



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ VYBRANÉ SOUČÁSTI SESTAVY VAKUOVÉ VÝVĚVY

TECHNOLOGY OF A SELECTED PART OF THE VACUUM PUMP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tereza Lišková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Bc. Tereza Lišková
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Chladil, CSc.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie obrábění vybrané součásti sestavy vakuové vývěvy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie výroby vybrané součásti vakuové vývěvy se zaměřením na optimalizace technologie se zaměřením na zkrácení výrobních časů. Experimentální část bude zaměřena na operaci frézování.

Cíle diplomové práce:

- Charakteristika technologie frézování.
- Popis vakuové vývěvy.
- Rozbor výchozího stavu.
- Experimentální část.
- Technická zpráva.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje, Vyd. 1., Brno Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Brno. 2003. Dostupné také z:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Syllabus. Vysoké učení technické v Brně.

KOCMAN, K. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. New York Oxford University Press. 2nd. edition. 2005. ISBN 0-19-514206-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Téma studie je zaměřeno na snížení výrobních časů při frézování hliníkové součásti vakuové vývěvy. Primárním cílem práce je experimentálně ověřit navržené řezné podmínky při frézování lopatek rotoru a poté vyhodnotit dle předem daných parametrů. Výstupem je snížení času obrábění s ohledem na náklady, nástroj a stroj.

Klíčová slova

řezné podmínky, frézování, plánování experimentů, výrobní čas, lopatky rotoru

ABSTRACT

The content of study is related to reducing the production times of milling of aluminum component of vacuum pump. The primary aim of the thesis is to experimentally verify the proposed cutting conditions when milling the rotor blades and then evaluate them according to predetermined parameters. The output is reducing machining time with respect to cost, tools and machine.

Key words

cutting conditions, milling, design of experiments, the production time, the rotor blades

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LIŠKOVÁ, Tereza. *Technologie obrábění vybrané součásti sestavy vakuové vývěvy* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124668>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Chladil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Technologie obrábění vybrané součásti sestavy vakuové vývěvy** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24. června 2020

.....
Datum

.....
Tereza Lišková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat kolegům ze společnosti Edwards za poskytnutí materiálů a informací spojených s diplomovou prací, především Bc. Tomáši Navrátilovi.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ	10
1.1 Frézovací stroje	10
1.2 Nástroje pro frézování	13
1.2.1 Upínání nástrojů	13
1.3 Upínání obrobků	17
1.3.1 Dělicí přístroj	17
2 POPIS VAKUOVÉ VÝVĚVY	19
2.1 Rozdělení vývěv	19
2.2 Molekulární vývěvy	19
2.3 Hlavní části turbomolekulární vývěvy nEXT 85.....	20
3 ROZBOR VÝCHOZÍHO STAVU.....	26
3.1 Polotovary pro frézování.....	27
3.2 Výchozí vybavení pro frézování.....	27
3.3 Operace frézování	30
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
4.1 Stroj	35
4.2 Řezné nástroje	37
4.3 Tvorba programu	38
4.4 Plánování experimentu	39

4.5	Experiment 1	40
4.5.1	Test 1	41
4.5.2	Test 2	44
4.5.3	Testy řady B	46
4.5.4	Test 3	52
4.5.5	Testy řady A	54
4.5.6	Testy řady F	56
4.5.7	Test 4	58
4.6	Experiment 2	60
4.6.1	Test 5	61
5	TECHNICKÁ ZPRÁVA	67
5.1	Porovnání obráběcích časů	67
5.2	Ekonomické zhodnocení původního a nového stavu.....	68
5.3	Hodnocení povrchu součásti	70
5.4	Porovnání řezných podmínek	71
5.5	Hodnocení rotoru z hlediska funkčnosti ve vývěvě	72
	DISKUZE	73
	ZÁVĚR.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
	SEZNAM PŘÍLOH	81

ÚVOD

V posledních letech se stále rychleji vyvíjejí a zdokonalují řezné nástroje. V obráběcím procesu to vede k navyšování řezných parametrů, jako je posuv (f), hloubka záběru hlavního ostří (a_p), nebo řezná rychlost (v_c). V některých firmách není časový prostor na zdokonalování těchto proměnných u obrábění obrobků, které jsou již zavedeny ve výrobě, protože se technologové zpravidla zabývají více obráběcími procesy a řešením různých problémů, které jsou aktuální nebo se zrovna vyskytnou a je nutné je vyřešit v co nejrychlejším čase. Není tomu jinak ani ve firmě Edwards, kde sice prostor na zlepšování řezných parametrů u stávající výroby je, ale není ani zdaleka tak dostatečný, jak by bylo potřebné.

Práce proto bude zaměřena právě na téma zkracování výrobních časů, hlavně z hlediska změny řezných parametrů. Což dle předpokladů povede k větší produktivitě, ale i zmenšení nákladů na čas výroby. Experimenty budou prováděny na technologii frézování lopatek rotorové součásti vakuové vývěvy nEXT85.

Firma Edwards byla založena roku 1919 s hlavním sídlem v Londýně. Vakuové přístroje začala vyrábět o 20 let později. Společnost se rozrostla do více než 20 zemí po celém světě, přičemž největší výrobní centra jsou v Japonsku, Koreji a Číně. V České Republice byl v roce 2011 otevřen výrobní závod v Lutíně.

1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Při frézovacím procesu je materiál odebírán vícebřítým nástrojem (frézou), který koná hlavní rotační pohyb a je charakterizovaný řeznou rychlostí v_c . Vedlejší posuvový pohyb koná zpravidla obrobek a určuje jej posuvová rychlost v_f . Odebírání třísky je přerušované a každý zub frézy odřezává proměnlivou tloušťku třísky [1,2].

Dále je přibližovaná teorie úzce související s experimentální částí práce.

1.1 Frézovací stroje

Frézovací stroje lze rozdělit podle různých hledisek, např. podle [1,2,3]:

- způsobu řízení,
 - ruční
 - řízení programem (NC – číslicově řízené, CNC – počítačově číslicově řízené),
- velikosti obráběného materiálu,
- tvaru obráběného materiálu,
 - rotační obrobky,
 - skříňové a ploché obrobky.
- výkonu,
- atd.

Základním rozdělením frézek se však uvádí čtyři skupiny – konzolové, stolové, rovinné a speciální [1,3].

Konzolové frézky jsou pojmenovány podle výškově nastavitelné konzole, kde je umístěn stůl pro upnutí obrobku s podélným a příčným posuvem. Tento typ stroje lze rozdělit na vodorovné, horizontální a univerzální. Ke stroji je zároveň mnoho příslušenství, jako např.: dělicí přístroje, otočné stoly atd. [1,2,3].

Stolové frézky jsou specifické tím, že svislý pohyb vykonává vřeteno s nástrojem a stůl je tedy pevně ukotven v určité výšce a vykonává tedy jen pohyb ve vodorovné rovině. Stroje v této skupině jsou rozměrné a tuhé a jsou určeny pro větší a rozměrnější obrobky. Vyrábí se vertikální i horizontální [1,2].

Rovinné frézky jsou robustní a řadí se mezi nejvýkonnější druh frézek. Obrábí se na nich rozměrné a těžké obrobky. Stroje se využívají v kusových, malosériových, ale i v sériových výrobách [1,2].

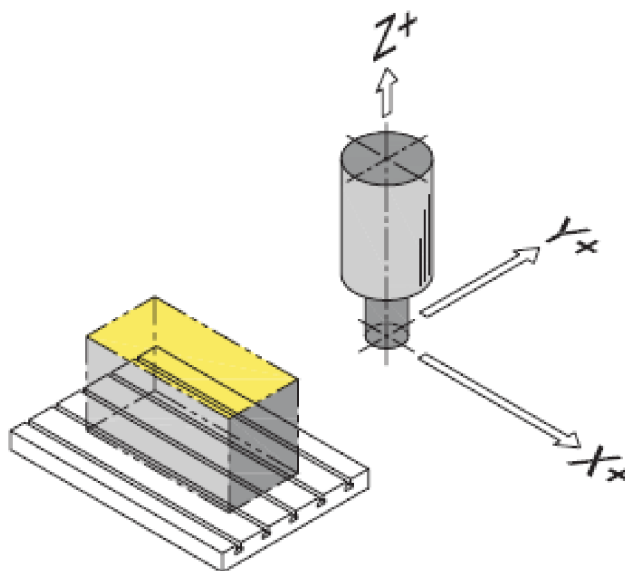
Speciální frézky jsou typy strojů na konkrétní druh obrábění, např.: frézky na výrobu ozubení, drážek atd. Do této skupiny jsou zařazeny i NC a CNC obráběcí stroje [1,3].

CNC obráběcí centra

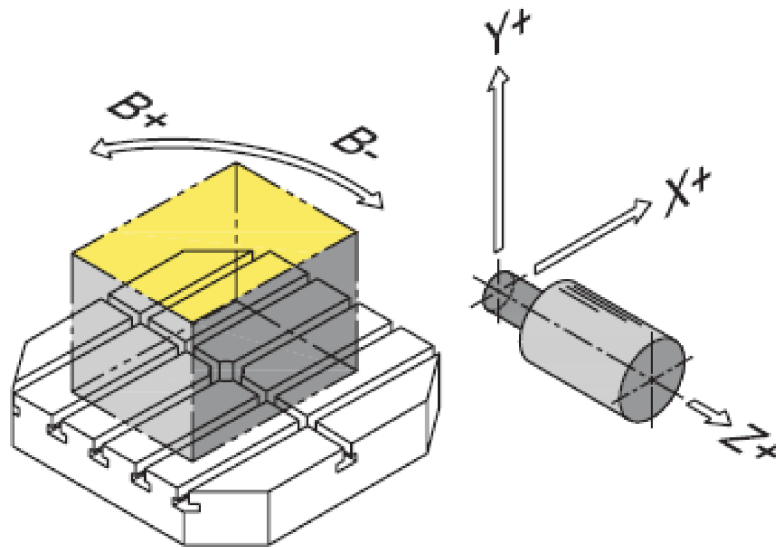
Je celá řada druhů CNC (Computer Numerical Control) strojů. Liší se svou velikostí, vhodností pro danou práci, funkcí atd. Mají však společný znak, který je tvořen jejich primárními osami X a Y [4].

Typy CNC frézovacích strojů [1,4]:

- podle počtu os,
 - tří až pětiosé,
- orientace os,
 - vertikální (obr. 1.1),
 - horizontální (obr. 1.2).



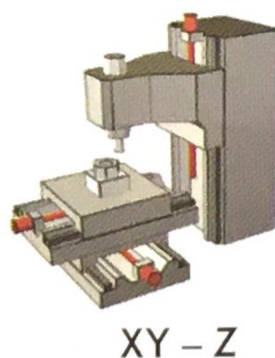
Obr. 1.1 Schématické znázornění vertikálního CNC frézovacího centra [4].



Obr. 1.2 Schématické znázornění horizontálního CNC frézovacího centra [4].

CNC obráběcí stroje jsou populární hlavně kvůli produktivitě, snižování strojních časů a možnosti použití lepších řezných podmínek (důraz kladen na stroj, nástroj a jeho upnutí), tedy i lepších nástrojů. Ovšem stroje mají i nevýhody, jako například větší pořizovací cena, složitější i dražší údržba, ale i nutná kvalifikovanější pracovní síla než u konvenčních strojů. CNC stroje mohou mít i různá přídavná zařízení, jako jsou zásobníky na nástroje (pak se jedná o CNC obráběcí centrum), chladicí a mazací zařízení apod. [1,2,3].

Pro frézování ve výchozím stavu i v experimentální části je používán stroj Matsuura FX-1 generace první (výchozí stav) a druhé (experimentální část). Oba tyto stroje jsou typu XY-Z, kdy dvěma osami (XY) se pohybuje obrobek a jednou osou vřeteník s nástrojem – osa Z. Schématické zobrazení je na obr. 1.3 [5].



Obr. 1.3 Kinematická struktura u obráběcích center [5].

1.2 Nástroje pro frézování

Obecně se frézy rozlišují podle způsobu použití, a to dle různých hledisek [1,2,6]:

- nástrojový materiál zubů,
- provedení zubů (výroba),
- směr zubů,
- počet zubů,
- geometrický tvar funkční části,
- způsob upnutí,
- smysl otáčení,
- konstrukční uspořádání zubů.

U CNC obráběcích center jsou nástroje se speciální stavebnicovou konstrukcí, která zahrnuje např.: držák, upínací členy, prodlužovací a redukční části a samotný nástroj. Nástroje se seřizují mimo stroj na zařízeních, která udávají přesnou hodnotu celkové délky, kterou lze ztotožnit s délkou uvedenou v programu. Mimo jiné většina těchto přístrojů dokáže změřit i průměr, rádius a úhly nástroje [3,7].

1.2.1 Upínání nástrojů

Díky výhodám, které plynou z použití CNC obráběcího centra, tedy hlavně použití vyšších rezných podmínek, je kladen velký důraz na upnutí nástroje. Samotné upnutí nástroje závisí na konstrukci frézy a musí splňovat následující podmínky [1,3]:

- pevnost v ohybu,
- ideální dynamické vyvážení,
- velké upínací síly, které dokáží přenést vysoké kroutící momenty,
- přesné upnutí s minimálním obvodovým házením,
- tlumení vibrací,
- přívod kapalin do místa řezu,
- rychlé a jednoduché upnutí, či uvolnění nástroje,
- bezpečnost práce.

Upínání pomocí kužele

Základním typem upínání, jenž využívá kužel, je upínání pomocí frézovacích trnů, které se výhradně používá **u nástrčných fréz** větších průměrů. Trn a vřeteno mají upínací kužel, který může být [2,3,8]:

- metrický (kuželovitost 1:20),
- Morse (kuželovitost 1:19 až 20),
- strmý (kuželovitost 1:3,5).

U metrického a Morse kuželu se kroučící moment přenáší díky jejich samosvornosti. Pro lepší přenos momentu je ve vřetenu obdélníkové vybrání, do kterého zapadá zploštělý konec frézovacího trnu. Strmý kužel není samosvorný a při jeho upínání ve stroji dochází pouze ke středění. Přenos kroučícího momentu probíhá pomocí dvou kamenů, které jsou na čelní ploše vřetene a vybráním v nákrůžku u frézovacího trnu. U CNC frézek se používá upnutí letmé, které požaduje přesné a rychlé upnutí seřizovaného nástroje [2,3,8].

Dalším využitím kuželového upínání jsou frézy s kuželovou stopkou (metrickou a Morse), které jsou buď přímo upínány do vřetene stroje nebo pomocí redukčních pouzder, které se používají v případě jiného typu nebo velikosti kužele ve vřeteni. Tento typ upínání se využívá i pro frézy s válcovou stopkou, které jsou upnuty pomocí upínací hlavice se sklíčidlem nebo kleštinou (obr. 1.4). Tyto upínací prvky mají rovněž upínací kužel, díky kterému jsou upnuty do vřetene stroje [2,3,8].

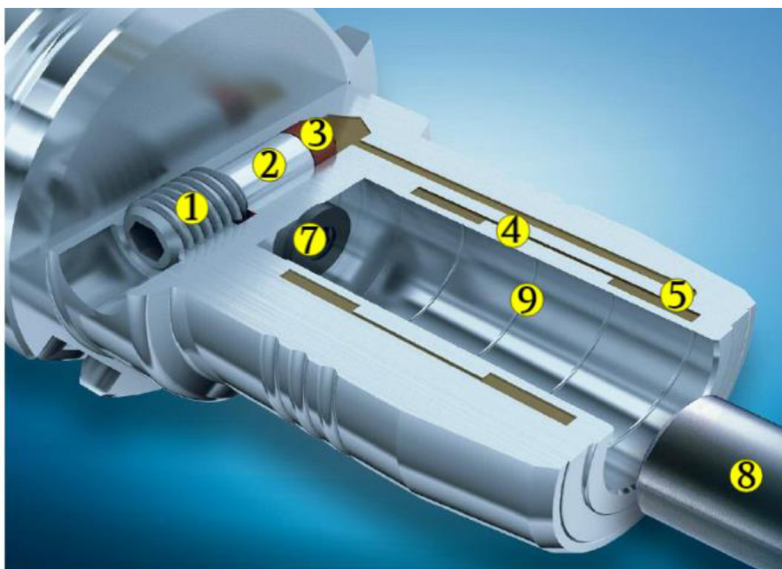


Obr.1.4 Příklad upnutí frézy s válcovou stopkou pomocí upínací hlavice s kleštinou [9].

Upínání fréz s válcovou stopkou

Frézy s válcovou stopkou lze upnout různými způsoby mezi které patří již zmíněné upínání pomocí upínacích hlavic. V dnešní době jsou tyto metody nahrazovány upínáním hydraulickým, tepelným nebo polygonálním [1,8].

Hydraulické upínače (obr. 1.5) využívají k upnutí nástroje tlak. Ten je vytvářen utěsněným pístem, který je pomocí šroubu zatlačován do dutiny, kde se nachází olej. Vznikající tlak působí na rozpínací pouzdro, které upne stopku frézy. Drážky v pouzdře slouží k zachycení nečistot. Mezi výhody můžeme zahrnout vysokou přesnost upnutí a tlumení vibrací [1,9,10].

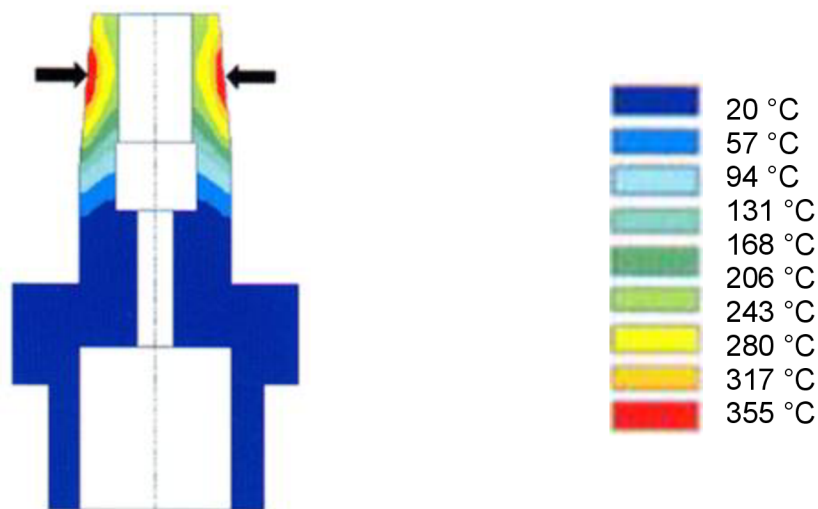


- 1 – tlakový šroub
- 2 – tlakový píst
- 3 – těsnění
- 4 – rozpínací objímka
- 5 – komorový systém
- 7 – nastavení délky šroubu
- 8 – nástroj
- 9 - drážky

Obr. 1.5 Hydraulický upínač [9].

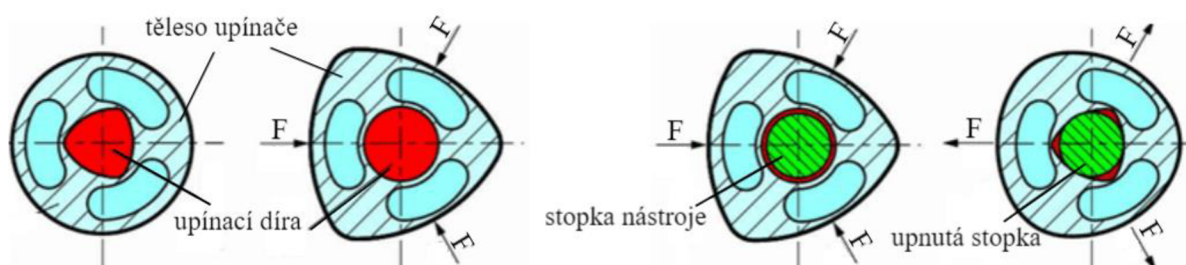
Tepelné upínače (obr. 1.6) fungují na principu tepelné roztažnosti materiálů, přičemž samotný upínač musí být vyroben ze speciálního materiálu, který při ohřevu zvětší průměr otvoru (v řádech setin milimetru). V zařízení pro tepelné upínání nástrojů se pomocí magnetického pole cívky upínač lokálně ohřeje na teploty 250 °C až 350 °C, do kterého se vkládá nástroj o pokojové teplotě, tím je zaručen rozdíl v průměrech. Při odepínání frézy se postupuje stejným způsobem a je využíváno vlastnosti délkové roztažnosti, kdy otvor upínače se zvětší více než průměr nástroje, který pak lze vyjmout. Ohřev trvá v řádech jednotek sekund. Ochlazení probíhá proudem vzduchu nebo pomocí vodní sprchy. Tento způsob upínání má řadu výhod, jako je např.: nízká cena, jednoduchost, možnost upínat i frézy s vyfrézovanou ploškou (weldon), nízká hřívivost nástroje apod. Nevýhodou může být vyšší riziko

popálení při neopatrné manipulaci, větší nároky na přesnost upínací stopky frézy a průměru otvoru v upínači [1,3,10,11,12].



Obr. 1.6 Tepelné ovlivnění upínače při tepelném upínání [11].

Polygonální upínání (obr. 1.7) získalo svůj název podle tvaru otvoru pro nástroj při uvolněném stavu, který je polygonální (mnohohúhelníkový). Tímto způsobem se upínají frézy s válcovou stopkou menších rozměrů. Funguje díky pružným deformacím, které vznikají při působení vnějších sil (vytvořené pomocí speciálního zařízení), a tím mění vnitřní otvor. Nástroj je vložen do díry a následně je působící tlak uvolněn, čímž se snaží dutina v upínači vrátit do původního tvaru. Výhodou tohoto typu upínání je vysoká radiální tuhost. Soustava upínače nemá pohyblivé díly, proto nejsou kladeny požadavky na jeho údržbu [1,3,10].



Obr. 1.7 Princip polygonálního upínání [9].

1.3 Upínání obrobků

Při frézování se obrobky upínají pomocí různých přípravků, které jsou charakterizovány jednoznačným a pevným uchycením součásti při obrábění. Důraz při upnutí je kladen na tuhost obrobku vzhledem k nástroji, ale také na rychlosti, přesnosti a jednoduchosti upínání. Přípravek je upínán k pracovnímu stolu frézky a samotné upínání součásti je realizováno mechanicky, elektromagneticky, hydraulicky, pneumaticky atd. U CNC frézovacích strojů se často používají tzv. technologické palety. Zvolení správného upínacího zařízení závisí např. na [1,6]:

- tvaru a velikosti obrobku,
- způsobu frézování,
- požadované přesnosti výroby,
- hmotnosti obrobku.

Nejlevnější volbou přípravku je použít univerzální (svěrák, sklíčidlo atd.), a ten pak podle svých potřeb upravit, či doplnit o další prvky při zachování požadavků kladených na obrobek [6].

1.3.1 Dělicí přístroj

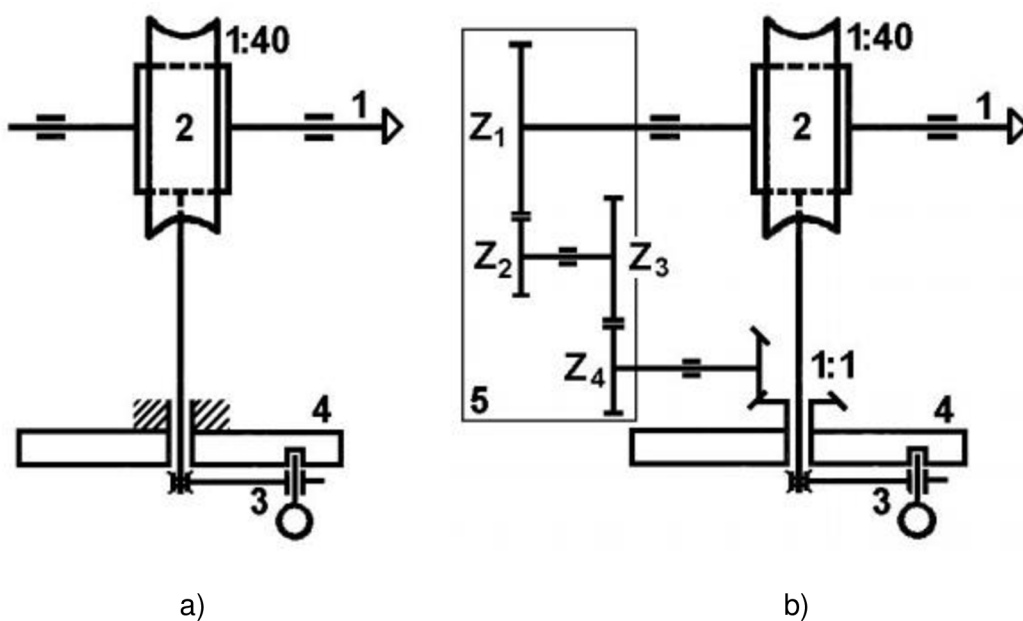
Dělicí přístroje jsou nejvyužívanější přídavná zařízení používaná na frézkách. Umožňují natáčení obrobku o daný úhel. Díky dělicím mechanismům lze obrobit na frézce např. čtyřhranné a šestihhranné matice, vícedrážkové hřídele, ozubená kola, vícebřité nástroje atd. Dělicí zařízení jsou jednoduchá a univerzální (obr. 1.8) [2,6,13].



Obr. 1.8 Univerzální dělicí zařízení [2].

Jednoduché dělicí zařízení je vhodné pro malý počet roztečí. Obvod obrobku lze rozdělit na 24, 12, 8, 4, 3 a 2 stejných dílů, pomocí dělicího kotouče, který má 24 zářezů na svém obvodu a pomocí západky nebo kolíku je zajištěno správné ustavení obrobku [2,13,14].

Univerzální dělicí zařízení je používáno pro 3 způsoby dělení – přímé, nepřímé a diferenciální. Přímé dělení univerzálním přístrojem je obdobné jednoduchému dělicímu zařízení. Nepřímé dělení se uskutečňuje pomocí dělicího kotouče a šnekového převodu s poměrem 1:40 (obr. 1.9 a). Diferenciální dělení (obr. 1.9 b) se využívá v případech, kdy si nelze vystačit s nepřímým dělením. Dělicí deska je spojena s dělicím vřetenem jedním až čtyřmi ozubenými koly a celé seřizování pro daný obrobek probíhá s pomocí příslušných tabulek, které jsou vytvořeny pro každý dělicí přístroj [2,13,14].



Obr. 1.9 Dělení: a) nepřímé, b) diferenciální [2].

Univerzální dělicí zařízení je při experimentální části využíváno jako 4. osy při obrábění na CNC frézovacím centru, které je blíže přiblíženo v kapitole 4.

2 POPIS VAKUOVÉ VÝVĚVY

Vakuum se v technice a fyzice označuje jako prostor, kde je tlak plynu daleko menší, než je atmosférický tlak okolí. Teoretická fyzika toto místo definuje následovně: „*Vakuum je stav systému s nejnižší možnou energií.*“ Podle této formulace je tedy absolutní vakuum považováno za prostředí s nulovým tlakem. Fyzikální stav vakua lze v ideální případě označit jako prostor, v kterém není přítomna žádná hmota. Může však obsahovat pole (např. gravitační, magnetické atd.). Příklad, který umí vytvořit vakuum se nazývá vývěva [15,16,17].

Vakuum se dělí do několika skupin podle tlaku, přičemž ve vesmíru se blíží hodnotám 10^{-15} Pa [15,17]:

- dokonalé vakuum – 0 Pa,
- extrémně vysoké vakuum – tlak menší než 10^{-10} Pa,
- ultravysoké vakuum – 10^{-10} až 10^{-7} Pa,
- vysoké vakuum – 10^{-7} až 10^{-2} Pa,
- nízké vakuum – 10^{-2} až 10^2 Pa.

2.1 Rozdělení vývěv

Základní rozdělení vývěv podle způsobu snížení tlaku [15,18,19]:

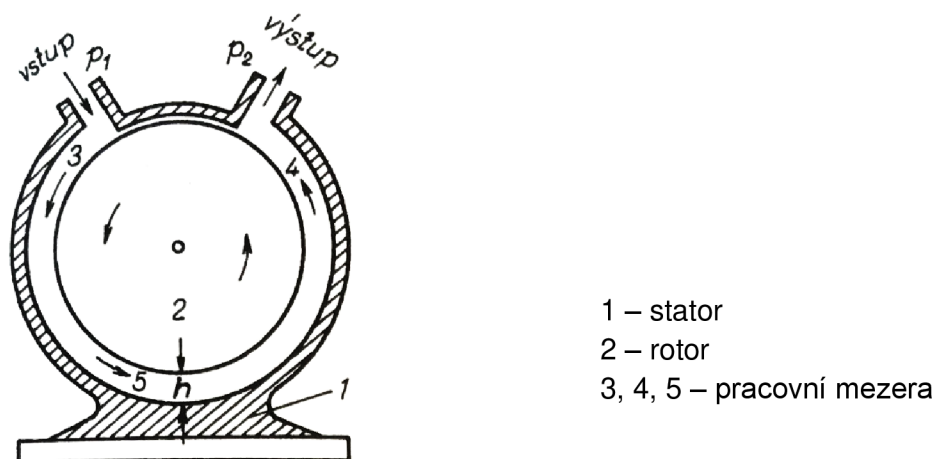
- transportní – molekuly jsou přenášeny od vstupního k výstupnímu otvoru (výfuku),
- sorpční – molekuly jsou uchovány a vázány uvnitř vývěvy (není výfukové hrdlo).

Transportní vývěvy se dále dělí na mechanické (pístové, rotační) a hybnostní. Práce bude dále zaměřena na hybnostní, konkrétně na molekulární vývěvy [15,18,19].

2.2 Molekulární vývěvy

Tyto přístroje pracují na základě přenosu impulsu. Molekuly získávají přídavnou složku rychlosti k rychlosti, kterou mají od tepelného pohybu. Rychlost je dodávána od povrchu pohybujícího se rotoru vývěvy, konkrétně od jeho lopatek. Nevýhodou je,

že nedokáží pracovat s atmosférickým tlakem, protože by se vlivem vysokého tření o nasávaný plyn lopatky zahřívaly a zničily. Proto je zapotřebí použít vývěvu, která vytvoří předvakuum. Molekulární vývěvy se dále dělí na vlastní molekulární (obr. 2. 1) a turbomolekulární vývěvy. [15,17,19,20].



Obr. 2.1 Schéma vlastní molekulární vývěvy [19].

Předmětem experimentu je turbomolekulární vývěva (obr. 2.2), která částečně odstraňuje problém s malou mezerou mezi státorem a rotorem u vlastních molekulárních vývěv. Rotor a stator má lopatky, které musí být vhodně orientovány. Návrh a výroba takového rotoru je velmi náročná tedy i drahá, vývěvy jsou však velice výkonné, dokáží vytvořit ultravysoké dokonce i extrémně vysoké vakuum [15,19,20].

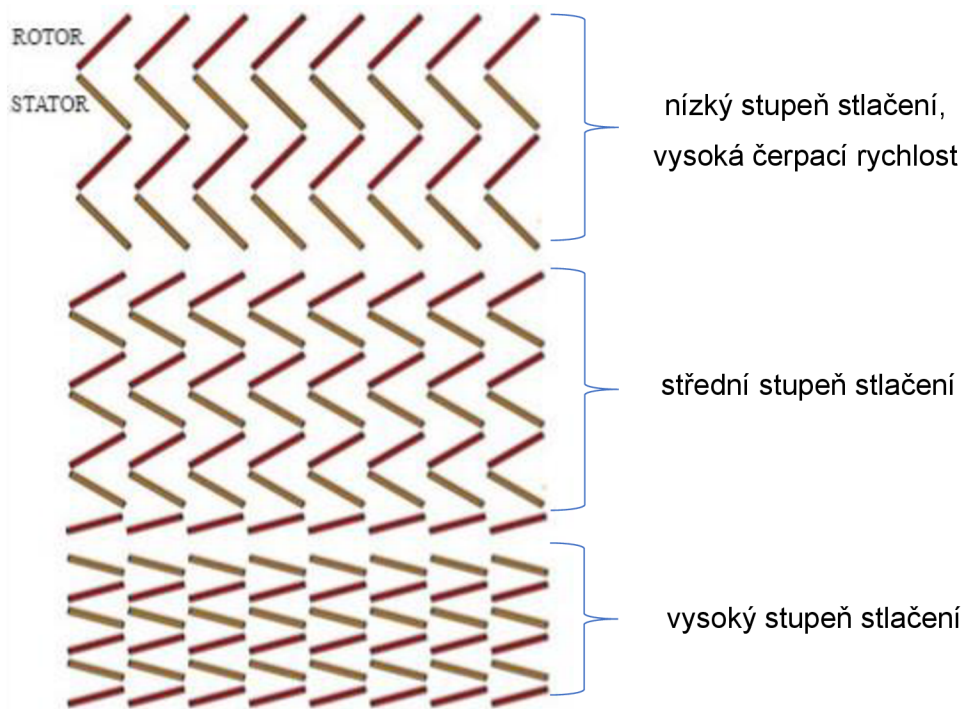
2.3 Hlavní části turbomolekulární vývěvy nEXT 85

Důležitou částí sestavy turbomolekulární vývěvy nEXT 85 (obr. 2.2) je rotor s lopatkami. Ustavuje se pomocí hnacího hřídele přes ložiska. Rotor má několik různých řad lopatek a každá skupina má své specifikace – sklon (obr. 2.3), velikost, počet atd. Lopatky na vstupu do vakuové vývěvy mají mezi sebou větší mezery a postupně se zmenšují. Mezi řadami jsou pak pevně umístěny lopatky statoru, které opět mají své specifikace. Díky vzájemné orientaci lopatek pak dochází k vhodnému odrazu molekul (obr. 2.4) vzduchu správným směrem (k výfuku) a dochází k odčerpávání a snižování tlaku, tedy tvorbě vakua. Rotor se otáčí v řádech desetitisíců za minutu (až $90\,000\text{ min}^{-1}$), je to díky vytvořenému předvakuu, protože

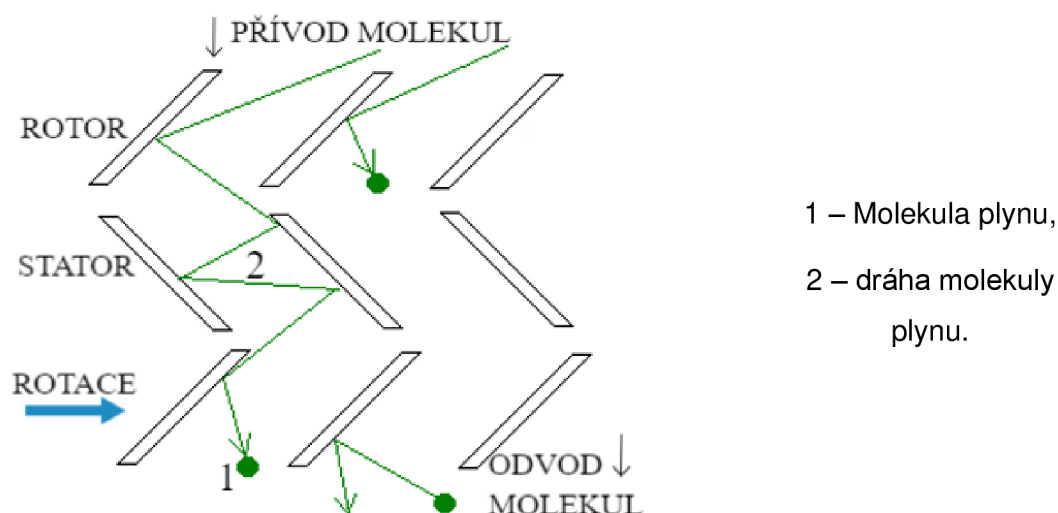
dochází k menšímu tření (mezi lopatkami a molekulami vzduchu), lze tedy bez významného zahřátí dosáhnout vysokých otáček [20,21].



Obr. 2.2 Turbomolekulární vývěva nEXT 85 [22].



Obr. 2.3 Vliv sklonu rotorových lopatek na požadavky zákazníka [23].



Obr. 2.4 Schéma pohybu molekul plynu [24].

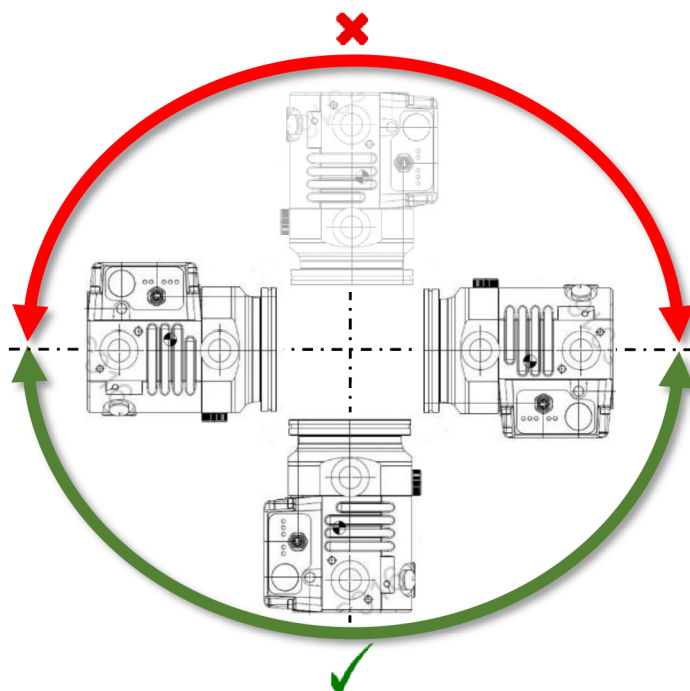
Ložiska v sestavě jsou dvě. Na vstupu do vývěvy (zpravidla nahoře) se v dnešní době používá magnetické, které zajišťuje, že sestava vývěvy není znečištěna mazacím olejem a vytváří ideální nulové tření, minimální vibrace atd. Ložisko (obr. 2.5), které je zalisované na hnací hřídeli a uloženo v podstavci vývěvy je zpravidla jediným kontaktním místem mezi rotorem a statorem. Je mazáno a utěsněno tak, aby neznečistovalo prostor vývěvy, kde se vytváří vysoké vakuum. U moderních vývěv se používají keramické kuličky, které oproti ocelovým mají výhody [21,24,25,26]:

- nízká hmotnost,
- nižší koeficient tření,
- vyšší tlumení vibrací,
- menší míra opotřebení a kumulace tepla.



Obr. 2.5 Ložisko s keramickými kuličkami [22].

Velkou výhodou, tohoto typu vývěvy a ložiska je, že je lze vyměnit na místě a není nutné ji vozit do servisu. Životnost ložiska se stanovuje na 4 roky. Z důvodu možného znečištění nesmí být vývěva umístěna v jiné poloze, než je uvedeno na obr. 2.6. Musí být tedy vstupním hrdlem nahoru (osa rotace svislá) nebo do stran (osa rotace horizontální) [22].



Obr. 2.6 Možnost polohování vývěvy nEXT 85 [22].

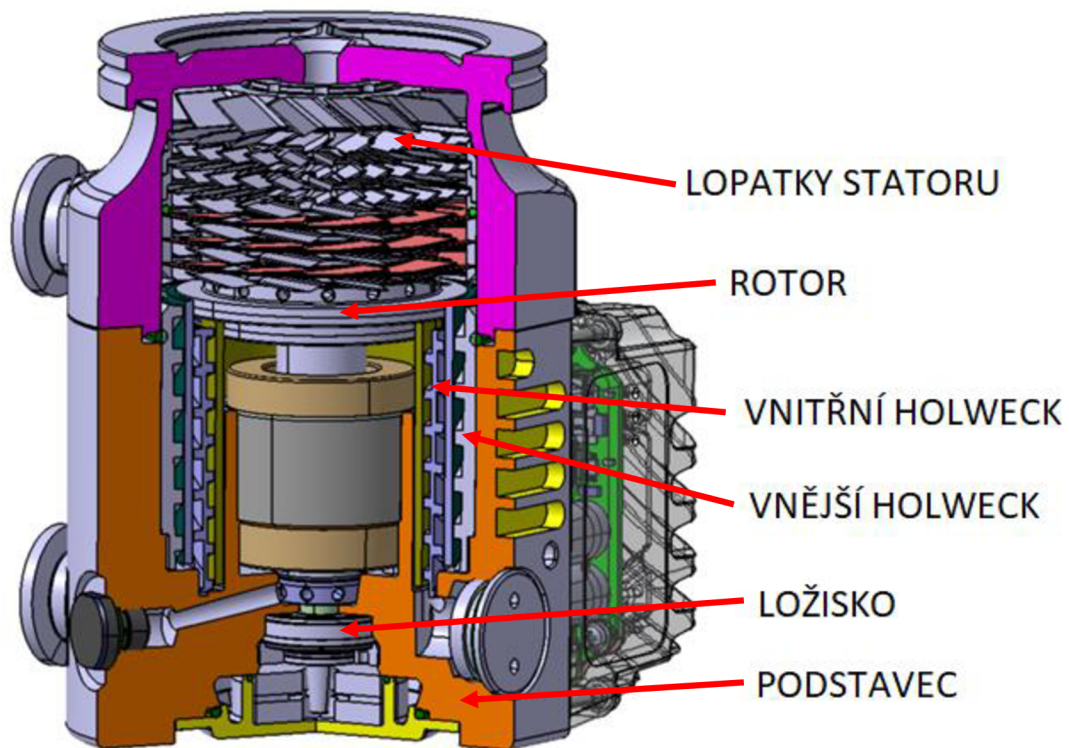
Podstavec turbomolekulární vývěvy je důležitou součástí, protože ustavuje všechny komponenty, jak otáčející se (rotor s lopatkami), tak i stojící (stator s lopatkami a holweck). Důležitou součástí jsou i elektrická zařízení, jako je motor, snímače apod. Protože vývěva pracuje s předvakuum, není náročná na spotřebu elektrické energie. Ke svému fungování potřebuje vývěva napájení pomocí stejnosměrného proudu 24 V až 48 V [21,27].

Turbomolekulární vývěva je kombinována s výstupním molekulárním stupněm Holweckova (obr. 2.7) typu. Jedná se o válcový stator se šroubovitou drážkou. U vývěvy nEXT 85 se rozlišuje vnější (drážka pouze z jedné strany obr. 2. 7 a) a vnitřní (drážka z vnější i vnitřní strany obr. 2. 7 b). Tím vývěva dosahuje ještě vyšších hodnot komprese, a tedy ultravysokého vakua. Dalším důležitým příslušenstvím jsou chladicí zařízení (ventilátory), které brání přehřívání vznikající zejména díky vysokým otáčkám [22,28].



Obr. 2.7 Holweck: a) vnější, b) vnitřní [22].

Turbomolekulární vývěva musí pracovat s předvakuum, a dosahuje tak nízkých tlaků ($5 \cdot 10^{-9}$ až $5 \cdot 10^{-10}$ Pa). Tohoto nízkého tlaku nabývá hlavně díky dvoustupňovému provedení, kdy na vstupu do vývěvy je několik řad statorových a rotorových lopatek a následně se stlačuje v druhém stupni vývěvy holweckova typu. Rychlost odsávání plynu se liší druhem odsávaného plynu, například dusík (N_2) je odsáván zhruba 85 litrů za sekundu, vodík (H_2) asi 58 litrů za sekundu. Záleží také na požadavcích zákazníka (ty jsou zpravidla proti sobě), jestli upřednostňuje sací rychlost, vytvořené vakuum a podobně [28,29].

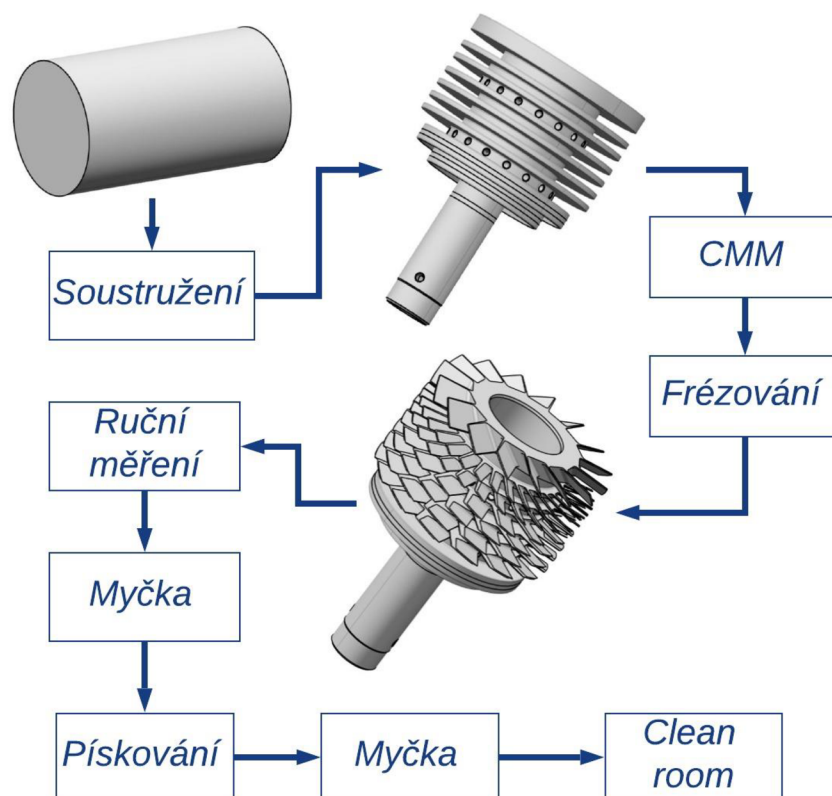


Obr. 2. 8 Schéma vakuové vývěvy nEXT 85 v řezu [22].

3 ROZBOR VÝCHOZÍHO STAVU

Vybranou součástí sestavy je rotor s lopatkami, který se vyrábí z tyčového polotovaru EN AW 7075, jedná se o vytvrditelnou hliníkovou slitinu za studena se zinkem (AlZn5,5MgCu), dobře obrobitelnou s vysokou pevností. Rozbor chemického složení je uveden v příloze 1 [30].

Na obr. 3.1 je zobrazen sled operací. Polotovaz je soustružen na dvě operace. Kus se následně kontroluje na CMM (Coordinate Measuring Machine) od firmy Zeiss. Poté se frézují lopatky na vertikálním frézovacím centru. Tato operace je předmětem práce. Následuje kontrola, mytí, pískování, finální mytí a přesun do speciální místnosti tzv. „clean room“, což je místnost se speciální klimatizací a odvodem vzduchu, tak aby docházelo k co nejmenšímu víření prachu a nečistot. V této místnosti dochází ke skládání jednotlivých komponent dohromady a vzniku samotné turbomolekulární vývěvy. Díky vysoké čistotě a opatrnosti při sestavování, nedochází ke znečišťování vývěvy a lze ji uvést do provozu ihned po zakoupení, bez žádných „čisticích“ hodin.



Obr. 3.1 Sled operací výroby rotoru vývěvy nEXT 85.

3.1 Polotovar pro frézování

Vstupní polotovarem (výkres polotovaru v příloze 2) pro frézování je obrobek ze soustruhu (obr. 3.2), který má osoustružené jednotlivé řady. Před samotnou frézovací operací je důležité zaslepit otvory mezi řadami šroubky (2 řady po 16 šroubcích, tedy 32 šroubků). Tyto díry se závity slouží následně k vyvážení rotoru. Správná vyváženost je důležitá hlavně z hlediska otáček rotoru, které při maximálním výkonu turbomolekulární vývěvy dosahují až $90\,000\text{ min}^{-1}$. Nevyváženost se odstraňuje použitím určitého množství šroubků o dané váze a následné kontrole na speciálním vyvažovacím zařízení. Zaslepení děr je důležité při pískování součásti, protože by se touto operací mohly závity poškodit. K zasleповání dochází před frézováním, protože po frézování a před pískováním jsou obrobené lopatky ostré a mohlo by dojít k poranění [31].



Obr. 3.2 Polotovar pro frézování.

3.2 Výchozí vybavení pro frézování

Stroj

Frézovací operace se provádí na stroji od japonské firmy Matsuura, typ FX – 1GI (obr. 3.3). Je to vertikální tříosé frézovací centrum se zásobníkem na nástroje. Specifikace stroje jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Technické údaje stroje [32,33].

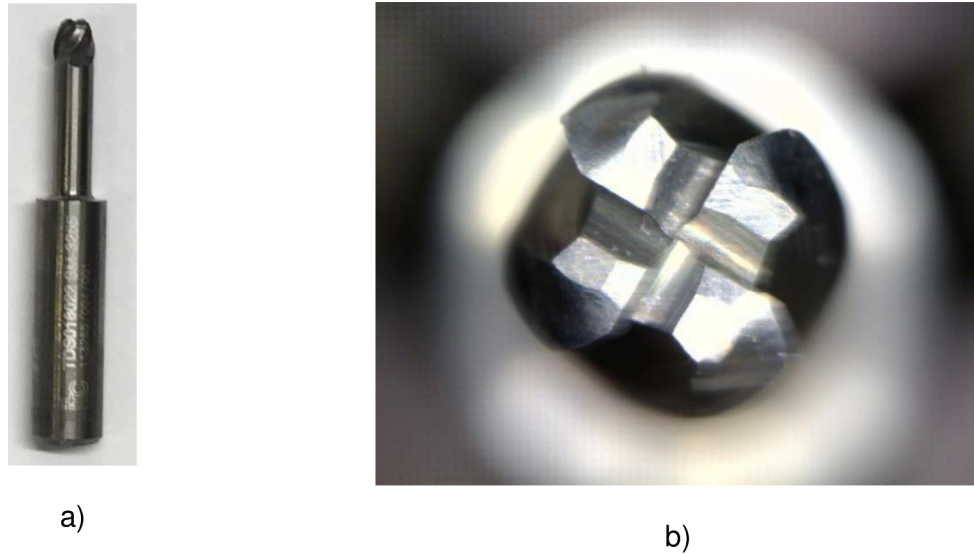
Matsuura FX – 1GI	
Řídicí systém	Matsuura J 300
Pojezdová dráha osa X	510 mm
Pojezdová dráha osa Y	360 mm
Pojezdová dráha osa Z	460 mm
Rychloposuv: (X/Y/Z)	30 / 30 / 24 m·min ⁻¹
Posuv: (X/Y/Z)	15 m·min ⁻¹
Otáčky vřetene	30 000 min ⁻¹
Nástrojová kapacita	20
Velikost stolu	760 x 380 mm



Obr. 3. 3 Stroj Matsuura FX – 1GI.

Nástroj

Výchozími nástroji jsou frézy s válcovou stopkou o různých průměrech. Na obr. 3.4 je zobrazen největší používaný nástroj o průměru 3 mm pro frézování lopatek rotoru. Upnutí nástrojů je realizováno pomocí tepelného upínání.

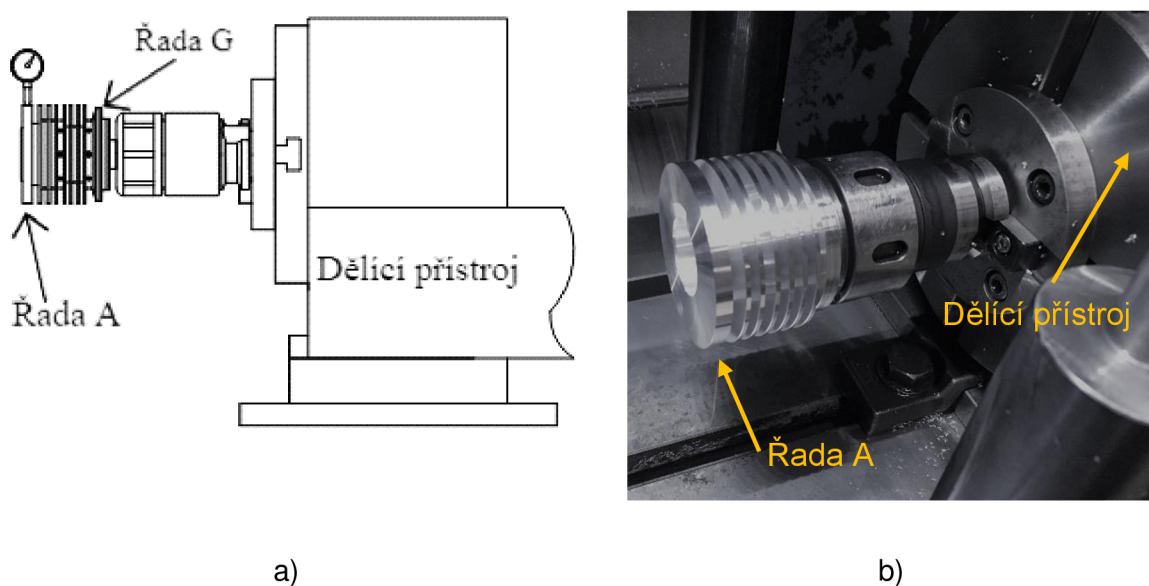


Obr 3.4 Čelní válcová fréza: a) celý nástroj, b) pohled na špičku a břity nástroje.

Každý nástroj je specifický svými parametry a odlišuje se úhlem, průměrem a počtem břitů. Průměr nástroje je dán šířkou kapsy mezi lopatkami v dané hloubce jednotlivých řad.

Upínání obrobku

Obrobek je upnutý za válcovou hřídelovou část kleštinovým upínacím trnem, který je ustaven v dělicím přístroji (obr. 3.5). Díky dělicímu přístroji, jenž je zautomatizovaný se strojem, lze obrobek otáčet o určitý úhel, a tak přesně obrobit lopatky v dané pozici. Upínací zařízení je seřizováno dle platné firemní dokumentace.

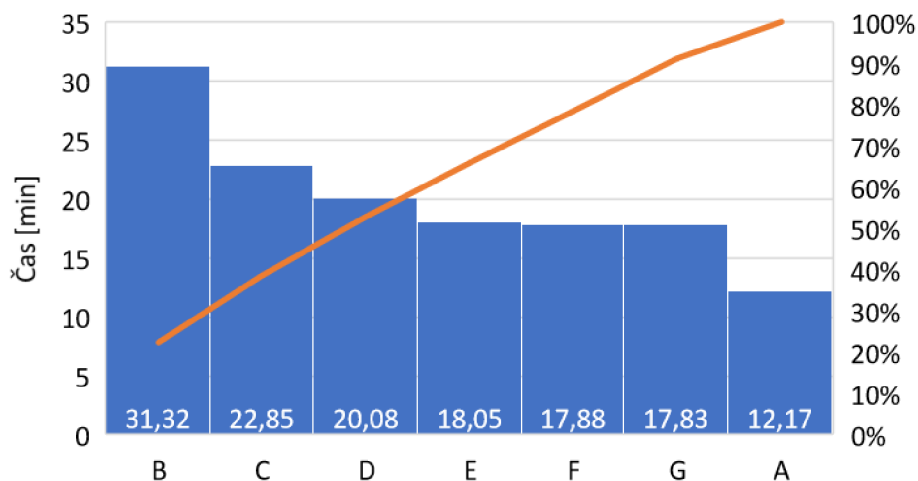


Obr. 3. 5 Upnutý obrobek ve stroji: a) schematicky, b) reálně [34].

3.3 Operace frézování

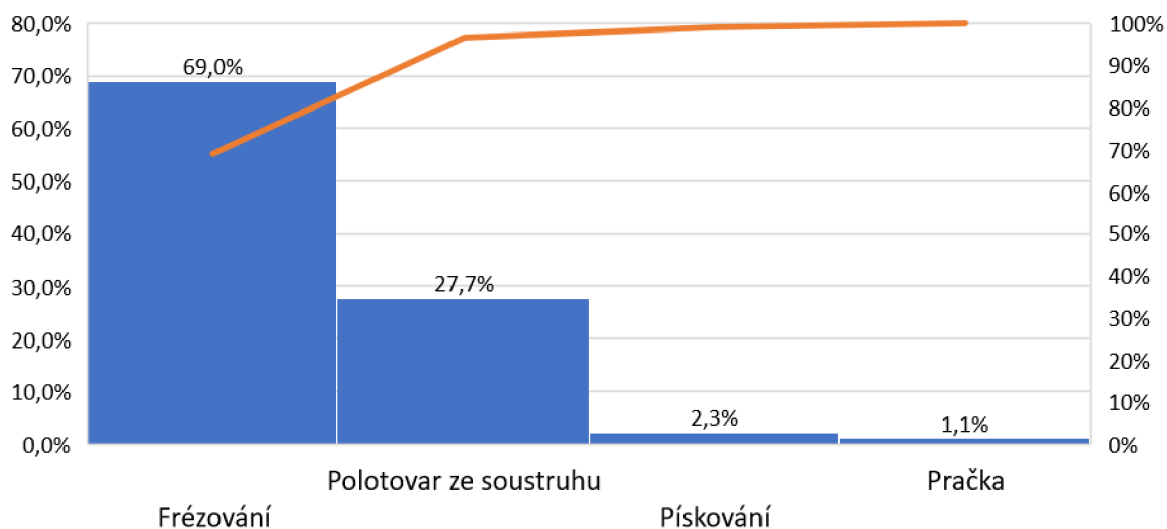
Při frézování se primárně neobrábí lopatka, ale kapsa mezi dvěma lopatkami (výkres obrobku v příloze 3). Pokud tedy v jedné řadě je 30 lopatek, je zapotřebí obrobít 30 kapes mezi nimi. Dělicí přístroj tedy rozdělí 360° na 30 částí. Operace pak probíhá postupným frézováním kapsy do určité hloubky dle požadavků pro danou řadu, následně dělicí přístroj pootočí obrobek o dané stupně a frézuje se další kapsa. Po obrobení celé řady se nástroj a dělicí přístroj posune do výchozí polohy. Zpravidla každou řadu obrábí jiný nástroj, takže následuje jeho výměna. Poté se obrobek natočí do polohy pro další frézování a celý proces se opakuje. Po frézovací operaci je důležité zkontrolovat tloušťku a hloubku lopatek. Stroj, na kterém se rotor turbomolekulární vývěvy vyrábí, má systém, který neumí průměrové korekce, proto nástroj nelze seřídit, aby se vyráběli lopatky (kapsy) na nominální tloušťku. Při větším otupení (zmenšení průměru nástroje) se kapsy zmenšují a tloušťka lopatek se zvětšuje, v některých případech, kdy se tloušťka již nevhodně vejde do tolerančního pole, je nutné nástroj vyměnit. Životnost nástrojů není přesně stanovena. Operátoři musí pozorovat obrobek a při větším výskytu otřepů vyměňují nástroj, protože u následujícího kusu zpravidla dochází ke zlomení nástroje. Ukazatelem životnosti může být i právě zmiňovaná tloušťka lopatek, při jejímž přiblížení horní tolerance je důležité nástroj vyměnit.

Na obr. 3.6 je paretův diagram, který zachycuje čas obrábění jednotlivých řad (v čase jsou započítány i vedlejší časy – výměna nástrojů, přejezdy apod.), přičemž řadu E, F a G frézuje stejný nástroj, protože řady jsou svými parametry velmi podobné (F a G jsou stejné). Celkový čas obrábění je 2 hodiny 23 minut a 18 sekund. Z paretova diagramu na obr. 3.6 je rovněž patrné, že řada B je časově nejnáročnější.



Obr. 3. 6 Paretův diagram obráběcích časů jednotlivých řad u výchozího stavu.

Cena polotovaru, frézování a přídavných operací (pískování a mytí obrobku) je znázorněna na obr. 3.7. Jednotlivé operace v grafu jsou vyjádřeny v procentuálním podílu. Z paretova grafu vyplývá, že nejnákladnější je operace frézování.



Obr. 3. 7 Paretův diagram ceny jednotlivých operací v procentech.

Samotné frézování je rozděleno na tři operace – hrubování středu, hrubování a dokončování. Každá tato operace má své vlastní řezné podmínky v závislosti na použitém nástroji a parametrech dané lopatky. Hodnoty zaznamenávané v následujících tabulkách jsou odečteny z programů ve stroji.

1. operace hrubování středu

Při hrubování středu je radiální hloubka řezu rovna průměru nástroje. Axiální hloubka řezu je poloviční jak u samotného hrubování, je to z důvodu, že středové hrubování se jede na více záběrů (viz tab. 3.2).

Tab. 3.2 Řezné podmínky výchozího stavu pro hrubování středu.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
A	Ø 3	0,75	3 000	30 000	2
B	Ø 1	0,342	3 000	30 000	2
C	Ø 1,2	0,333	3 000	30 000	2
D	Ø 1,2	0,338	3 000	30 000	2
E	Ø 1	0,339	3 000	30 000	2
F, G	Ø 1	0,333	3 000	30 000	2

2. operace hrubování

Při hrubování radiální hloubka řezu rovna třem desetinám průměru nástroje, axiální hloubka řezu je dvojnásobná, než u hrubování středu (2 záběry). V následující tab. 3.3 jsou uvedené parametry pro hrubování.

Tab. 3.3 Řezné podmínky výchozího stavu pro hrubování.

Řada	Průměr nástroje D [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,5	3 000	30 000	0,9 (0,3 · D)
B	Ø 1	0,684	3 000	30 000	0,3 (0,3 · D)
C	Ø 1,2	0,666	3 000	30 000	0,36 (0,3 · D)
D	Ø 1,2	0,676	3 000	30 000	0,36 (0,3 · D)
E	Ø 1	0,679	3 000	30 000	0,3 (0,3 · D)
F, G	Ø 1	0,667	3 000	30 000	0,3 (0,3 · D)

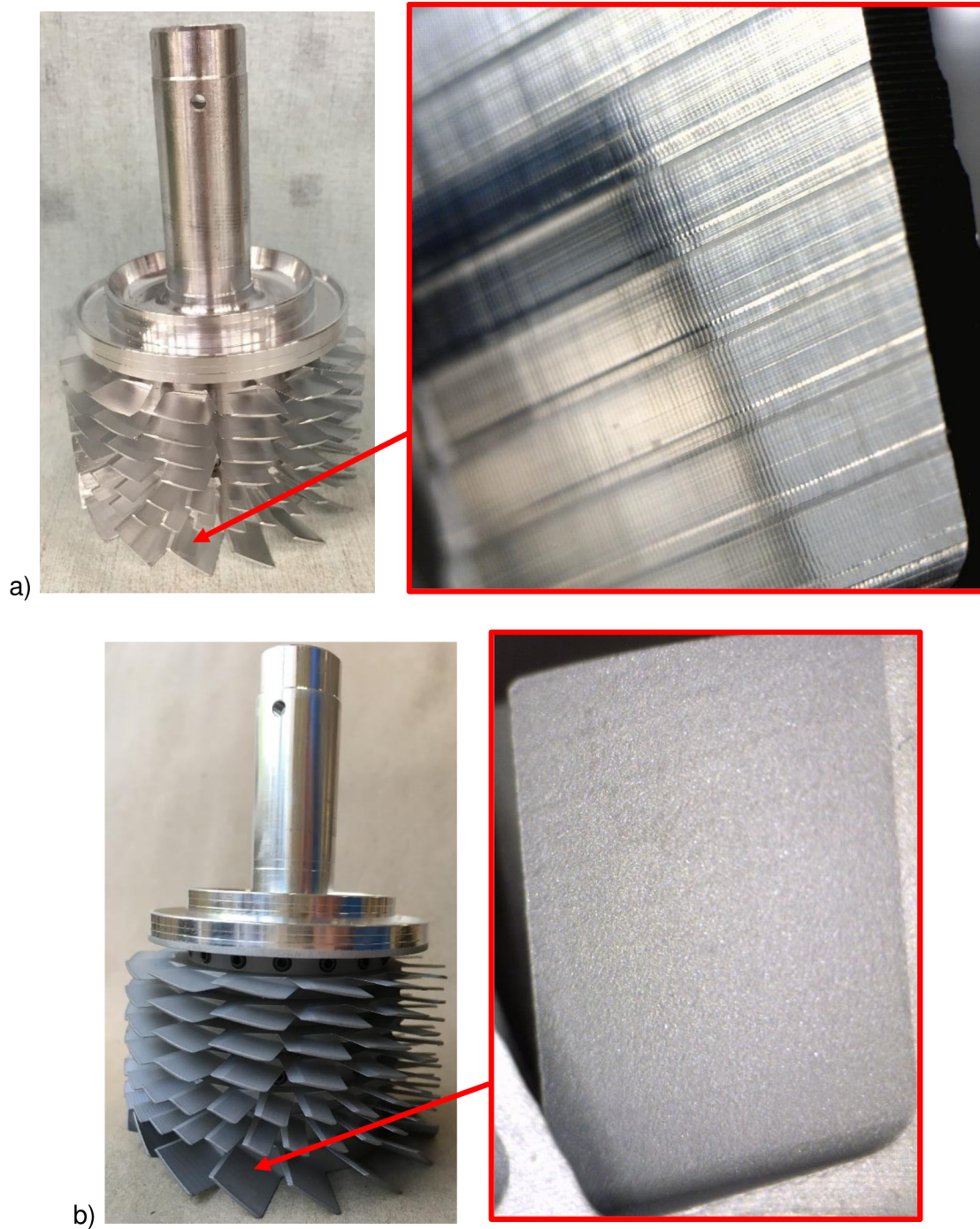
3. operace dokončování

Operace dokončování je určena hlavně pro zlepšení jakosti povrchu a vyrovnání nerovností, které mohly vzniknout během hrubování. Nastavení posuvu u výchozího stavu je stejné jako při hrubování, což není nejvhodnější řešení. Řezné parametry jsou v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Řezné podmínky výchozího stavu pro dokončování.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,5	3 000	30 000	0,05
B	Ø 1	0,684	3 000	30 000	0,05
C	Ø 1,2	0,666	3 000	30 000	0,05
D	Ø 1,2	0,676	3 000	30 000	0,05
E	Ø 1	0,679	3 000	30 000	0,05
F, G	Ø 1	0,667	3 000	30 000	0,05

Na následujícím obr. 3.8 jsou ukázané obrobky po frézování a po pískování. Je důležité pískovat všechny frézované lopatky a odstranit tak ostřiny. Také z vizuálního hlediska dosahuje obrobek lepších výsledků (viz obr. 3.8). Při upínání do pískovacího stroje se upíná rovněž za hřídelovou část, která je zároveň krytá proti pískování, z důvodu uložení ložiska. Přikrývá se i spodní část kusu, kde je do díry lisováno magnetické ložisko.



Obr. 3. 8 Výchozí kus: a) po frézování, b) po pískování.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro snížení výrobních časů při frézování je nutné brát v úvahu následující možnosti:

- změna stroje,
- změna nástrojového vybavení,
- změna technologie výroby.

Při inovaci technologie výroby se nesmí zapomenout na stroj. Je důležité uvažovat, co nabízí stávající strojový park v dané firmě, ale i zvážit koupi nového stroje a s tím souvisí další propočty návratnosti peněz atd. V práci bude uvažováno použití stroje, který již firma vlastní, protože strojový park je rozsáhlý.

Řezné nástroje mají velký vliv na použití řezných podmínek. Zásadní při obrábění je geometrie, použitý materiál, ale i povrchová úprava nástroje (povlak, leštění). Při zvyšování řezných podmínek u stávajících nástrojů je možno docílit snížení výrobních časů, ale zpravidla tento zásah vede rovněž ke snížení trvanlivosti. Návrh nové geometrie a výroby samotného nástroje, může přispět cennými minutami k trvanlivosti, a tedy k ušetření nákladů na nové nástroje.

Pro zefektivnění výroby je uvažováno i se změnou technologie výroby. Hlavním ukazatelem zvýšení produktivity je objem odebraného materiálu za časovou jednotku, což je MRR (Material Removal Rate) v $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ [35].

4.1 Stroj

Nejvhodnější stroj ze strojového parku, který má firma, je novější generace Matsuury typ FX – 1GII (obr. 4.1) – druhá generace. Je to rovněž vertikální tříosé frézovací centrum se zásobníkem na nástroje. Specifikace stroje jsou uvedeny v tab. 4.1. Velkou výhodou je řídicí systém, který dokáže pracovat s průměrovými korekcemi nástrojů, protože na dosavadním stroji to řídicí systém neuměl. Z tohoto důvodu bylo vždy nutné vyměnit nástroj, když lopatky rotoru byly mimo toleranční pole, které udávala výkresová dokumentace.

Tab. 4.1 Technické údaje stroje [32].

Matsuura FX – 1GII	
Řídicí systém	Fanuc series 16iM
Pojzdová dráha osa X	550 mm
Pojzdová dráha osa Y	410 mm
Pojzdová dráha osa Z	460 mm
Rychloposuv: (X/Y/Z)	30 / 30 / 30 m·min ⁻¹
Otáčky vřetene	33 000 min ⁻¹
Nástrojová kapacita	30
Velikost stolu	860 x 400 mm



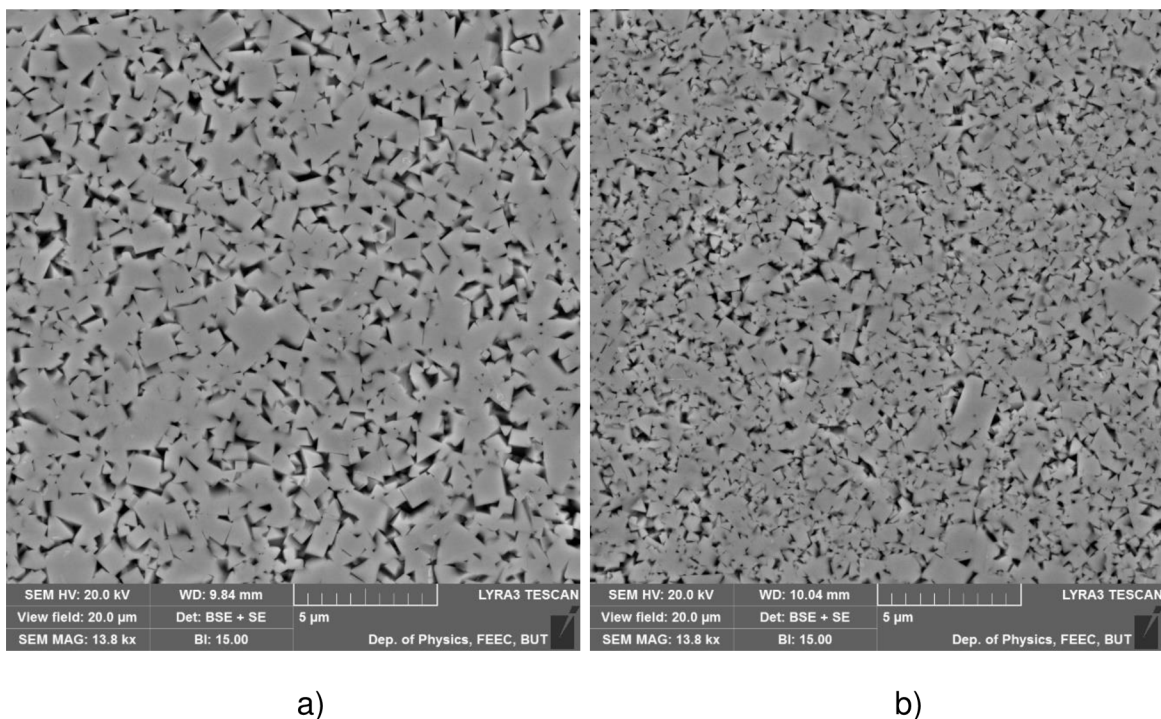
Obr. 4.1 Stroj Matsuura FX – 1GII.

4.2 Řezné nástroje

Byla provedena poptávka po nových nástrojích od místní firmy. Výrobce nástrojů navrhl novou, ale podobnou geometrii. Přičemž cena nástroje se snížila na třetinu ceny původní. Původní a nový nástroj je na obr. 4.2. Další změnou u nástroje byl počet břitů. U všech pěti nových typů nástrojů (při výrobě rotoru nEXT 85) jsou tři břity. Při dodatečných testech byla zjišťována mikrostruktura (obr. 4.3) nástroje ze slinutého karbidu, která ovlivňuje i jeho otupování.



Obr. 4.2 Řezný nástroj: a) původní, b) nový.



Obr. 4.3 Mikrostruktura řezného nástroje: a) původního, b) nového.

Z obr. 4.3 je patrné, že velikost zrn u nového nástroje je daleko jemnější než u starého. Při vylomení většího zrna dojde k rychlejšímu otupování než při vylamování malých zrn. Obrázky jsou pořizované ve stejném měřítku a to 5 μm . Ve větším detailu je mikrostruktura zobrazena v příloze 4.

4.3 Tvorba programu

Tvorba programu probíhala ve speciální excelovské tabulce, která byla vytvořena pro obrábění těchto typů rotorů. Postupem času byla upravována a doplňovaná, pro zamezení chyb vytvořených v programu, ale i k vylepšování výpočtů. Každou změnu je nutné odladit přímo na stroji a zkontrolovat, zda vytváření programu je správné. V tabulce je důležité vyplnit informace o obrobku (výkresové hodnoty), nástrojích a určit řezné podmínky (posuv na zub, axiální a radiální hloubka řezu a řezná rychlost), kterými bude obrobek frézován. Poté pomocí vzorců a výpočtů excel vygeneruje programy – hlavní a vedlejší (počet vedlejších programů odpovídá počtu řad obrobku), které lze vyexportovat do textového dokumentu. Důležitým krokem je kontrola propojenosti hlavního a vedlejších programů a to zejména, kvůli vyvolávání podprogramu pro danou řadu, kontroluje se i správné označení nástroje a parametry týkající se sondy, která na začátku programu provádí měření. Následně lze tento soubor pomocí přenosného zařízení vložit do stroje pod názvem ve tvaru „OXXXX“, přičemž znak X představuje číslici. Pro práci v tabulkách je zapotřebí školení. Je důležité upravovat jen hodnoty, které jsou k tomu určené. Při přepsání jiných hodnot může dojít k přepsání vzorců, které jsou ve většině okének a může být tak poškozena např. kontrola, která je přednastavena formátováním, případně chyba může proniknout až do samotného vygenerovaného programu a může nastat poškození nástrojů či stroje.

Při zadávání maximální hloubky záběru se v excelovské tabulce zadává maximální hodnota, pomocí výpočtů je pak tato maximální hodnota rozdělena na daný počet záběrů, dle požadované celkové hloubky lopatek pro danou řadu.

V práci jsou mnohdy udávány pojmy posuv na zub a posuv či rychlost posuvu. Do excelovských tabulek, které udávají parametry nástroje jsou udávány posuvy na zub, které jsou doporučeny dle dané operace, ale do programu je zapotřebí uvést rychlost posuvu. Primárně měněný posuv na zub (f_z v mm) je pak přepočítávaný pro každou

operaci na rychlost posuvu (v_f v $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Ukázka části excelovské tabulky je v příloze 5.

4.4 Plánování experimentu

Při experimentování je důležité uvažovat o jeho plánování. V teorii je tento proces označován DOE (Design of Experiments) a dělí se na 5 částí [36,37]:

- příprava (plánování) experimentu,
- vlastní návrh experimentu,
- provedení experimentu,
- analýza výsledků,
- ověření výsledků.

První fází experimentu je jeho plánování. Tedy stanovení cílů a cest, kterými se k nim lze dopracovat. Jak bylo zmíněno v kap. 4 v úvodní části – změna nástrojového vybavení a s tím spojené experimenty s pracovními podmínkami, jako je hloubka řezu a posuv na zub. Hodnotícím parametrem je ukazatel kvality, kterým lze ohodnotit daný experiment. Mezi hlavní ukazatele experimentu je zařazen čas, kvalita povrchu a celistvost nástroje, jako vedlejší hodnotící parametr je zvuková odezva při obrábění. Faktory ovlivňující proces – radiální a axiální hloubka záběru, posuv na zub (rychlost posuvu) [35,37].

Návrh experimentu je druhou fází plánování. Nejprve bylo zapotřebí sjednotit obrábění s podmínkami používanými u jiných frézovacích operacích obdobného charakteru (Test 1). Byl navrhnut i experiment bez odjehlování při frézování (Test 2) Dalším bodem bylo zjištění, která řada je časově nejnáročnější na obrábění (řada B – dle původního stavu) a na ní navrhnout řezné podmínky, které se následně experimentálně ověří. Další experimenty probíhaly v závislosti na závěrech z testů předešlých [37].

Třetí fází je samotné provedení experimentu, které je přiblíženo v následujících kapitolách – Experiment 1 a Experiment 2. Tedy jedná se o aplikování návrhu experimentu [37].

Analýza – čtvrtá fáze experimentu. Tento proces probíhal kontinuálně s experimentem. Bylo nutné průběžně kontrolovat hlavní ukazatele kvality a jejich ovlivnění v závislosti se zvyšujícími se řeznými podmínkami. Dále bylo posuzováno, zda je možné tyto řezné podmínky navýšit [37].

Pátou fází je ověřování výsledků, které probíhalo po stanovení konečného stavu obráběného rotoru [37].

4.5 Experiment 1

Při frézování byly pozorovány zejména vibrace a hluk stroje. Posuzování obrobku záviselo hlavně na jakosti povrchu, ale i na celkovém vzhledu a zachování výkresových požadavků. Při pozitivním výsledku všech hodnotících faktorů, byly řezné podmínky navyšovány, až do přesáhnutí hraničních hodnot, kdy docházelo k nesplnění některé podmínky.

Experimentem bylo hledáno nejvhodnější kombinace mezi radiální a axiální hloubkou řezu, posuvem a řeznou rychlostí. Vzhledem k tomu, že je stroj omezen otáčkami $33\,000\text{ min}^{-1}$, není možné tyto hodnoty překročit. Výrobce nástrojů uvádí, že na dané nástroje, lze použít řeznou rychlost až $400\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, kterou lze podle vztahu 4.1 přepočítat na otáčky nástroje, které se zadávají u tohoto obráběcího centra. Pro nejmenší používaný nástroj o průměru 1 mm je hodnota otáček rovna $127\,000\text{ min}^{-1}$. V experimentu bude tedy hledaná nejvhodnější kombinace mezi hloubkou řezu a posuvem při zachování výkresových požadavků. Výpočet otáček je ve vztahu 4.1 [2,38]:

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

kde: v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] - řezná rychlost,
 D [mm] - průměr obrobku,
 n [min^{-1}] - otáčky obrobku.

Začátek experimentu obnášel detailní prostudování stávajících programů. Zjištění současných řezných podmínek (axiální a radiální hloubka řezu, otáčky nástroje a posuvy frézovacího stolu) muselo proběhnout odečítáním přímo z programů, který

lze převést do textového souboru. Následně byly vytvořeny excelovské tabulky pro jednotlivé řady obrobku, kde byly zaznamenány zjištěné parametry a poté i hodnoty samotného experimentování. Ukázka tabulky plánování experimentu je v příloze 6.

Testování nových řezných podmínek probíhalo již s novými řeznými nástroji. Bylo posuzováno několik aspektů, jako je jakost povrchu, vizuální vzhled, vibrace a pískání při obrábění, trvanlivost nástrojů a celkový čas výroby. Podle těchto ukazatelů byly jednotlivé testy vyhodnocovány, zda byly nebo nebyly úspěšné.

4.5.1 Test 1

Experiment:

Předmětem prvního testování, bylo přenesení programů do jiné verze řídicího systému používaného na nově vybraném stroji, tedy doplnění průměrových korekcí (G41, G40). A také úprava rychlosti posuvu pro jednotlivé řady. Ty byly upraveny, podle hodnot používaných u obdobných prací na stejném stroji Matsuura typ FX – 1GII, kde však nejsou používány stejné nástroje, bylo tedy nutné tyto hodnoty stanovit menší. Mimo jiné byly navýšeny hodnoty axiální hloubky záběru a při dokončování zvýšena radiální hloubka řezu.

1. operace hrubování středu

V následující tabulce (tab. 4.2) je přehled řezných podmínek při hrubování středu.

Tab. 4.2 Řezné podmínky pro hrubování středu – Test 1.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
A	Ø 3	0,75	3 000	30 3500	2
B	Ø 1	0,313	1 830	30 420	4
C	Ø 1,2	0,417	2 240	31 150	4
D	Ø 1,2	0,411	2 240	31 150	4
E	Ø 1	0,297	1 830	30 420	4
F, G	Ø 1	0,313	1 830	30 420	4

2. operace hrubování

V tab. 4.3 jsou řezné podmínky pro hrubování při 1. testu.

Tab. 4.3 Řezné podmínky pro hrubování – Test 1.

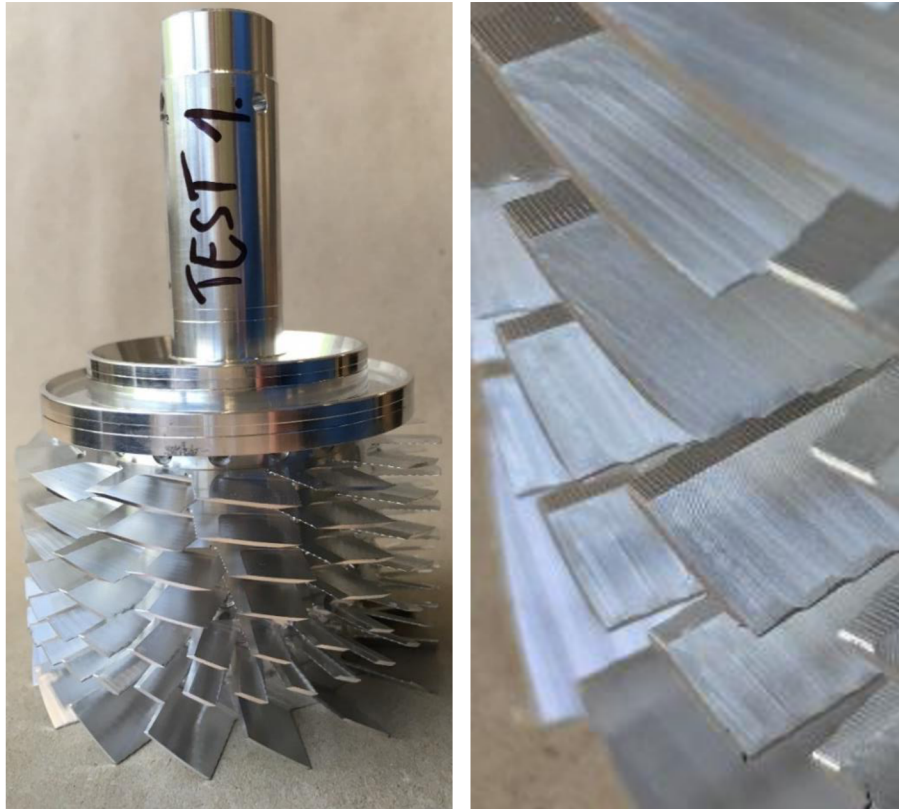
Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,5	3 910	30 350	0,9 (0,3 * D)
B	Ø 1	1,25	2 370	30 420	0,3 (0,3 * D)
C	Ø 1,2	1,668	2 920	31 150	0,36 (0,3 * D)
D	Ø 1,2	1,644	2 900	31 150	0,36 (0,3 * D)
E	Ø 1	1,188	2 370	30 420	0,3 (0,3 * D)
F, G	Ø 1	1,25	2 370	30 420	0,3 (0,3 * D)

3. operace dokončování

Tab. 4.4 udává řezné podmínky při dokončování. Vzhled obrobku před pískováním po 1. testu je na obr. 4.4.

Tab. 4.4 Řezné podmínky pro dokončování – Test 1.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹] Dokončování / odjehlení	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,5	3 920 / 900	30 350	0,1
B	Ø 1	1,25	2 370 / 550	30 420	0,1
C	Ø 1,2	1,668	2 900 / 670	31 150	0,1
D	Ø 1,2	1,644	2 240 / 670	31 150	0,1
E	Ø 1	1,188	2 370 / 550	30 420	0,1
F, G	Ø 1	1,25	2 390 / 550	30 420	0,1



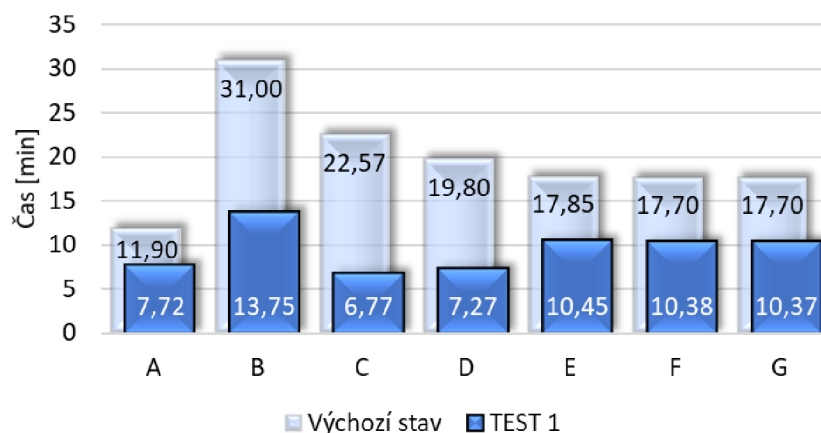
a)

b)

Obr. 4.4 Obrobek po 1. testu frézování: a) celý b) detailně.

Výsledky:

Na obr. 4.5 je graf s časy obrábění jednotlivých řad výchozího a nového stavu. V tabulce 4.5 je přehled časů obrábění jednotlivých řad, do celkového času jsou pak připočteny i hodnoty času měření sondy a výměny nástrojů.



Obr. 4.5 Výrobní časy obrábění při výchozím stavu a testu 1.

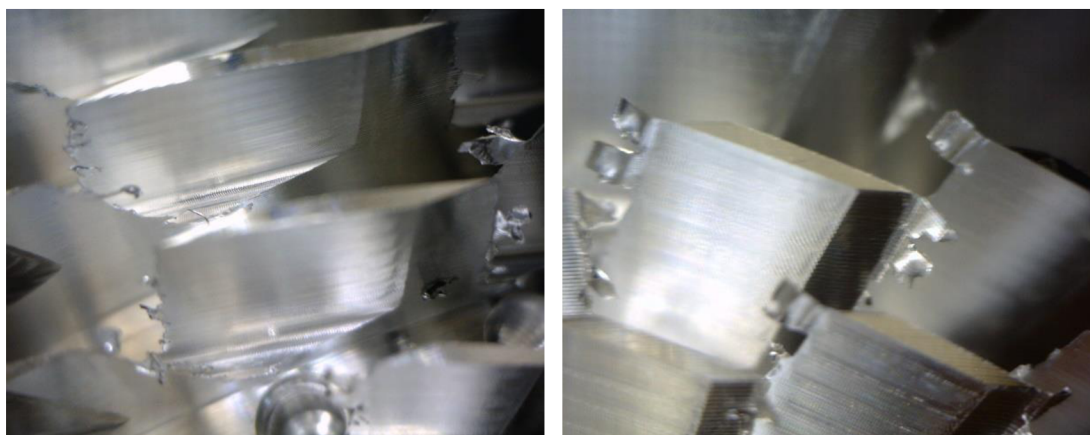
Tab. 4.5 Časy jednotlivých řad – Test 1 a výchozí stav.

Řada	Označení nástroje	Test 1 [min]	Výchozí stav [min]
A	T40	07,72	11,90
B	T44	13,75	31,00
C	T41	06,77	22,57
D	T42	07,27	19,80
E	T43	10,45	17,85
F	T43	10,38	17,70
G	T43	10,37	17,70
	Sonda	00,92	03,12
	Výměny nástrojů	00,73	01,65
	Celkový čas	68,35	143,30

4.5.2 Test 2

Experiment:

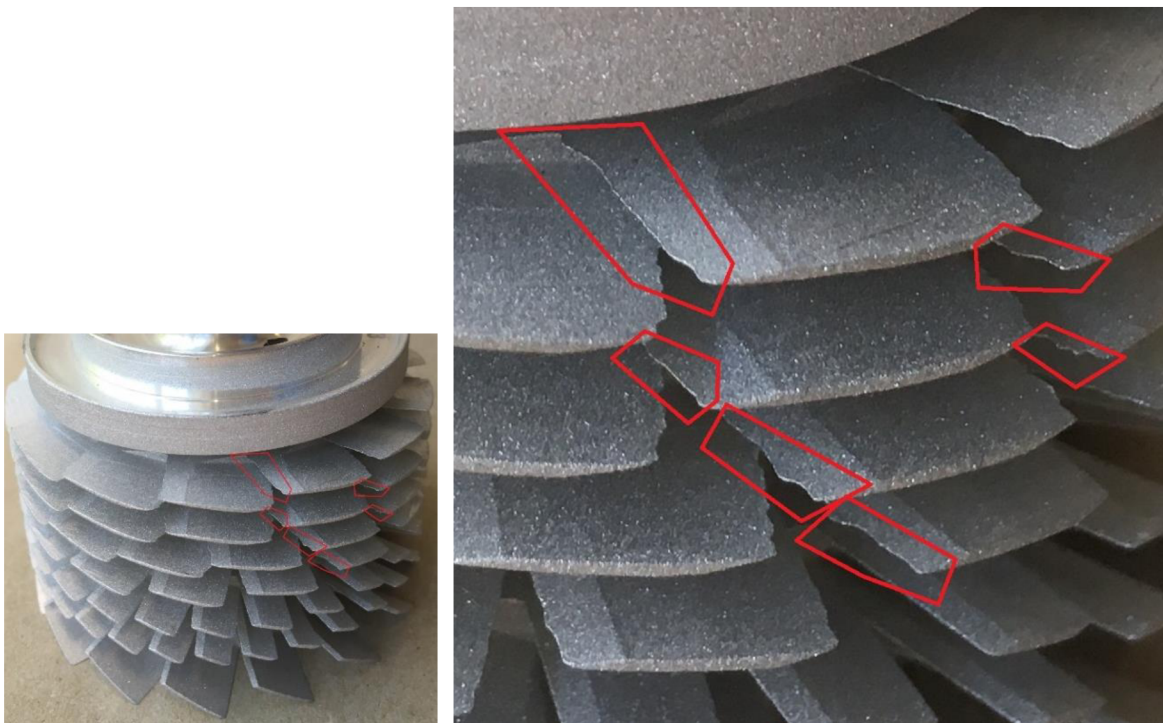
Následující experiment je obdobou Testu 1 s výjimkou 3. operace. Při 3. operaci dokončování zároveň dochází k odjehlení ostré hrany lopatky. Při druhém testu byla tato operace vynechána a následně bylo zjišťováno, zda pískovací stroj dokáže obrobek dostatečně odjehlít. Na obr. 4.6 je obrobek před pískováním.



Obr. 4.6 Ukázka neodjehlených řad před pískováním – Test 2.

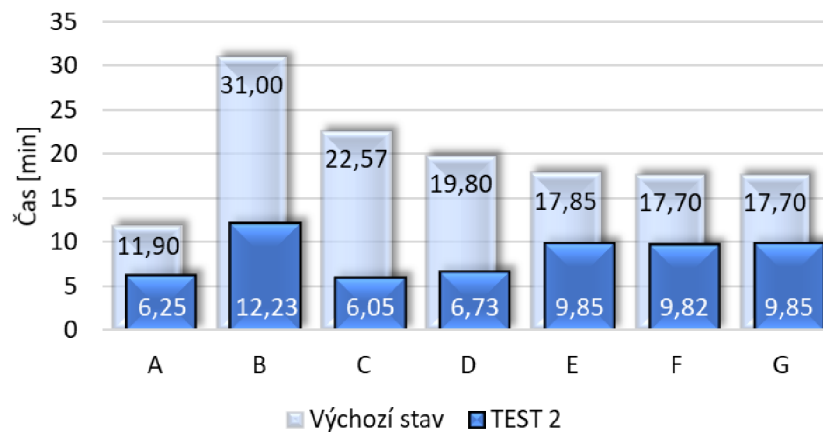
Výsledky:

Celkový čas tohoto testu byl 1 hodina 2 minuty a 26 sekund. Došlo tedy k úspoře 5 minut a 55 sekund oproti času obrábění testu 1. Odjehlení kusů proběhlo na strojní pískovačce s tlakem 5 barů a na ruční pískovačce s tlakem 6 barů. Odstranění třísek a nerovností nebylo dostatečné viz obr. 4.7. Na lopatkách pod malým úhlem byly třísky nedostatečně odstraněny a vznikaly tak nerovnosti. U lopatek, které jsou naopak pod větším úhlem došlo k dostatečnému odstranění třísek, ale hrany byly příliš ostré a při další manipulaci s rotory by byly nebezpečné a mohly by zapříčinit úraz. Tento test byl vyhodnocen jako nevyhovující, a proto v následujících experimentech bude při frézování probíhat odjehlování.



Obr. 4.7 Odjehlené kusy na ruční pískovačce s tlakem 6 barů.

Na obr. 4.8 je graf, který zobrazuje čas výchozího stavu a nového stavu při 2. testu.



Obr. 4.8 Výrobní časy obrábění při výchozím stavu a testu 2.

4.5.3 Testy řady B

Ve výchozím stavu se řada B frézuje 31 minut a 19 sekund. Je to nejdelší výrobní čas řady ze všech, které jsou na obrobku nEXT85. Z paretova diagramu na obr. 3.6 (strana 30) vyplývá, že řada B je časově nejnáročnější, proto by měly být testy zaměřeny na ni. Bylo tedy rozhodnuto, že různé možnosti obrábění budou odzkoušeny na této řadě. Dlouhý čas obrábění je hlavně z důvodu největšího počtu lopatek v řadě.

V příloze 2 je zobrazen výkres polotovaru, z kterého je patrné, že kromě první řady označené A, jsou všechny ostatní řady (B až G) stejně široké. To lze využít při testování. V excelovském programu lze sjednotit všechny řady, tedy parametry zadávané z výkresu budou pro řady B až G totožné a může se na nich aplikovat různých řezných podmínek. Je tedy výhodou, že několik testů stejné řady může být vyzkoušeno zároveň (na jednom polotovaru). V následujícím testování řady B bylo využito této možnosti. Jednotlivé řady byly sjednoceny na B, tedy veškeré parametry jsou jednotné, mění se pouze řezné podmínky – posuv na zub u hrubování středu, hrubování a dokončování a axiální a radiální hloubka záběru.

Samotný experiment byl rozdělen na 11 testů se značením Test B. 1 až B. 11, přičemž test B. 10 a B. 11 jsou jen čistě experimentálního charakteru a slouží k porovnání axiální hloubky záběru a posuvové rychlosti a jejich vliv na čas obrábění. Všechny uváděné parametry jsou navyšovány z hodnot Testu 1, protože bylo

konstatováno, že při těchto parametrech nástroje i stroj dokáže obrábět bez svého poškození a se zachováním všech pozorovaných parametrů.

Experiment:

U experimentů byly nejdříve zkoumány vlivy na čas obrábění zvyšováním axiální a radiální hloubky záběru a posuvu. Bylo vždy vycházeno z 1. testu. V následující tabulce (tab. 4.6) je naznačena souvislost mezi experimenty řady B a testem 1. Nevyplněná políčka značí, že nebyl parametr v daném experimentu oproti testu 1 žádným způsobem změněn. Testy B. 10 a B. 11 byly odzkoušeny bez polotovaru, sloužily pouze pro vykreslení grafu závislosti času na řezných podmínkách. Mimo měření času při daných podmínkách, bylo pozorováno i chování stroje a nástroje (např. vibrace, zvýšení hlučnosti atd.), ale také jakost povrchu a rozměry obrobku dle výrobního výkresu.

Tab. 4.6 Zvýšení hodnot axiální hloubky řezu nebo posuvu na zub vzhledem k testu 1.

Test	Radiální hloubka řezu a_e [mm]	Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub (f_z) [%]	Test	Radiální hloubka řezu a_e [mm]	Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub (f_z) [%]
B. 1	$+0,1 \cdot D$	-	-	B. 7	-	$+0,6 \cdot D$	-
B. 2	-	-	+20	B. 8	-	$+0,8 \cdot D$	-
B. 3	-	-	+40	B. 9	-	-	+70
B. 4	-	-	+50	B. 10	-	-	+240
B. 5	-	$+0,2 \cdot D$	-	B. 11	-	$+2,9 \cdot D$	-
B. 6	-	$+0,4 \cdot D$	-				

1. operace hrubování středu

V tab. 4.7 je přehled řezných podmínek při hrubování středu.

Tab. 4.7 Řezné podmínky pro hrubování středu testu řady B.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
B. 1	Ø 1	0,313	1 830	30 420	4
B. 2	Ø 1	0,313	2 190	30 420	4
B. 3	Ø 1	0,313	2 560	30 420	4
B. 4	Ø 1	0,313	2 740	30 420	4
B. 5	Ø 1	0,347	1 830	30 420	4
B. 6	Ø 1	0,391	1 830	30 620	4
B. 7	Ø 1	0,446	1 830	30 620	4
B. 8	Ø 1	0,521	1 830	30 620	4
B. 9	Ø 1	0,313	3 120	30 620	4
B. 10	Ø 1	0,313	6 222	30 420	4
B. 11	Ø 1	1,045	1 840	30 420	4

2. operace hrubování

V tab. 4.8 jsou řezné podmínky pro hrubování při testech řady B.

Tab. 4.8 Řezné podmínky pro hrubování testu řady B.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
B. 1	Ø 1	1,25	2 370	30 420	0,4 (0,4 * D)
B. 2	Ø 1	1,25	2 850	30 420	0,3 (0,3 * D)
B. 3	Ø 1	1,25	3 320	30 420	0,3 (0,3 * D)
B. 4	Ø 1	1,25	3 560	30 420	0,3 (0,3 * D)
B. 5	Ø 1	1,388	2 370	30 420	0,3 (0,3 * D)
B. 6	Ø 1	1,564	2 370	30 620	0,3 (0,3 * D)
B. 7	Ø 1	1,784	2 370	30 620	0,3 (0,3 * D)

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
B. 8	Ø 1	2,084	2 370	30 620	0,3 (0,3 * D)
B. 9	Ø 1	1,25	4 060	30 620	0,3 (0,3 * D)
B. 10	Ø 1	1,25	8 058	30 420	0,3 (0,3 * D)
B. 11	Ø 1	4,167	2 370	30 420	0,3 (0,3 * D)

3. operace dokončování

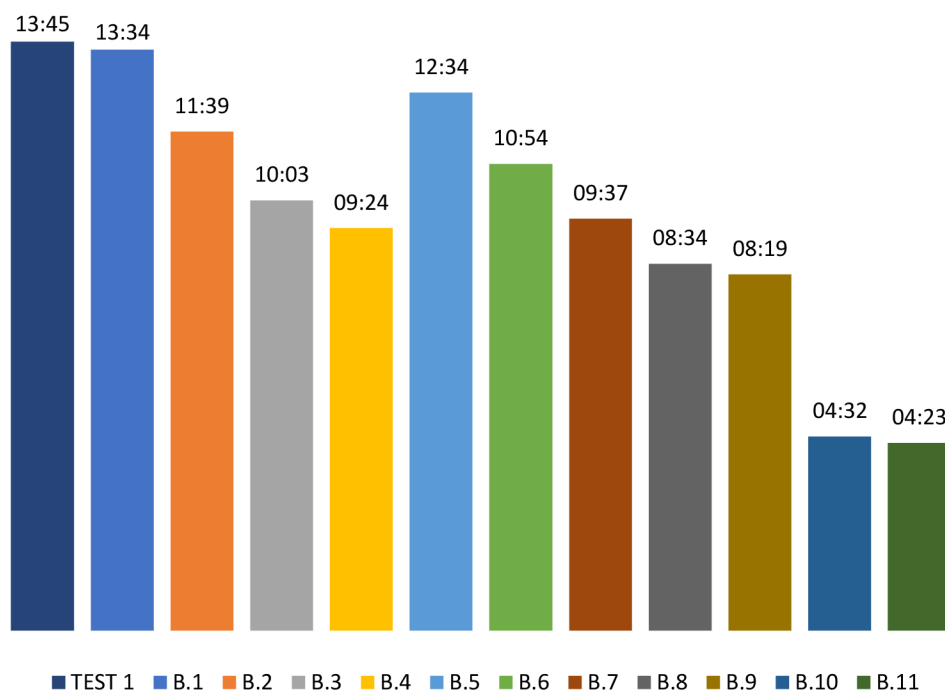
Tab. 4.9 udává řezné podmínky při dokončování.

Tab. 4.9 Řezné podmínky pro dokončování testu řady B

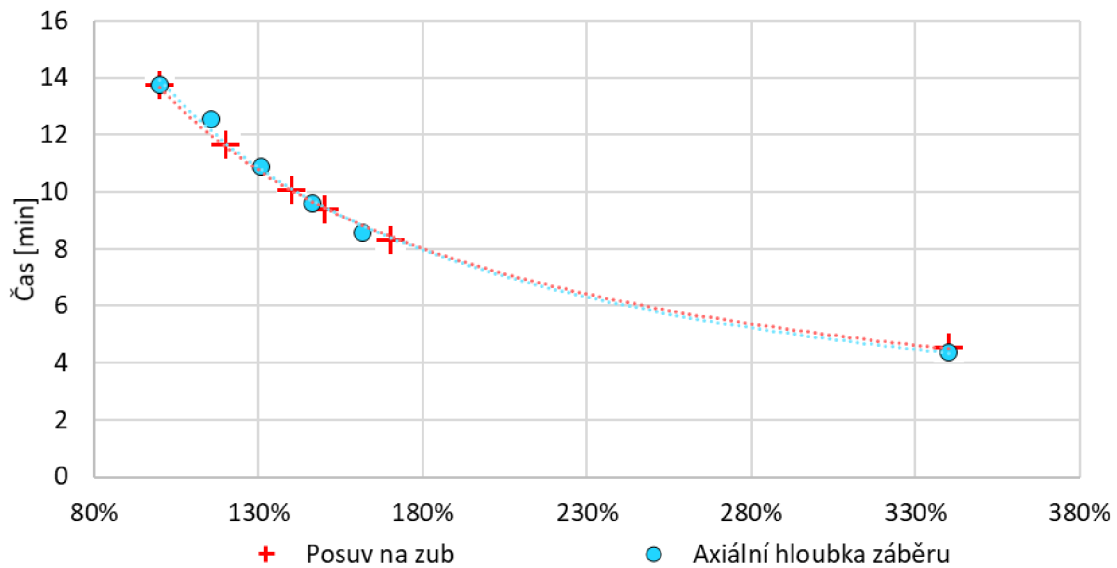
Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹] Dokončování / odjehlení	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
B. 1	Ø 1	1,25	2 370 / 550	30 420	0,1
B. 2	Ø 1	1,25	2 850 / 660	30 420	0,1
B. 3	Ø 1	1,25	3 320 / 770	30 420	0,1
B. 4	Ø 1	1,25	3 560 / 820	30 420	0,1
B. 5	Ø 1	1,388	2 370 / 550	30 420	0,1
B. 6	Ø 1	1,564	2 370 / 550	30 620	0,1
B. 7	Ø 1	1,784	2 370 / 550	30 620	0,1
B. 8	Ø 1	2,084	2 370 / 550	30 620	0,1
B. 9	Ø 1	1,25	4 060 / 940	30 620	0,1
B. 10	Ø 1	1,25	8 058 / 1870	30 420	0,1
B. 11	Ø 1	4,167	2 370 / 550	30 420	0,1

Výsledky:

Z hlediska chování stroje a nástroje, bylo zjištěno, že při zvyšování axiální hloubky řezu nedochází k pískání, ani k žádnému jinému hlasitějšímu projevu obrábění než u testu 1, a to ani u testu B. 8, kdy je axiální hloubka řezu na hraniční hodnotě, vzhledem k povrchu lopatek. Při zvyšování posuvu bylo pískání slyšitelné u testu B. 4 do hloubky cca. 5 mm z celkových 12,5 mm. U B. 9 byla hlasitost obdobná. Na obr. 4.9 je čas jednotlivých testů. Obr. 4.10 zobrazuje závislost času obrábění řady B na řezných podmínkách. Jak axiální hloubka záběru, tak i posuv má obdobný vliv na čas a nelze říci, které řezné podmínky měnit z hlediska obráběcího času. Vzhledem k nástroji a jeho otupování je výhodnější maximalizovat axiální hloubku záběru a tomu přizpůsobit posuvovou rychlost.

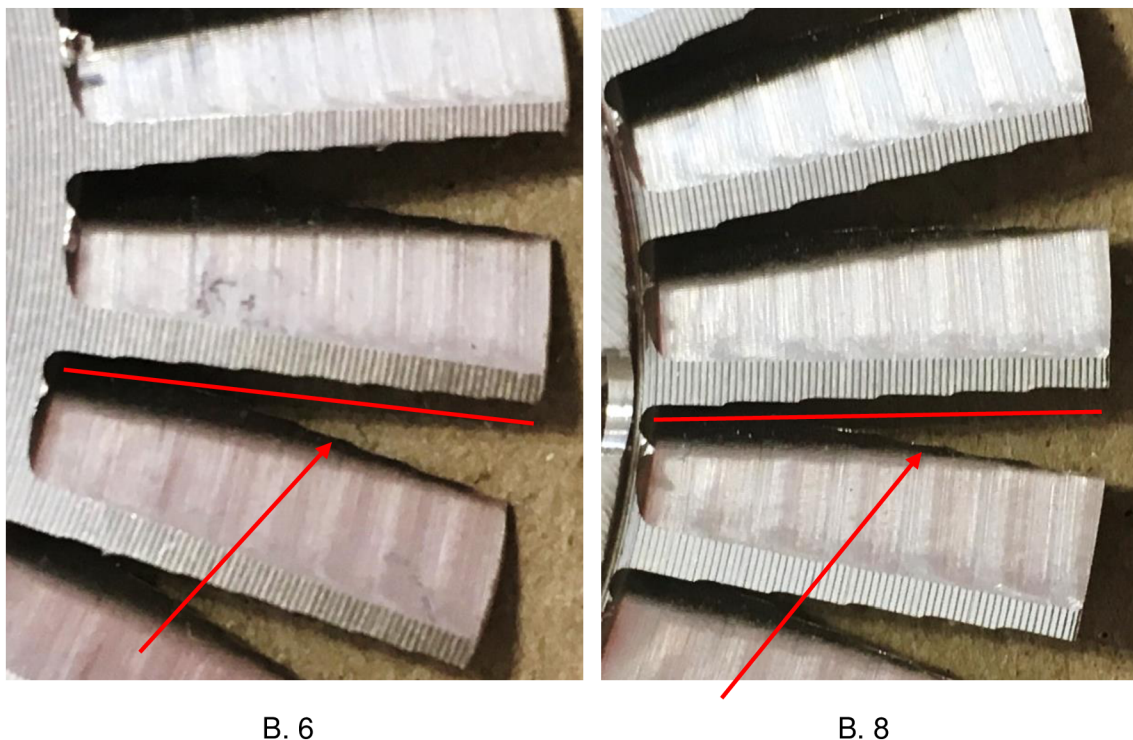


Obr. 4.9. Čas obrábění řad B.



Obr. 4.10 Závislost času na řezných podmínkách.

Na obr. 4. 11 jsou řady B. 6 a B. 8 po frézování. Rozdíl mezi nimi je rozdílná axiální hloubka řezu, která je viditelná na počtu záběrů. U B. 6 je 8 kroků, kdežto u B. 8 už jen 6 kroků. Tato změna je viditelná na „schodcích“ u červené čáry.



Obr. 4.11 Zobrazení některých řad B po frézování.

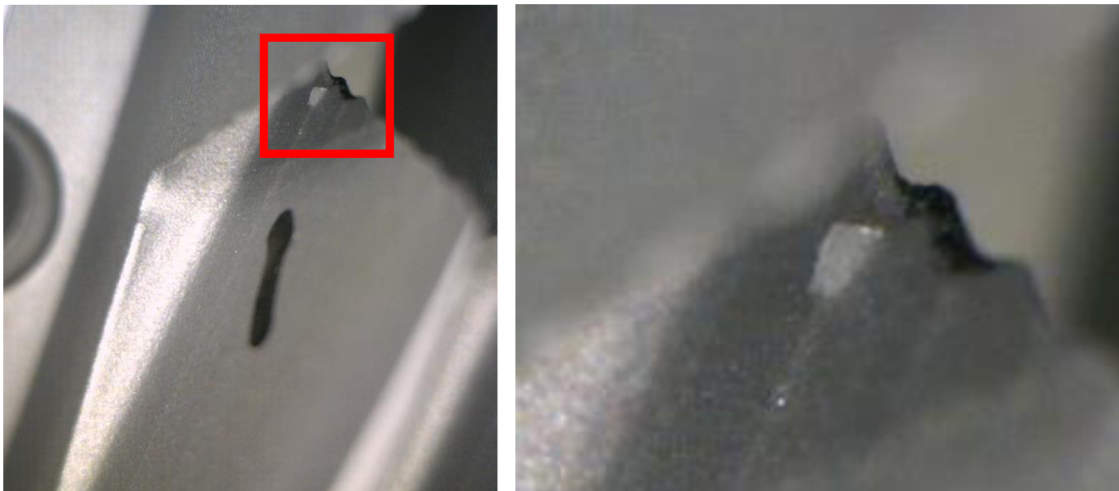
4.5.4 Test 3

Experiment 3.1:

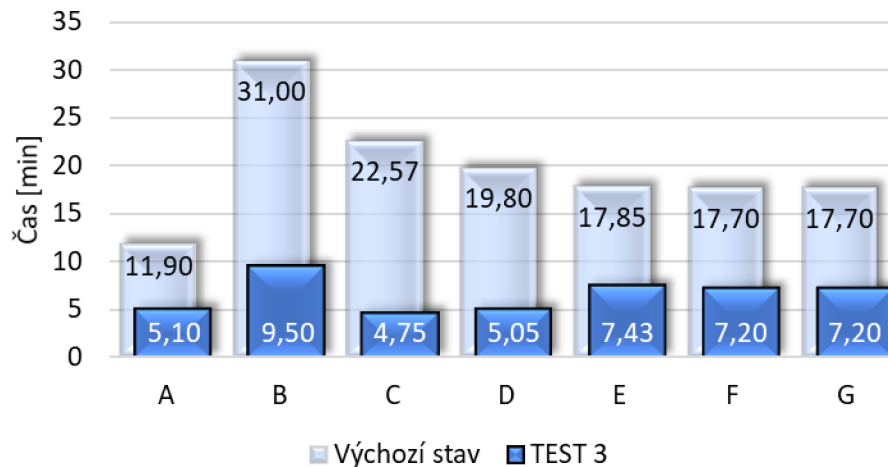
Z předchozího testu bylo zjištěno, že rychlost posuvu navýšené o 50 % vůči testu 1 jsou strojem i nástrojem obrobitelné, přičemž zachovávají požadavky na jakost obrobku a další výkresové požadavky. V následujícím testu byla tedy zvýšen posuv o 50 % a konkrétní řezné podmínky můžeme vidět v příloze 7.

Výsledek 3.1:

Rychlejší posuv při obrábění měl viditelné následky na povrchu materiálu. Při procesu odjehlování u dokončovací operace lopatek pod menším úhlem zůstávali nepatrné otřepty, které byli odstraněny až pískováním. Po detailním prohlédnutí lupou byli zjištěny nerovnosti na koncích lopatek (obr. 4.12). Jednalo se o špatně odjehlené třísky pískováním. Proto bylo navrženo, že bude proveden dodatečný test 3. 2. Na obr. 4.13 je graf obráběcích časů pro test 3. 1.



Obr. 4.12 Nerovnosti na lopatkách s malým úhlem (E, F, G).



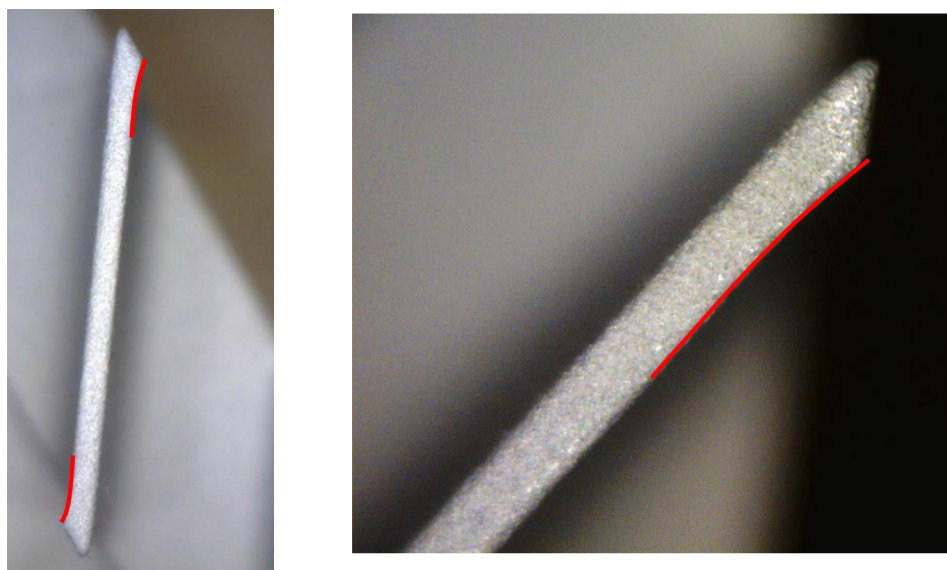
Obr. 4.13 Výrobní časy obrábění při výchozím stavu a testu 3.

Experiment 3.2:

Při experimentu 3. 2 byl čistě zkoumán stav po zvětšení odjehlení při frézování a následný povrch po pískovací operaci. Původní odjehlení bylo 0,5 mm u všech řad, které bylo zvětšeno a zkušeno na řadách D, E, F a G ve dvou variantách 0,8 a 1 mm. Testování probíhalo u těchto řad, protože jsou pod nejmenšími úhly a tvořily se u nich nerovnosti na lopatkách. U jiných řad, k tomuto problému nedocházelo, hlavně z důvodu většího úhlu sklonu lopatek. Mimo jiné byl i proveden test A1, kde byly použity podmínky z předešlého testu 3. 1 a navíc byl zvětšen radiální záběr na 0,4 D.

Výsledek 3.2:

Nerovnosti na lopatkách už nadále nebyly viditelné ani lupou. Byly však zjištěny problémy u řady A, kde byl při obrábění změněn profil lopatky. Lopatky by měly mít obě své strany rovnoběžné po celé délce, na obr. 4.14 je viditelné že na rozích lopatek je materiál, který nebyl odebrán. Možnou příčinou by mohl být malý výjezd mimo kapsu, a tedy nedostatečné obrobení lopatky. Nástroj je totiž většího průměru, a aby se vešel do mezery mezi řadami, je zkrácen jeho výjezd na nejmenší možný. V následujících experimentech bude zkoumaná a řešená tato problematika.



Obr. 4.14 Lopatka z řady A se špatným profilem.

4.5.5 Testy řady A

Experiment A.2:

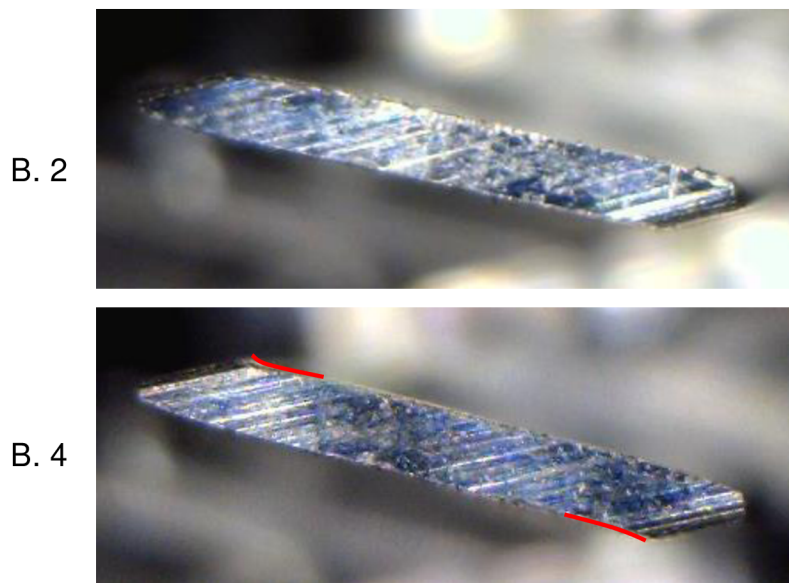
Přejezd nástroje, který obrábí řadu A je zkrácený, tak aby udržoval bezpečnou vzdálenost od vedlejší řady. Bylo tedy propočítáno o kolik by mohl nástroj přejet, tak aby nenajel a nenarušil řadu vedle. Přejezd byl tedy zvětšen z původních 0,069 mm na 0,1 mm. Byl zanechán radiální záběr 0,4 D a zvětšen axiální záběr nástroje na 0,7 D (2,1 mm). Posuv byl oproti testu 3 snížen z původních 150 % na 130 % - přesné hodnoty jsou obsaženy v tab. 4.10.

Tab. 4.10 Řezné podmínky testu řady A.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
Hrubování středu					
A. 1	Ø 3	0,964	3 910	30 350	2
Hrubování					a_e [mm]
A. 1	Ø 3	1,929	5 090	30 350	0,4 D
Dokončování					a_e [mm]
A. 1	Ø 3	1,929	5 090	30 350	0,4 D

Výsledek A.2:

Po přezkoumání obrobené řady, nebyly zjištěny žádné změny. Profil lopatky nebyl správně obrobený a vykazoval stejné problémy, jako u předchozího testu, kdy byl problém zjištěn. Navíc při přezkoumání kusů, na kterých se dělaly testy řady B, bylo zjištěno, že se zvětšujícím se posuvem je tato deformace profilu výraznější. Na obr. 4.15 jsou zobrazeny testy řady B, kdy B. 2 má pomalejší posuv ($2\,850\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) a B. 4 rychlejší posuv ($3\,560\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) při dokončovacím řezu.



Obr. 4.15 Lopatky řady B se správným (B. 2) a špatným (B4. 4) profilem.

Bylo tedy vyhodnoceno, že zásadní vliv na deformaci profilu lopatek musí mít posuv při dokončování. Pro potvrzení byl proveden následující test.

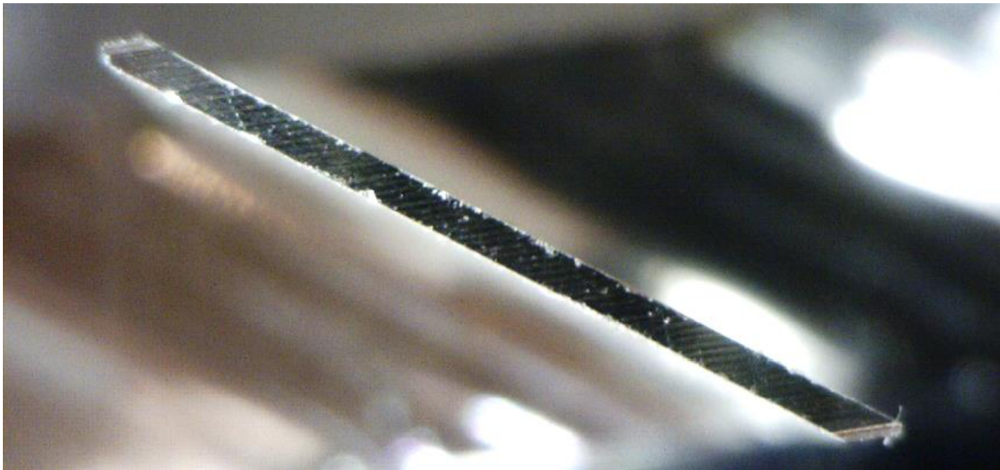
Experiment A.3:

Experiment byl proveden za účelem potvrzení, že vliv na deformaci profilu má posuvová rychlost při dokončování. Byl tedy snížen posuv na zub při dokončování z $0,056\text{ mm}$ na $0,017\text{ mm}$, ostatní řezné podmínky zůstaly stejné jako v předchozím testu A2.

Výsledek A.3:

Posuv dokončovacího řezu při obrábění byl oproti předešlým testům nízký ($1\,570\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Přičemž nástroj, který frézuje řadu A je o průměru 3 mm a mohl by mít rychlost posuvu až čtyřnásobný. Ukázka profilu lopatky je na obr. 4.16.

Závěr testu je tedy takový, že dynamika stroje při vyšších posuvech nezvládne zahrnout nástrojem, tak aby zachoval požadovanou dráhu. Při následujícím testu A. 4, který sloužil k potvrzení správnosti profilu při daných podmínkách, bylo zjištěno, že rychlost posuvu do $3\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ neovlivňuje profil požadovaný dle výrobní dokumentace. Jedná se o test A. 4, který je obdobný testu A. 3, proto nebude uváděn.



Obr. 4.16 Lopátka testu A. 3.

4.5.6 Testy řady F

Protože řady F jsou svým profilem hodně odlišné od řady B, je důležité odzkoušet i změnu rezných podmínek na této řadě. Proto testy budou obdobné, jako u řady B, ale již s ohledem na parametry posuvu při dokončování. Pro kontrolu je i na této řadě proveden test, který má větší rychlost posuvu u dokončovacího řezu než $3\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Experiment:

Z testu 3. 2 byly zvednuty hodnoty odjehlení na 1 mm. Test byl rozdělen na dvě části. Nejprve byl proveden test, kdy byly obrobeny dvě řady, které odpovídaly svými parametry řadě F. Poté následovalo posouzení od členů technické podpory a vedení, zda vizuální stránka lopatek je v pořádku (obr. 4.17). Po kontrole a schválení byly provedeny ještě další 3 testy řady F pro kontrolu a možnosti podmínek, které mohou být použity na danou řadu. Parametry, které byly měněny, jsou v tab.4.11.

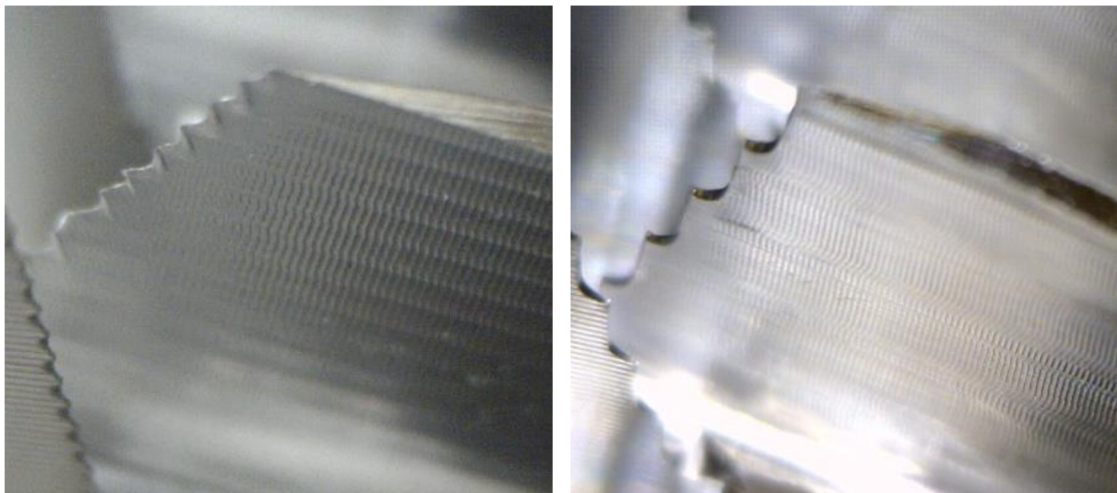
Tab. 4.11 Zvýšení řezných podmínek u testu řad F vzhledem k testu 1.

Test	Radiální hloubka řezu a_e [mm]	Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub (f_z) [%]	Test	Radiální hloubka řezu a_e [mm]	Axiální hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub (f_z) [%]
F. 1	-	$+0,2 \cdot D$	-	F. 4	-	$+0,4 \cdot D$	+30
F. 2	-	-	+20	F. 5	-	$+0,4 \cdot D$	+50
F. 3	-	$+0,7 \cdot D$	-				

U testu F. 4 byl zvednut posuv na zub o 30 % vůči testu 1. Nebyl však zvednut u dokončovacího řezu, kde zůstal výchozí. U ostatních testů byly tyto parametry měněny u všech operací – hrubování středu, hrubování a dokončování.

Výsledky:

Po provedení dvou testů bylo nutné schválit vizuální vzhled rotoru (obr. 4.17). Vzhled lopatek je ovlivněn velikostí odjehlení a počtem záběrů a_p . U původního byl počet záběrů 15. U testu řady F byl počet záběrů snížen na 7. U testu F. 3 byl počet záběrů 5. Tento test byl následně také kontrolován z vizuální stránky a byl schválen.



Původní kus řada F

Testy řady F

Obr. 4.17 Zobrazení tzv. schodečků z původní výroby a testů řady F.

Po přezkoumání řad pod lupou a mikroskopem bylo vyhodnoceno, že testy proběhly úspěšně a může se přejít k dalším. Nebyly odhaleny žádné nerovnosti, ani vady u obrobených lopatek. Rovněž byl kontrolován profil lopatek, který byl v pořádku u všech testů, kromě testu F. 5, kde byla taktéž potvrzena předchozí teorie, kdy dynamika stroje ovlivňuje negativně změnu směru nástroje, a to dřívějším zatočením. Byla tedy potvrzena stanovená hranice rychlosti posuvu u dokončování na $3\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

4.5.7 Test 4

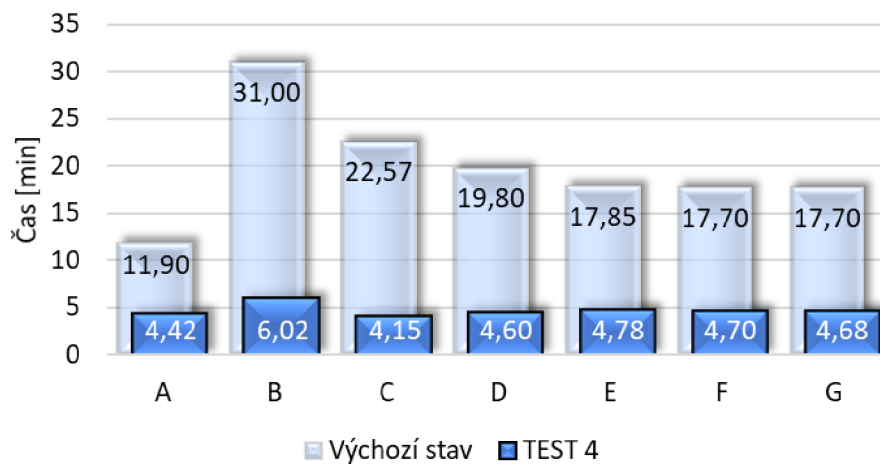
Získané informace z výše popsaných testů jsou implementovány na všechny řady. V testu 4 jsou zohledňovány všechny získané poznatky – negativní i pozitivní.

Experiment:

Radiální hloubka řezu a_e byla u všech řad změněna na $0,4\cdot D$. Axiální hloubka řezu a_p byla zvýšena na maximální hodnotu u všech řad na 2,1 mm, přičemž řezná část všech nástrojů je 3 mm (i s výběhem šroubovitě drážky pro odchod třísky). Posuv na zub byl navýšen o 50 % oproti testu 1. Dokončovací řezy byly nastaveny tak, aby nepřesáhly posuvovou rychlost $3000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Odjehlení u řad D, E, F a G bylo nastaveno z původních 0,5 mm na 1 mm. V příloze 8 jsou uvedené konkrétní řezné podmínky používané při testu.

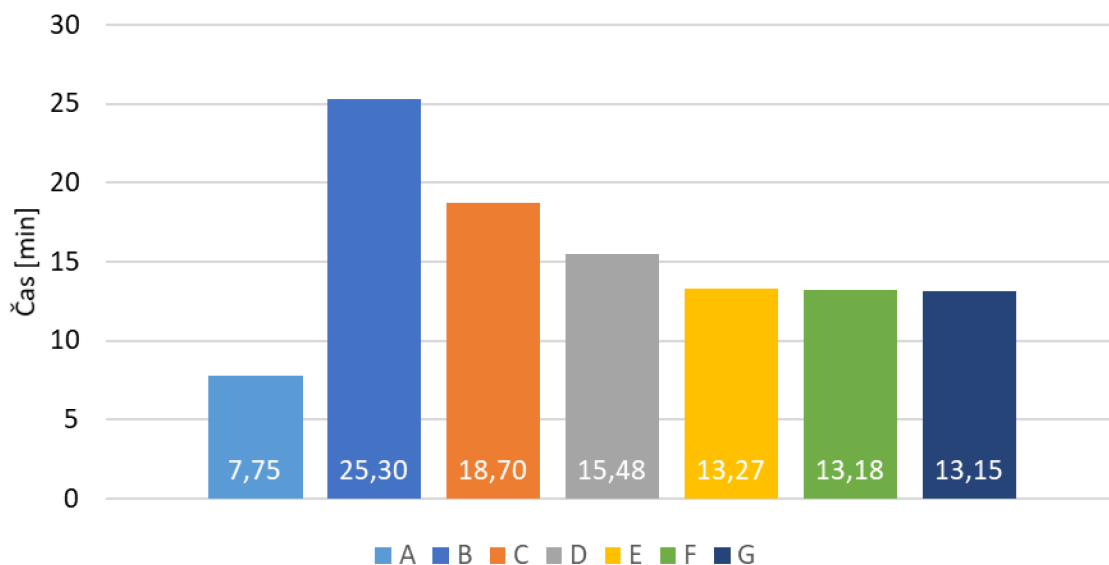
Výsledky:

Čas obrábění jednotlivých řad je vidět na obr. 4.18. Celkový čas je 34 minut a 46 sekund (jsou v něm započítány i časy výměn nástroje a čas měření sondy). Pro větší přehlednost jsou paretovy grafy výrobních časů řad testů 1, 2, 3 a 4 zobrazeny v příloze 9.



Obr. 4.18 Výrobní časy obrábění při výchozím stavu a testu 4.

Na obr. 4.19 je vidět rozdíl času obrábění mezi původním stavem a testem 4. Z kterého lze vyvodit, že největší časová úspora je u řady B. Z paretova digramu pro test 4, který je v příloze 9, však vyplývá, že je to stále výrobně nejdelsí řada, ale rozdíl s ostatními řadami už není tak markantní.



Obr. 4.19 Rozdíl výrobních časů původního stavu a testu 4.

Experiment 1 byl zakončen výrobou tzv. N3, což je série 3 kusů, které se musí vyrobit a nechat změřit funkční rozměry, které byly vyráběny na změněné operaci, kvalifikovaným pracovníkem. Těmito parametry se rozumí – tloušťka, hloubka a úhel naklonění lopatek. V případě, že všechny parametry jsou v pořádku, pokračují tyto

kusy na testování ve vývěvách. Testování probíhá pomocí cyklického start – stop testu, kdy vývěva, je opakovaně spouštěna na maximální výkon a vypínána a testem výkonnostních parametrů (objem odčerpaného plynu – rychlost čerpání např. hélia, vodíku, úroveň vakua). Testy probíhaly několik měsíců. Vývěvy s nově vyrobenými rotory vydrží 40 000 cyklů bez poškození. Splňují tedy podmínky vývěv, které pracovaly s rotorem z původní operace obrábění.

4.6 Experiment 2

Tvar kapsy, která je obráběna, se postupně s hloubkou zužuje, proto bylo uvažováno i s možností, že by kapsa mohla být obráběna dvěma nástroji. Větším nástrojem by byla frézovaná první část kapsy, např. 40 % hloubky a dalším nástrojem, který byl používaný v předchozích experimentech, doobrobena hloubka celková. Proto byly navrženy nové nástroje a následně zadané výrobcí nástrojů, u kterého byly poptány i nástroje k experimentu 1. Pro navržení průměru nástrojů (tab. 4.12) bylo nutné analyzovat test 4. Byl zjištěn počet řezů na lopatku každé řady. Podle axiální hloubky řezu a_p byl stanoven počet řezů druhého nástroje u všech řad na 2 (odpovídá zhruba 40 % celkové hloubky). Následně byla dopočítaná hloubka těchto dvou řezů a podle známých parametrů tvaru kapes mezi lopatkami byla dopočítaná její šířka, z které vyplývá maximální průměr nástroje, který se do této hloubky v kapse vleze a vyfrézuje správný profil lopatky. Z šířky kapsy v dané hloubce byl stanoven maximální průměr nástroje, který byl následně zmenšen o 0,3 – 0,5 mm. Řezné podmínky pro 1. nástroj jsou uvedeny v příloze 10 a pro 2. nástroj zůstávají stejné jako při testu 4.

Tab. 4.12 Průměry navržených nástrojů pro experiment 2.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Řada	Průměr nástroje (D) [mm]
A	Ø 6	D	Ø 2
B	Ø 1,8	E, F, G	Ø 1,5
C	Ø 2		

V dalším kroku bylo nutné přepracovat excelovské tabulky, aby vytvářely správný program. Bylo uvažováno s univerzálním vytvářením programu, který by vytvářel

program pro variantu s jedním nástrojem, tak i program s dvěma nástroji. Byly tedy vloženy nové funkce, které ovlivňovaly tvorbu programu. Takový velký zásah, bylo nutné odzkoušet na stroji, aby bylo vše správně nastaveno a nedošlo ke kolizi nástroje, případně jiným problémům. Odlazení programů probíhalo v následujících testech.

4.6.1 Test 5

Experiment – pokus 1.:

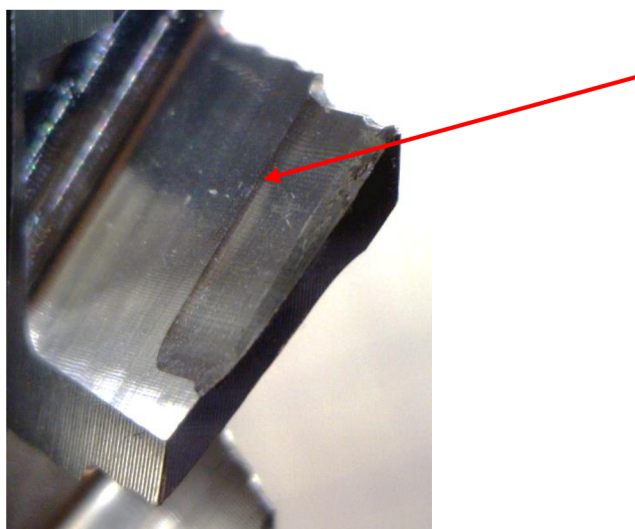
Byl vytvořen program pro frézování hloubky dvěma nástroji. Excelovské tabulky jsou naprogramované pro vygenerování 1 hlavního programu a 7 podprogramů. Vytvořily se tedy podprogramy a hlavní program pro první nástroje a následně pro druhé nástroje. Protože byly vytvořeny 2 hlavní programy, bylo nutné je spojit do jednoho. Zkouška nově nastavených a vytvořených programů byla odlazena na řadě A.

Výsledky – pokus 1.:

Experiment je ve stavu testování a odlazování programu, proto se obrábí pouze řada A. Po jejím vyfrézování následovalo zastavení programu, kontrola rozměrů a vzhledu obrobku. Byly zjištěny nedostatky z hlediska nulových bodů. Stanovená hloubka pro druhé nástroje, která je uvedena v tab. 4.13, měla zároveň vést ke změně nulových bodů. Tato skutečnost však byla zanedbaná, a díky tomu došlo k nesprávnému obrobení řady, a to jen do hloubky Z2 (hloubka 2. nástroje) od výchozího nulového bodu, který byl nastaven pro každou řadu hlavním programem pro 1. nástroje. Hloubka 2. nástroje byla tedy brána jako celková hloubka dané řady. To mělo za následek, že obrobené plochy nenavazovaly (obr. 4.20), protože v programu se nastavuje šířka dna kapsy. Šířka pro první nástroj byla počítaná pomocí goniometrických funkcí z celkové hloubky Z ($Z_1 + Z_2$), ale dle 2. nástroje byla celková hloubka daná Z2, tedy šířka, která měla být dle výkresu např. pro řadu A v hloubce 13,5 mm, byla ve skutečnosti v hloubce 9,3 mm.

Tab. 4.13 Zaznamenání hloubek pro 1. a 2. nástroj.

Řada	Z (Z1+Z2) celková hloubka	Z1 hloubka 1. nástroje	Z2 hloubka 2. nástroje
A	13,500	4,20	9,30
B	12,500	4,20	8,30
C	10,000	4,00	6,00
D	11,500	4,00	7,50
E	9,500	3,80	5,70
F	10,000	4,00	6,00
G	10,000	4,00	6,00



Obr. 4.20 Vzhled nenavazujících obrobených ploch lopatky A – pokus 1.

Mimo jiné bylo zjištěno, že 1. nástroj, který má průměr 6 mm, nevyjžděl z kapsy celým svým průměrem, což vytvářelo špatný profil lopatky (obr. 4.21).



Obr. 4.21 Profil lopatky řady A – pokus 1.

Řešení – pokus 1:

Na začátku hlavního programu je načítání všech nulových bodů. Kvůli zanedbání faktu, že tyto body pro 2. nástroj mají jiné souřadnice než pro 1. nástroje, bylo zapotřebí pro ně určit další značení, které je kompletně uvedeno v tab. 4.14.

Tab. 4.14 Značení nulových bodů pro 1. a 2. nástroj.

1. nástroj							
Řada	A	B	C	D	E	F	G
Nulový bod	G54	G55	G56	G57	G58	G59	G54.1P1

2. nástroj							
Řada	A	B	C	D	E	F	G
Nulový bod	G54.1P2	G54.1P3	G54.1P4	G54.1P5	G54.1P6	G54.1P7	G54.1P8

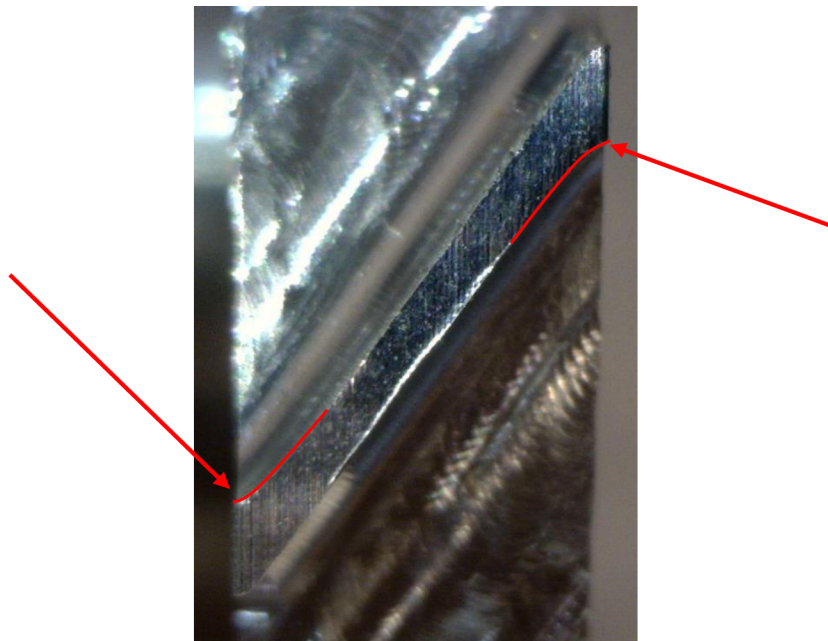
Špatné vyjždění nástroje z kapsy bylo opraveno tak, aby ji nástroj přejížděl o něco více, než při prvním pokusu.

Experiment – pokus 2.:

Při 2. pokusu byla odlazovaná řada A, na které byly provedeny změny přejezdů 1. nástroje. Načítání nulových bodů bylo odlazeno na řadě B. Bylo nutné vygenerovat 2 hlavní programy a 14 vedlejších (7 řad pro 1. nástroj a 7 řad pro 2. nástroj). Hlavní programy bylo zapotřebí sjednotit do jednoho, tedy jak načítání nulových bodů, tak i načítání podprogramů a nástrojů.

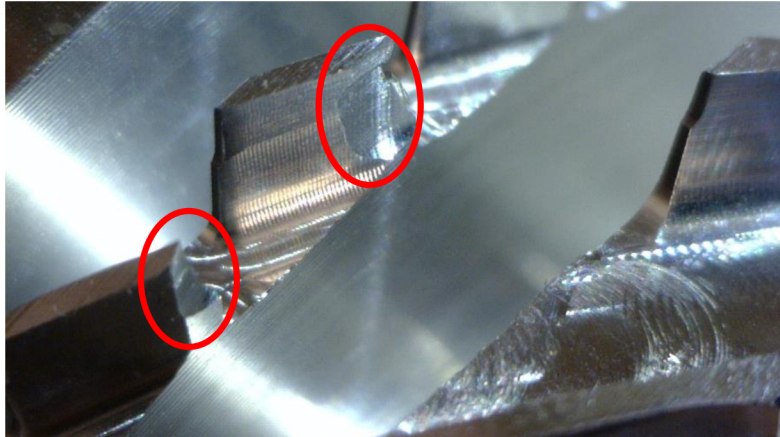
Výsledky – pokus 2.:

Při detailnějším prozkoumání řady A, bylo zjištěno, že profil je stále špatný (obr. 4.22) a bylo by zapotřebí nástrojem vyjíždět z mezery ještě několik desetin milimetru. Při větším vyjíždění nástroje z kapsy by došlo k obrobení vedlejší lamely, která je vzdálená 4,61 mm, je tato možnost změny programu neproveditelná. Což se potvrdilo už i u tohoto testu, kdy byl záměrně větší výjezd nástroje, aby se zjistilo, zda excel, díky kterému jsou vytvářeny programy, má zpětnou kontrolu v tomto parametru a zároveň jestli počítá správně. Přejezd byl tedy o 0,1 milimetru větší, než byla dle výkresu přípustná hodnota. Na obr. 4.23 je zobrazeno zasetí nástroje do následující lamely.



Obr. 4.22 Profil lopatky řady A – pokus 2.

Mimo jiné byla měřena hloubka řady B, která již odpovídala správné hodnotě, a to 12,5 milimetru, z toho vyplývá, že nastavení nulových bodů je správné a odladění této změny v programu lze uvést jako úspěšně dokončené.



Obr. 4.23 Profil lopatky řady A – pokus 2.

Řešení – pokus 2:

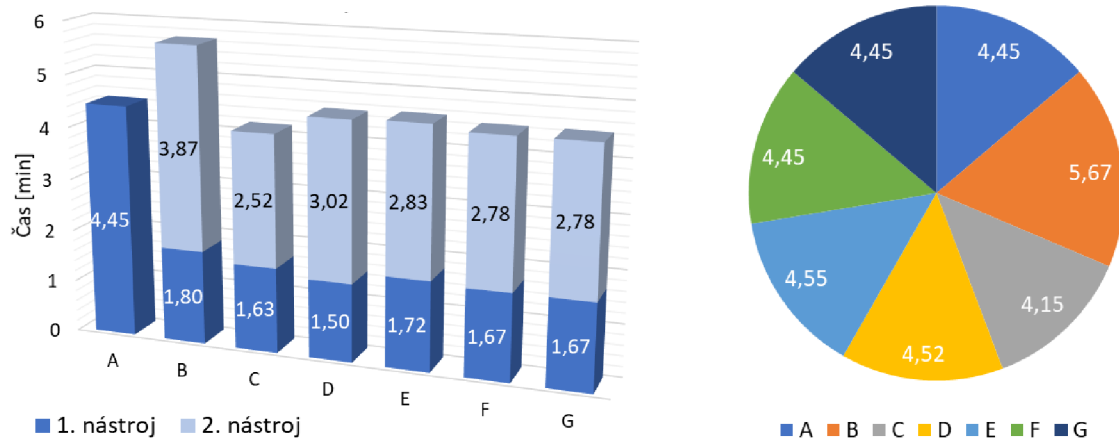
Řešení špatného profilu lopatky řady A a zároveň obrábění následující řady B, bylo takové, že nástroj průměru 6 milimetrů byl označen za nevhodný a v následujících pokusech již nebyl používán.

Experiment – pokus 3.:

V 3. pokusu, byly aplikovány výsledky a řešení z předchozích pokusů a byly tedy obrobena všechny řady. Mimo jiné byly měřeny časy jednotlivých řad.

Výsledky – pokus 3.:

Obrábění řad proběhlo bez kolizí. Bylo možné konstatovat, že excelovský program pro dva nástroje je odladěný a lze jej používat i pro jiné typy rotorů. Časy obrábění 1. a 2. nástroje jsou uvedeny na obr. 4.24. Celkový čas obrábění dvěma nástroji s časy na výměnu nástroje a sondy je 34 minut a 6 sekund.



Obr. 4.24 Výrobní časy obrábění pro 1. a 2. nástroj a celkový čas jednotlivých řad.

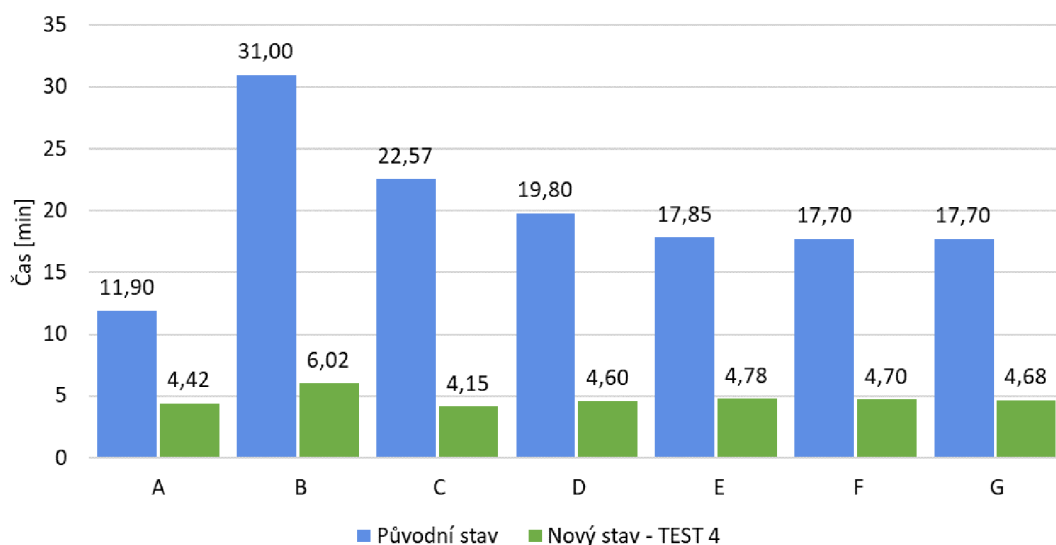
Vzhledem k testu 4 (čas obrábění 34 minut 46 sekund) došlo k časové úspoře 40 sekund. Po domluvě a vyhodnocení byl druhý experiment označen jako úspěšný, avšak pro daný rotor neefektivní, z důvodu malé časové úspory při dvojnásobných nákladech na nástroje. U tohoto rotoru je hloubka lopatek malá a dva nástroje nejsou efektivní volbou. Tato technologie lze použít na jiné rotory, které ale nejsou předmětem této práce.

5 TECHNICKÁ ZPRÁVA

Výstupem každého experimentu je vyhodnocení. Z hlediska stanovení cílů je nejpodstatnější vyhodnotit čas obrábění, náklady a kvalitu povrchu. Obsahem zprávy je i porovnání původních a nových řezných podmínek.

5.1 Porovnání obráběcích časů

Celkový čas původního obrábění, který zahrnuje čas obrábění, výměnu nástroje a čas měření sondou, byl 2:23:18 (2 hodiny, 23 minut a 18 sekund). Časově nejnáročnější byla řada B. Celkový čas nového stavu odpovídá 34:46 (34 minut a 46 sekund) – tedy i čas obrábění testu 4. Porovnání časové náročnosti jednotlivých řad původního a nového stavu je na obr. 5.1. Tab. 5.1 zobrazuje úsporu jednotlivých řad v procentech. Z tabulky vyplývá, že největší časová úspora je u řady C.

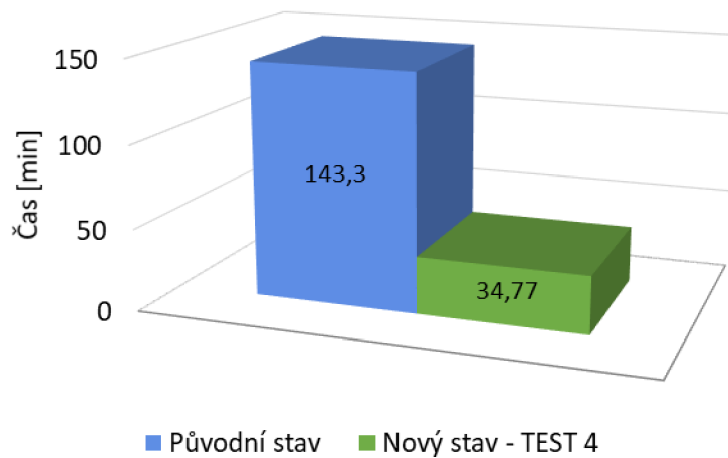


Obr. 5.1 Čas obrábění jednotlivých řad při původním a novém stavu.

Tab. 5.1 Časová úspora jednotlivých řad v procentech.

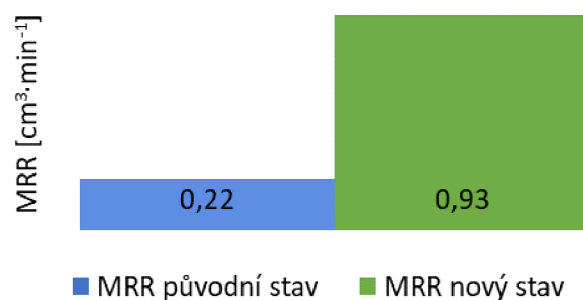
Řada	A	B	C	D	E	F	G
Časová úspora [%]	62,9	80,6	81,6	76,8	73,2	73,5	73,6

Celkový čas obrábění původního a nového stavu je na obr. 5.2. Uspořený čas odpovídá 75,7 %.



Obr. 5.2 Celkový čas obrábění původního a nového stavu.

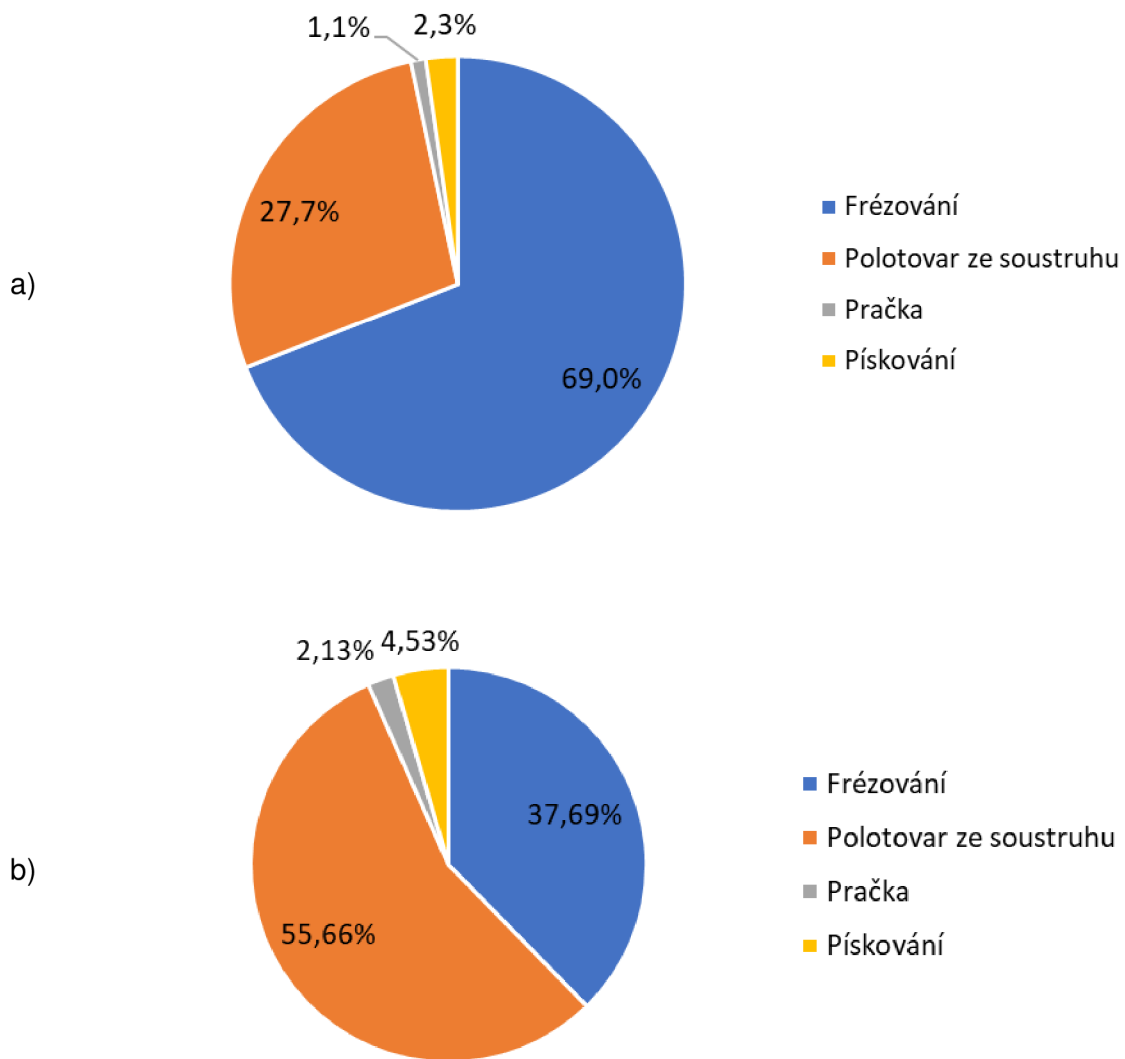
Hlavním ukazatelem zvýšení produktivity je MRR viz obr. 5.3.



Obr. 5.3 Hodnoty MRR původního a nového stavu.

5.2 Ekonomické zhodnocení původního a nového stavu

Do ceny obrobku se promítá operace frézování, mycí proces na pračce, pískování a cena obrobku po operaci soustružení (cena polotovaru pro frézování). Na obr. 5.4 jsou zobrazeny dva grafy v procentuálním podílu těchto jednotlivých složek původního a nového stavu.



Obr. 5.4 Procentuální podíly jednotlivých složek tvořící celkovou cenu: a) při výchozím stavu, b) při novém stavu.

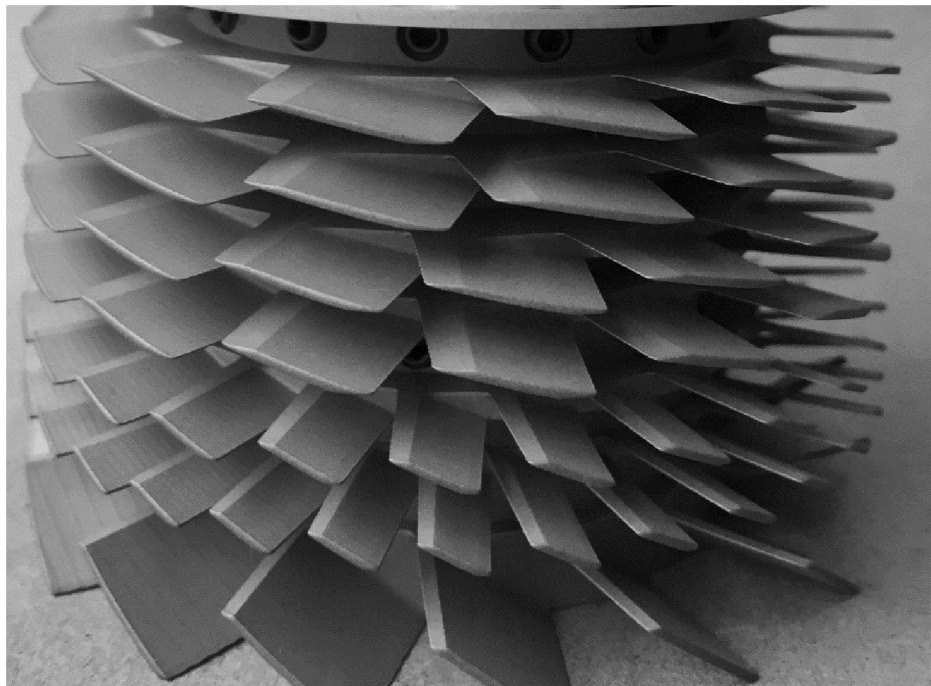
Z grafu na obr. 5. 4 b) jasně vyplývá, že při novém stavu je nejnákladnější položkou tvořící celkovou cenu obrobku polotovar ze soustruhu.

Cena nových nástrojů se průměrně zmenšila o 65 % z původní ceny. Protože však nebyla stanovena životnost původních nástrojů, není možné tyto náklady zahrnout do celkových úspor.

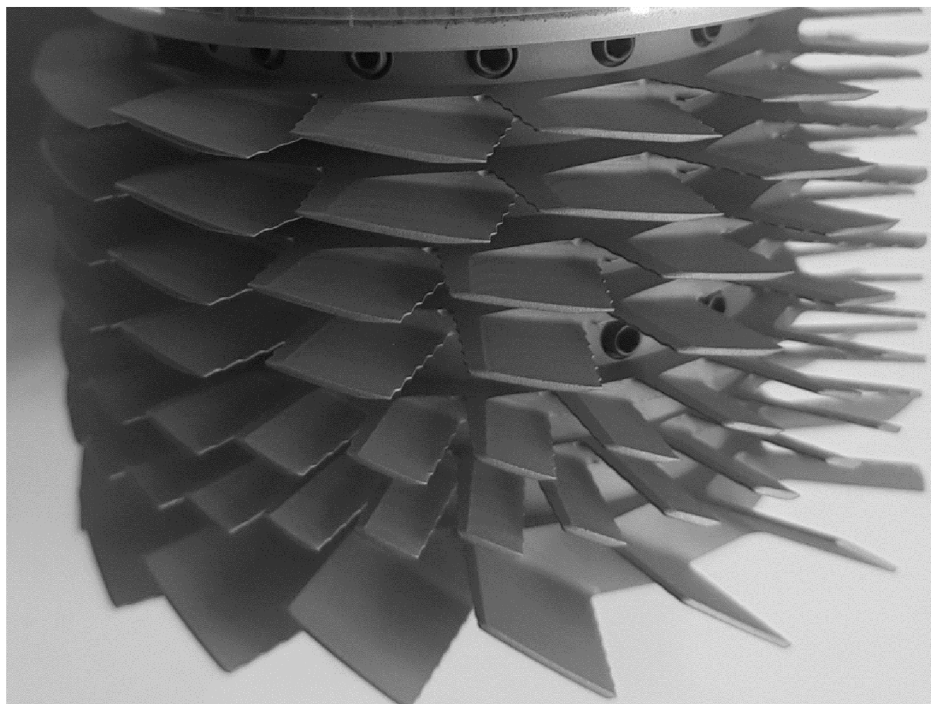
5.3 Hodnocení povrchu součásti

Povrch součásti při novém obráběcím procesu splňuje výkresové požadavky. Vizuálně obrobek vypadá lépe po původním obráběcím procesu viz obr. 5.5, nový vzhled lopatek však nemá vliv na funkčnost rotoru ve vývěvě, jak bylo potvrzeno testy zmíněnými na konci kapitoly 4. 5. 7.

a)



b)



Obr. 5.5 Vzhled obrobku: a) v původním, b) v novém stavu.

5.4 Porovnání řezných podmínek

Změna řezných podmínek proběhla u axiální (a_p) a radiální (a_e) hloubky záběru a rychlosti posuvu (v_f), která vychází z posuvu na zub (f_z). Řezná rychlost nemohla být měněna z důvodu omezení stroje. V následujících tab. 5.2 5.3 a 5.4 je přehled změn výše zmíněných parametrů s ohledem na druh operace (hrubování středu, hrubování a dokončování).

Tab. 5.2 Změny řezných podmínek při hrubování středu.

Hrubování středu (a_e - celý průměr nástroje)						
Řada	Axiální hloubka záběru a_p [mm]		Rychlost posuvu v_f [mm·min ⁻¹]		Radiální hloubka záběru a_e [mm]	
	Původní	Nová	Původní	Nová	Původní	Nová
A	0,75	0,96	3 000	4 510	3	3
B	0,342	0,521	3 000	2 760	1	1
C	0,333	0,5	3 000	3 360	1,2	1,2
D	0,338	0,479	3 000	3 360	1,2	1,2
E	0,339	0,475	3 000	2 760	1	1
F, G	0,333	0,5	3 000	2 760	1	1

Tab. 5.3 Změny řezných podmínek při hrubování.

Hrubování						
Řada	Axiální hloubka záběru a_p [mm]		Rychlost posuvu v_f [mm·min ⁻¹]		Radiální hloubka záběru a_e [mm]	
	Původní	Nová	Původní	Nová	Původní	Nová
A	1,5	1,93	3 000	5 870	0,9	1,2
B	0,684	2,084	3 000	3 580	0,3	0,4
C	0,666	2	3 000	4 350	0,36	0,48
D	0,676	1,916	3 000	4 350	0,36	0,48
E	0,679	1,9	3 000	3 580	0,3	0,4
F, G	0,667	2	3 000	3 580	0,3	0,4

Tab. 5.4 Změny řezných podmínek při dokončování.

Dokončování						
Řada	Axiální hloubka záběru a_p [mm]		Rychlost posuvu v_f [mm·min ⁻¹]		Radiální hloubka záběru a_e [mm]	
	Původní	Nová	Původní	Nová	Původní	Nová
A	1,5	1,93	3 000	3 000	0,05	0,1
B	0,684	2,084	3 000	2 760	0,05	0,1
C	0,666	2	3 000	2 920	0,05	0,1
D	0,676	1,916	3 000	2 920	0,05	0,1
E	0,679	1,9	3 000	2 760	0,05	0,1
F, G	0,667	2	3 000	2 760	0,05	0,1

Rychlost posuvu při dokončování je záměrně menší z důvodu dynamiky stroje, která při vyšší posuvové rychlosti nezvládne nástroj přesunovat do přesných konečných souřadnic, ale kontinuálně pokračuje po oblouku na další souřadnice. Tato problematika byla řešena v kap. 4. 5. 4.

5.5 Hodnocení rotoru z hlediska funkčnosti ve vývěvě

Ve výsledcích u testu 4 (strana 57 – 58) byly zmíněny dva testy, kterými byla zkoušena správná funkčnost rotoru ve vývěvě. Prvním testováním bylo cyklické namáhání rotoru tzv. start – stop test, při němž vývěva byla opakovaně zatěžována při maximálním výkonu a následně vypínána. Rotor úspěšně prošel s 40 000 provedenými cykly. Druhým testem byla zkouška výkonnostních parametrů, která měla za úkol posoudit tyto parametry vývěvy:

- objem odčerpávaného plynu za minutu,
- rychlost čerpání plynu,
- úroveň vakua.

I tento test byl úspěšný, proto z hlediska používání vývěvy byla odsouhlasena nová technologie výroby.

Při dalším pozorování obráběcího procesu byla posuzována jeho stálost, která byla dle očekávání v pořádku. Podmínka pro životnost nástroje byla stanovena na 50 obrobených kusů, a to bylo splněno.

DISKUZE

Při dalším monitorování, které už nespadlo do cílů práce, začalo docházet k potížím, a to lámání jednoho konkrétního nástroje, který frézoval řady E, F a G. Byly řešeny různé důvody, které tento stav mohly zapříčinit a jedním z nich byl nástroj. Bylo kontrolováno házení držáku a nástroje a zjistilo se, že nástroj házel až 0,2 mm. Proto byl vybrán nástroj, který házel do 0,05 mm a bylo jím obráběno. Tímto testem se potvrdilo, že problém s lámáním byl zapříčiněn špatně nabroušeným nástrojem od dodavatele, které zapříčinilo, že nástroj házel nad požadovanou toleranci. Tato skutečnost byla komunikována a problém byl napraven ze strany dodavatele.

Pro lepší pozorování stavu nástroje, ale i samotného stroje bylo doporučeno používat vibrodiagnostiku.

ZÁVĚR

Výstupem práce je snížení výrobních časů frézování lopatkového rotoru pro turbomolekulární vakuovou vývěvu společně se zachováním výkresových požadavků. Cíle byly splněny a čas obrábění byl snížen o 108,5 minut. Dodatečná podmínka životnosti nástroje 50 kusů byla rovněž splněna.

Při experimentování bylo zjištěno:

- nutné odjehlování lopatek při frézování,
- při dokončení nelze použít vyšší posuvové rychlosti než $3\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (profil lopatky není v souladu s výkresovou dokumentací),
- řezná rychlost je omezena otáčkami stroje $v_c \approx 100\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pro nástroj $\varnothing 1$ a $v_c \approx 300\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ pro nástroj $\varnothing 3$, dodavatel doporučuje $v_c \approx 400\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,
- axiální hloubka záběru vzhledem k nástroji byla stanovena na $a_{p\max} = 2,1\text{ mm}$,
- z hlediska snižování časů je pro tento typ rotoru neefektivní použití dvou nástrojů pro jednu řadu.

Experiment byl úspěšný a byl zaveden jako standardní obráběcí proces do výroby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁK, Jakub. *Produktivní frézování hliníkových slitin* [online]. Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2017 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/65619>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.
2. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
3. JANOŠEK, Martin. *Frézovací nástroje pro CNC obráběcí stroje* [online]. Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2010 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/18385>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Anton Humár, CSc.
4. SMID, Peter. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming* [online]. 3rd ed. New York, NY: Industrial Press, c2008 [cit. 2019-05-30]. ISBN 978-0-8311-3347-4. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCNCPHAC1/viewerType:toc//root_slug:cnc-programming-handbook
5. MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
6. ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2336-6.
7. Měření a seřizování nástrojů. *Zoller* [online]. Ried im Innkreis, Rakousko: Zoller Austria, c1987-2017 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <http://www.zoller.cz/produkty/mereni-a-serizovani-nastroju/>

8. KAMENICKÁ, Pavlína. *Způsoby upínání nástrojů a obrobků* [online]. Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2013 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/27465>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
9. Druhy a rozdělení fréz. *Elektronická učebnice* [online]. Olomoucký kraj [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1228>
10. BORO VAN, Petr. Upínače nástrojů (2). *Technický deník* [online]. Praha, 2012 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-jejich-prislusenstvi/upinace-nastroju-2_8498.html
11. Diebold ThermoGrip® – Smršťovací technika. *Tepelné upínání* [online]. Brno: DEK TECHNIK [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <http://www.tepelneupinani.cz/technika/>
12. DVOŘÁK, Luděk. Tepelné upínání nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, **2015**(6), 68 [cit. 2019-05-30]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-upinani-nastroju-11885.html>
13. Frézování pomocí dělicího přístroje. *Elektronická učebnice* [online]. Olomoucký kraj [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1236>
14. KONOP, Josef a Josef JOHÁNEK. *T2-5 Frézování pomocí UDP – přímé a nepřímé dělení*. Domažlice, 2014. VY_52_INOVACE_05.18. Dostupné také z: https://m.soudom.cz/files/odborny_vyvcvik_-_kovo_1-/vy-inovace-05.18.pdf
15. ERBEN, Milan. *Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií* [online]. Pardubice, 2008 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: https://www.upce.cz/sites/default/binary_www_old/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf. Učební text. Univerzita Pardubice, fakulta chemicko-technologická.

16. NEUMAYEROVÁ, Zdeňka. *Speciální laboratorní technika* [online]. Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2008 [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30278330.pdf>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce RNDr. Lukáš Richtera, Ph.D.
17. SÍTKO, Vladimír. *Vakuová technika*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1966, 215 s.
18. KORMUNDA, Martin. *Vývěvy s pracovní komorou: pístové, s valivým pístem, olejové a suché rotační vývěvy, šroubové vývěvy* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, fakulta přírodovědecká [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~mkormund/P222/FTV_p6.pdf
19. GROSZKOWSKI, Janusz a Libor PÁTÝ. *Technika vysokého vakua*. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1981, 438 s.
20. DUBRAVCOVÁ, Viera. *Vákuová a ultravákuová technika*. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-050-1090-7.
21. TMP_MANUFACTURING_EDWARDS. *Understanding STP Products and Technology*. Velká Británie, 2013.
22. WOOD, John a Petr LASTOVICKA. EDWARDS. *NEXT85*. Velká Británie, 2019.
23. BEJDÁK, Jan. EDWARDS. *Turbomolekulární vývěvy*. Lutín, 2010.
24. EDWARDS. *EXT Introduction and Technology*. Velká Británie, 2009.
25. KORMUNDA, Martin. *Vývěvy s přenosem impulsu: Rootsovy vývěvy, molekulární a turbomolekulární vývěvy* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, fakulta přírodovědecká [cit. 2019-05-30]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~mkormund/P222/FTV_p7.pdf
26. HARRIS, Tim. Magnetická ložiska SKF – od inovace k osvědčeným řešením. *Elektro* [online]. 2005, **2005**(4) [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/magneticka-loziska-skf-od-inovace-k-osvedcenym-resentim--13657>
27. EDWARDS. *NEXT85: Návod k použití*. C. Velká Británie, 2017.
28. RUSŇÁK, K. *Vývěvy pracující na základě přenosu impulsu*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra fyziky, 2013, (04). Dostupné také z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYTV/impulz.pdf>

29. *Product data sheet: nEXT85 turbomolecular pump*. Velká Británie, 2016.
30. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin* [online]. Brno, Vysoké učení technické v Brně: Akademické nakladatelství CERM, 2004 [cit. 2020-02-25]. ISBN 80-214-2790-6. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/metalurgie-nezelezných-kovu/metalurgienezeleznýchkovu-skripta.pdf>
31. EDWARDS. *Vacuum Equipment for research and development: 3601001801*. Velká Británie, 2018.
32. Fréza Matsuura FX 1 G, r.v. 1999. *Stenzel* [online]. Německo, Oestrich-Winkel: Stenzel, c2016 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <https://www.cnc-stenzel.cz/matsuura-fx-1-g--7889.html>
33. Vertikální obráběcí centrum CNC MATSUURA FX 1 G. *UniMachines* [online]. Polsko: MASZYNERIA SP. Z O.O., 2019 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <http://unimachines.cz/vertik%C3%A1ln%C3%AD-obr%C3%A1b%C4%9Bc%C3%AD-centrum-cnc-matsuura-fx-1-g-1999-13477.html>
34. LAČŇÁK, Martin. EDWARDS. *SOP nEXT85 Impeller Bladed B8G200010 FX1*. Lutín, 2015.
35. DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování? *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, **2013**(9), 102 [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>
36. MILLER, Ivan. *DOE: návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB®*. Praha: Interquality, 2010. ISBN 978-80-902770-5-2.
37. BOHUŠ, Michal. *DOE plánování experimentu: Studijní materiál ke školení*. Ostrava, VŠB-TU, 2017.
38. MATĚJÍČEK, Jan. *Technologie frézování* [webinář]. Brno: SECO TOOLS CZ s.r.o. 7. dubna 2020.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
MRR	$\text{cm}^3 \cdot \text{min}$	Material Removal Rate (rychlost odstraňování materiálu)
Z	mm	Celková hloubka
Z1	mm	Hloubka 1. nástroje
Z2	mm	Hloubka 2. nástroje
a_e	mm	Radiální hloubka záběru
a_p	mm	Axiální hloubka záběru
f	mm	Posuv
f_z	mm	Posuv na zub
n	min^{-1}	Otáčky nástroje
v_c	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	Řezná rychlost
v_f	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Posuvová rychlost

Zkratka	Popis
Al	Hliník
AW	Hliník tvářený
CMM	Coordinate Measuring Machine (Souřadnicový měřicí stroj)
CNC	Computer Numeric Control
Cu	Měď
D	Průměr nástroje
EN	Evropská norma
G40	Vypnutí korekce nástroje
G41	Zapnutí korekce nástroje
H ₂	Vodík
Mg	Hořčík
N ₂	Dusík
N3	Kontrolní 3 kusy

Zkratka	Popis
NC	Numeric Control (číslicově řízený)
Pa	Jednotka tlaku - Pascal
V	Jednotka napětí – Volt
Zn	Zinek
$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	Centimetr krychlový za minutu
$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	Metr za minutu
$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Milimetr za minutu
min^{-1}	Za minutu
mm	Milimetr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Protokol o chemickém složení polotovaru.
Příloha 2	Výkres polotovaru pro frézování.
Příloha 3	Výkres obrobku.
Příloha 4	Mikrostruktura starého a nového nástroje.
Příloha 5	Ukázka tabulky pro řezné podmínky z excelu.
Příloha 6	Ukázka tabulky plánování experimentu.
Příloha 7	Tabulky řezných podmínek k testu 3.
Příloha 8	Tabulky řezných podmínek k testu 4.
Příloha 9	Paretovy diagramy obráběcích časů jednotlivých testů.
Příloha 10	Tabulky řezných podmínek pro 1. nástroj při testu 5.

Protokol o chemickém složení

Materiál: EN AW-7075
Zadavatel: liškova
Označ. vzorku: polotovar

Protokol č.: 003/2020
Poř. číslo knihy:003/2020
Zkušební stroj:Spectrumat GDS 750

Výsledné chemické složení:

Ozn. vzorku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Ca
polotovar	0,14	0,32	1,78	0,09	3,50	0,22	5,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,001

Zpracoval: Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

V Brně dne 27. ledna 2020

.....
doc. Ing. Vít JAN, Ph.D.



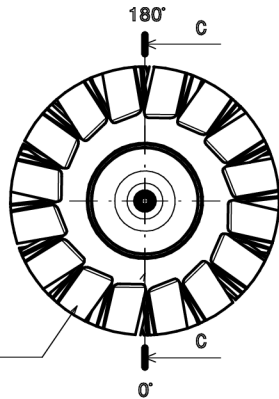
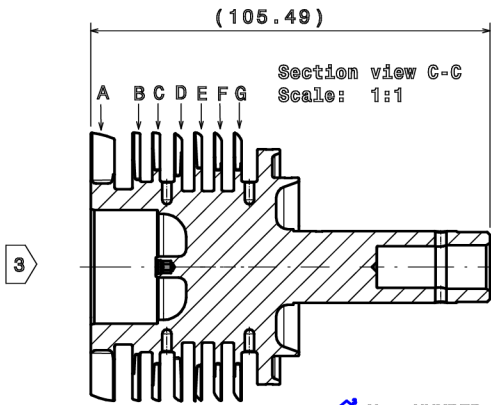
© COPYRIGHT EDWARDS LIMITED. THIS IS THE PROPERTY OF EDWARDS LIMITED. IT MUST NOT BE COPIED OR OTHERWISE MADE USE OF WITHOUT WRITTEN PERMISSION.

PRÍLOHA 3

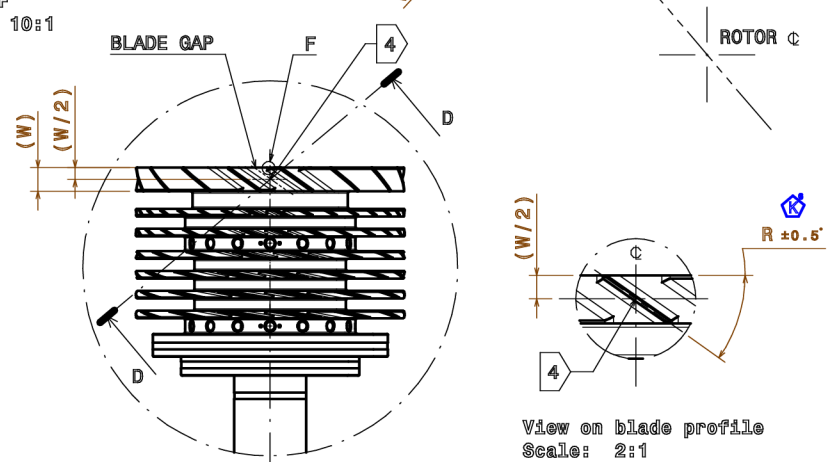
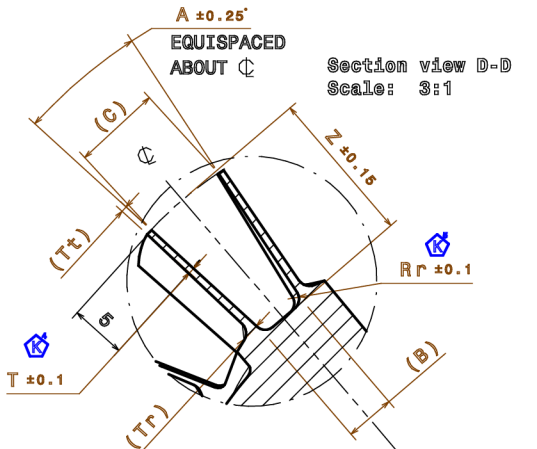
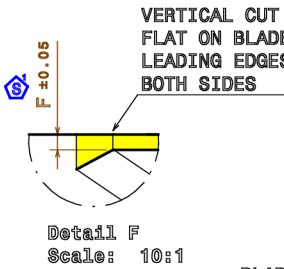
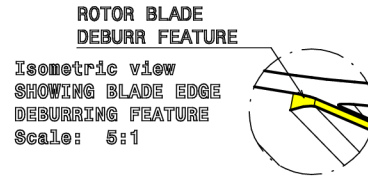
DO NOT SCALE - FIRST ANGLE PROJECTION - IF IN DOUBT ASK

IMPORTANT: REMOVE ALL BURRS AND SHARP EDGES UNLESS OTHERWISE STATED

ISSUE B
 DRAWING NUMBER B8G200010
 SIZE A2
 PROJECT NEXT85
 SHEET No 1 OF 3

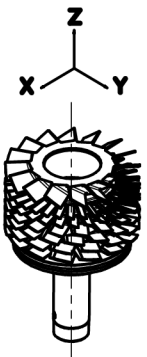


N = NUMBER OF BLADES/ROW



NOTE:

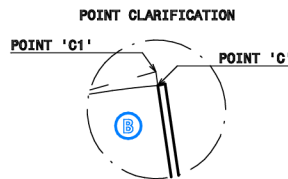
1. BLADE THICKNESS VARIATION AROUND EACH ROW MUST NOT EXCEED 0.05mm
2. DIMENSIONS QUOTED IN THIS TABLE ARE FINISHED BLADE SIZES AFTER SAND BLASTING, EXCEPT C1 WHICH IS A MACHINE PROGRAMMING SIZE (C1 IS THE CORDAL DISTANCE AT BLANK O/D SEE VIEW BELOW).
3. DIMENSIONS GENERATED ON BLANK BUT TO BE CHECKED AFTER MACHINING.
4. BLADES ARE TO BE MACHINED WITH THEIR ANGULAR DISPLACEMENT AXIS ON THE CENTERLINE OF EACH BLADE DISC (SAME FOR THE BLADE GAPS)
5. BLADES ARE TO BE EQUALLY SPACED AROUND EACH DISC CIRCUMFERENCE.



Isometric view
Scale: 1:2

BLADE DIMENSIONS															
BLADE ROW	Z AXIS ROTATION	N	A'	(B)	(C)	(C1)	R'	(W)	Z	F	(Tt)	T	(Tr)	Rr	
A	0°	16	13												
B	180°	32	5												
C	0°	26	6												
D	180°	16	5												
E	0°	16	5												
F	180°	14	5												
G	0°	14													

MASS 240.888g



6	D12	SHT1
5	B11	SHT1
4	C9	SHT1
3	D8	SHT1
2	B4	SHT1
1	D1	SHT1
ZONE SHEET		
KEY FEATURE LOCATION		

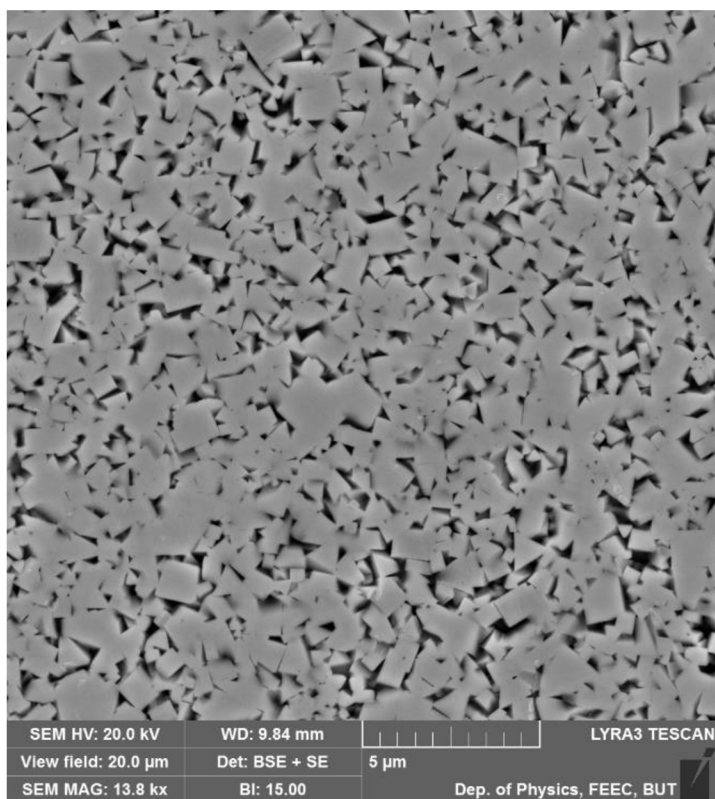
SCALE: 1:1	TOLERANCES
DRWN	ALL DIMENSIONS IN mm.
DATE	OPEN DIMS. & DIMS. TO ONE DECIMAL PLACE ± 0.5
TECHNICAL	ANGLES ± 0°-30'
APPR'D	HOLES -0/+0.25 ON DIA UNLESS OTHERWISE STATED.
	MACHINED COMPONENTS
	SURFACE FINISH TO BE N/A MAX. UNLESS OTHERWISE STATED.

ESTIMATED VOLUME	89476.9mm ³	ESTIMATED MASS	242g
DESCRIPTION	IMPELLER BLADED		
MATERIAL	B8G200011 (ALUM BLANK)		
FINISH	SEE NOTES		
SIZE	DRAWING NUMBER	SHEET No	ISSUE
A2	B8G200010	1 OF 3	B

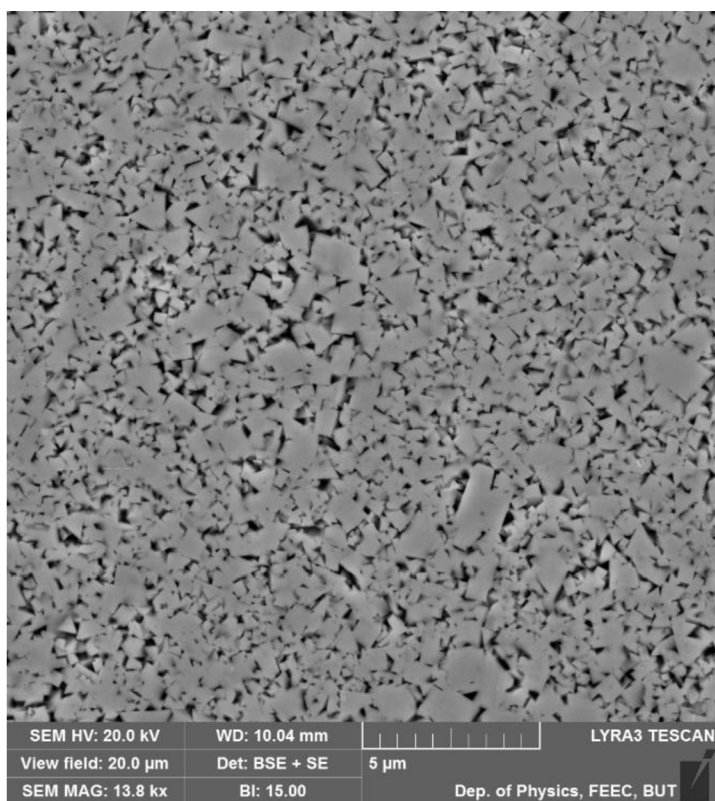
PŘÍLOHA 4

Mikrostruktura starého a nového nástroje.

Starý nástroj



Nový nástroj



PŘÍLOHA 5

Ukázka tabulky pro řezné podmínky z excelu.

Cutting data - FROM CUTTING DESIGN CRITERIA (TEST 1)													
Tool	Blade	N	Deg	WOFFS	SUB	D Tool dia	Q Depth	K Ae hrub	V Ae Fini	feeds			T Chamfer
										F Centr	X Rough	Y Finish	
TDS0A	A	1	0	54	6411	3.000	1.5	0.9	0.1	3000	3920	3920	0.5
TDS0B	B	2	180	55	6412	1.003	1.3	0.3	0.1	1830	2370	2370	0.5
TDS0C	C	3	0	56	6413	1.203	1.8	0.36	0.1	2240	2900	2900	0.5
TDS0D	D	4	180	57	6414	1.203	1.8	0.36	0.1	2240	2900	2900	0.5
TDS0EFG	E	5	0	58	6415	1.003	1.3	0.3	0.1	1830	2370	2370	0.5
TDS0EFG	F	6	180	59	6416	1.003	1.3	0.3	0.1	1830	2370	2370	0.5
TDS0EFG	G	7	0	54.1P1	6417	1.003	1.3	0.3	0.1	1830	2370	2370	0.5

Tool	Ap/D ratio		Fz by Ae			Rpm	centr cuts no	centr cuts reduction				Chamfer	
	100%	30%	100%	30%	5%			F	Fz	From Bottom	Cuts	F	fz
TDS0A	0.25	0.50	0.033	0.043	0.043	30 350	2	3000	0.033	0%	2	900	0.010
TDS0B	0.33	1.30	0.020	0.026	0.026	30 420	4	1830	0.020	0%	4	550	0.006
TDS0C	0.38	1.50	0.024	0.031	0.031	31 150	4	2240	0.024	0%	4	670	0.007
TDS0D	0.38	1.50	0.024	0.031	0.031	31 150	4	2240	0.024	0%	4	670	0.007
TDS0EFG	0.33	1.30	0.020	0.026	0.026	30 420	4	1830	0.020	0%	4	550	0.006
TDS0EFG	0.33	1.30	0.020	0.026	0.026	30 420	4	1830	0.020	0%	4	550	0.006
TDS0EFG	0.33	1.30	0.020	0.026	0.026	30 420	4	1830	0.020	0%	4	550	0.006

PŘÍLOHA 6

Ukázka tabulky plánování experimentu.

Hrubování středu (řada B)				
Hlavní faktory	A - Axiální posuv	Vedlejší faktory	Rovinnost kapsy	
	B - Posuvová rychlost		životnost nástrojů	
	C - otáčky			
	faktor	označení	výchozí hodnota	TEST 1
	A - axiální posuv	a_p	0,342	0,313
	B - posuvová rychlost	v_f	3 000	1 830
	C - otáčky	n	30 000	30 420
	p. záběrů		2	4

Hrubování (řada B)				
Hlavní faktory	A - Axiální posuv	Vedlejší faktory	Povrch dna kapsy	
	B - radiální posuv		Životnost nástrojů	
	C - Posuvová rychlost			
	D - otáčky			
	faktor	označení	výchozí hodnota	TEST 1
	A - axiální posuv	a_p	0,684	1,25
	B - radiální posuv	a_e	max 0.309 (0.309D)	max 0.3
	C - posuvová rychlost	v_f	3 000	2 370
	D - otáčky	n	30 000	30 420

Dokončování (řada B)				
Hlavní faktory	A - Axiální posuv	Vedlejší faktory	Jakost povrchu lopatek	
	B - radiální posuv		životnost nástrojů	
	C - posuvová rychlost			
	D - otáčky			
	faktor	označení	výchozí hodnota	TEST 1
	0 - odjehlení	O	ANO	ANO
	A - axiální posuv	a_p	0,684	1,25
	B - radiální posuv	a_e	0,05 (0,05D)	0,1
	C - posuvová rychlost	v_f	3 000	2 370/550
	D - otáčky	n	30 000	30 420

	výchozí hodnota	TEST 1	TEST 2
Q _{1B}	31:19	13:45	12:14
Čas			
Q _{2B}			
Povrch	Zelená - OK Červená - Není OK		
Q _{3B}	N	N	N
Zlomený nástroj	N - ne není zlomený A - ano je zlomený		

PŘÍLOHA 7

Tabulky řezných podmínek k testu 3

1. operace hrubování středu

Tab. P7.1 Řezné podmínky 3. testu pro hrubování středu.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
A	Ø 3	0,75	4 510	30 350	2
B	Ø 1	0,313	2 760	30 620	4
C	Ø 1,2	0,417	3 360	31 150	4
D	Ø 1,2	0,411	3 360	31 150	4
E	Ø 1	0,297	2 760	30 620	4
F, G	Ø 1	0,313	2 760	30 620	4

2. operace hrubování

Tab. P7.2 Řezné podmínky 3. testu pro hrubování.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,5	5 870	30 350	0,9 (0,3 * D)
B	Ø 1	1,25	3 580	30 620	0,3 (0,3 * D)
C	Ø 1,2	1,668	4 350	31 150	0,36 (0,3 * D)
D	Ø 1,2	1,644	4 350	31 150	0,36 (0,3 * D)
E	Ø 1	1,188	3 580	30 420	0,3 (0,3 * D)
F, G	Ø 1	1,25	3 580	30 420	0,3 (0,3 * D)

3. operace dokončování

Tab. P7.3 Řezné podmínky 3. testu pro dokončování.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹] Dokončování / odjehlení	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,5	5 870 / 1 350	30 350	0,1
B	Ø 1	1,25	3 580 / 830	30 620	0,1
C	Ø 1,2	1,668	4 350 / 1 010	31 150	0,1
D	Ø 1,2	1,644	4 350 / 1 010	31 150	0,1
E	Ø 1	1,188	3 580 / 830	30 620	0,1
F, G	Ø 1	1,25	3 580 / 830	30 620	0,1

PŘÍLOHA 8

Tabulky řezných podmínek k testu 4

1. operace hrubování středu

Tab. P8.1 Řezné podmínky 4. testu pro hrubování středu.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
A	Ø 3	0,96	4 510	30 350	2
B	Ø 1	0,521	2 760	30 620	4
C	Ø 1,2	0,5	3 360	31 150	4
D	Ø 1,2	0,479	3 360	31 150	4
E	Ø 1	0,475	2 760	30 620	4
F, G	Ø 1	0,5	2 760	30 620	4

2. operace hrubování

Tab. P8.2 Řezné podmínky 4. testu pro hrubování.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,93	5 870	30 350	1,2 (0,4 * D)
B	Ø 1	2,084	3 580	30 620	0,4 (0,4 * D)
C	Ø 1,2	2	4 350	31 150	0,48 (0,4 * D)
D	Ø 1,2	1,916	4 350	31 150	0,48 (0,4 * D)
E	Ø 1	1,9	3 580	30 620	0,4 (0,4 * D)
F, G	Ø 1	2	3 580	30 620	0,4 (0,4 * D)

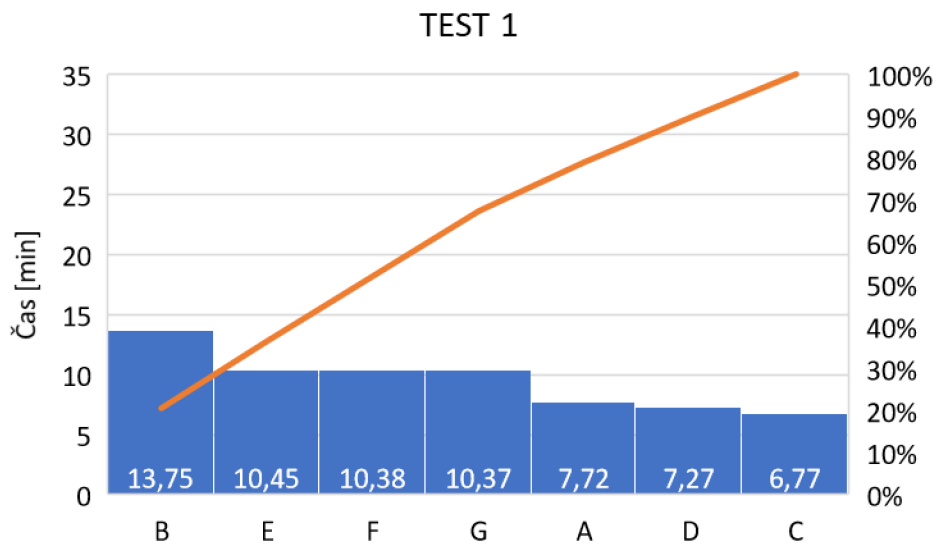
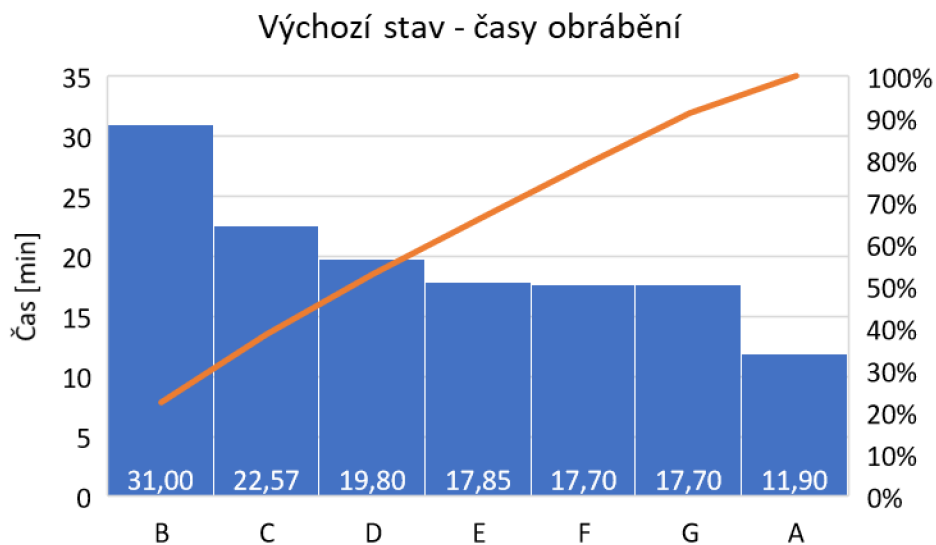
3. operace dokončování

Tab. P8.3 Řezné podmínky 4. testu pro dokončování.

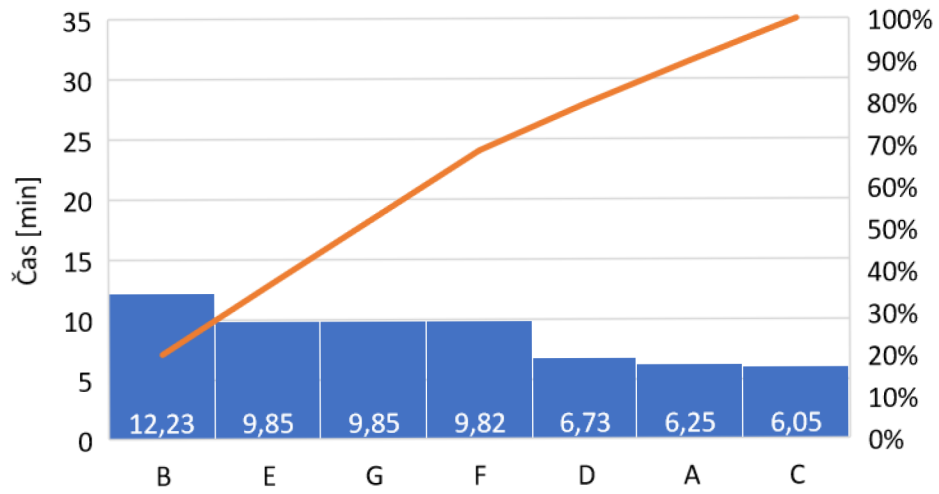
Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹] Dokončování / odjehlení	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 3	1,93	3 000 / 1 350	30 350	0,1
B	Ø 1	2,084	2 760 / 830	30 620	0,1
C	Ø 1,2	2	2 920 / 1 010	31 150	0,1
D	Ø 1,2	1,916	2 920 / 1 010	31 150	0,1
E	Ø 1	1,9	2 760 / 830	30 620	0,1
F, G	Ø 1	2	2 760 / 830	30 620	0,1

Příloha 9

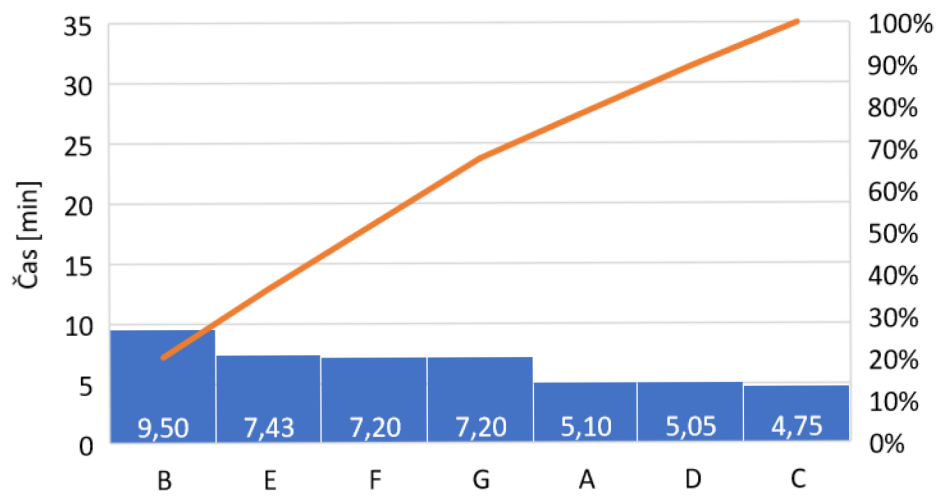
Paretovy diagramy obráběcích časů jednotlivých testů.



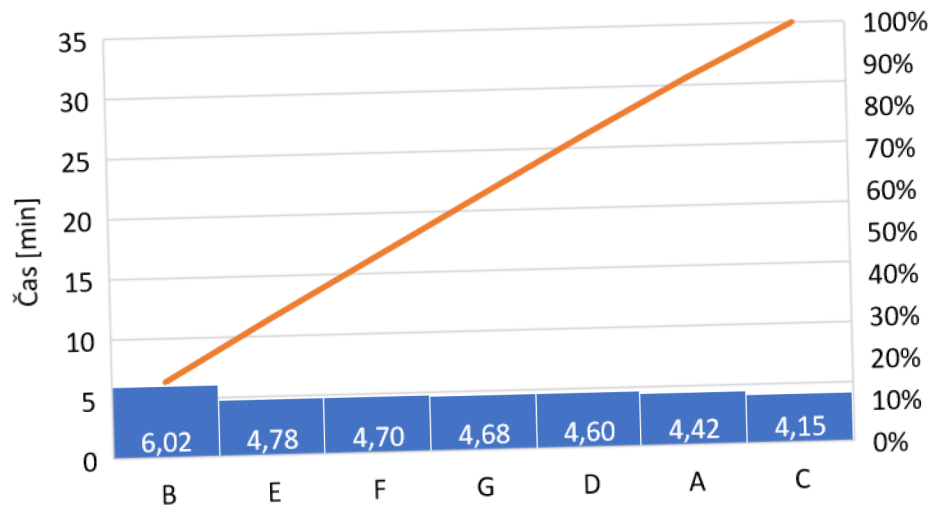
TEST 2



TEST 3



TEST 4



PŘÍLOHA 10

Tabulky řezných podmínek pro 1. nástroj při testu 5.

1. operace hrubování středu

Tab. P10.1 Řezné podmínky 4. testu pro hrubování středu.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Počet záběrů
A	Ø 6	1,05	5 310	23 000	2
B	Ø 1,8	0,525	4 230	30 620	4
C	Ø 2	0,5	4 650	31 000	4
D	Ø 2	0,5	4 590	30 620	4
E	Ø 1,5	0,475	3 860	30 620	4
F, G	Ø 1,5	0,5	3 860	30 620	4

2. operace hrubování

Tab. P10.2 Řezné podmínky 4. testu pro hrubování.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹]	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 6	2,1	6 000	23 000	1,2 (0,4 * D)
B	Ø 1,8	2,1	5 140	30 620	0,4 (0,4 * D)
C	Ø 2	2	5 770	31 000	0,48 (0,4 * D)
D	Ø 2	2	5 700	30 620	0,48 (0,4 * D)
E	Ø 1,5	1,9	4 780	30 620	0,4 (0,4 * D)
F, G	Ø 1,5	2	4 780	30 620	0,4 (0,4 * D)

3. operace dokončování

Tab. P10.3 Řezné podmínky 4. testu pro dokončování.

Řada	Průměr nástroje (D) [mm]	Axiální hloubka řezu (a_p) [mm]	Rychlost posuvu (v_f) [mm·min ⁻¹] Dokončování / odjehlení	Otáčky (n) [min ⁻¹]	Radiální hloubka řezu (a_e) [mm]
A	Ø 6	2,1	3 170 / 1 590	23 000	0,1
B	Ø 1,8	2,1	2 940 / 1 270	30 620	0,1
C	Ø 2	2	2 980 / 1 400	31 000	0,1
D	Ø 2	2	2 940 / 1 380	30 620	0,1
E	Ø 1,5	1,9	2 940 / 1 160	30 620	0,1
F, G	Ø 1,5	2	2 940 / 1 160	30 620	0,1