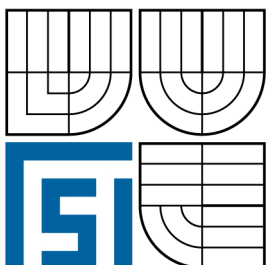


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE PRO SOUČÁST „HŘÍDEL PARNÍ TURBÍNY“ S OPTIMALIZACÍ TVAROVĚ SLOŽITÉ PLOCHY

**SOLUTION TECHNOLOGY OF PRODUCTION "HŘÍDEL PARNÍ TURBÍNY"-PART WITH
EFFECTIVE USAGE OF CONTOURED SURFACE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

IGOR VACENOVSKÝ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MILAN KALIVODA

ABSTRAKT

Cílem práce je řešení návrhu nové technologie obrábění drážek rotoru pro lopatky parní turbíny. Popis technologie obrábění drážek rotoru. Jsou sledována různá kritéria a výsledné řešení je sestaveno na zadané podmínky pro firmu EKOL, spol. s r.o. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

parní turbína, rotor, drážka, lopatka, technologie, obrábění, břitová destička, podpich

ABSTRACT

The aim of this work is to suggest the solution for the new technology of rotor grooves machining for vanes of the steam turbine. It contains the technology of rotor grooves machining. Various criteria are taken into account and the final solution is adapted to the conditions of EKOL, spol. s r.o. company. Technical and economical evaluation.

Key words

steam turbine, rotor, groove, vane, technology, machining, cutting tip, groove recess

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VACENOVSKÝ, I. *Řešení technologie pro součást "hřídel parní turbíny" s optimalizací tvarově složité plochy*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Řešení technologie pro součást „hřídel parní turbíny“ s optimalizací tvarově složité plochy* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

16.5.2008

.....

Igor Vacenovský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto za možnost zpracování diplomové práce pro firmu EKOL generálnímu manažeru firmy EKOL, spol.s.r.o. prof. Ing. Stanislavovi Veselému, CSc. a generálnímu řediteli divize EKOL ENERGO s.r.o. Ing. Stanislavu Gojovi, dále děkuji za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce těmto odborníkům: vedoucí technologie Ing. Rudolf Semotam, programátor CNC strojů Patrik Gregor. Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Kalivodovi za odborné vedení, cenné připomínky a rady a doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za rady a konzultace při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
Úvod	9
1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE	11
1.1 Pojmy a definice ve strojírenství	11
1.1.1 Strojírenská technologie	11
1.1.2 Výrobní proces	11
1.1.3 Technologický postup	11
1.1.4 Členění technologických postupů	12
1.1.5 Rozdělení obráběcích operací	13
1.1.6 Přídavky na obrábění	13
1.2 Počítačová podpora ve strojírenství	13
1.2.1 CAD/CAM	13
1.2.2 CAD	14
1.2.3 CAM	14
1.3 Turbínové stroje	14
1.3.1 Parní turbína	14
1.3.2 Parní turbosoustrojí	14
1.3.3 Parní turbínové zařízení	14
2 PARNÍ TURBÍNY	15
2.1 Konstrukční a technologická charakteristika parních turbín	15
2.2 Provozní charakteristika	17
2.3 Ekonomická charakteristika	18
2.4 Druhy parních turbín	19
2.4.1 Kondenzační turbíny (K)	19
2.4.2 Kondenzační turbíny s regulovaným odběrem teploty (T), nebo průmyslovým (P)	20

	2.4.3 Protitlakové turbíny(R).....	20
	2.4.4 Kondenzační turbíny se dvěma regulovanými odběry páry (PT, nebo PP).....	21
	2.4.5 Protitlakové turbíny s jedním regulovaným odběrem páry (TR a PP).....	2
	2	
	2.4.6 Speciální parní turbíny.....	22
3	ROTORY PARNÍCH TURBÍN.....	23
	3.1 Typické konstrukční koncepce rotorů.....	23
	3.2 Technologické a provozní problémy rotorů.....	24
	3.3 Typické konstrukce závěsů rotorových lopatek.....	26
	3.4 Uzávěrky drážek obvodových závěsů a zajištění axiální polohy lopatky v axiálních závěsech.....	26
	3.5 Rotorové lopatky.....	27
4	POPIS STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE.....	29
	4.1 Postup obrábění drážky	30
	4.2 NC program pro obrobení drážky	36
5	KRITICKÁ MÍSTA OBRÁBĚNÍ.....	37
	5.1 Charakter drážek rotoru	37
	5.2 Problémy spojené s obráběním drážek	40
	5.3 Tvarové a povrchové tolerance drážek	40
	5.4 Podpich.....	41
6	NÁVRH NOVÉHO ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE	43
	6.1 Úprava tvaru drážky	44
	6.2 Popis obrábění drážky po optimalizaci	44
	6.3 Výhody a nevýhody po optimalizaci	47
	6.4 Výpočet strojních časů obrábění.....	48

6.4.1 Výpočet strojního času obrábění drážky E 4-22070 na prvním nosném stupni rotoru parní turbíny.....	49
6.4.2 Výpočet strojního času obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru parní turbíny.....	51
6.4.3 Výpočet strojního času obrábění drážek E 4-22071 na druhém nosném stupni rotoru parní turbíny.....	53
6.4.4 Výpočet strojního času obrábění drážky E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru parní turbíny.....	55
6.4.5 Výpočet strojního času obrábění drážek E 4-19256 a drážky E 4-23547 na třetím nosném stupni rotoru parní turbíny.....	57
6.4.6 Výpočet celkového strojního času obrábění všech drážek rotoru a celkový strojní čas obrábění 3. operace všech drážek rotoru.....	58

7 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....59

7.1 Zhodnocení z hlediska úspory strojních časů	59
7.2 Zhodnocení z hlediska nákladů	60
7.3 Zhodnocení z hlediska technologie a technologické přípravy výroby.....	61
7.4 Celkové zhodnocení nové technologie.....	62

Závěr	63
--------------------	-----------

Seznam použitých zdrojů	65
--------------------------------------	-----------

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	67
---	-----------

Seznam příloh	68
----------------------------	-----------

ÚVOD

V oblasti technických věd stojí technologie na čelním místě všech technických oborů. Technické vědy využívají výsledků vědeckého bádání ve prospěch lidstva, vedou lidstvo k vyššímu stupni hmotného blahobytu i kultury a vyvíjí se úměrně s vývojem lidské společnosti.

Technologie je jedním z technických oborů, který aplikuje poznatky zejména z vědního oboru fyziky, matematiky a chemie při zavádění, zdokonalování a využívání výrobních postupů. Vývoj technologie je úzce spjat s vývojem poznání vědy a techniky. Kvalita aplikované technologie, dominantním způsobem ovlivňuje nejen užité vlastnosti hotového výrobku, ale i ekonomiku výrobku.

Současný stav třískového obrábění a perspektivní směry rozvoje ukazují, že obrábění zůstává a zůstane ve strojírenské výrobě základní technologickou profesí. Několik tisíciletí byla založena výroba kovových součástí a nástrojů pouze na odlévání a teprve v 19. a 20. století došlo k rozvoji třískového obrábění, které zajišťuje podstatně vyšší přesnost, a tím i vyšší spolehlivost jednotlivých elementů výrobku a jejich celků.

V první polovině minulého století došlo v oblasti technologie obrábění k prudkému rozvoji sériové, velkosériové a hromadné výroby. V letech 1950-1960 se vlivem vysokých požadavků leteckého průmyslu a rozvíjející se kosmonautiky na spolehlivost a přesnost obráběných součástí kvalitativně změnila podstata obrábění a došlo k vývoji a nasazení obráběcích strojů, u kterých byla posloupnost obrábění řízena číslicově zadanými informacemi. Ukázalo se, že číslicový řídicí systém a později počítač je schopen podstatně rychleji dodávat v reálném čase informace o výrobním procesu, než pomalu reagující lidský činitel. Opět to byla oblast technologie obrábění, kde číslicově řízená výrobní technika dosáhla největšího rozvoje a v současné době pracuje naprosto spolehlivě i celá řada bezobslužných pracovišť. Další vývoj technologie obrábění je orientován na automatizaci výrobního procesu, nasazení perspektivních, vysoce výkonných řezných materiálů a aplikaci nekonvenčních metod obrábění (obrábění laserem, svazkem elektronů, ultrazvukem, za tepla, vodním paprskem atd.). (1)

Základní informace o firmě EKOL, spol. s r.o.

Obr. 1.1 Logo EKOL, spol. s r.o. (2)

Firma EKOL se zabývá dodávkami parních a spalovacích turbín, energetickým inženýrstvím, diagnostikou točivých strojů a obráběním strojních součástí. Od svého založení v roce 1991 získala v oboru - **parní a spalovací turbíny** - zákazníky nejenom v České a Slovenské republice, ale také v Německu, Polsku, Maďarsku, Ukrajině, Rusku, Kazachstánu, Egyptě, Sýrii, Rumunsku a Francii. Export tvoří asi 90 % produkce. Mezinárodní tendry a jejich výsledky svědčí o světové úrovni technického řešení turbín od firmy EKOL.

Název EKOL vznikl od slova ekologie. Řešením ekologických problémů vznikajících při provozu parních a spalovacích turbín se firma věnuje již od založení a je to její prioritou. Vysoký důraz je kladen na snižování emisí škodlivin při spalování karbonských paliv ve spalovacích komorách turbín. Firmou EKOL bylo provedeno již více jak 250 ekologických modernizací spalovacích komor pro různé spalovací turbíny. (2)



Obr. 1.2 Sídlo firmy EKOL, spol. s r.o. (3)

1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

1.1 Pojmy a definice ve strojírenství

1.1.1 Strojírenská technologie

Technologie(řeckého původu – techné=dovednost, logus=nauka) je technický obor, který se zabývá uplatňováním přírodovědeckých poznatků při zavádění, využívání a zdokonalování výrobních postupů.

Strojírenská technologie analyzuje výrobní proces do všech podrobností tak, aby byly vytvořeny účelné a ekonomické podmínky pro aplikaci nejnovějších poznatků ve výrobním procesu. (1)

1.1.2 Výrobní proces

Je soubor na sobě nezávislých činností, při kterých se přetváří výchozí materiál v hotový výrobek. Výrobní proces je realizován technologickými postupy, které dávají stručný návod zpracování polotovarů v součást, nebo hotový výrobek a dělí se obecně na technologické postupy hlavní a obecné. (1)

1.1.3 Technologický postup a jeho členění

Technologický postup určuje potřebné výrobní zařízení, nářadí řezné, upínací, měřicí a pracovní podmínky potřebné pro danou operaci tak , aby dílec nebo celý výrobek byl podle daného technologického postupu hospodárně vyrobitelný a splňoval kvalitativní a kvantitativní požadavky dané technickou dokumentací. (1)

Technologický postup typicky obsahuje:

- výrobní prostředky, tj. výrobní zařízení, přípravky, nástroje a měřidla
- sled operací včetně popisu práce
- počet vyráběných kusů
- technologické podmínky včetně režimu práce strojů
- jednotlivé operační rozměry
- odměny za vykonanou práci
- časy jednotkové práce t_A u jednotlivých operací

Technologický postup je výsledkem práce technologa=postupáře v rámci technické přípravy výroby a je pro výrobu závazný, tj. stejně platný jako technický výkres. Svévolné porušení technologických podmínek se kvalifikuje jako porušení technologické kázně a je trestné.

K hlavní technologickým postupům patří technologické postupy součástí a montáže finálních výrobků z nich. K pomocným technologickým postupům pak výroba a ostření náradí, oprava zařízení, vnitrozávodní doprava apod. (1)

1.1.4 Členění technologických postupů

Současná strojírenská výroba klade vysoké požadavky na komplexnost, úplnou a vysokou úroveň výrobních postupů. Úroveň technologického postupu ovlivňuje konečné kvalitativní výsledky, tj. přesnost rozměrů a tvarů i stav povrchu opracovaných ploch a dále kvalitativní výsledky, tj. ovlivňuje ekonomickou stránku řešení. Ke splnění uvedené podmínky se technologický postup člení na jednotlivé **operace-úseky-úkony-pohyby**.

Operace je část výrobního procesu, prováděná nepřetržitě při jednom čase, charakterizovaná stejným výrobním cílem, vykonávaná na určitém dílci nebo několika stejných dílcích na jednom pracovišti nebo jedním strojem a zpravidla jedním pracovníkem.

Úsek je část operace, kdy se vykonává práce za stejných technologických podmínek, jedním nástrojem nebo skupinou nástrojů pracujících současně na jedné ploše nebo skupině ploch dílce. Například soustružení hřídel se dělí na úseky soustružení čela, válcových ploch, zápchů atd. Úsek se často skládá z několika záběrů a to v případě, že se obrábí tatáž plocha několikrát.

Úkon je část úseku, charakteristický jednoduchou pracovní činností, organizačně nedělitelnou. Například při soustružení hřídele je to upínání dílce, spuštění stroje, přisunutí nástroje, nastavení hloubky řezu, zapnutí posuvu atd. Hlavní úkon je ten, při kterém se realizuje vlastní předepsaná práce, tj. například při obrábění odebrání třísky; ostatní jsou úkony vedlejší, bez kterých by hlavní úkon nebylo možné provést (upínání a vyjmutí dílce, uvedení stroje do činnosti, zastavení činnosti stroje atd.).

Pohyb je nejjednodušší část pracovní činnosti, uváděná zejména v hromadné výrobě a u montážních prací. Je to nejmenší měřitelný prvek operace. (1)

1.1.5 Rozdělení obráběcích operací

Celkový přídavek na jednotlivých plochách se odebírá postupně na několikrát a počet těchto operací je nutné rozdělit:

- **hrubování:** odebírá se přebytečný materiál, působí velké řezné síly při obrábění, vyvíjí se velké množství tepla a odebíráním povrchových vrstev dochází k novému rozdělení vnitřních napětí v obrobku a případně k jeho deformaci.
- **poločistě obrábění:** odebírají se malé přídavky, jednotlivé povrchy dílce se postupně zpřesňují a připravují se tak na provedení konečných operací
- **čistě obrábění:** jednotlivé povrchy dílce se obrobí s potřebnou přesností
- **dokončující obrábění:** se používá v případě, že nelze při čistém obrábění hospodárně obrobit jednotlivé plochy v požadované přesnosti(1)

1.1.6 Přídavky na obrábění

Při obrábění polotovaru se mění postupně jeho tvar, rozměry a struktura jeho povrchu. Uvedené změny způsobuje postupné ubírání vrstev materiálu z povrchu polotovaru jednotlivých fázích technologického postupu.

Celkový přídavek je vrstva materiálu, kterou je nutné odstranit z polotovaru, aby vznikla hotově obrobená součást. Celkový přídavek se odebírá postupně v jednotlivých operacích obrábění a velikost přídavku pro jednotlivé operace se nazývá operační přídavek. V průběhu operace může být odebírán jen jedním nebo několika záběry.(1)

1.2 Počítačová podpora ve strojírenství

1.2.1 CAD/CAM

(projektování pomocí počítače/výroba pomocí počítače). Termín označují použití počítačů při projektování a výrobě produktů. Metoda CAD/CAM spočívá v tom, že výrobek, jako např. část stroje, se navrhne v CAD programu nebo pomocí objemového modelování a konečný tvar se přeloží do soustavy instrukcí, jež lze přenést jako zdroj do zpravidla číslicově řízených obráběcích strojů, které podle ní příslušný výrobek vyrobí. (1)

1.2.2 CAD

(Computer-aided design). Termín označující programy (a pracovní stanice) používané při navrhování nástrojových, architektonických a vědeckých modelů od jednoduchých nástrojů, až po složité celky, např. letadla. Různé aplikace CAD vytváří dvou a třírozměrné objekty, přičemž výsledkem mohou být „kostry“ objektů složené z čar (wire frame), náročnější modely se stínovanými částmi nebo skutečné zobrazení objektů. Některé programy taktéž umožňují rotaci objektů nebo změnu jejich velikosti, poskytují pohled zevnitř, vytváří seznamy materiálů potřebných ke konstrukci a provádějí jiné příbuzné funkce. (1)

1.2.3 CAM

(Computer-aided manufacturing). Aplikace počítačů v automatizaci výroby, technologické přípravy výroby a kontroly výrobků. Uplatňuje se jak při kusové výrobě, tak i při výrobě hromadné za použití robotů a automatizovaných linek. (1)

1.3 Turbínové stroje

1.3.1 Parní turbína

Je tepelný lopatkový motor, v němž se mechanická energie na hřídeli získává expanzí proudící vodní páry v jednom, nebo více turbínových stupních. (4)

1.3.2 Parní turbosoustrojí

Je parní turbína s poháněným strojem(např. turboalternátorem) – u turbín s převodem včetně převodovky. (4)

1.3.3 Parní turbínové zařízení

Je parní turbosoustrojí včetně vnitřního spojovacího potrubí a ostatního příslušenství (např. čerpadel, kondenzátoru a jeho příslušenství, regeneračních ohříváků).(4)

2 PARNÍ TURBÍNY

Jedná se o točivý tepelný stroj, přeměňující kinetickou energii a tepelnou energii proudící páry na mechanický rotační pohyb přenášený na osu resp. hřídel stroje.

Skládá se z jednoho, nebo několika postupně se zvětšujících lopatkových kol. Lopatková kola, která jsou součástí statoru stroje, se nazývají rozváděcí. Ta, která jsou spojena s rotující osou (resp. jsou umístěna na hřídeli) stroje, se nazývají oběžná a spolu s osou tvoří rotor.

Pro zvýšení účinnosti bývají obvykle velké parní turbíny rozděleny na několik dílů - vysokotlaký a nízkotlaký, případně i středotlaké stupně. Mezi nimi může být i regenerátor páry, který znovu ohřeje expanzí zchladlou páru, čímž zvětší (za cenu dodání relativně malé energie) její objem.

Parní turbína je využívána především v energetice pro pohon alternátorů (tepelná elektrárna, jaderná elektrárna), se kterým bývá mechanicky spojena společným hřídelem. Parní turbína se ale užívá i jako lodní pohon (parník, bitevní loď, jaderná ponorka). (5)

2.1 Konstrukční a technologická charakteristika parních turbín

Vysoké otáčky rotorů: Parní turbíny přímo spojené s poháněnými elektrickými generátory zapojenými do sítí a frekvencí 50 Hz případně 60 Hz mají otáčky 50 s^{-1} , případně 60 s^{-1} , u „pomaluběžných“ soustrojí na mokrou páru v jaderných centrálách 25 s^{-1} , případně 30 s^{-1} , rychloběžné převodové turbíny 100 až 500 s^{-1} . Parní turbíny k přímému pohonu turbokompresorů mívají otáčky 50 až 400 s^{-1} .

Vysoké obvodové rychlosti rotorů: Termodynamické procesy v pracovních stupních turbín vyžadují zpravidla vysoké obvodové rychlosti rotujících lopatkových mříží. Obvodové rychlosti špiček oběžných lopatek posledních stupňů kondenzačních turbín na příklad dosahují 400 až 600 ms^{-1} i více, obvodové rychlosti oběžných kotoučů a bubnů 200 až 250 ms^{-1} , rychlosti ložiskových čepů 60 až 100 ms^{-1} . Dotyk takto rychle rotujících částí se statorem znamená vesměs vážné poškození (havárie) turbín a přerušení jejich provozu.

Různorodost součástí a funkčních celků: Turbíny se vyznačují mimořádným rozsahem různorodých součástí funkčních celků podle kritérií funkčních, tvarových, hmotnostních, technologických a provozních, který nemá u jiných výrobků obdoby.

Jsou využívány téměř všechny možnosti technologie a metalurgie ke zvládnutí konstrukčních a provozních nároků a požadavků, kladených na součásti turbín v uvedeném širokém rozsahu technických parametrů.

Odlitky: Běžné odlitky z lité oceli a šedé litiny o hmotnosti několika kg po největší proveditelné odlitky současnou technologií do hmotnosti 120 t i více, přesné odlitky metodami vytavitelných modelů.

Výlisky a výkovky: Běžné výkovky a výlisky, přesné výlisky bez nutnosti dalšího opracování, velké největších proveditelných rozměrů současnou technologií (oběžné kotouče do průměru 3000 mm, hřídele a bubny do délky 12 m, hmotnosti 160 t i více).

Svarky: Běžných rozměrů s koncepcí, speciální svarky rozváděcích kol, lopatky, košilek spalovacích komor a skříní, turbínových rotorů největších rozměrů, turbínových skříní, zejména nízkotlakých těles, kondenzátorů, základ základových rámců atd. až do největších transportovatelných rozměrů, často svařovaných na místě v centrále v ještě větší celky.

Materiálová různorodost: Vyplývá z funkční různorodosti částí turbín. Typické je používání nejhodnotnějších žáropevných ocelí a slitin feritických i austenitických na lopatky, rotory, výkovky a odlitky pracující za vysokých teplot, použití barevných kovů (mosazi) na trubky kondenzátorů.

Montážní různorodost a náročnost: Vyplývá z rozdílných velikostí a hmotností turbín a z jejich konstrukčních koncepcí, technických parametrů a montážního prostředí: dílenské prostředí u výrobce, v podmínkách strojoven v centrále, v klimaticky extrémních podmínkách provozních lokalit při venkovním provedení. Turbíny malých a středních výkonů v tzv. blokové koncepci přicházejí na staveniště zcela smontované, odzkoušené a nakonzervované a vyžadují časově krátkou montáž menšího rozsahu. Spouštějí se zpravidla bez otevření turbínových těles. Největší parní turbíny nelze z transportních důvodů (rozměry a hmotnosti částí) dopravit na staveniště vcelku, nelze dopravit často ani zalopatkované rotory, svařené výstupní turbínové skříně, kondenzátory a jiné části. Montáž v centrále je pak pokračováním výroby u výrobce, soustrojí je zkušeno až v centrále.(4)

2.2 Provozní charakteristika

Požadavky na provozní vlastnosti tepelných turbín vyplývají z jejich zapojení do energetických soustav, technologických procesů a do vyšších hospodářských a společenských systémů, jejichž funkce závisí na spolehlivé dodávce elektrické, tepelné a mechanické energie získávané v tepelných turbínách (průmyslové aglomerace, hutě, sídliště, dálkové rozvody elektřiny, zemního plynu, ropy, doprava, spoje atd.). (4)

Provozní spolehlivost jako schopnost výrobku plnit během stanovené doby požadované funkce při zachování provozních parametrů daných technickými podmínkami. Vyjadřuje se dílčími vlastnostmi jako na příklad bezporuchovostí, životností, opravitelností, pohotovostí atd. (4)

Provozní bezpečnost a vlivy neokolní prostředí zahrnuje stupeň ohrožení života lidí a okolního zařízení na př. při havárii rotorů, parovodů, požáru olejových a palivových systémů, vlivy vibrací a hlučnosti, exhalací plynových turbín, vhodnosti pro provoz ve výbušném prostředí chemických závodů, v bezpečnostních podmínkách jaderných centrál atd. Obecně platí požadavek zabezpečit při konstrukci optimálně tyto provozní vlastnosti. (4)

Vlastnosti při spouštění, zastavování, regulaci, dlouhodobém nebo přerušovaném provozu, údržbě, opravách, odstavení do klidu, transportu atd.

U elektrárenských turbín pro základní zatížení a zejména u parních turbín k pohonu kompresorů v chemických technologických procesech, za něž není paralelně zapojené náhrady, je požadován nepřetržitý bezporuchový provoz po dobu jednoho roku i déle, doba mezi dvěma revizemi hlavní části (otevření turbíny) 3 až 4 roky. U záložních turbín jsou požadovány velmi rychlé starty a zatěžování (několik desítek vteřin, nebo minut), zpravidla plně automatizované a na dálkový impulz. Automatické zařízení provozu a měření veličin je u většiny soustrojí dnes samozřejmostí. Regulační vlastnosti navazují na požadavky elektrických, parních a jiných sítí. (4)

Provozní životnost parních turbínových zařízení pro základní zatížení, jako celku je požadována 25 až 30 let i více. Životnost vysoce exponovaných částí u parních turbín je sice podstatně kratší, avšak má být co nejdelší. U špičkových

turbín jsou požadovány velmi rychlé a četné starty a zatěžování i za cenu snížení životnosti. (4)

2.3 Ekonomická charakteristika

Tepelné turbíny středních a velkých výkonů vyžadují velmi nákladné a specializované výrobní, zkušební a kontrolní zařízení a specifické zkušenosti techniků a dělníků získané dlouhodobou a rozsáhlou výrobou. Charakter výroby je převážně kusový, náročný na organizaci a řízení předvýrobních a výrobních cyklů. Výrobní cyklus je zpravidla dlouhý (u velkých turbín několikaletý), klade vysoké nároky na včasný přísun polotovarů řídicích částí (výkovky rotorů, odlitky skříní, lopatky) a zajištění mnoha náročných subdodávek (speciální materiály, přístroje, armatury aj.). Zmetkovitost je u řídicích částí velmi nákladná, narušuje průběh výroby. Efektivnost výroby vyžaduje značný objem výroby, její specializaci a účelnou kooperaci. Kompletní výrobky lze při provozních parametrech zkoušet až v provozu v centrálách, což zvláště u prototypů zvyšuje riziko výroby. Náročná je výroba náhradních částí, provádění oprav a rekonstrukcí provozovaných turbín. Extrémní prototypy vyžadují dlouhý (několikaletý) vývojový cyklus, nákladný a rozsáhlý laboratorní a provozní výzkum funkčních částí a celků. Výrobní kapacitě má odpovídat velikost a trvalý růst odbytových teorií. Obtížnost uvedených okolností často opodstatňuje výrobu licenční.

Provozní výpadky turbíny způsobené její nedostatečnou provozní spolehlivostí způsobují vysoké ztráty nevyrobenou energií, umrtvení finančních prostředků vložených do celé centrály a národohospodářské ztráty při výpadku, nebo omezování výroby z nedostatku energie.

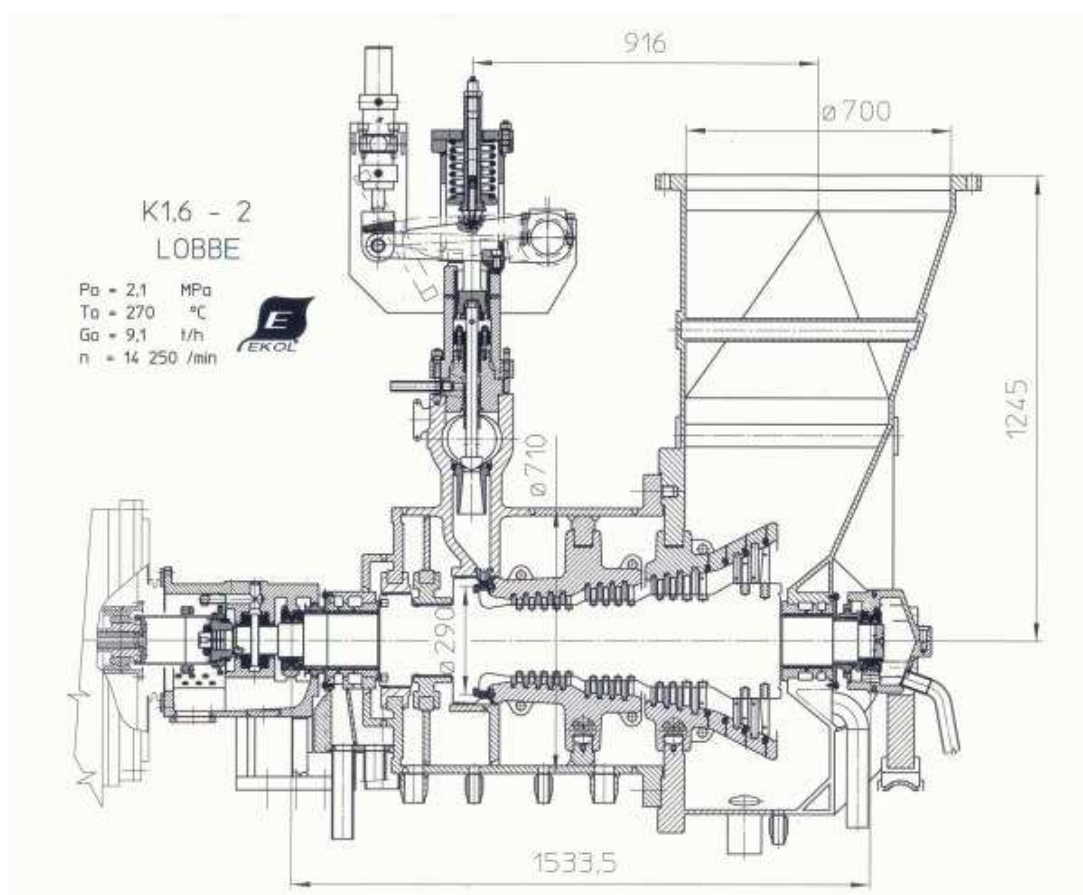
Vysoká účinnost turbíny snižuje cenu vyrobené energie zvláště u soustrojí s vysokým ročním využitím. Významné jsou náklady na odstraňování poruch, údržbu a opravy. (4)

2.4 Druhy parních turbín

2.4.1 Kondenzační turbíny (K)

Jsou to výkonové třídy 50 MW zpravidla jednotělesové, u vyšších výkonů 2 až 5 ti tělesové. Charakterizuje je nízký tlak vstupní páry (vakuum v kondenzátoru) – 3 až 30 kPa, velký celkový zpracovaný tepelný spád, velký počet pracovních stupňů,

velký měrný objem výstupní páry [m^3kg^{-1}]. Turbíny velkých výkonů mají velký celkový vteřinový objem výstupní páry [m^3kg^{-1}], což vyžaduje nekolikanásobný výstup (4 až 8-mi proudové NT části). Průtočná plocha lopatkování se směrem expanze mnohonásobně zvětšuje. Lopatky posledních stupňů mívají mezní rozměry (délky), NT část pracuje v oblasti mokré páry a proto má průtočná část prvky k odhlučování vody. Turbíny klasické do výkonu asi 100 MW výše mívají přehřívání páry v kotli, turbíny pro jaderné elektrárny mívají vnější odhlučování vody a přehřívání páry čerstvou nebo odběrovou parou. Turbíny největších současných výkonů (1.300 MW), zejména pomaluběžné mají velké rozměry. (4)

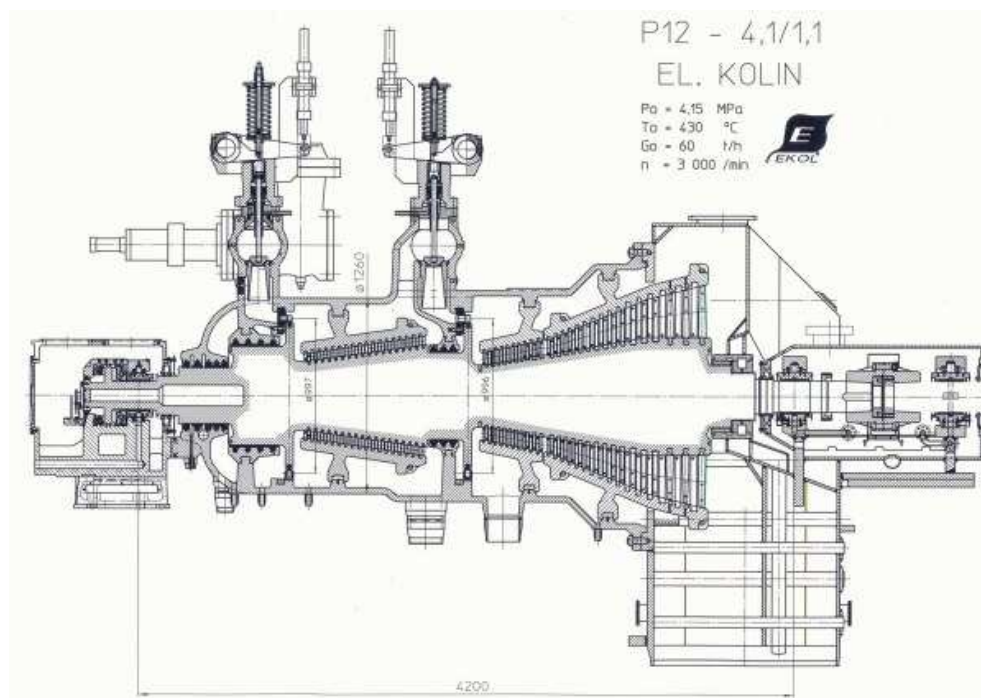


Obr. 2.1 Parní kondenzační turbína 1,6 MW (6)

2.4.2 Kondenzační turbíny s regulovaným odběrem teplotenským (T), nebo průmyslovým (P)

Vyrábějí se pro střední a menší výkonové třídy (od 2,5 MW do 150 až 250 MW). Ustupují stále více turbínám protitlakovým, které mají NT části a kondenzační zařízení (elektřinu lze hospodárněji vyrábět ve velkých čistě kondenzačních turbínách). Do výkonové třídy 25 až 50 MW bývají jednotělesové. NT část nebývá

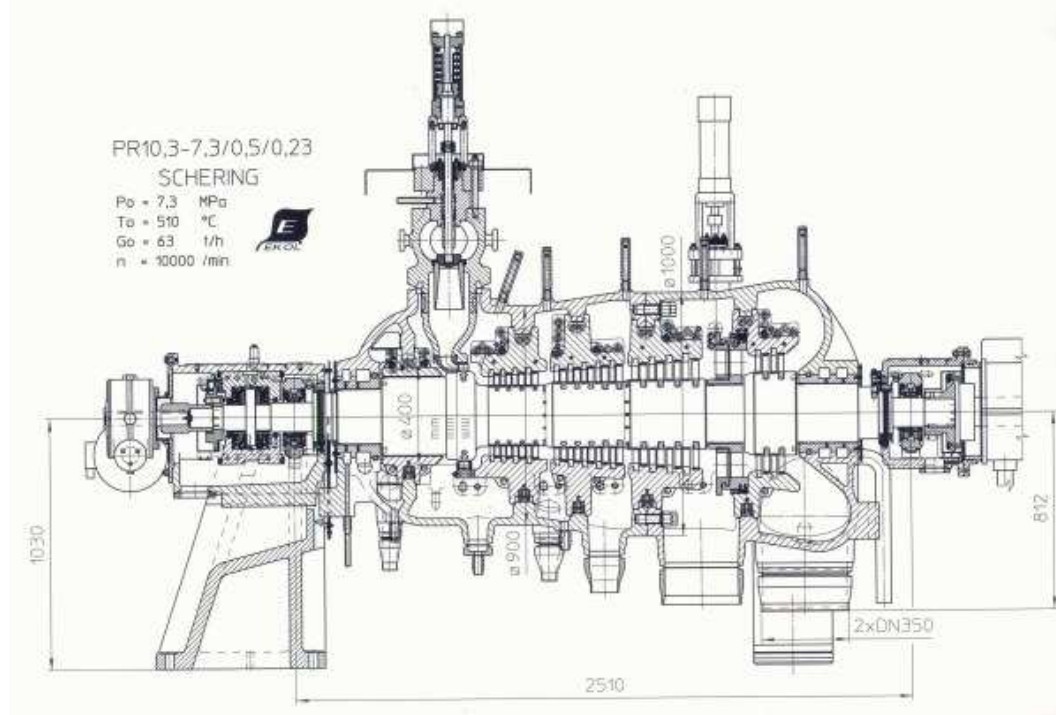
nadimenzována na plný průtok páry odpovídající jmenovitému výkonu při nulovém odběru páry. Nemívají přehřívání páry, u dvoutělesových turbín bývá regulovaný odběr mezi tělesy. Základní jmenovité tlaky páry regulovaných odběrů viz ČSN 08 0010. Používají se rovněž k pohonu turbokompresorů. (4)



Obr. 2.2 Parní kondenzační turbína 12 MW(7)

2.4.3 Protitlakové turbíny (R)

Užívají se od nejmenších výkonů několika kW až do výkonových tříd 100 až 200 MW. Typy pro malé výkony (do 1 MW) zejména pro záložní a sezónní provoz bývají jednostupňové (Curtisova kola), typy pro střední výkony a dlouhé doby ročního využití vícestupňové a jednotělesové. Vstupní (protitlaková) pára se používá pro nejrůznější průmyslové účely a jako pára topná v teplárnách. Podle účelu využití bývá volen jmenovitý protitlak a jeho přestavitelnost – viz ČSN 08 0010. Turbíny do výkonu 12 MW výjimečně do 30 MW bývají často vysokootáčkové, typy k pohonu turboalternátorů mají převodovou skříň s čelními koly nebo planetovou, typy pro mechanické pohony jsou přímo spojovány s poháněným strojem. Parametry vstupní páry bývají tím vyšší, čím větší je hmotnostní průtok páry. Přehřívání páry se používá výjimečně. Konstrukční koncepce protitlakových turbín větších výkonů bývá tatáž jako VT tělesa kondenzačních turbín. (4)



Obr. 2.3 Parní odběrová-protitlaková turbína 10,3 MW(8)

2.4.4 Kondenzační turbíny se dvěma regulovanými odběry páry (PT nebo PP)

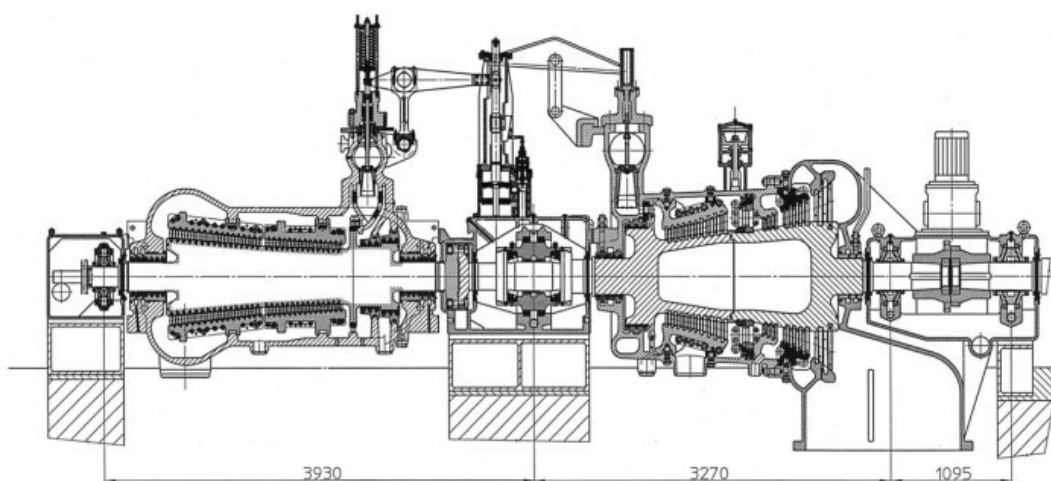
Používají se v průmyslových teplárnách a jsou napojeny na příslušný technologický proces, případně na topný systém závodu a jeho okolí. Užívají se dnes ve středních výkonových třídách 25 až 250 MW a jsou zpravidla dvoutělesové a výjimečně mají přilhívání páry. Konstrukční koncepce vzniká zejména u unifikovaných typových řad spojením protitlakové turbíny (VT část) s kondenzační turbínou s jedním regulovaným odběrem páry (ST a NT část) v jedno dvoutělesové soustrojí. Tím že mají NT části a kondenzační zařízení, není elektrický výkon soustrojí přímo závislý na hmotnosti odběrové páry. Mohou pracovat též čistě bez odběrů jako čistě kondenzační turbíny. Mají složité regulační a zabezpečovací systémy. Obdobně jako turbíny T a P bývají nyní nahrazovány typy TR a PR, které jsou jednodušší, investičně a provozně výhodnější.(4)

2.4.5 Protitlakové turbíny s jedním regulovaným odběrem páry (TR nebo PR)

Jsou zpravidla jednotělesové, vícešupňové, nejčastěji o výkonu 4 až 100 MW. Stavby vstupní a výstupní páry a konstrukční koncepce jsou obdobné turbínám čistě protitlakovým. Široká přizpůsobivost základních typů požadavků projektantů (turbíny „na míru“) se dosahuje konstrukční unifikační funkčních celků, na př. Použitím nosičů rozváděcích lopatek uložených ve skříni turbíny. Při dvoutělesové uspořádání má VT těleso tutéž koncepci jako typ R. Rozsah použití turbín TR a PR v průmyslových a kombinovaných teplárnách se stále rozšiřuje ve všech výkonových třídách. Používají se i pro mechanické pohony. (4)

2.4.6 Speciální parní turbíny

Kromě uvedených základních druhů se používají např. turbíny dvoutlakové na dvojí vstupní páru, nízkotlakové kondenzační turbíny na přebytečnou páru regulovaných odběrů sousedních turbín, nebo na výfukovou páru jiných zařízení. (4)



Obr. 2.4 Parní odběrová-kondenzační turbína 33 MW(9)

3 ROTORY PARNÍCH TURBÍN

Zalopátkované rotory a rotorové soustavy jsou charakteristickou částí tepelných turbín a turbokompresorů. Novodobý vývoj směrem k velkým výkonům a rozměrům soustrojí, k vysokým parametrům pracovních medií, vysokým otáčkám a vysoké provozní spolehlivosti byl umožněn pozoruhodným rozvojem těžké metalurgie a technologie, vývojem kvalitnějších materiálů, metod hodnocení a jejich pevnosti a životnosti, výpočetních a zkušebních metod velkých výkovků. Klasické koncepce rotorů byly aplikovány až téměř k mezním parametrům. (4)



Obr. 3.1 Rotor parní kondenzační turbíny s regulovaným odběrem (10)

3.1 Typické konstrukční koncepce rotorů

Celokované rotory jsou konstrukčně nejjednodušší, odpadají obtíže s dimenzováním, koncentrací napětí, výrobou a relaxací oběžných kol za provozu. Pracovní rovnotlaké stupně mají malé axiální rozteče a hřídel v mezistupňových a vnějších ucpávkách má malé průměry. To umožňuje oproti skládaným rotorům zkrátit axiální délku turbíny, zvýšit její účinnost a provozní pružnost. Větší nároky na kvalitu a velikost výkovku byly metalurgii zvládnuty tak, že celokované rotory v řadě případů nahradily rotory skládané a kombinované i u střednětlakých a nízkotlakých těles. Hmotnost ingotů dosahuje nyní až 400 t,

výkovků až 200 t, vnější průměry bývají až 2000 mm.(4)

Hřídelové (skládané) a kombinované rotory se nadále používají u rovnotlakých turbín středních a nízkých parametrů páry a v pevnostně a rozměrově středně náročných případech, zejména však u nízkotlakých těles K-turbín velkých výkonů a rozměrů, kdy výrobce turbíny nemá technické a ekonomické možnosti použít rotory celokované nebo svařované. U vysokootáčkových parních turbín do výkonové třídy asi 25 MW, kde rotory mají menší průměry, přešli téměř všichni výrobci na rotory celokované.(4)

Svařované diskové a bubnové rotory, jejichž novodobý vývoj doznal u některých výrobců vynikajících výsledků, jsou sice specificky velmi náročné, avšak při zvládnutí konstrukčních, materiálových a technologických problémů dosahují vyšší kvality a technických parametrů než typy celokované a hřídelové a jsou nejvíce perspektivní pro vývoj rotorů největších rozměrů. Menší rotory se svařují ze dvou až tří bubnových částí, velké z nevrtaných disků a koncových částí tvaru kalicha. Jsou lehčí než celokované, kvalitu částí lze před svařením spolehlivě docílit a kontrolovat. Rotory se svařují nyní automaticky vesměs na numericky řízených jednoúčelových stanovištích, ve vertikální poloze, současně na několika místech, pod tavidlem, nebo v ochranné atmosféře, rotor se pootáčí a je indukčně ohříván. Technické podmínky svařování tepelného zpracování a kontroly jsou obdobné tlakovým nádobám jaderných reaktorů.(4)

3.2 Technologické a provozní problémy rotorů

Kvalita výkovků se ověřuje zkouškami mechanických hodnot vzorků odebíraných z přídavek na výkovku v místech spojkových čepů a největšího průměru rotoru, ultrazvukovou zkouškou celého rotoru, prozářením exponovaných míst radioizotopy, elektromagnetickou zkouškou v místech ložiskových čepů, leptací zkouškou čelních ploch výkovku a míst ložiskových čepů. Spojková část má být vykována z nejjakostnější části ingotu. Výkovky z hutí mají přídávky na plochu 3 až 5 mm pro konečné opracování. Dosažení vysokých mechanických hodnot, záruky svařitelnosti, chemického složení a vysoké strukturální čistoty a homogenity materiálu vyžadují přísné dodržování technologických předpisů, zvláště tepelného zpracování (zušlechťování a žíhání na odstranění pnutí) a svařování. U velkých rotorů, pracujících za vysokých teplot, se provádí zkouška tepelné stability, při níž se rotor za stálého

pootáčení ohřívá v elektrické peci na teplotu o něco vyšší než provozní a po vychladnutí se zajišťuje, zda nedošlo k nepřipustnému trvalému průhybu. Závalu lze odstranit opětovným žiháním, nebo nutno rotor vyřadit.(4)

Závažné výrobní operace jsou dynamické vyvažování a odstředování holých, nebo zalopatkovaných rotorů. Svařované rotory se odstředují v bunkrech po svaření před opracováním nahotovo, rotory všech typů velkých rozměrů a rotory vysokootáčkové se odstředují a současně dynamicky vyvažují až v zalopatkovaném stavu ve zvláštních vakuových tunelech. Konečné dovažování celé rotorové soustavy spojené spojkami se provádí až na místě při uvedení soustrojí do provozu.(4)

Jedním z hlavních pracovních problémů rotorů jsou teplotní změny a teplotní rozdíly, které vznikají v rotorech zejména při nestacionárních provozních stavech. Způsobují přídavná napětí, případně i průhyby rotoru, které zneklidní chod soustrojí, nebo dokonce znemožní jeho provoz. Největší teplotní změny probíhají v rotoru při spuštění a odstavení turbíny a při náhlých změnách zatížení v oblasti maximálních průtoků páry, nebo při náhlém odlehčení a to u VT a ST rotorů turbín velkých výkonů s vysokými teplotami vstupní a přehřáté páry.(4)

Pokud se rotor otáčí, vznikají značná, avšak osově symetrická přídavná napětí a při častých změnách může dojít k nízkocyklické únavě rotorů. Ke zmenšení těchto vlivů se používá regulovaného chlazení, nebo ohřívání rotorů za provozu parou, nebo odstavených turbín horkým vzduchem. Trvalé chlazení rotorů parních turbín parou nižší teploty se až na výjimky nepoužívá. Je však obvyklé chlazení vzduchem u rotorů vysokoteplotních spalovacích turbín (chlazení disků a závěsů společně s chlazením lopatek).(4)

Velká, avšak osově nesymetrická tepelná pnutí vznikají při nerovnoměrném místním ohřátí, nebo ochlazení části obvodu rotoru, na příklad za rotace při tření prohnutého hřídele v ucpávkových břítech, kdy může dojít až k takovému ohřátí části obvodu, že se povrchová vlákna hřídele plasticky napěchují, po vychladnutí rotoru zkrátí a tím dojde k trvalému průhybu rotoru na opačnou stranu. Zkřivený rotor možno opravit tepelným narovnáním a opatrným vyžiháním. K přechodnému (elastickému) průhybu rotoru dochází při chladnutí horkého stojícího (neprotáčeného) rotoru

po odstavení turbíny, jehož spodek je chladnější, kdy se rotor prohýbá nahoru, nebo vniknutím chladnější vody do rotorových ucpávek. Rotor dolehne často v ucpávkách na stator a znemožní protáčení a spuštění turbíny. (4)

3.3 Typické konstrukce závěsů rotorových lopatek

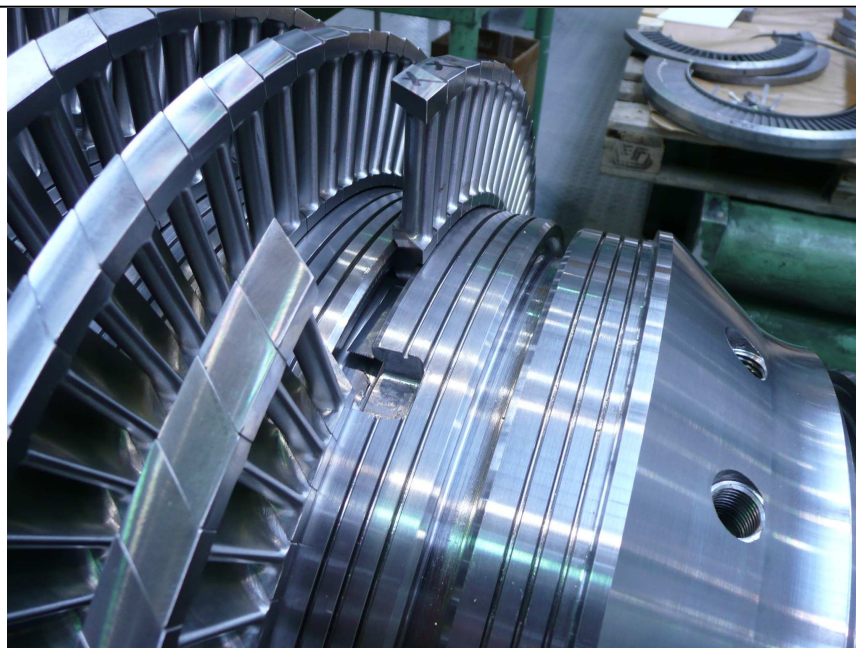
Volba typu závěsu závisí hlavně na velikosti odstředivých sil, které má závěs přenášet, tj. na profilu, délce, roztečném průměru a obvodové rychlosti listu lopatky (turbínovém stupni), na tvaru rotoru v místě závěsu a na technologii používané výrobcem.

Závěsy dělíme na obvodové, u nichž je drážka závěsu na rotoru vyrobena soustružením a je společná pro všechny lopatky příslušné řady a na axiální, u nichž každá lopatka má vlastní drážku rovnoběžnou s osou rotoru. Drážka je vyráběna frézováním, obrážením, protahováním apod.

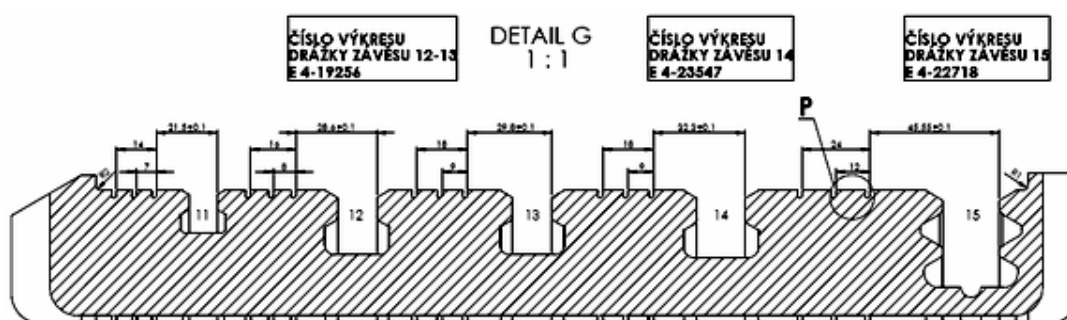
Obvodové závěsy jsou přímé, u nichž je lopatka vsazena přímo do drážky v rotoru a síly z lopatky jsou přenášeny přímo z lopatky do rotoru, a nepřímé, kdy lopatka je vsazena do drážky pomocí mezeríků nebo kolíků, jimiž jsou síly lopatky přenášeny do rotoru. Přímé závěsy nerozebíratelné mají lopatky přivařené k rotoru, nebo vyrobené s rotorem z jednoho kusu. (4)

3.4 Uzávěrky drážek obvodových závěsů a zajištění axiální polohy lopatek v axiálních závěsech

Rotorové lopatky se vsazují při montáži se vsazují do obvodových drážek zpravidla na jednom místě obvodu, kde je drážka rozšířena tak, aby umožňovala vsunutí nožky lopatky do drážky. Po montáži všech lopatek do řady nutno toto rozšíření a zbývající část obvodu závěsu uzavřít buď tzv. závěrnou lopatkou, nebo závěrnou vložkou (mezeríkem), které jsou přilicovány k sousedním lopatkám a uzavřené drážce. Části uzávěru nutno spolehlivě zajistit proti odstředivým silám. (4)



Obr. 3.2 Rotor při montáži lopatek



Obr. 3.3 Detail drážek č.11-15 (11)

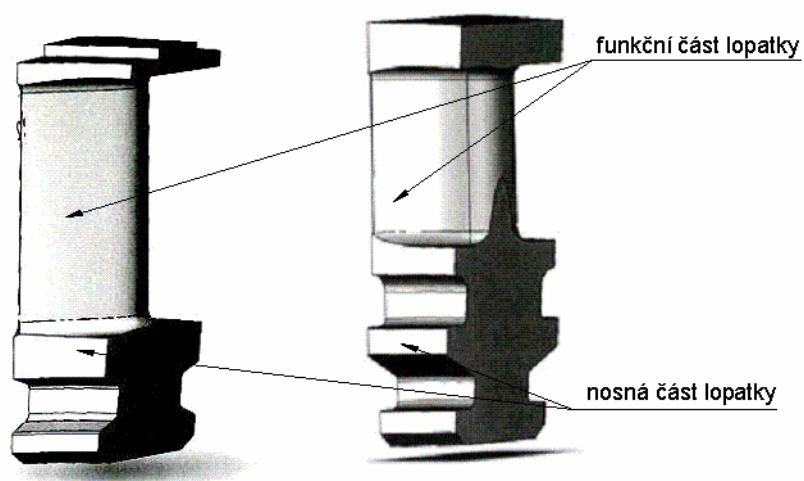
3.5 Rotorové lopatky

Rotorové lopatky patří k všestranně nejnáročnějším částem tepelných turbín. Je požadována jejich vysoká účinnost, provozní spolehlivost a dostatečně dlouhá životnost. Za provozu jsou vystaveny statickým a dynamickým silám a jejich momentům, které vyvolávají složitá napětí, jsou vystaveny nepříznivým účinkům proudícího média (např. vysokým teplotám, erozivním a korozivním účinkům vlhké páry, chemických a mechanických nečistot). Vyžadují vysoce náročnou metalurgii, výrobní a montážní technologii a speciální výchozí materiály. (4)



Obr. 3.4 Rotorová lopatka parní turbíny

Provozní poruchy rotorových lopatek mají zpravidla charakter havárií, jejichž oprava je nákladná a vyžaduje často otevření turbínové skříně a vyjmutí rotoru ze statoru turbíny. Konstrukčními, výrobními a provozními problémy lopatkování se zabývají zkušení specialisté, výroba probíhá ve specializovaných provozech a závodech.(4)



Obr. 3.5 Schéma rotorových lopatek parní turbíny

4 POPIS STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGIE

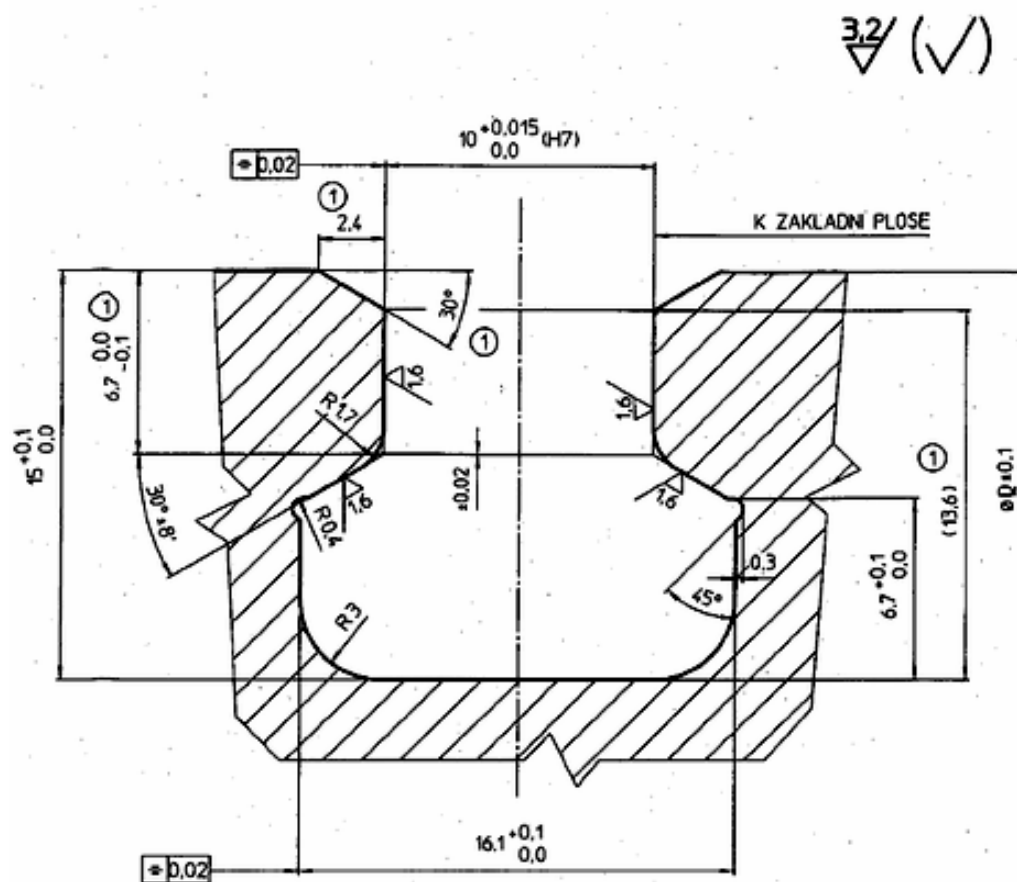
Polotovarem dodávaným do firmy je ohrubovaný výkovek charakteru rotoru (viz. příloha č.1). Rotor se hrubuje na rozměry dané výkresem, včetně středících důlků a s přídavky 5mm na plochu. Výkovek je tepelně zpracovaný na požadované tabulkové hodnoty a po vyhrubování na rozměry dle výkresu žíhán na snížení pnutí. Výkovek je dodáván s přídavkem na zkušební vzorky a celý povrch se kontroluje ultrazvukem a elektromagnetickou zkouškou. Materiál výkovku je 28CrMoNiV49 (1.6985) EN 10204-3.1 (ČSN 16431). Polotovar se obrábí na CNC soustruhu SUA 125/6000, druh řídicího systému je Sinumerik 840 D. Software použitý pro NC program obrábění je EDGE CAM. Kompletní technologický postup výroby rotoru přiložen do příloh (viz příloha č.2). Výrobní výkresy drážek rotoru přiloženy v příloze (viz. příloha č.3-6).



Obr. 4.1 CNC soustruh SUA125/6000

4.1 Postup obrábění drážky

Drážky se stejně jako celý rotor obrábí na CNC soustruhu SUA 125/6000, řídící program tohoto stroje je Sinumerik 840 D. Používanými nástroji jsou nože s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu od firmy Iscar.

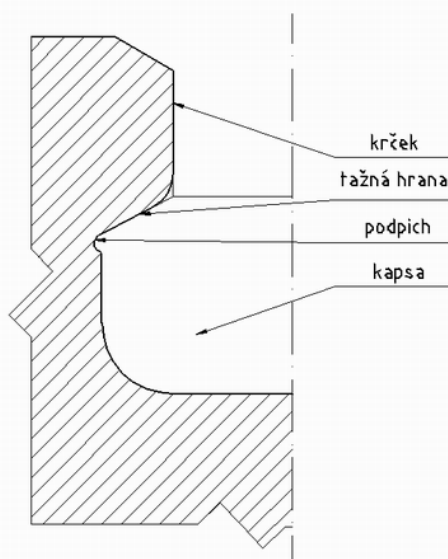


NETOLEROVANE ROZMERY DLE CSN ISO 2768-m

Obr. 4.2 Geometrie soustružené drážky č.v.E 4-22071 (11)

Obrábění drážky sestává z těchto operací:

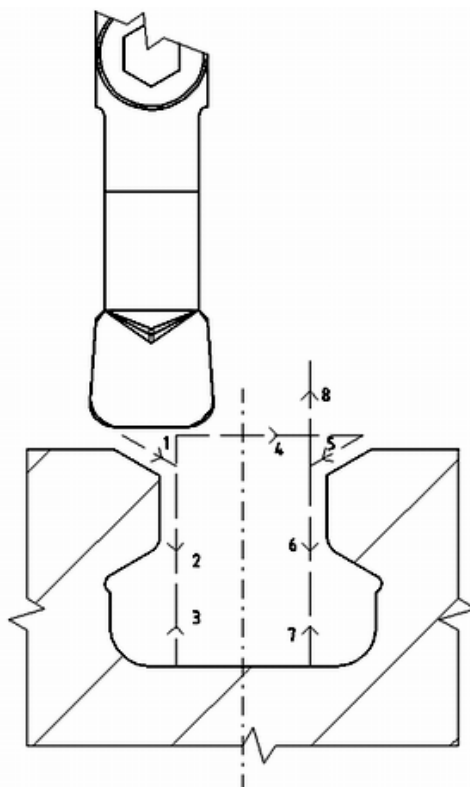
1. Soustružení krčku drážky a prostřední části kapsy drážky.
2. Soustružení tažné hrany drážky a dosoustružení kapsy drážky.
3. Soustružení podpichu.



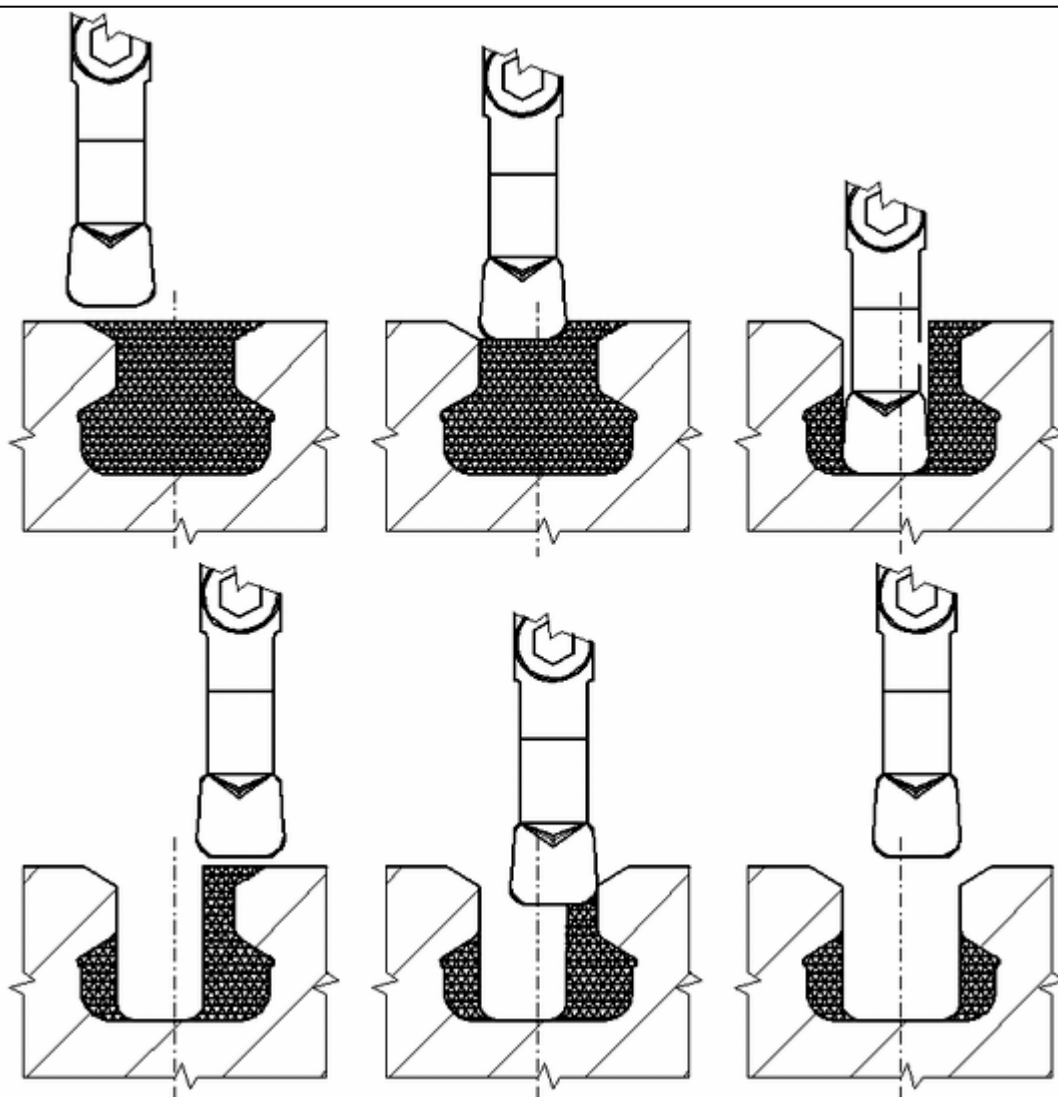
Obr. 4.3 Schéma drážky

1. Soustružení krčku drážky a prostřední části kapsy drážky:

V první operaci se soustruží krček drážky a prostřední část kapsy drážky. Na krček se vztahuje tolerance H7 a také tolerance drsnosti povrchu, proto je nutné tyto tolerance dodržet. V této operaci dochází k největšímu odběru materiálu při obrábění drážky a drážka se soustruží upichovací vyměnitelnou destičkou.



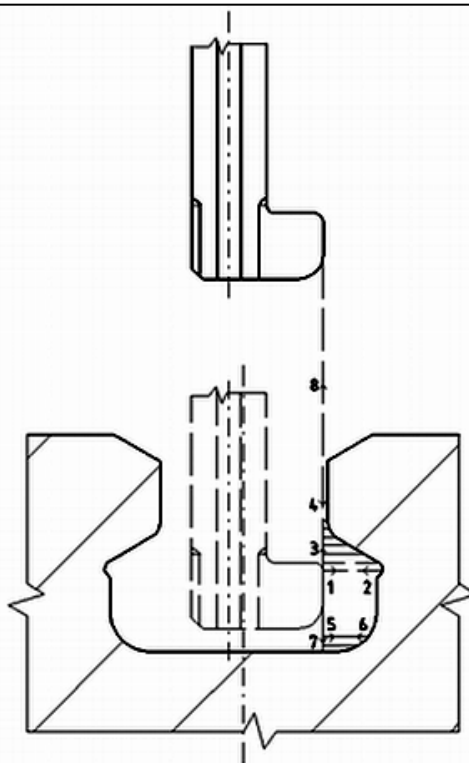
Obr. 4.4 Dráhy nástroje při soustružení krčku a kapsy drážky



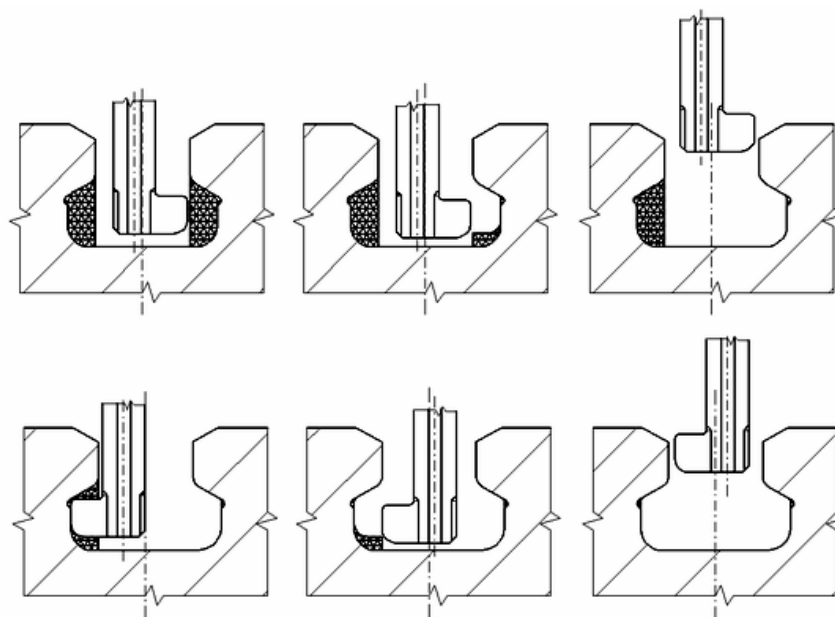
Obr. 4.5 Postup při soustružení krčku a kapsy drážky

2. Soustružení tažné hrany drážky a dosoustružení kapsy drážky:

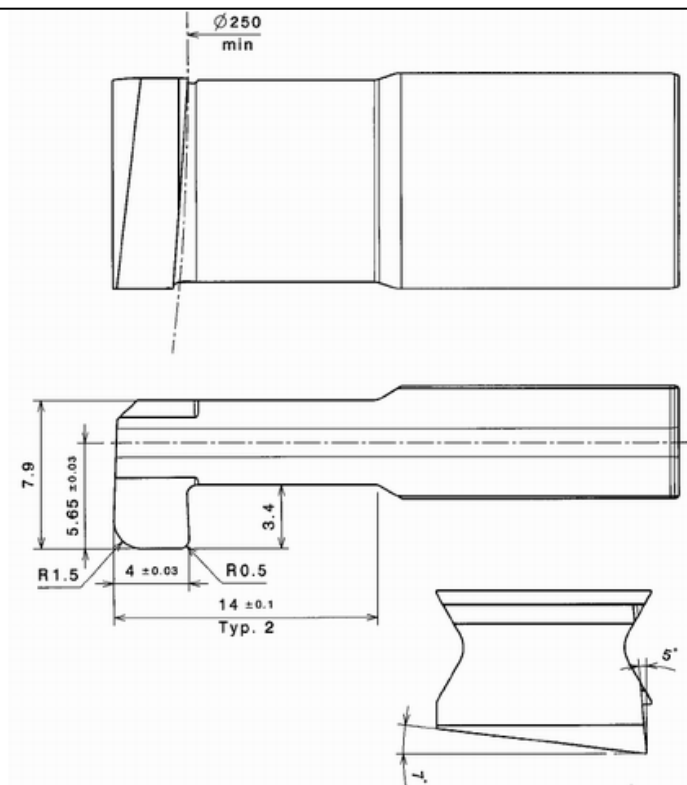
Ve druhé operaci se soustruží tažné hrany drážky a zbylá část kapsy drážky. Soustruží se tvarovou vyměnitelnou destičkou a tato operace je náročná z hlediska dodržení tolerance vzájemné polohy tažných hran drážky. Geometrii vyměnitelné destičky firma Iscar vyrábí na základě požadavků plynoucích z geometrie drážky.



Obr. 4.6 Dráhy nástroje při soustružení tažných hran drážky



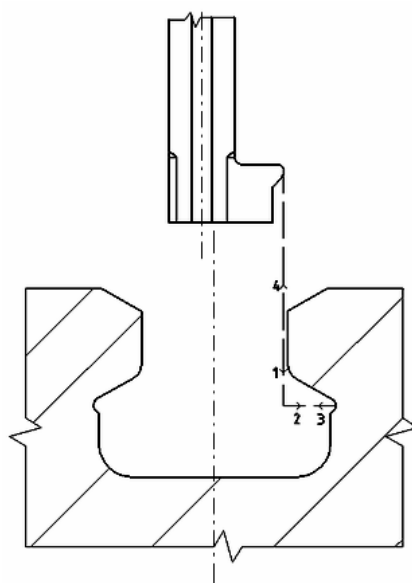
Obr. 4.7 Postup při soustružení tažných hran drážky



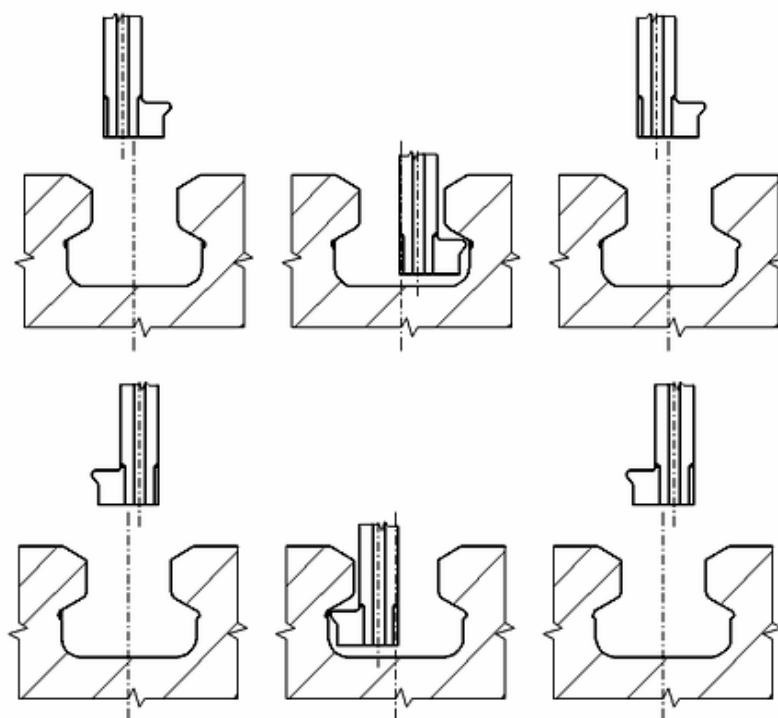
Obr. 4.8. Schéma geometrie destičky soustružení tažné hrany (11)

3. Soustružení podpichu:

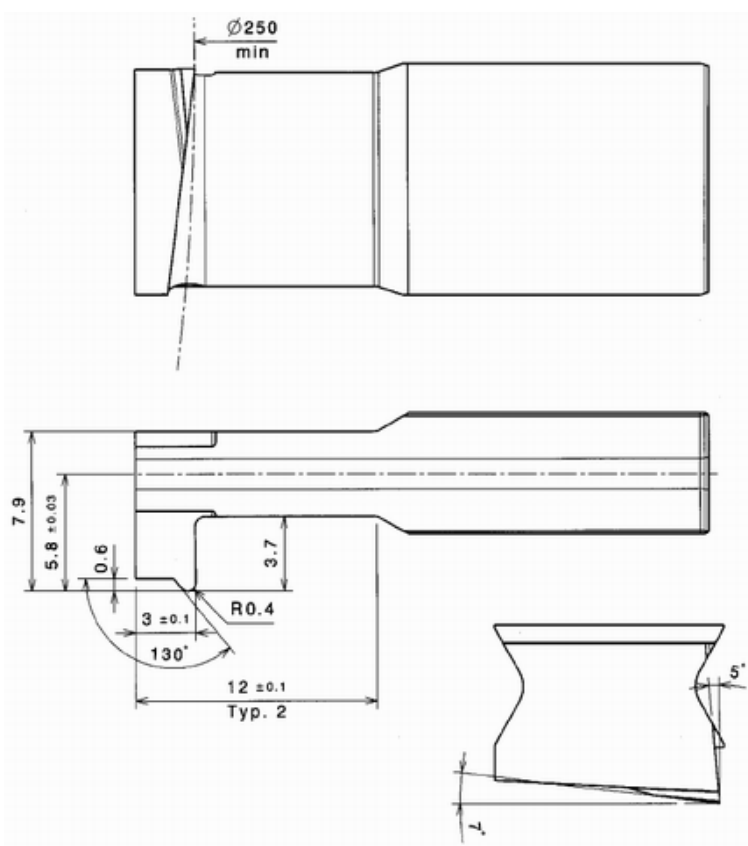
Poslední operací je soustružení podpichu. Tvar břitové destičky je negativem geometrie podpichu. Geometrii vyměnitelné destičky firma Iscar vyrábí na základě požadavků plynoucích z geometrie podpichu a drážky.



Obr. 4.9 Dráha nástroje při soustružení podpichu



Obr. 4.10 Postup při soustružení podpichu



Obr. 4.11 Schéma geometrie destičky pro podpich (11)

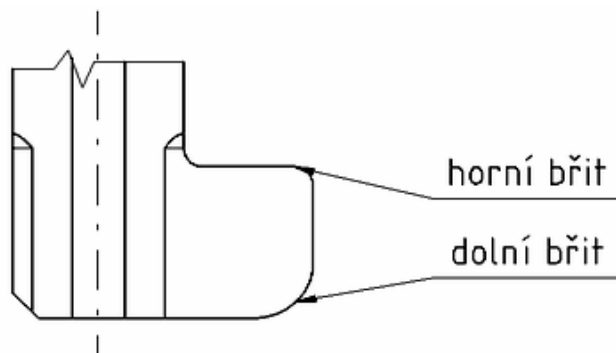
4.2 NC program pro obrobení drážky



Obr. 4.12 Řídící panel CNC soustruhu SUA125/6000

NC program je sestaven pro řídicí systém Sinumerik a byl programátorem vytvořen v programu EDGE CAM. V programu jsou použité symboly „?“ na místech čísel určených pro korekci souřadného systému a pro volbu nástroje, je tomu tak z důvodu zachování výrobního tajemství firmy .

V řádku N230 NC programu se mění řídicí bod na břítu nástroje. Pro soustružení tažné hrany je řídicí bod stanoven na horním břítu nástroje a pro zbylou část programu obrábění drážky je řídicí bod na dolním břítu nástroje (viz. příloha č.7).



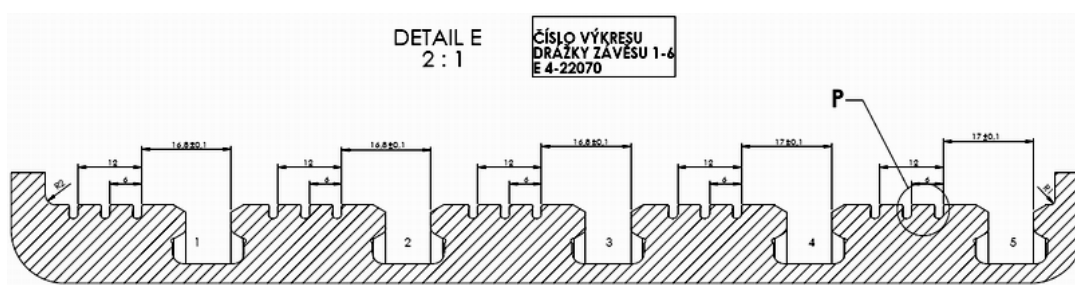
Obr. 4.13 Schéma horní a dolní břít nástroje

5 KRITICKÁ MÍSTA OBRÁBĚNÍ

Rotor parní turbíny je velice složitá strojní součást. Vyznačuje se komplikovanou geometrií, s množstvím tvarových, rozměrových i jakostních tolerancí. K řešení technologie obrábění takto složité součásti je zapotřebí propracovaný technologický postup, velmi přesné stroje, kvalitní nástroje, zkušený tým lidí a především zkušenosti firmy s obráběním v této oblasti. Kritickými místy obrábění jsou potom drážky pro lopatky rotoru parní turbíny. Tyto drážky se vyznačují složitou geometrií, množstvím tolerovaných ploch a i proto je jejich obrábění složité. Tvar drážek se liší podle typu drážky, geometrie těchto drážek je ale natolik specifická, že jejich obrábění vyžaduje i speciální tvarové destičky. Pro každý jednotlivý typ drážky je navržena a na zakázku vyrobena speciální destička. I když se těmito speciály obrábí jen část drážky, jsou nepostradatelnou součástí výroby.

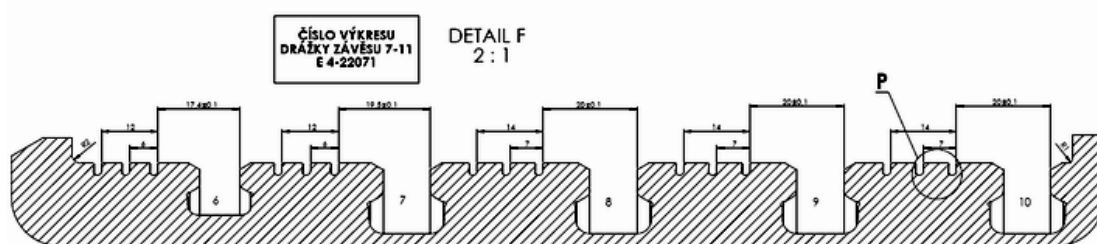
5.1 Charakter drážek rotoru

Na optimalizovaném rotoru jsou tři typy drážek pro lopatky rotoru parní turbíny. Nejpočetnější skupinou drážek jsou jednoduché drážky typu T vnitřní. Těchto drážek je celkem 14, svým tvarem, tolerancemi i jakostí povrchu jednotlivých ploch jsou shodné, liší se však svojí velikostí. Drážky můžeme rozdělit do čtyř skupin podle jejich velikosti. První skupinou jsou drážky č.1-6, které jsou svými rozměry nejmenší.

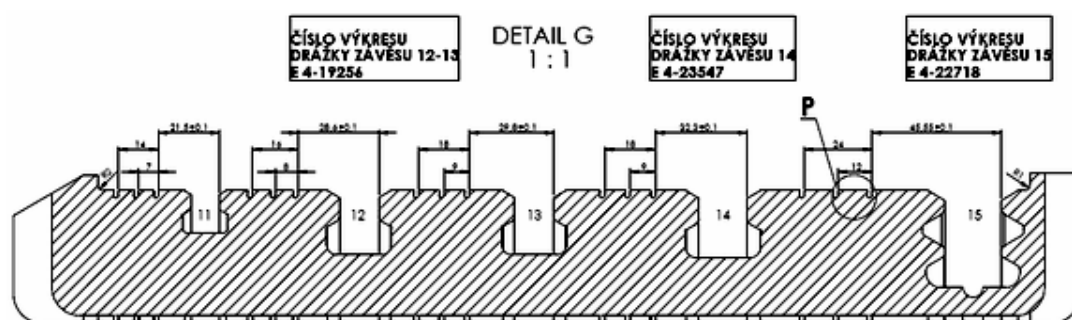


Obr. 5.1 Detail drážek č.1-5 (11)

Druhou skupinou jsou drážky č.7-11, třetí skupinou jsou dvě drážky a to drážka č. 12 a 13. Poslední drážka svými rozměry největší je drážka č. 14. Vzrůstající velikost drážek souvisí se vzrůstající odštědivou silou v nosné lopatkové části rotoru. Čím větší odštědivá síla působí na lopatku, tím větší musí být drážka pro patu lopatky, zejména pak, tažná hrana drážky pro lopatku.

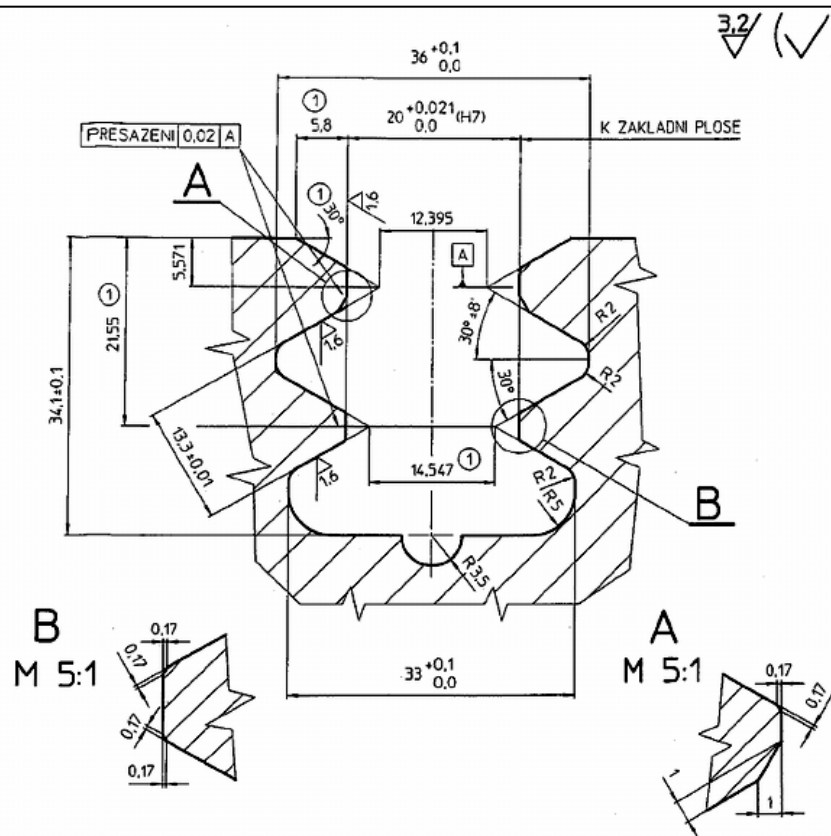


Obr. 5.2 Detail drážek č.6-10 (11)



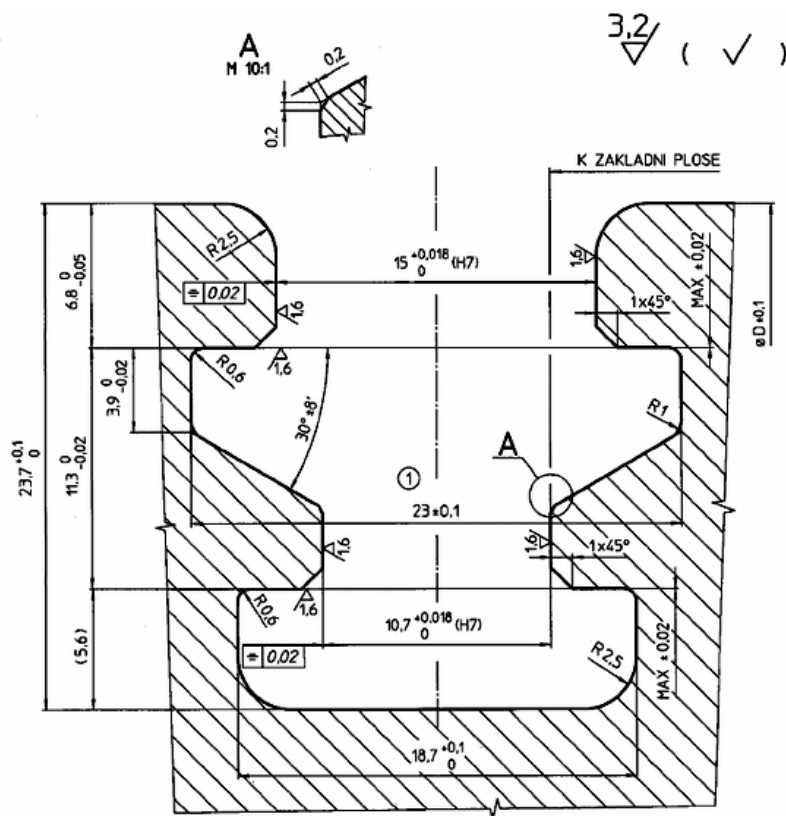
Obr. 5.3 Detail drážek č.11-15 (11)

Dvě zbylé drážky jsou dvojité T-drážky vnitřní pro větší odstředivé síly. První drážka je situována na regulačním stupni rotoru a druhá drážka je poslední drážkou č.15 na nosné lopatkové části rotoru. Ty dvě drážky se nacházejí na největších průměrech rotoru. Rotorové lopatky uloženy v těchto drážkách, mají největší oběžnou rychlost ze všech lopatek na rotoru a z tohoto důvodu na ně působí největší odstředivá síla. Na rozdíl od lopatek pro drážky č.1-14 je tedy geometrie těchto drážek odlišná, právě z výše zmíněných důvodů.



NETOLEROVANE ROZMERY DLE ISO 2768-m

Obr. 5.4 Geometrie drážky pro regulační stupeň (11)



Obr. 5.5 Geometrie drážky č. 15 (11)

5.2 Problémy spojené s obráběním drážek

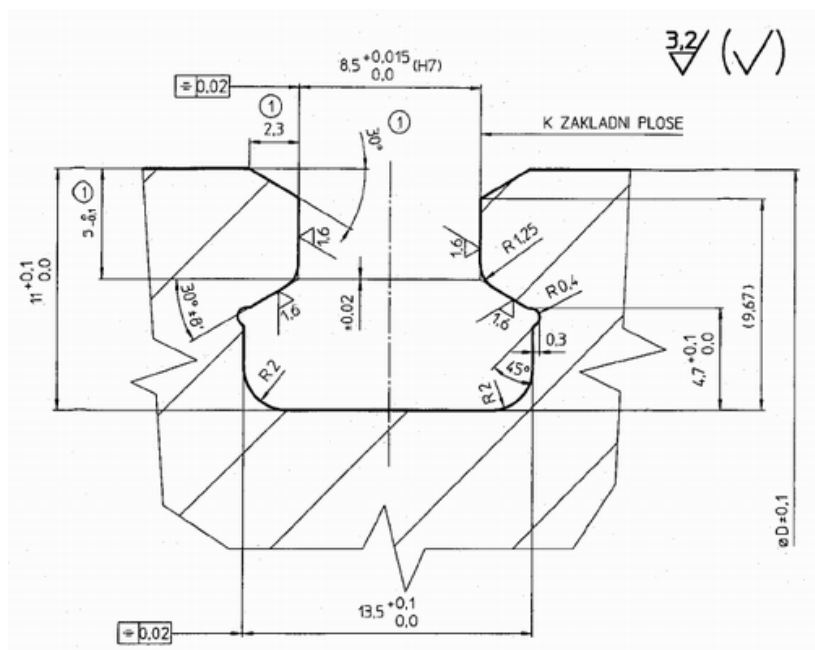
Drážky pro lopatky parních turbín, jsou tvarově velmi složité. Volba geometrie drážky je závislá především na odstředivé síle, kterou má drážka přenášet, také na tvaru rotoru v místě závěsu a na technologii, kterou výrobce používá.

Geometrie drážek je hlavním činitelem ovlivňujícím náročnost obrábění těchto ploch. Je přitom nutno dodržet všechny předepsané tolerance a jakost povrchu drážek. NC programy obrábění drážek jsou tím složitější, čím složitější je geometrie drážky. Během obrábění se zpravidla několikrát mění nástroj a spolu se samotným obráběním drážky je tento proces časově a zároveň i technologicky náročný.

Používané nástroje jsou drahé, protože mimo konvenčních břitových destiček se k obrábění používají také speciální tvarové destičky, bez kterých se obrábění složitějších tvarů drážky neobejde. Tyto nástroje jsou dělány na zakázku, podle druhu drážky kterou bude nástroj obrábět.

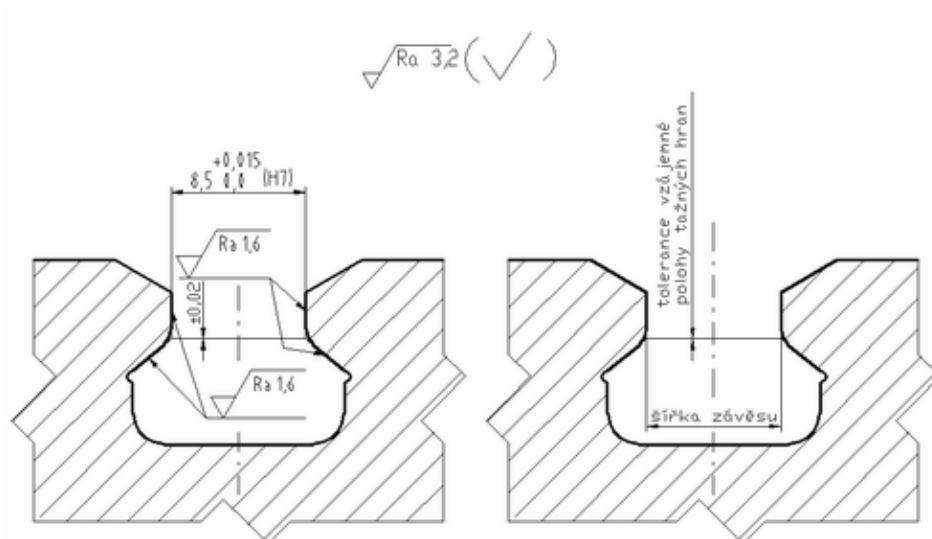
5.3 Tvarové a povrchové tolerance drážek

Drážky pro lopatky parních turbín mají několik tolerovaných ploch. Na výkresech těchto drážek se vyskytují tvarové, rozměrové tolerance a tolerance jakosti povrchu.



Obr. 5.7 Geometrie soustružené drážky č.v.E4-22070 (11)

Nejdůležitějšími plochami a tolerovanými rozměry jsou tolerovaná šířka závěsu a tolerance vzájemné polohy tažných hran. Na krček a tažné hrany se zároveň vztahuje i přísnější tolerance jakosti povrchu.

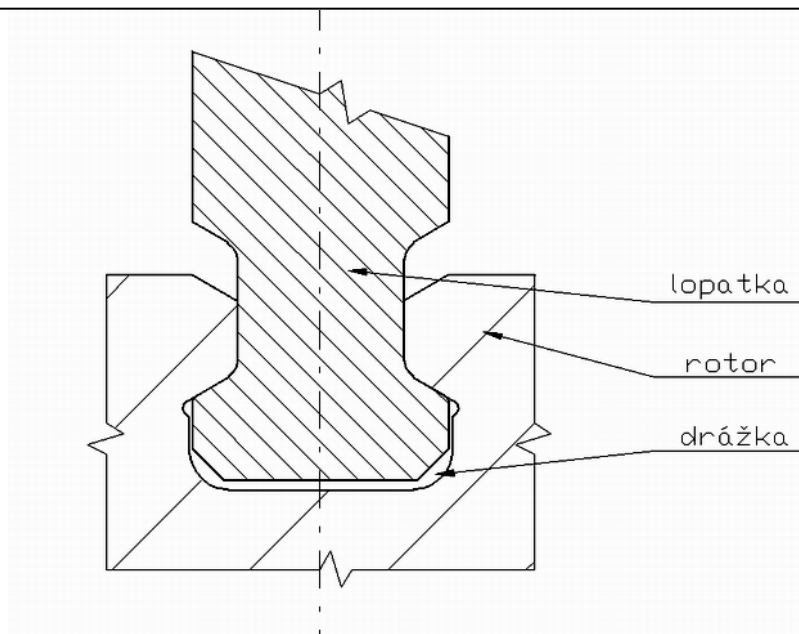


Obr. 5.8 Schéma tolerance vzájemné polohy tažných hran a šířky závěsu

5.4 Podpich

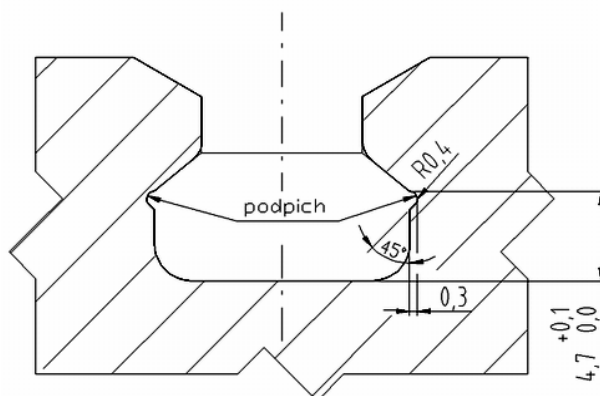
Podpich je technologická plocha, sloužící ke snadné montáži lopatek rotoru turbíny (zalopátkování rotoru) a snadné demontáži lopatek rotoru turbíny. Další funkcí podpichu je snadnější měření rozměrů drážky při jejím obrábění, ke kterému se používají šablony a měřidlo přesazení.

Z pohledu konstruktéra je podpich zcela postradatelný a záleží tedy na domluvě mezi technologem a konstruktérem, zda se při konstrukci drážky bude počítat i s podpichem, či nikoliv.



Obr. 5.9 Schéma lopatky v drážce rotoru před optimalizací

Samotné soustružení podpichu není technologicky náročná operace. K obrábění se ale používají také nástroje charakteru speciálních tvarových destiček vyrobených na zakázku.

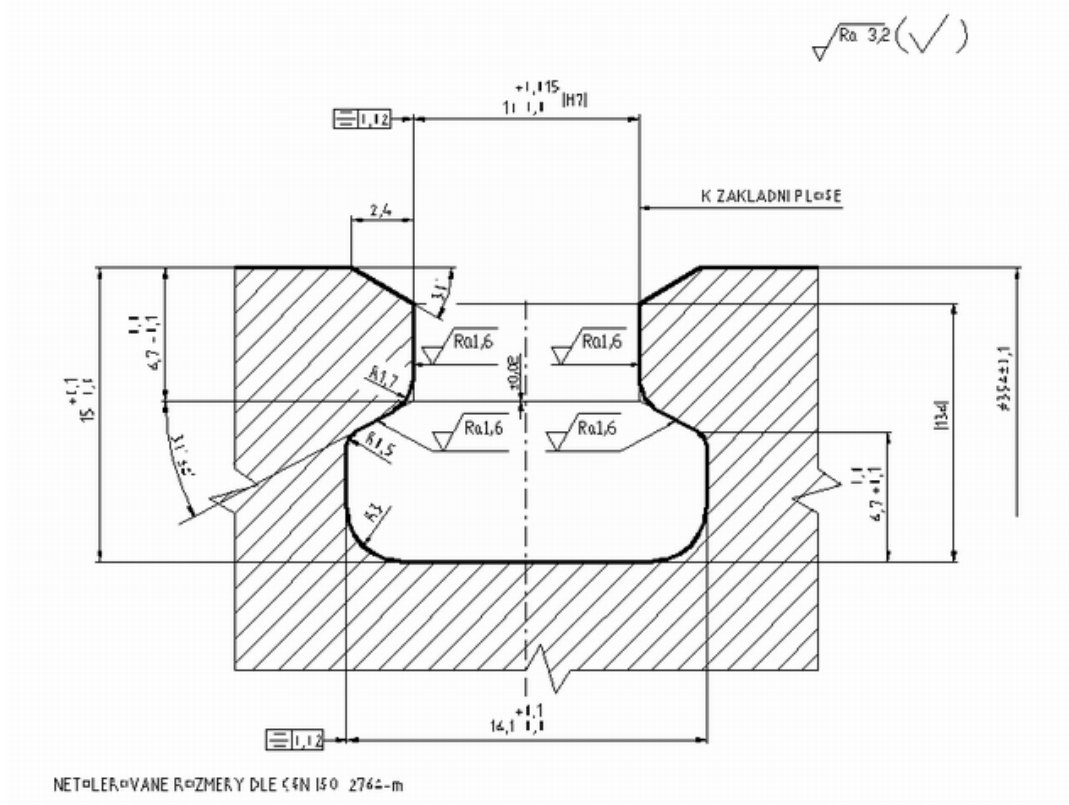


Obr. 5.10 Schéma podpich

6 NÁVRH NOVÉHO ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE

Návrh nové technologie se vztahuje k rotoru (viz. příloha č.8) a požadavkem firmy je optimalizovat tvarově složité plochy na něm. Při návrhu nové technologie byl kladen největší důraz na zjednodušení, zlevnění a časové úspore na stávající technologii se současným zachováním všech požadovaných tolerancí. Při optimalizaci se vychází ze stávající technologie firmy a ze zažitých výrobních postupů ve firmě. Nová technologie by zároveň neměla zasahovat do operací před a po obrábění těchto ploch a měnit příliš geometrii drážek. Výroba drážek po optimalizaci, by měla být možná se stávajícím strojním vybavením firmy a tím by nově navržená technologie mohla plynule přejít do výrobní praxe.

Vhodné k optimalizaci jsou drážky rotoru č. 1-14 (viz. příloha č.3 a 4), jsou to jednoduché T-drážky vnitřní, které se liší svojí velikostí, geometrie těchto drážek je ale shodná.



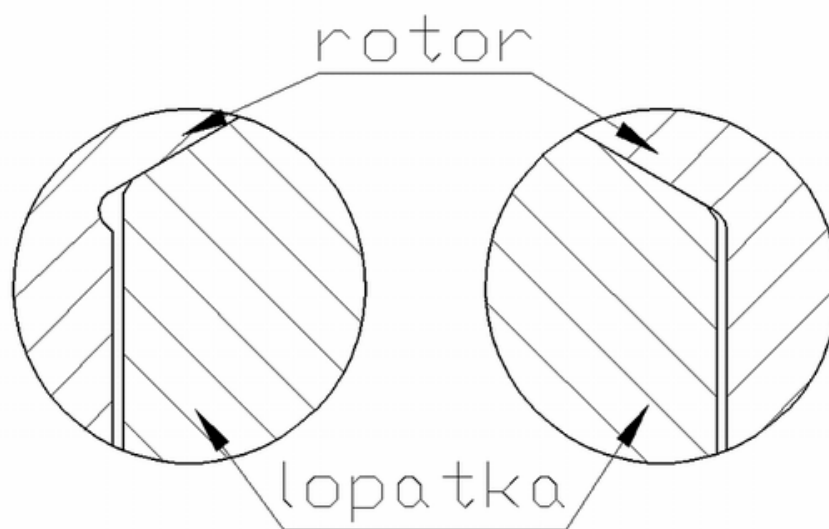
Obr. 5.11 Drážka E 4-22071 po optimalizaci

6.1 Úprava tvaru drážky

K úpravě tvaru drážky je nutno přistupovat opatrně a to po konzultaci s konstruktérem drážek. Je třeba zachovat všechny funkční plochy sloužící k přenosu odstředivé síly lopatky rotoru na rotor turbíny a dodržet všechny tolerance drážky stanovené konstruktérem.

S ohledem na vše výše zmíněné se nejvhodnější k optimalizaci jeví podpich. Tato plocha je technologického charakteru, neovlivňuje tedy parametry drážky zvolené konstrukcí. Při optimalizaci této plochy nedochází k výrazným změnám geometrie drážky, tažných hran, které spolu se šířkou závěsu tvoří nejdůležitější plochy drážky. Všechny tvarové a rozměrové tolerance navržené konstruktérem zůstávají zachované, stejně jako jakost povrchu drážky.

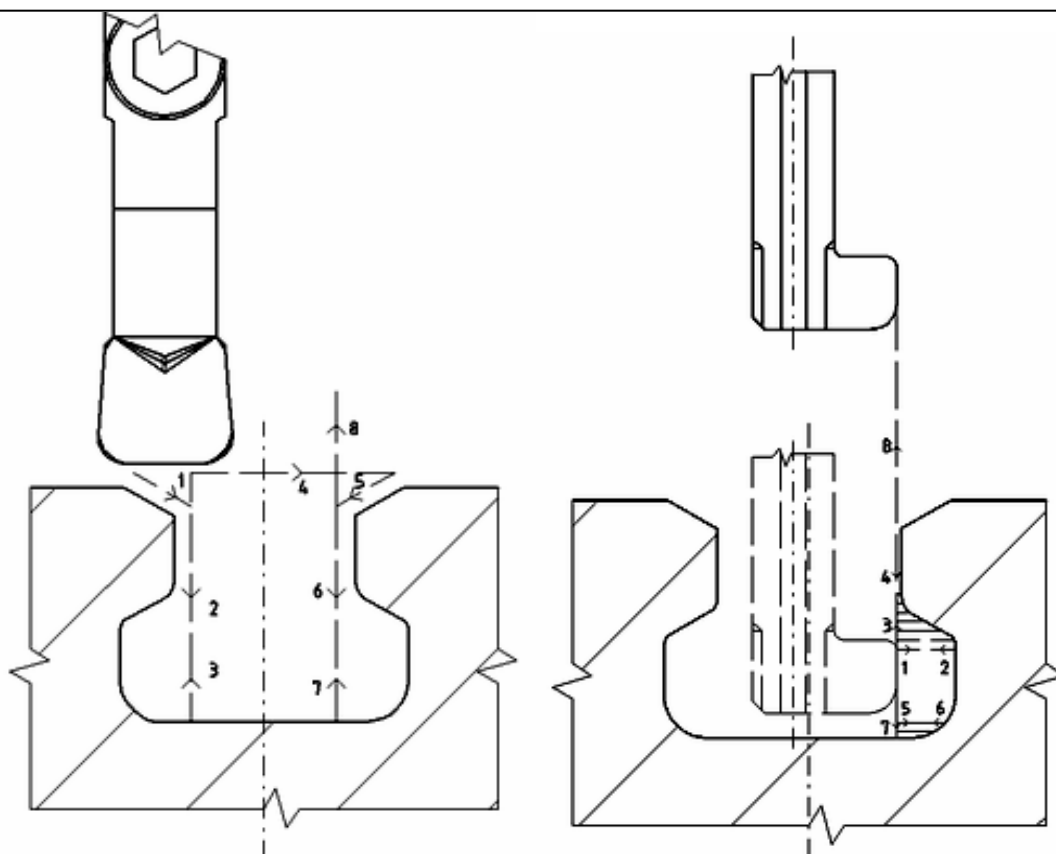
V nově navržené technologii se počítá s odstraněním podpichu a nahrazení této plochy rádiusem. Velikost rádiusu se volí s ohledem na tvar paty lopatky tak, aby po změně geometrie nedošlo k vytvoření k přesahu, který by znemožňoval montáž lopatek, případně jejich demontáž.



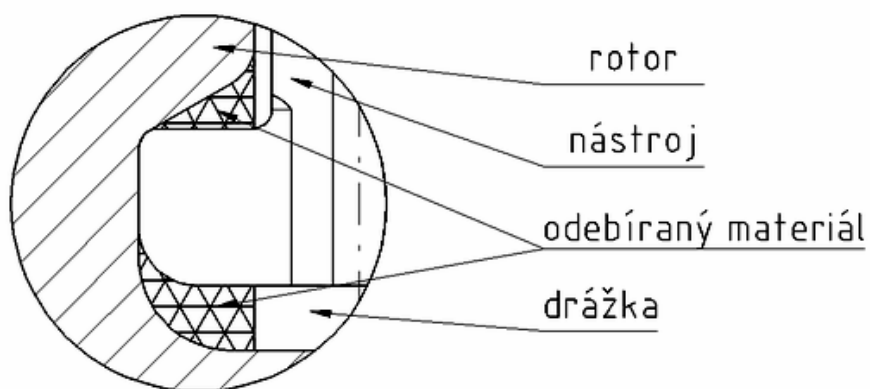
Obr. 6.1 Detail drážky s lopatkou v místě podpichu s podpichem a bez podpichu

6.2 Popis obrábění drážky po optimalizaci

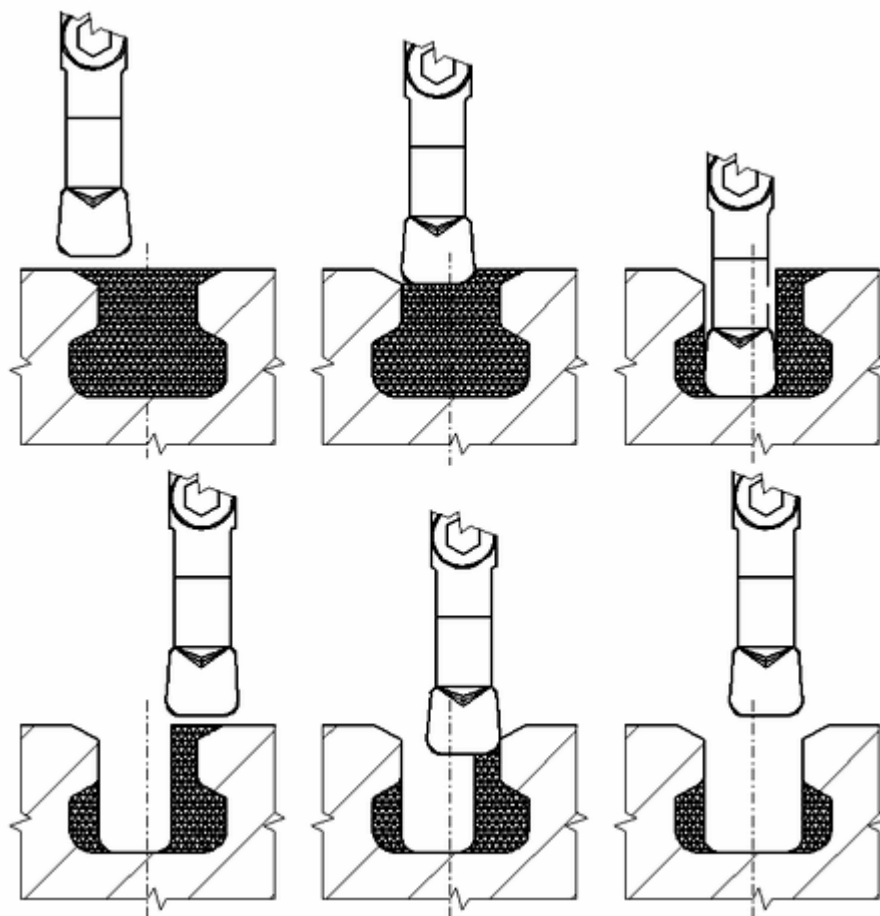
Takto optimalizovaná drážka se bude obrábět z velké části stejným způsobem, jako před optimalizací. Změny technologie obrábění se týkají jen obrábění v místech podpichu, který je nahrazen rádiusem. Nové řešení zcela odstraní celý proces obrábění podpichu a je nahrazen obráběním rádiusu, který funkci podpichu zastupuje.



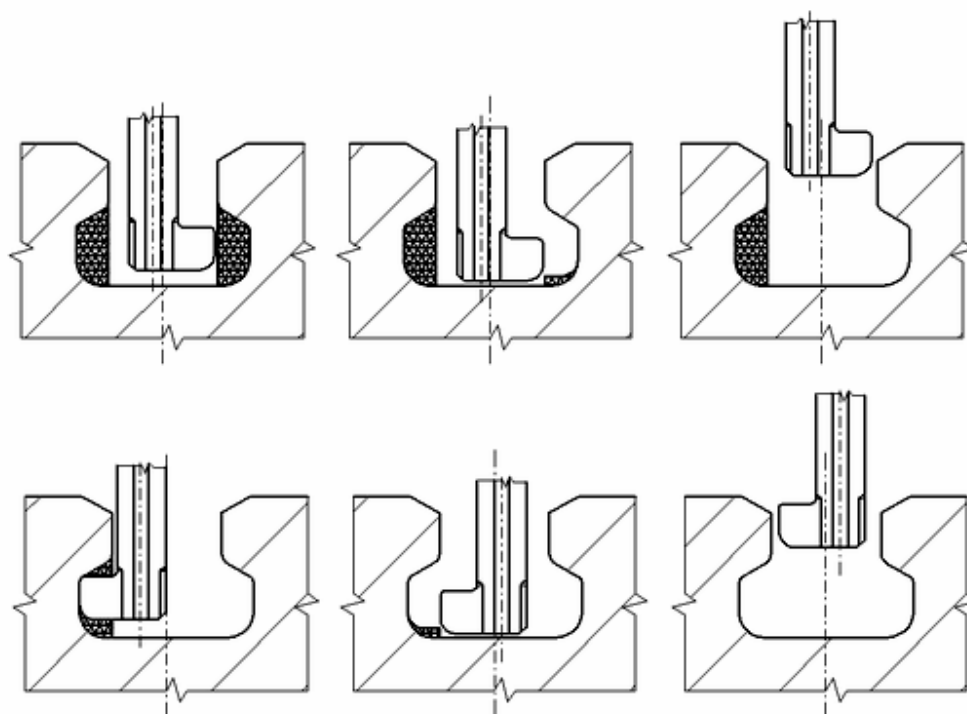
Obr. 6.2 Dráhy nástrojů v první a druhé operaci po optimalizaci



Obr. 6.3 Detail nástroje v záběru při obrábění místa původního podpichu po optimalizaci



Obr. 6.4 Schéma odebírání materiálu v první operaci po optimalizaci

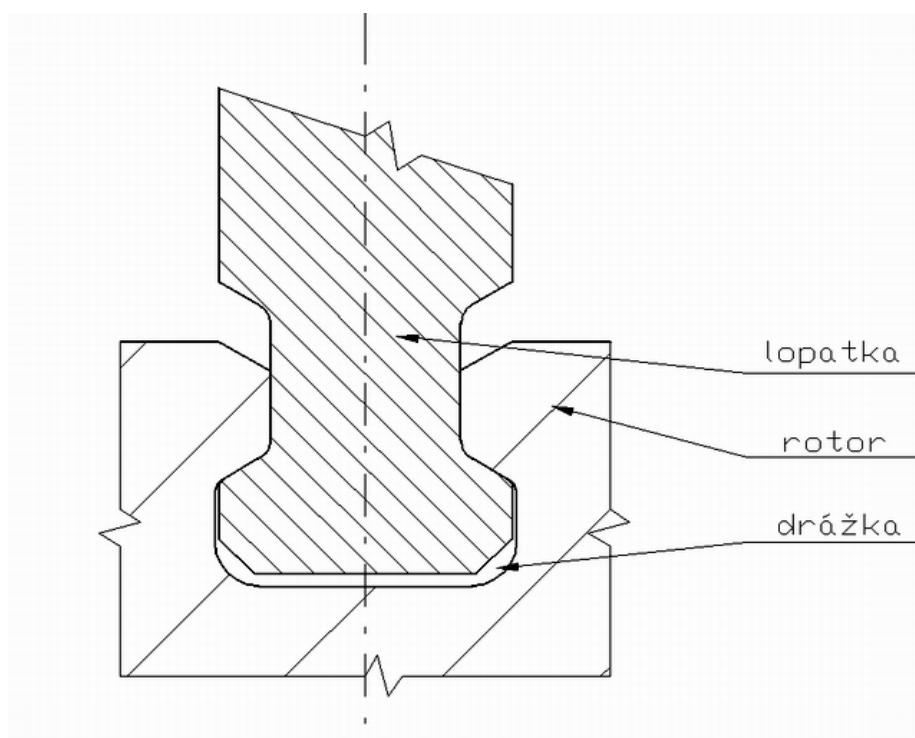


Obr. 6.5 Schéma odebírání materiálu ve druhé operaci po optimalizaci

6.3 Výhody a nevýhody po optimalizaci

Nově navržená technologie značně zjednodušuje celý proces obrábění drážek pro lopatky rotoru parní turbíny. Zjednodušuje technologii výroby drážek č.1-14, zjednodušuje práci obsluhy CNC soustruhu, které odpadá jedna celá operace obrábění na každé ze zmíněných drážek. Snižuje se tak pravděpodobnost chyb spojených s obráběním drážky, zejména pak s chybným zaměřením nástroje na nulový bod. Dochází k časové úspoře spojené s obráběním podpichu a výměnou nástroje. Programátor CNC soustruhu nemusí sestavovat program pro obrábění podpichu těchto drážek a rovněž technologovi se zjednoduší práce při návrhu technologie pro obrábění drážek. Pokud nová technologie nepočítá s obráběním podpichu, není tedy ani třeba nástroj k jeho obrobení.

Nevýhody plynoucí z optimalizace mohou nastat při montáži a zejména pak demontáži lopatek rotoru. Další nevýhodou může být složitější manipulace a měření rozměrů přes šablony a měřidlo přesazení. Firemní zkušenosti s výrobou turbín ale deklamují, že při montáži a provozu takto optimalizovaného tvaru drážky nedochází ke kritickým jevům spojených s montáží či provozem turbíny.



Obr. 6.6 Schéma lopatky v drážce rotoru po optimalizaci

6.4 Výpočet strojních časů obrábění

K obrábění drážek rotoru se používají břitové destičky ze slinutého karbidu, řezná rychlost při obrábění zůstává konstantní a otáčky se mění lineárně v závislosti na obráběném průměru. Koeficient „i“ je počet třísek obrábění. V první a druhé operaci se odebírají tři třísky, z toho první tříska je hrubovací a zbylé dvě jsou pro dokončení na čisto. Koeficient „k“ je ve výpočtech použit ve smyslu obrábění druhé poloviny drážky. Strojní čas bez tohoto koeficientu, by byl pouze strojní čas obrábění jedné poloviny drážky a vzhledem k tomu, že druhá strana drážky je zrcadlově stejná a obrábí se totožným způsobem se stejnými řeznými podmínkami, je nutné tento koeficient zařadit do vzorce.

Vzorec pro výpočet řezné rychlosti

$$v_c = \left(\frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \right) \quad (6.1)$$

Vzorec pro výpočet otáček stroje

$$n = \left(\frac{v_c \cdot 10^3}{\pi \cdot D} \right) \quad (6.2)$$

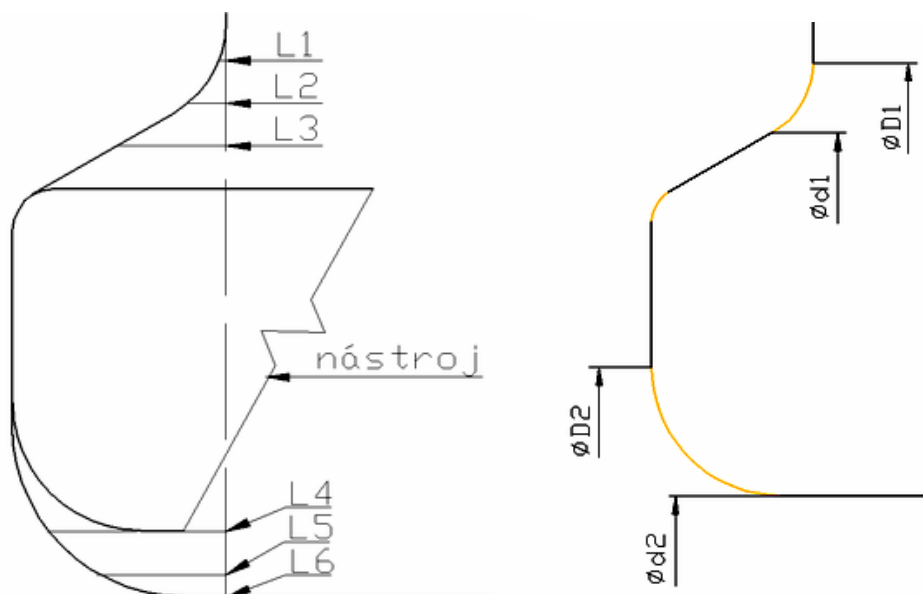
Vzorec pro výpočet strojního času

$$t_{AS} = \left(\frac{L}{n \cdot f} \right) \quad (6.3)$$

Vzorec pro výpočet strojního času soustružení mezi dvěma průměry

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_c} \quad (6.4)$$

Drážka má složitou geometrii a proto délky drah nástrojů jsou odečteny pomocí programu AutoCAD 2002 z důvodu toho, že by jejich výpočet byl složitý.



Obr. 6.7 příklad měření průměrů a délek drah nástrojů z programu AutoCAD

6.4.1 Výpočet strojního času obrábění drážky E 4-22070 na prvním nosném stupni rotoru parní turbíny

Výpočet strojního času 1. operace obrábění drážky E 4-22070 na prvním nosném stupni rotoru, kde $f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$; $i = 3$; $k = 2$; $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; $\varnothing D = 308 \text{ mm}$; $\varnothing d = 297 \text{ mm}$, $i = 3$

$$t_{AS1} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot i \cdot k}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_c} = 2,412 \text{ min}$$

Výpočet strojního času (viz. vzorec č. 6.2 a 6.4) 2. operace obrábění drážky E 4-22070 na prvním nosném stupni rotoru, kde $f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$; $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab.6.1 Tabulka výpočtu t_{AS} pro 1.stupeň rotoru a drážky E 4-22070

Údaje zjišťované			Údaje vypočítané	
i [-]	l_i [mm]	$\varnothing d_i$ [mm]	n_i [ot.min ⁻¹]	t_{ASi} [min]
1	0,09	303,27	136,45	0,013
2	0,44	302,77	136,67	0,064
3	1,27	302,27	136,90	0,186
4	2,5	297,77	138,97	0,360
5	1,5	297,27	139,20	0,215
6	0,5	297,0	139,33	0,072
Celkový strojní čas 2. operace t_{as2}				0,91

Výpočet strojního času (viz. vzorec 6.3) pro dokončovací obrábění drážky E 4-22070 na prvním nosném stupni rotoru na čisto ve 2. operaci, kde $i = 2$; $k = 2$; $n_6 = 139,33$ ot. min⁻¹; $f = 0,1$ mm.ot⁻¹; $v_c = 130$ m.min⁻¹

Tab.6.2 Tabulka výpočtu t_{AS} na čisto pro 1.stupeň rotoru a drážky E 4-22070

Údaje zjišťované				Údaje vypočítané
i [-]	l_i [mm]	$\varnothing D_i$ [mm]	$\varnothing d_i$ [mm]	t_{ASi} [min]
1	1,309	303,72	302,64	0,158
2	1,874	302,64	301,70	0,137
3	0,524	301,70	301,27	0,063
4	2,268	301,27	299,00	0,329
5	3,142	299,00	297,00	0,288
6	0,5	297,00	297,00	0,144
Celkový strojní čas t_{as3} 2. operace na čisto				1,119

Výpočet strojního času 3. operace obrábění drážky E 4-22070 na prvním nosném stupni rotoru, kde $L = 0,3$ mm, $f = 0,1$ mm.ot⁻¹; $n = 137,13$ ot.min⁻¹

$$t_{ASp4} = \left(\frac{L \cdot k}{n \cdot f} \right) = 0,044 \text{ min}$$

Výpočet celkového strojního času obrábění všech drážek na prvním nosném stupni rotoru kde $m = 5$ [-]

$$t_{ASc1} = (t_{AS1} + t_{AS2} + t_{AS3} + t_{ASp4}) \cdot m = (2,412 + 0,91 + 1,119 + 0,044) \cdot 5 = 22,43 \text{ min}$$

Koeficient „m“ představuje počet drážek na jednotlivých stupních rotoru.

6.4.2 Výpočet strojního času obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru parní turbíny

Výpočet strojního času 1. operace obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru, kde $\varnothing D = 358 \text{ mm}$; $\varnothing d = 347 \text{ mm}$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $i = 3$; $k = 2$; $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$

$$t_{AS1} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot i \cdot k}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_c} = 2,811 \text{ min}$$

Výpočet strojního času (viz. vzorec č. 6.2 a 6.4) 2. operace obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru, kde $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$

Tab.6.3 Tabulka výpočtu t_{AS} pro 2.stupeň rotoru a drážku E 4-22070

Údaje zjišťované			Údaje vypočítané	
i [-]	l_i [mm]	$\varnothing d_i$ [mm]	n_i [ot.min ⁻¹]	t_{ASi} [min]
1	0,09	353,27	117,14	0,015
2	0,44	352,77	117,30	0,075
3	1,27	352,27	117,47	0,216
4	2,5	347,77	118,99	0,420
5	1,5	347,27	119,16	0,252
6	0,5	347,00	119,25	0,084
Celkový strojní čas 2. operace t_{as2}				1,197

Výpočet strojního času (viz. vzorec 6.3) pro dokončovací obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru na čisto ve 2. operaci, kde $i = 2$; $k = 2$; $n_6 = 119,25 \text{ ot. min}^{-1}$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$

Tab.6.4 Tabulka výpočtu t_{AS} na čisto pro 2.stupeň rotoru a drážku E 4-22070

Údaje zjišťované				Údaje vypočítané
i [-]	l_i [mm]	$\varnothing D_i$ [mm]	$\varnothing d_i$ [mm]	t_{ASi} [min]
1	1,309	353,72	352,64	0,184
2	1,874	352,64	351,70	0,160
3	0,524	351,70	351,27	0,073
4	2,268	351,27	349,00	0,384
5	3,142	349,00	347,00	0,336
6	0,5	347,00	347,00	0,168
Celkový strojní čas t_{as3} 2. operace na čisto				1,305

Výpočet strojního času 3. operace obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru, kde $L = 0,3 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $n = 117,63 \text{ ot.min}^{-1}$

$$t_{ASp4} = \left(\frac{L \cdot k}{n \cdot f} \right) = 0,051 \text{ min}$$

Výpočet celkového strojního času obrábění drážky E 4-22070 na druhém nosném stupni rotoru

$$t_{ASc2} = (t_{AS1} + t_{AS2} + t_{AS3} + t_{ASp4}) = (2,811 + 1,197 + 1,305 + 0,051) = 5,364 \text{ min}$$

6.4.3 Výpočet strojního času obrábění drážek E 4-22071 na druhém nosném stupni rotoru parní turbíny

Výpočet strojního času 1. operace obrábění drážky E 4-22071 na druhém nosném stupni rotoru, kde $\varnothing D = 358 \text{ mm}$; $\varnothing d = 343 \text{ mm}$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $i = 3$; $k = 2$; $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$

$$t_{AS1} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot i \cdot k}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_c} = 3,812 \text{ min}$$

Výpočet strojního času (viz. vzorec č. 6.2 a 6.4) 2. operace obrábění drážky E 4-22071 na druhém nosném stupni rotoru , kde $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$

Tab.6.5 Tabulka výpočtu t_{AS} pro 2.stupeň rotoru drážky E 4-22071

Údaje zjišťované			Údaje vypočítané	
i [-]	l_i [mm]	$\varnothing d_i$ [mm]	n_i [ot.min ⁻¹]	t_{ASi} [min]
1	0,08	351,93	117,58	0,014
2	0,33	351,43	117,75	0,056
3	0,90	350,93	117,92	0,153
4	1,77	350,43	118,09	0,300
5	3,00	345,93	119,62	0,502
6	2,95	345,43	119,79	0,492
7	2,80	344,93	119,97	0,467
8	2,56	344,43	120,14	0,426
9	2,12	343,93	120,32	0,352
10	1,55	343,43	120,49	0,257
11	0,70	343,00	120,64	0,116
Celkový strojní čas 2. operace t_{as2}				3,135

Výpočet strojního času (viz. vzorec 6.3) pro dokončovací obrábění drážky E 4-22071 na druhém nosném stupni rotoru na čisto ve 2. operaci, kde $i = 2$; $k = 2$; $n_6 = 119,25 \text{ ot. min}^{-1}$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$

Tab.6.6 Tabulka výpočtu t_{AS} na čisto pro 2.stupeň rotoru drážky E 4-22071

Údaje zjišťované				Údaje vypočítané
i [-]	l_i [mm]	$\varnothing D_i$ [mm]	$\varnothing d_i$ [mm]	t_{ASi} [min]
1	1,781	352,43	350,96	0,250
2	2,225	350,96	349,88	0,183
3	0,491	349,88	349,43	0,076
4	3,432	349,43	346,00	0,576
5	4,712	346,00	343,00	0,499
Celkový strojní čas t_{as3} 2. operace na čisto				1,584

Výpočet strojního času 3. operace obrábění drážky E 4-22071 na druhém nosném stupni rotoru, kde $L = 0,3 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $n = 118,25 \text{ ot.min}^{-1}$

$$t_{ASp4} = \left(\frac{L \cdot k}{n \cdot f} \right) = \left(\frac{0,3 \cdot 2}{118,25 \cdot 0,1} \right) = 0,051 \text{ min}$$

Výpočet celkového strojního času obrábění všech drážek na druhém nosném stupni rotoru kde $m = 4 [-]$

$$t_{ASc3} = (t_{AS1} + t_{AS2} + t_{AS3} + t_{ASp4}) \cdot m = (3,812 + 3,135 + 1,584 + 0,051) \cdot 4 = 34,328 \text{ min}$$

6.4.4 Výpočet strojního času obrábění drážky E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru parní turbíny

Výpočet strojního času 1. operace obrábění drážky E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru, kde $D = 398 \text{ mm}$; $d = 383 \text{ mm}$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $i = 3$; $k = 2$; $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$

$$t_{AS1} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot i \cdot k}{4 \cdot 10^3 \cdot f \cdot v_c} = 4,247 \text{ min}$$

Výpočet strojního času (viz. vzorec č. 6.2 a 6.4) 2. operace obrábění drážky E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru, kde $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$; $k = 2$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$

Tab.6.7 Tabulka výpočtu t_{AS} pro 3.stupeň rotoru drážky E 4-22071

Údaje zjišťované			Údaje vypočítané	
$i [-]$	$l_i [\text{mm}]$	$\varnothing d_i [\text{mm}]$	$n_i [\text{ot.min}^{-1}]$	$t_{ASi} [\text{min}]$
1	0,08	391,93	105,58	0,015
2	0,33	391,43	105,71	0,062
3	0,90	390,93	105,85	0,170
4	1,77	390,43	105,99	0,334
5	3,00	385,93	107,22	0,560
6	2,95	385,43	107,36	0,550
7	2,80	384,93	107,51	0,521
8	2,56	384,43	107,64	0,476
9	2,12	383,93	107,78	0,393
10	1,55	383,43	107,92	0,287
11	0,70	383,00	108,04	0,130
Celkový strojní čas 2. operace t_{as2}				3,498

Výpočet strojního času (viz. vzorec 6.3) pro dokončovací obrábění drážky E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru na čisto ve 2. operaci, kde $i = 2$; $k = 2$; $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $v_c = 130 \text{ m.min}^{-1}$

Tab.6.8 Tabulka výpočtu t_{AS} na čisto pro 3.stupeň rotoru drážky E 4-22071

Údaje zjišťované				Údaje vypočítané [min]
$i [-]$	$l_i [\text{mm}]$	$\varnothing D_i [\text{mm}]$	$\varnothing d_i [\text{mm}]$	$t_{ASi} [\text{min}]$
1	1,781	392,43	390,96	0,278
2	2,225	390,96	389,88	0,204
3	0,491	389,88	389,43	0,085
4	3,432	389,43	386,00	0,643
5	4,712	386,00	383,00	0,558
Celkový strojní čas t_{as3} 2. operace na čisto				1,768

Výpočet strojního času 3. operace obrábění E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru, kde $L = 0,3 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm.ot}^{-1}$; $n = 106,12 \text{ ot.min}^{-1}$

$$t_{ASp4} = \left(\frac{L \cdot k}{n \cdot f} \right) = \left(\frac{0,3 \cdot 2}{106,12 \cdot 0,1} \right) = 0,057 \text{ min}$$

Výpočet celkového strojního času obrábění drážky E 4-22071 na třetím nosném stupni rotoru

$$t_{ASc4} = (t_{AS1} + t_{AS2} + t_{AS3} + t_{ASp4}) = (4,247 + 3,498 + 1,768 + 0,057) = 9,57 \text{ min}$$

6.4.5 Výpočet strojního času obrábění drážek E 4-19256 a drážky E 4-23547 na třetím nosném stupni rotoru parní turbíny

Jelikož k výpočtu strojních časů drážek E 4-19256 a E 4-23547 nebyly poskytnuty firmou detailní výkresy, tak dle výkresu opracování (viz příloha č.), byly k výpočtu strojních časů těchto dvou typů drážek zvoleny koeficienty „ a_1 “ a „ a_2 “, které zohledňují strojní časy výše zmíněných drážek vzhledem k jejich velikosti. Ke srovnání poměru velikostí slouží drážka E 4-22071 a strojní čas této drážky na třetím stupni nosné části rotoru. Koeficient „ k_1 “ potom značí počet drážek stejné velikosti na třetím nosném stupni rotoru.

Výpočet strojního času 3. operace obrábění E 4-19256 na třetím nosném stupni rotoru, kde $t_{AS} = 0,057 \text{ min}$; $m = 2$

$$t_{ASp5} = t_{AS} \cdot k_1 = 0,057 \cdot 2 = 0,114 \text{ min}$$

Výpočet celkového strojního času obrábění drážek E 4-19256 na třetím nosném stupni rotoru, kde $t_{AS} = 17,631 \text{ min}$; $a_1 = 2$; $k_1 = 2$

$$t_{ASc5} = t_{AS} \cdot k_1 \cdot a_1 = 9,57 \cdot 2 \cdot 2 = 38,28 \text{ min}$$

Strojní čas 3. operace drážky E 4-23574 na třetím stupni rotoru je totožný se strojním časem 3. operace drážky E 4-22071 na témže stupni rotoru a má hodnotu $t_{ASp6} = 0,057 \text{ min}$

Výpočet celkového strojního času obrábění drážky E 4-23547 na třetím nosném stupni rotoru, kde $t_{AS} = 17,631 \text{ min}$; $a_2 = 2,33$

$$t_{ASc6} = t_{AS} \cdot a_2 = 9,57 \cdot 2,33 = 22,30 \text{ min}$$

6.4.6 Výpočet celkového strojního času obrábění všech drážek rotoru a celkový strojní čas obrábění 3. operace všech drážek rotoru

Výpočet celkového strojního času obrábění všech drážek rotoru, kde $t_{ASc1} = 46,28 \text{ min}$; $t_{ASc2} = 6,586 \text{ min}$; $t_{ASc3} = 63,292 \text{ min}$; $t_{ASc4} = 17,631 \text{ min}$; $t_{ASc5} = 70,524 \text{ min}$; $t_{ASc6} = 41,08 \text{ min}$

$$\begin{aligned} t_{ASC} &= t_{ASc1} + t_{ASc2} + t_{ASc3} + t_{ASc4} + t_{ASc5} + t_{ASc6} = \\ &= 22,43 + 5,364 + 34,328 + 9,57 + 38,28 + 22,30 = \\ &= 132,227 \text{ min} \end{aligned}$$

Výpočet celkového strojního času obrábění 3. operace všech drážek rotoru, kde

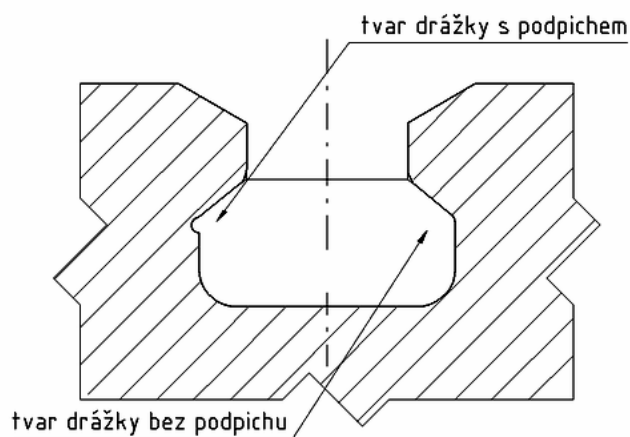
$$t_{ASpC} = \sum t_{ASp} = 5 \cdot 0,044 + 5 \cdot 0,055 + 4 \cdot 0,057 = 0,703 \text{ min}$$

Tab.6.9 Tabulka strojních časů obrábění rotoru (viz. příloha č.8)

Položky určující stupeň rotoru	Hodnota [min]
Čas t_{AS} na I. stupni rotoru	22,43
Čas t_{AS} na II. stupni rotoru	39,692
Čas t_{AS} na III. stupni rotoru	70,15
Čas t_{AS} celkem	132,227
Čas t_{AS} 3.operace celkem	0,703

7 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Po optimalizaci drážek č.1-14 dochází ke zjednodušení technologické přípravy výroby (dále jen TPV) a zjednodušení NC programů, pro obrábění drážek. Pro obsluhu CNC soustruhu optimalizace znamená zjednodušení procesu obrábění, odpadá jedna celá operace a to soustružení podpichu u drážek č.1-14. Snižují se náklady na speciální nástroj, kterým se podpich soustruží a náklady spojené se samotným obráběním drážek. Dále se eliminují případné chyby spojené s obráběním drážek a dochází i k časové úspoře způsobené odebráním jedné celé operace na drážkách č. 1-14.



Obr. 7.1 Srovnání tvaru drážky s podpichem a bez podpichu

7.1 Zhodnocení z hlediska úspory strojních času

Nové řešení obrábění se projeví úsporou strojního času při obrábění drážek. První dvě operace po optimalizaci jsou téměř stejně časově náročné. Třetí operace (soustružení podpichu) je po optimalizaci, na rozdíl od předchozí technologie zcela vynechána a to u drážek č.1-14. Samotné soustružení podpichu není příliš časově náročné, ale protože drážek je 14 a každá disponuje dvěma podpichy je to už 28 operací, kterým předchází výměna nástroje. Proto i z pohledu úspory strojních časů je výsledek optimalizace časově příznivý.

Součet vedlejších časů $t_{A11} = 1.3$ min, tento čas zahrnuje sled doprovodných operací při obráběcím procesu, jako je výměna nástrojů, rychloposuvy apod. Čas přípravy pracoviště $t_{BC} = 60$ min, z ohledem na optimalizace se tento čas zkrátí o 15 min, jelikož není třeba ustavit nástroje pro 3. operaci obrábění, není třeba

nahrávat program do řídicího systému apod. Čas t_{BC} pro 3.operaci je tedy $t_{BC} = 15\text{min}$.

Výpočet celkového strojního času obrábění 3. operace (soustružení podpichu), kde $t_{A11} = 1.3\text{ min}$; $t_{ASpC} = 0,703\text{ min}$; $t_{BC} = 15\text{min}$

$$t_C = t_{A11} + t_{ASpC} + t_{BC} = 1,3 + 0,703 + 15 = 17,003\text{ min}$$

7.2 Zhodnocení z hlediska nákladů

Z hlediska nákladů je nové řešení obrábění velmi příznivé a to především úspora nákladů vynaložených na pořízení speciálního nástroje pro soustružení podpichu. Cena tohoto nástroje se pohybuje od 500 Kč/ks až do 800 Kč/ks a to pro destičku s jednou pracovní hranou. Záleží také na složitosti tvaru destičky a čekací doba na tento nástroj je asi jeden měsíc. Cena destičky pro obrábění podpichu pro rotor (viz příloha č.9) je 800 Kč a to proto, že její tvar je složitý. I když výrobce destičky udává dobu čekání na nástroj 1 měsíc, realitou jsou až 3 měsíce čekání. To může značně zpozdit výrobu a tím ji i výrazným způsobem prodražit. Nástroj má výrobcem zaručenou životnost $T = 40\text{ min}$. při optimálních podmínkách obrábění a při původní technologii byl nástroj v záběru 2,003 min, realitou plynoucí z praxe firmy je, že nástroje vydrží až dvojnásobek svoji životnosti udávané výrobcem při optimálních podmínkách obrábění rotorů parních turbín.

Další významná úspora nákladů je spojená se samotným procesem obrábění podpichu, kdy cena práce na CNC soustruhu SUA125/6000 je 820Kč/hod. práce a to pro vnitropodnikové potřeby. Po optimalizaci je 3.operace obrábění drážek zcela vynechána, čímž dochází k další úspoře nákladů. Jestliže strojní čas soustružení podpichu je 2,003min a čas přípravy pracoviště pro 3. operaci je 15 min . pak úspora na této operaci činí asi 233 Kč.

Další nezanedbatelnou úsporou na nákladech pro firmu je i úspora na čase pro technologa a programátora. Po optimalizaci se jim oběma zjednoduší práce spojená s návrhem technologie obrábění drážek č.1-14 a respektive s programem obrábění téže drážek. TPV je zkrácena o operaci tvorby NC programu podpichu, včetně firemní dokumentace, editací, korekcí a s tím je také spojeno snížení pravděpodobnosti chyb spojených s těmito činnostmi. Odborný pracovník firmy se tak může věnovat práci na jiných projektech firmy.

Tab.7.1 Tabulka nákladů na obrábění podpichu

Charakter nákladů	Vyčíslení nákladů [Kč]
Náklady na nástroj	800
Náklady na obrábění podpichu	233
Náklady celkem	1033

7.3 Zhodnocení z hlediska technologie a TPV

Nové řešení technologie obrábění drážek č.1-14 zjednodušuje postup obrábění drážek pro lopatky rotoru turbíny, protože v místě kde před optimalizací byl podpich, je nyní nahrazen rádiusem. Rádus se soustruží ve druhé části obrábění drážky a v porovnání s původní technologií se podmínky obrábění nemění, používá se stejný nástroj a čas obrábění je téměř totožný. Od původní technologie se nová liší zejména tím, že odpadá celá poslední operace a to soustružení podpichu. Pro technologa to znamená zjednodušení technologického postupu pro obrábění drážek. Pro CNC programátora z optimalizace drážek plyne, že odpadá celý jeden program na obrábění podpichu a obrábění drážky je z jeho pohledu také jednodušší.



Obr. 7.1 Rotor (viz. příloha č.8) při montáži lopatek

7.4 Celkové zhodnocení nové technologie

Nové řešení technologie je jedna z možných cest optimalizace drážek pro lopatky rotorů parních turbín. Navržené nové řešení obrábění drážek je příznivé

z hlediska nákladů na nástroje, nákladů na provoz stroje a nákladů na obsluhu stroje. Vzhledem k tomu, že v novém řešení se nepočítá s obráběním podpichu, není potřeba již i speciální nástroj pro tuto operaci a odpadá tak administrativa spojená s objednáním u výrobce a čekání na dodání nástroje pro tuto operaci. Nové řešení je také příznivé pro programátory NC programu, jelikož operace obrábění podpichu zcela odpadá, to platí i pro obsluhu stroje, která nebude podpich obrábět. Eliminují se tak i chyby spojené s obráběním podpichu, které mohou být kritické pro celou výrobu rotoru, potažmo pro celý proces výroby a montáž turbíny. Další výhodou je zjednodušení technologického postupu výroby rotoru. Při aplikaci nového řešení do provozní praxe firmy dojde k celkovému zjednodušení celé technologie obrábění drážek č.1-14, úsporám časovým a úsporám na nákladech spojených s touto operací.

Naproti tomu výhodou starého řešení je snadnější montáž a demontáž lopatek rotoru, kde se ve starém řešení technologie naopak s podpichem počítá. Drážka je v místech na obou koncích tažných hran rozšířena o podpich, což eliminuje případné nežádoucí tření při montáži a demontáži lopatek. Pro obsluhu stroje je staré řešení příznivější k měření rozměrů drážky při obrábění drážek.

Při porovnání obou variant, je na straně nového řešení více příznivých faktorů (viz. tabulka 6.9 a 7.1) a proto je tato varianta doporučena. Případné nevýhody nového řešení, jako je montáž a demontáž lopatek rotoru a měření rozměrů drážky při obrábění, nejsou natolik kritického charakteru, že by ze zkušenostní firmy (například uvažovaná životnost a spolehlivost výrobku po dobu do třiceti let) musela být varianta nevhodná. Nové řešení lze bez problému uplatnit do výrobní praxe.

ZÁVĚR

Parní turbíny jsou velmi složitá zařízení, která se skládají z mnoha strojních součástí. Požadavky kladené na turbíny jsou značné a to jak z hlediska výkonu, spolehlivosti, životnosti, bezpečnosti, ale v dnešní době je kladen důraz i na ekologii těchto zařízení. Stejně požadavky nejsou kladeny jen na turbínu jako celek, ale na každou jednotlivou její součást. Proto je výroba takto složitých strojních zařízení velmi náročná na celý proces výroby a montáže ve firmě, počínaje konstrukcí, technologickou částí a konče samotným zařazením turbíny do provozu. Celá metodika výroby a montáže turbíny vyžaduje značné zkušenosti firmy v daném oboru a na jednotlivých segmentech výroby musí pracovat zkušené týmy odborníků s rozsáhlými znalostmi o problematice turbín a odpovídajícími zkušenostmi v oboru, aby výsledek jejich práce splňoval nejprísnejší kritéria pro výrobu a provoz turbín. Charakter výroby je převážně kusový a proto každá turbína je svým způsobem unikátní.

Rotory parních turbín jsou hřídele které rotují při vysokých otáčkách kolem své osy. Mají složitou geometrii a pracují v náročných podmínkách, jako například vystavení nepříznivým vlivům horké páry (teplota, tlak apod.). Největší teplotní změny nastávají při spuštění turbíny do provozu a odstavení z provozu. Na rotory jsou kladeny značné nároky na jakost a dodržení všech tolerancí. I když rotory dosahují svojí délkou i několika metrů, některé tolerance jsou předepsány i v setinách milimetrů, toto vše musí být zohledněno ve výrobním procesu.

Návrh nového řešení technologie se věnuje problematice obrábění tvarově složitých ploch na rotoru, tyto plochy jsou charakteru drážek pro lopatky parní turbíny. Na drážky jsou kladeny značné požadavky, jako je dodržení předepsaných tolerancí, jakosti povrchu apod. Jejich geometrie je složitá a proto i zvládnutí celé technologie a obrábění těchto drážek je náročné a vyžaduje značné zkušenosti ve firmě, tj. přítomnost odborníků, speciální stroje, zařízení a nástroje. Při návrhu nové technologie se vycházelo z dat stávající technologie firmy. Byl kladen největší důraz na zjednodušení, úsporu na nákladech a času na stávající technologii při současném zachování všech požadovaných tolerancí. Nové řešení nemělo zasahovat do geometrie důležitých částí drážky, jako je tažná hrana a krček drážky. Výroba drážek po optimalizaci je možná se stávajícím strojním vybavením firmy a tím je nově navržená technologie použitelná ve výrobní praxi.

K tvorbě nového řešení byla firmou poskytnuta výrobní dokumentace, včetně výkresů a NC programů pro obrábění drážek. Vzhledem k zachování výrobního tajemství ale nebyla dokumentace kompletní a některé informace, výkresy a programy poskytnuty nebyly. I přesto se podařilo sestavit nové řešení technologie a prokázat, že je přínosem pro firmu a splňuje požadavky zadané firmou. Nové řešení technologie zjednodušuje celý proces TPV, technologii výroby, odpadá NC program pro obrábění podpichu a dochází ke snížení nákladů na stroj, obsluhu a nástroj při výrobě rotoru. Nové řešení je možno začlenit okamžitě do výroby, protože je možné ho aplikovat na stroje, nástroje, zařízení a výrobní postupy ve firmě.

Vzhledem k tomu, jak uvádím v průběhu své práce, celá problematika parních turbín (rotor a další součásti) je natolik složitá a obsáhlá, pak k jejímu dokonalému zvládnutí je potřeba rozsáhlých znalostí a zkušeností v daném oboru. Odborníkem se pracovník stane až po několikaleté praxi průběžně doplňované studiem problematiky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel. *Speciální technologie obrábění*. 3. přeprac. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. 227 s.
2. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-01-12]. Logo firmy. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/>>.
3. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-03-23]. Sídlo firmy. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/>>.
4. FRANTIŠEK, Michele. *Parní turbíny a kondenzace plynové turbíny a turbokompresory konstrukce*. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1985. 255 s.
5. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. MediaWiki, 2002 , 31. 3. 2008 [cit. 2008-03-10]. Parní turbína. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_turb%C3%ADna>.
6. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-01-18]. Parní kondenzační turbína 1,6 MW. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/reference-parni-turbiny-3.html>>.
7. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-01-18]. Parní kondenzační turbína 12 MW. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/reference-parni-turbiny-2.html>>.
8. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-01-18]. Parní odběrová-protitlaková turbína 10,3 MW. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/reference-parni-turbiny-5.html>>.
9. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-01-18]. Parní odběrová-kondenzační turbína 33 MW. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/reference-parni-turbiny-1.html>>.
10. EKOL [online]. SOVA® NET, s.r.o., 2004-2006 [cit. 2008-01-18]. Rotor parní kondenzační turbíny. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolbrno.cz/reference-parni-turbiny-2.html>>.
11. Dokumentace firmy EKOL, spol. s.r.o.
12. KOCMAN, K, PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 271 s. ISBN 80-214-1996-2.

13. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6
14. ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje a jejich programování. 1. vyd. Praha: Technická literatura BEN, 2007. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.
15. CIHLÁŘOVÁ, P., HILL, M., PÍŠKA, M. Fundamentals of CNC Machining. [online]. [cit. 2008-01-18]. Dostupné na WWW: <<http://cnc.fme.vutbr.cz/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAD	[-]	projektování pomocí počítače (computer-aided design)
CAM	[-]	výroba pomocí počítače (computer-aided manufacturing)
CNC	[-]	počítačem číslicově řízený (computer numeric control)
D	[mm]	velký průměr obrobku
K	[-]	Kondenzační turbína
L	[mm]	dráha nástroje
NC	[-]	číslicové řízení (numeric control)
NT	[-]	nízko-tlaková (součást, část, prostor apod.)
P	[-]	Kondenzační turbína s regulovaným průmyslovým odběrem
PP	[-]	Kondenzační turbína s dvěma regulovaným odběry páry průmyslovými
PR	[-]	Protitlaková turbína s jedním regulovatelným odběrem páry průmyslovým
PT	[-]	Kondenzační turbína s dvěma regulovaným odběry páry teplárenskými
R	[-]	Protitlaková turbína
ST	[-]	středně-tlaková (součást, část, prostor apod.)
T	[-]	Kondenzační turbína s regulovaným teplárenským odběrem
TPV	[-]	Technologická příprava výroby
TR	[-]	Protitlaková turbína s jedním regulovatelným odběrem páry teplárenským
VT	[-]	vysoko-tlaková (součást, část, prostor apod.)
a_1, a_2	[-]	koeficienty zohledňující velikost drážek při výpočtu strojního času
d	[mm]	malý průměr obrobku
f	[mm]	posuv na otáčku
i	[-]	počet třísek obrábění
k	[-]	počet obráběných stran drážky
l	[mm]	dráha nástroje daného úseku
m	[-]	počet stejných drážek na stupni rotoru
n	[min ⁻¹]	otáčky obrobku
t_{AS}	[min]	strojní čas
t_{A11}	[min]	vedlejší strojní čas
t_{BC}	[min]	čas přípravy pracoviště
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: Výkres polotovaru

Příloha č.2: Technologický postup výroby rotoru

Příloha č.3: Výrobní výkres drážky E 4-22070

Příloha č.4: Výrobní výkres drážky E 4-22071

Příloha č.5: Výrobní výkres drážky E 4-22718

Příloha č.6: Výrobní výkres drážky E 4-22397

Příloha č.7: NC program pro obrábění drážky E 4-22071

Příloha č.8: Výkres opracovaného rotoru