.

Porovnáním výsledků měření sad D, E a F bylo konstatováno, že pro bezpečné opracování oběžné lopatky je opět vhodné nastavit řeznou rychlost na $280 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ jako u první operace hrubování, výsledky sady E (Tab. 2). Touto řeznou rychlostí je možno bezpečně opracovat dva kusy lopatek.

Trvanlivost bříty u první operace hrubování byla 1 až 2 kusy lopatek, dle zvolené řezné rychlosti.

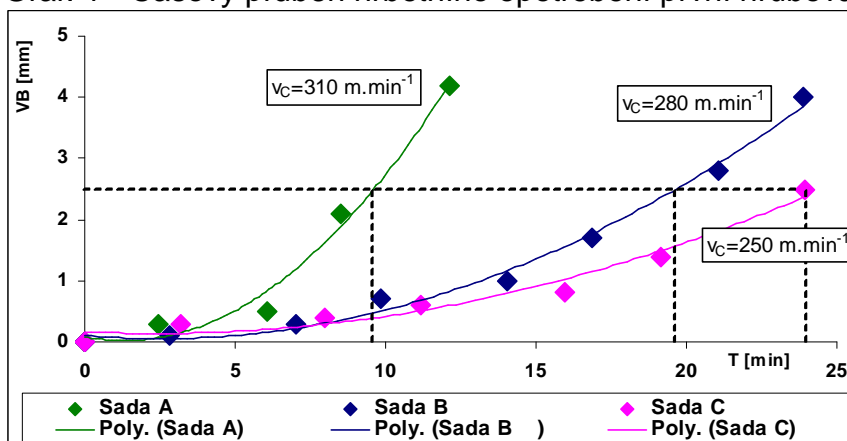
7 POROVNÁNÍ PŮVODNÍ A NOVÉ TECHNOLOGIE

Z vyhodnocení obou hrubovacích operací vyplývá, že optimální řezná rychlost pro $VB_{\max} = 2,8 \text{ mm}$ je $v_c = 280 \text{ m.min}^{-1}$ (Tab. 1 a Tab. 2).

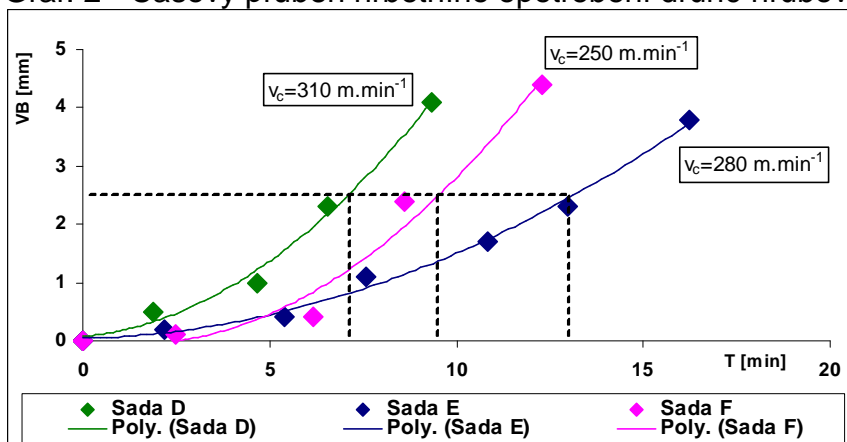
7.1 Vyhodnocení hřbetního opotřebení

Časové průběhy hřbetního opotřebení je možno vidět v grafu č.1 pro první operaci hrubování a v grafu č.2 pro druhou operaci hrubování.

Graf. 1 - Časový průběh hřbetního opotřebení první hrubovací operace



Graf. 2 - Časový průběh hřbetního opotřebení druhé hrubovací operace



Z grafu 2 je zřejmé, že se potvrdila informace zástupce dodavatele firmy SECO, že typ použité vyměnitelné břitové destičky má optimální řeznou rychlost nad hranicí $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$. Vznik nárustku (Obr. 34) na hřbetové straně VBD při $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$ u druhé operace hrubování enormně snížil trvanlivost břitu nástroje a bezpečnost frézování.

U první operace hrubování kde frézování probíhalo v nerovnostech materiálu, povrchových vadách a korozi, se tvorba nárustku také projevila, nebyla ovšem tak zřejmá (Obr. 27) jako při druhé operaci, frézování v čistém materiálu (Graf 1).

Vyměnitelná břitová destička NI-RP12-15635-4F-M12, MS2500 musí pracovat za optimálních teplot. Z tohoto důvodu byly veškeré hrubovací operace bez použití procesních kapalin, které teploty procesu řezání ovlivňují.

7.2 Bezpečný počet opracovaných kusů lopatek

Kromě kritéria opotřebení VB byl vyhodnocen také bezpečný počet opracovaných kusů lopatek (Tab. 3).

Doporučený počet opracovaných kusů je stav, kdy za stejných, běžných podmínek, nedojde k náhlému překročení $VB = 2,8$ mm a tím k možnému poškození tělesa frézy, obrobku či dokonce změny geometrie stroje.

Výměna VBD v době průběhu hrubovací operace je nepřijatelná.

Tab. 3 Bezpečný počet dokončených kusů oběžných lopatek

Určení doporučených kusů dle VB		1. kus	2. kusy	3. kusy	Doporučený počet kusů
Původní technologie	T [min]	14,50			1. kus
	VB [mm]	2,8			
Nová technologie - první operace hrubování - Sada B	T [min]	7,03	14,05	21,08	3. kusy
	VB [mm]	0,3	1	2,8	
Nová technologie - druhá operace hrubování - Sada E	T [min]	5,42	10,82	16,23	2. kusy
	VB [mm]	0,4	1,7	3,8	

7.3 Snížení spotřeby vyměnitelných břitových destiček

Po určení bezpečného počtu dokončených kusů oběžných lopatek (Tab. 3) byla určena i spotřeba VBD na jednu lopatku (Tab. 4) a tím i celková úspora VBD za kalendářní měsíc.

Tab. 4 Spotřeba VBD na opracování jednoho kusu lopatky

Spotřeba VBD na jednu lopatku	ks
Původní technologie	1,00
Nová technologie	0,83
Snížení spotřeby VBD [%]	17%

Při spotřebě 2000-2500 kusů VBD měsíčně pro 4 CNC stroje HX151 a snížení spotřeby o 17% (Tab. 4), je úspora počtu VBD 340–425 kusů za měsíc.

7.4 Úspora času operace hrubování

Tab. 5 Porovnání časů původní a nové technologie pro opracování 1 kusu:

Měření č.	0	1	2 (1. kus)	3	4 (2. kus)	5	6 (3. kus)	7	
$V_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Původní technologie								
	T [min]	0,00	14,50						
	VB [mm]	0	2,8						
$V_c = 280 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Nová technologie - Sada B - první operace hrubování								
	T [min]	0,00	2,82	7,03	9,83	14,05	16,87	21,08	23,88
	VB [mm]	0	0,1	0,3	0,7	1	1,7	2,8	4
$V_c = 280 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	Nová technologie - Sada E - druhá operace hrubování								
	T [min]	0,00	2,17	5,42	7,58	10,82	12,97	16,23	
	VB [mm]	0	0,2	0,4	1,1	1,7	2,3	3,8	

Přehled časů opracování původní technologie a optimální nové technologie zobrazuje Tab. 5. Původní čas celého hrubování jednoho kusu lopatky trvalo 14,5 min. Nová technologie, první operace hrubování jednoho kusu lopatky trvala 7,03 min, druhá operace trvala 5,42 min.

Pro porovnání časové úspory při opracování jednoho kusu lopatky bylo nutné sečíst časy obou hrubovacích operací. Výsledný čistý čas hrubování byl $T = 12,45$ min.

Tab. 6 Vyhodnocení úspory času

Doba nástroje v záběru	T [min]
Původní technologie	14,50
Nová technologie	12,45
Úspora času na 1 kus	2,05

Proti původní technologii, kdy bylo $T = 14,5$ min, došlo k snížení doby hrubovací operace o 2,05 min (Tab. 6), tedy o 14%.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na optimalizaci obrábění oběžných lopatek parní turbíny. Popisuje původní technologický postup výroby, strojní zařízení a zejména použité hrubovací nástroje. Byl navržen nový technologický postup hrubování listu a závěsu a experimentální metodou byla hledána optimální řezná rychlost nově použitých nástrojů.

Základním parametrem vyhodnocení provedené analýzy bylo bezpečné opracování, hrubování celé lopatky a maximální opotřebení břitu vyměnitelné břitové destičky $VB_{\max} = 2,8$ mm. Původní hrubovací operace byla rozdělena na operace dvě. U obou hrubovacích operací byly vyhodnoceny výsledky opotřebení a trvanlivosti v závislosti na použité řezné rychlosti. Výsledky jednotlivých měření byly zdokumentovány.

Porovnáním výsledků jednotlivých měření můžeme konstatovat, že optimální řezná rychlost pro hrubování kruhovými břitovými destičkami NI-RP12-15635-4F-M12 MS2500 firmy SECO je $v_c = 280$ m.min⁻¹. Proti původní technologii se zkrátila operace hrubování o 2,05 min, tj. 14%.

Rozdělením původní hrubovací operace na dvě a použitím dvou nástrojů s optimální řeznou rychlostí, se prodloužila bezpečná trvanlivost břitových destiček z jednoho kusu, na dva u první hrubovací operace (sada B) a na tři u druhé hrubovací operace (sada E). Celkové snížení spotřeby břitových destiček bylo tedy 17%.

Experiment zcela potvrdil doporučení zástupců firmy SECO, jaký rozsah řezné rychlosti je pro opracování oběžných lopatek parních turbín z korozi-vzdorného materiálu X22CrMoV12-1 optimální, $v_c = 250-310$ m.min⁻¹.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SIEMENS INDUSTRIAL TURBOMACHINERY s.r.o. *Základní informace* [online]. [vid. 2011-05-15]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/siemjet/cz/home/turbomachinery/Main/index.jet>.
2. KOČMAN, K., PERNIKÁŘ, J. Ročníkový projekt II - obrábění. [online]. [vid. prosince 2011-12-11]. Studijní opory pro kombinovanou formu bakalářského studia v oboru 23-07-7 Strojírenská technologie. ÚST, FSI-VUT v Brně, 2002, 27 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/RocnikovyProjekt_II-obrabeni.pdf.
3. STARRAGHECKERT *Popis stroje HX151* [online]. [vid. 2011-05-15]. Dostupné z: <http://www.starragheckert.com/sh/index.php/en/-produkte/bladecenters/-hx-series>.
4. LOESER GmbH *Pásové brusky* [online]. [vid. 2011-05-15]. Dostupné z: <http://www.loeser.de/index.php?id=82&L=1>.
5. WENZEL GmbH. *Popis stroje X-Orbit* [online]. [vid. 2011-05-15]. Dostupné z: <http://www.wenzelcmm.co.uk/Product.asp?SE=4>.
6. KLZ. *Měřidla – digitální posuvné měřítka* [online]. [vid. 2011-05-15]. Dostupné z: <http://www.vltava2009.cz/klz/default.asp>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a_e	[mm]	Šířka záběru
a_p	[mm]	Hloubka záběru
f_z	[mm]	Posuv na zub
k_m	[%]	Stupeň využití materiálu
m	[kg]	Hmotnost
m_o	[kg]	Hmotnosti obrobku
m_p	[kg]	Hmotnost polotovaru
n	[min^{-1}]	Otáčky
v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost
v_f	[$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	Posunová rychlost
z	-	Počet zubů
D	[mm]	Průměr
N_m	[kg]	Hmotnost polotovaru
Q_s	[kg]	Hmotnost obrobku
SIT	-	Siemen Industrial Turbomachinery
SST-300	-	Siemen Steam Turbine typ 300
SST-400	-	Siemen Steam Turbine typ 400
T	[min]	Trvanlivost
V	[m^3]	Objem
VB	[mm]	Velikost opotřebení
VBD	-	Vyměnitelná břitová destička

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Původní technologický postup výroby oběžné lopatky 17DH

Příloha 1

TECHNOLOGICKÝ POSTUP			
Součást: Oběžná lopatky 17DH			
Materiál: X22CrMoV12-1		Hmotnost Hrubá: 7,1 kg Čistá: 2,8 kg	
Číslo operace	Stroj / Pracoviště:	Popis operace	Nářadí
01	Řídící pracoviště 41AP	POZOR! Platí pro všechny činnosti tohoto technologického postupu: - dodržujte předpisy BOZP, PO a ochrany ŽP se kterými jste byli seznámeni, a pokyny svých vedoucích - vždy používejte příslušné přidělené osobní ochranné pomůcky a ochranná zařízení.	
10	Behringer HB263 60A05968 / I2661	Řezat na délku 237mm, odjehlit. Přenést atest materiálu.	Číselné razidla. Digitální posuvné měřítko
20	HX151 Star- ragHeckert 46A45321 / I2616	Frézovat hotově tvar listu a závěsu hotově, nechat provést kontrolu prvního kusu: - Hrubovat žlábek, hřbet profilu listu a tvar závěsu - Frézovat hotově tvar listu profilu - Frézovat hotově tvar závěsu	Upínač HSK 63 – ETA 435 Těleso frézy - 7710VR12-1052Z05R VBD - RPHT1204M08-422-X4 Tvarová fréza EFA 1054 Tvarová fréza EFA 1055 Digitální pos. měřítko 0-150 (Mitutoyo) Digitální výškoměr
30	Kontrola 35A09860 / I265	Kontrola prvního kusu lopatky, v případě shody s výkresovou dokumentací potvrdit operaci, v případě neshody vypsát protokol TQ 17DH/23.	Digitální pos. měřítko 0-150 (Mitutoyo) Digitální výškoměr 3D měřicí stroj Wenzel Drsnoměr Mitutoyo
40	Brusírna lopatek 43A05621 / I2613	Brousit tvar profilu listu lopatky, odjehlit tvar závěsu a bandáž. Omílat.	Šablona na měření tvaru profilu 17DH.
50	Konečná kontrola 35A09861 / I265	Konečná kontrola opracování lopatek, kontrola kompletnosti.	Digitální pos. měřítko 0-150 (Mitutoyo) Digitální výškoměr 3D měřicí stroj Wenzel Drsnoměr Mitutoyo