

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Akademický rok 2011/2012

Pavel MATOUŠ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Obrábění pro energetický průmysl – Komponenty parních turbín

Autor: **Pavel MATOUŠ**

Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk JANDA, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel MATOUŠ**  
Osobní číslo: **S11B0035P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Obrábění pro energetický průmysl - Komponenty parních tur-  
bín**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Konstrukční materiály používané v energetickém průmyslu
3. Nástrojové materiály pro energetický průmysl
4. Metody obrábění v energetickém průmyslu (běžné, nové, speciální)
5. Zhodnocení a závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Sandvik Coromant: Technická příručka obrábění; 2005**

**Sandvik Coromant: Příručka obrábění; 1997**

**Koutský, J.: Materiály tepelně-energetických zařízení, Plzeň 1991**

**CIRP ANNALS - Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Janda**


Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Hořejš**


ŠKODA POWER, a.s.

Datum zadání bakalářské práce: **18. listopadu 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. prosince 2011

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval zejména vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Jandovi, Ph.D. za cenné rady, poskytnuté materiály a vždy ochotnou pomoc. Dále děkuji Ing. Jaroslavu Hořejšovi za zprostředkování konzultace s pracovníky společnosti Škoda POWER s.r.o. a za kontrolu mé bakalářské práce. Dík patří také celé mojí rodině za veškerou podporu a všem, kdo mi jakkoliv pomáhal.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Matouš	Jméno Pavel		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie - technologie obrábění			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Janda, Ph.D.	Jméno Zdeněk		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Obrábění pro energetický průmysl – Komponenty parních turbín			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	49	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	49	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Hlavním cílem této bakalářské práce je vytvořit přehled konstrukčních materiálů, nástrojových materiálů a technologií obrábění, které se používají v energetickém průmyslu. Práce je zaměřena na komponenty parní turbíny. Typické jsou pro energetický průmysl velké obrobky jako rotory nebo skříně parní turbíny, které však musí být vyrobeny s velkou přesností.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p>	<p style="text-align: center;">Energetický průmysl, parní turbína, technologie obrábění, konstrukční materiály, nástrojové materiály</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Matouš	Name Pavel	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing processes - technology of metal cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Janda, Ph.D.	Name Zdeněk	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Machining for Energy Industry – Components of Steam Turbines		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	49	<b>TEXT PART</b>	49	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The main purpose of this Bachelor work is to create an overview of construction materials, tool materials and machining technologies which are used for energy industry. The work is focused on parts of a steam turbine. Workpieces of large dimensions are typical for energy industry such as turbine rotors, turbine cases and other parts that must be produced very accurately.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>energy industry, steam turbine, machining technologies, construction materials, tool materials</p>

## Obsah

Přehled použitých termínů .....	3
Přehled použitých zkratk .....	4
Přehled použitých symbolů .....	5
1. ÚVOD .....	6
1.1. Energetika .....	6
1.2. Elektrárny .....	6
1.3. Turbína.....	8
1.4. Parní turbína pro výrobu elektrické energie a její části .....	8
1.4.1. Rotor .....	9
1.4.2. Lopatky .....	10
1.4.3. Skříň turbíny .....	11
2. KOSTRUKČNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU.....	12
2. 1. Požadované materiálové vlastnosti.....	12
2. 2. Vliv jednotlivých přísadových prvků [2].....	12
2.2.1. Chrom .....	12
2.2.2. Molybden .....	12
2.2.3. Wolfram .....	12
2.2.4. Vanad .....	12
2.3. Konstrukční materiály jednotlivých částí .....	13
2.3.1. Materiály turbínových rotorů .....	13
2.3.2. Materiály lopatek parních turbín.....	15
2.3.3. Materiály litých skříní.....	17
2.3.4. Nové a moderní konstrukční materiály pro energetický průmysl.....	19
3. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY PRO ENERGETICKÝ PRŮMYSL.....	21
3. 1. Požadované vlastnosti rezných materiálů.....	21
3.1.1. Rychlořezná ocel – HSS .....	22
3.1.2. Slinuté karbidy .....	22
3.1.3. Cermety .....	24
4. METODY OBRÁBĚNÍ V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU .....	25
4. 1. Klasické technologie obrábění v energetickém průmyslu.....	25



4.1.1. Soustružení.....	25
4.1.2. Frézování.....	27
4.1.3. Protahování .....	32
4.1.4. Vrtání .....	33
4.1.5. Vyvrtávání.....	34
4.1.6. Broušení .....	35
4.1.7. Leštění.....	36
4.2. Speciální technologie.....	38
4.2.1. Svrtávání rotorů .....	38
4.2.2. Broušení kulové plochy .....	42
5. HODNOCENÍ A ZÁVĚR.....	45
6. LITERATURA .....	46

## Přehled použitých termínů

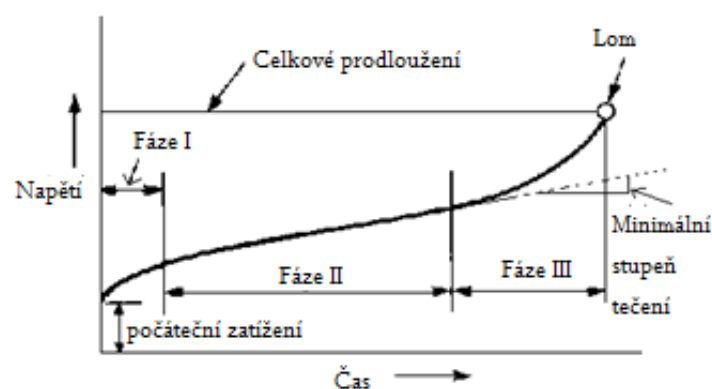
-zpracováno dle [1]

**Ocel slitinová** - ocel legovaná přísadovými prvky pro dosažení požadovaných vlastností.

**Ocel žárovevná** - ocel odolná proti tečení a lomu při tečení pro součásti pracující v oblasti vysokoteplotního creepu. Jedná se především o oceli třídy 15, u nichž je žárovevnost zajištěna strukturou se stabilními karbidy a nitridy a oceli tř. 17 vytvrzené intermetalickými fázemi.

**Ocel žáruvzdorná** - ocel odolná proti oxidaci v plynné atmosféře při teplotách nad 600°C. Žáruvzdorné oceli jsou podobně jako oceli korozivzdorné legovány Cr (6 -30%), v případě v kombinaci s Ni a dalšími přísadami, které zlepšují ochranné vlastnosti povrchových oxidů.

**Tečení (creep)** - jev, který nastává při statickém zatěžování materiálu při určité teplotě (u kovů při termodynamické teplotě  $T > 0.25 T_f$ ). Materiál se působením napětí nevratně trvale deformuje (protahuje, stlačuje, ohýbá, zkrucuje) – teče. Tento časově závislý nárůst trvalé deformace při stálém napětí za vysokých teplot může vést k nepřijatelné deformaci nebo poruše strojní součásti, pracující dlouhodobě za těchto podmínek.



Obr. 1 Schéma tečení v idealizovaném stavu[1]

## Přehled použitých zkratek

Zkratka	Popis zkratky
<b>Al</b>	Hliník
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Oxid Hlinitý
<b>C</b>	Uhlík
<b>CNC</b>	Počítačový řídicí systém (Computer Numerical Control)
<b>Co</b>	Kobalt
<b>Cr</b>	Chrom
<b>CVD</b>	Chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapour Deposition)
<b>ČSN</b>	Česká státní norma
<b>ECM</b>	Elektrochemické obrábění (Electrochemical machining)
<b>Fe</b>	Železo
<b>HRC</b>	Hodnota tvrdosti získaná statickou zkouškou tvrdosti podle Rockwella
<b>HSS</b>	RO - Rychlořezná ocel (High Speed Steel)
<b>HV</b>	Hodnota tvrdosti získaná statickou zkouškou podle Vickerse
<b>ISO</b>	Mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem (International Standard Organisation)
<b>JETE</b>	Jaderná elektrárna Temelín
<b>Mn</b>	Mangan
<b>Mo</b>	Molybden
<b>N</b>	Dusík
<b>Nb</b>	Niob
<b>NbC</b>	Karbid niobu
<b>NC</b>	Číslicové řízení (Numerical Control)
<b>Nf616</b>	Obchodní název typu oceli
<b>Ni</b>	Nikl
<b>P</b>	Fosfor
<b>P91 ,P92, P93</b>	Obchodní názvy typů ocelí
<b>PD</b>	Polykrystalický diamant
<b>PKNB</b>	Polykrystalický nitrid boru
<b>PVD</b>	Technologie nanášení tenké vrstvy odpařením z pevné fáze (Physical Vapour Deposition)
<b>S</b>	Síra
<b>Si</b>	Křemík
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	Nitrid křemičitý
<b>SK</b>	Slinutý karbid
<b>TaC</b>	Karbid tantalu
<b>Ti</b>	Titan
<b>TiAlN</b>	Tenká otěruvzdorná vrstva nástroje
<b>TiC</b>	Tenká otěruvzdorná vrstva nástroje
<b>TiCN</b>	Tenká otěruvzdorná vrstva nástroje
<b>TiN</b>	Tenká otěruvzdorná vrstva nástroje
<b>V</b>	Vanad

<b>VBD</b>	Vyměnitelná břitová destička
<b>W</b>	Wolfram
<b>WC</b>	Karbid wolframu

## Přehled použitých symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
<b>d</b>	Průměr vrtaného otvoru	mm
<b>f<sub>z</sub></b>	Posuv na zub	mm
<b>l</b>	délka vrtaného otvoru	mm
<b>p</b>	tlak	Mpa
<b>Ra</b>	Parametr hodnocení obrobeného povrchu	μm
<b>t</b>	teplota	°C
<b>v<sub>c</sub></b>	Řezná rychlost	m/min

## 1. ÚVOD

Zpracováno dle [6], [18], [19]

V rámci řešení práce bylo úzce spolupracováno s firmou Škoda Power s.r.o.

Tématem bakalářské práce je obrábění v energetickém průmyslu. Z důvodu rozsáhlosti tohoto odvětví je práce zaměřena na výrobu komponent parních turbín. Práce má tedy za cíl zmapovat technologie obrábění používané při výrobě těchto komponent. Dále také práce pojednává o konstrukčních materiálech částí parní turbíny a o nástrojových materiálech používaných k obrábění v závislosti na konstrukčních materiálech.

Nejdříve je však nutné se seznámit se základními termíny, které se vyskytují v oblasti energetiky a dále jsou v úvodu popsány hlavní části parní turbíny.

### 1.1. Energetika

Pojem energetika zahrnuje výrobní odvětví a také vědní obor. Vědní obor energetika se zabývá získáváním, transformací, distribucí a spotřebou všech forem energie. Získané poznatky se následně využívají při plánování, projektování, konstrukci, výstavbě a provozu energetických strojů a zařízení. Cílem energetiky jako výrobního odvětví je zabezpečit pro společnost dostatečné množství energie v požadované kvalitě, v požadovaném čase a místě, za přijatelnou cenu a s co nejmenším dopadem na životní prostředí. Je zřejmé, že všechna výrobní odvětví v dnešní době jsou závislá na energetice a energetika je tedy základem hospodářství každého státu.

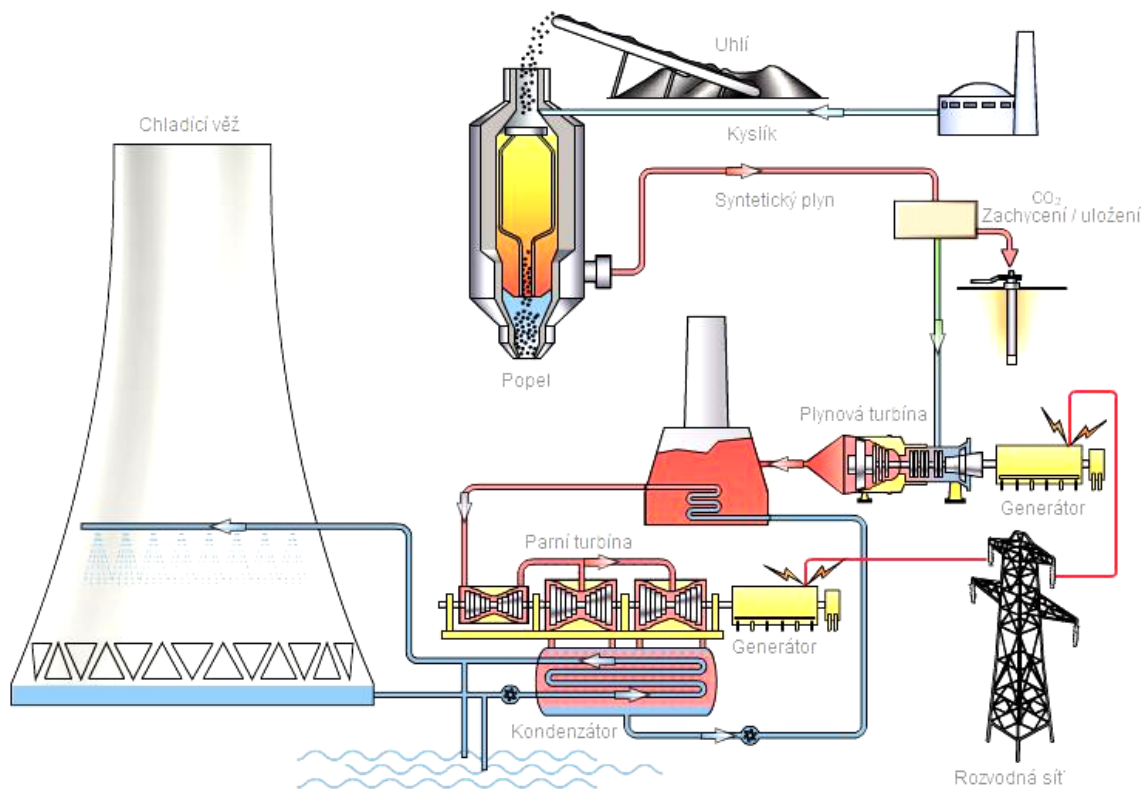
Energetika se zejména zaměřuje na výrobu elektrické energie v elektrárnách a její distribuci prostřednictvím přenosové soustavy. Dále sem patří výstavba a výroba energetických strojů a zařízení, těžba, distribuce a využití uhlí, ropy, zemního plynu nebo využití obnovitelných zdrojů.

### 1.2. Elektrárny

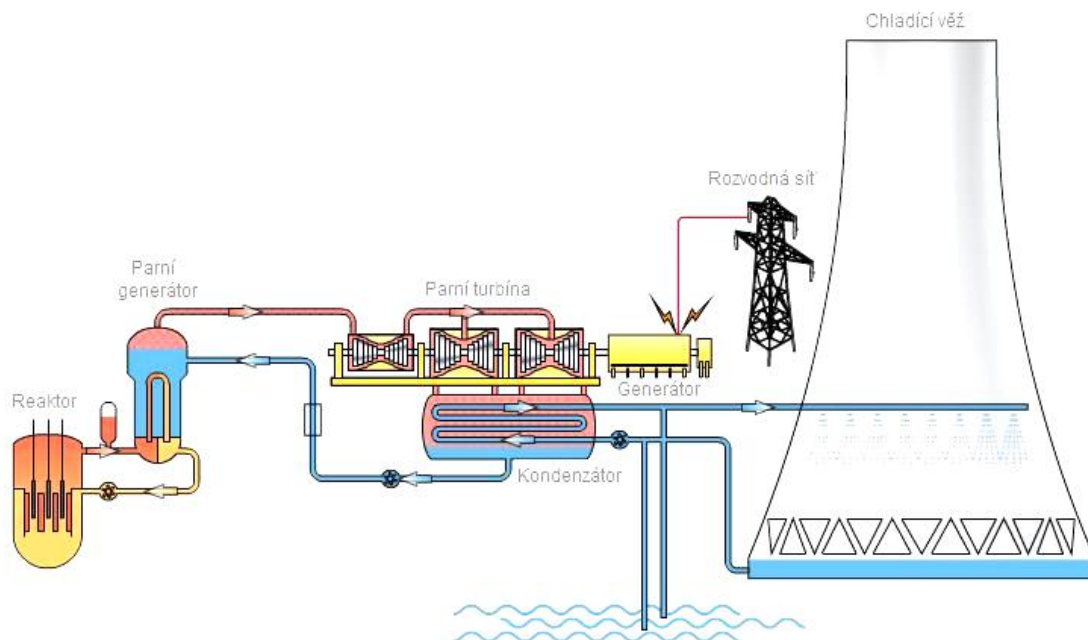
Elektrárny jsou technologické zařízení sloužící k výrobě elektrické energie. Elektrická energie se získává přeměnou z energie vázané v určitém zdroji. Nejčastěji je tato energie přeměněna na energii mechanickou, kterou je následně poháněn elektrický generátor.

Uhelná elektrárna využívá chemickou energii vázanou v palivu a spalovacím procesem je přeměňována na energii tepelnou. Tepelnou energii využíváme k výrobě vodní páry v parogenerátoru. Vodní pára je následně přiváděna na lopatky turbíny a tím je roztáčen generátor. Kolem 70 % instalovaného výkonu české energetiky představují právě uhelné elektrárny.

Jaderná elektrárna pracuje na podobném principu jako uhelná tepelná elektrárna. Vazebná energie jader těžkých prvků získaná v jaderném reaktoru je použita k výrobě páry. Poté už je princip totožný. V současnosti je jako palivo využíván převážně obohacený uran, což je přírodní uran, v němž byl zvýšen obsah izotopu  $^{235}\text{U}$  z původních 0,5% na 2 – 5%. V České republice pracují dvě jaderné elektrárny a to v Temelíně a Dukovanech.



Obr. 2 Schéma tepelné elektrárny [II]



Obr. 3 Schéma nejběžnějšího typu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem[II]

### 1.3. Turbína

Turbína je mechanický rotační stroj skládající se z jednoho nebo více pohyblivých lopatkových kol umístěných na společné hřídeli, mezi nimiž aktivně prochází pracovní medium. Výsledný rotační pohyb stroje je získán prouděním kapaliny nebo plynu turbínou. Dochází k přeměně kinetické, tepelné a tlakové energie na mechanickou práci.

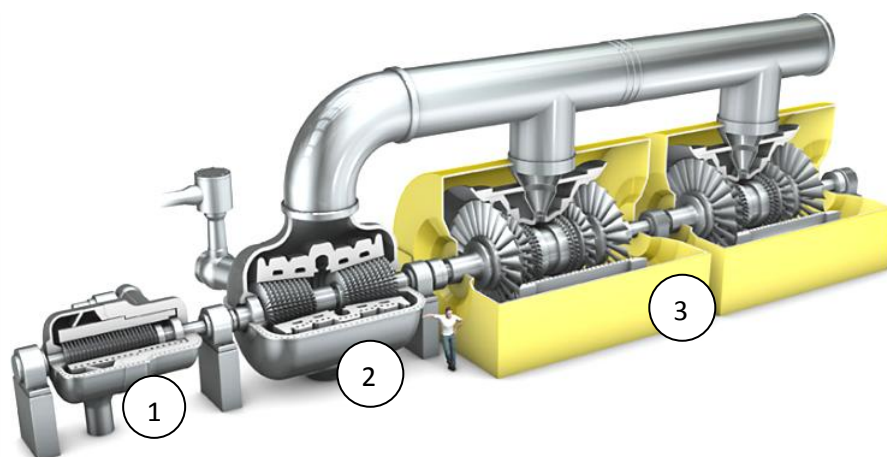
Turbíny nacházejí své uplatnění například v leteckých proudových motorech, dále jsou používány pro pohon velkých lodí a ponorek. Nejvýznamnější využití má ovšem v energetickém průmyslu. Zde se turbíny využívají k přímému pohonu elektrických generátorů, které jsou na společném hřídeli s turbínou. Elektrické generátory slouží k přeměně mechanické energie na elektrickou energii, která je následně rozvedena do elektrické přenosové soustavy.

### 1.4. Parní turbína pro výrobu elektrické energie a její části

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.

Tepelné turbíny je možno dělit podle různých kritérií. Například podle počtu těles. Pro menší dosahované výkony se používají jednotělesové turbíny. Vícetělesové turbíny mohou být rozděleny jako na **obr. 4.** na vysokotlaký stupeň, středotlaký stupeň a nízkotlaký stupeň. Výhodné je provést mezi jednotlivými stupni regeneraci páry, což znamená znovu ohřátí expanzí zchladlé páry a docílí se tak zvětšení objemu páry za relativně malého dodání energie. Parní turbíny mohou pracovat se sytou (mokrou) nebo přehřátou párou. Sytá pára se převážně využívá v jaderných elektrárnách.



Obr. 4 Parní turbína: 1- vysokotlaký st., 2- středotlaký st., 3 – nízkotlaký st. [III]

Parní turbína je využívána především v energetice pro pohon elektrických generátorů (tepelná elektrárna, jaderná elektrárna), se kterými bývá mechanicky spojena společným hřídelem.

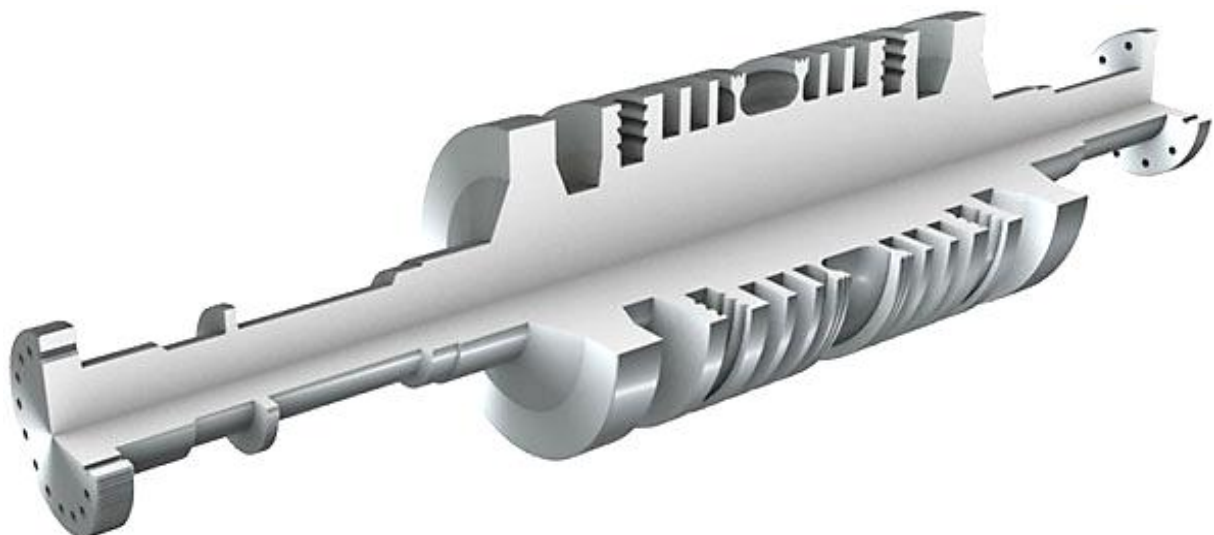
Parní turbína se dělí na rotorovou a statorovou část. Rotorová část se skládá z hřídele, oběžných lopatek a dalších komponent. U statorové části jsou nejvýznamnějšími komponentami rozváděcí lopatky a skříň parní turbíny.

#### 1.4.1. Rotor

Hlavní součástí rotoru je hřídel, na kterou se nasazují oběžná kola a další části rotoru. Oběžné kolo je kotouč, do kterého se za závěs upevňují lopatky. Rozlišujeme rotor pružný a rotor tuhý. U tuhého rotoru jsou jmenovité otáčky pod kritickými, naopak pružný rotor má některé kritické otáčky pod jmenovitými otáčkami. Kritické otáčky jsou otáčky, při kterých je nežádoucí odstředivá síla téměř nekonečná a přes otáčky se musí co nejrychleji přejít, aby se turbína nepoškodila.

Podle konstrukce se dělí rotor na:

- **Celokový rotor** - rotor vyroben jako jeden kus – výkovek  
- použití převážně pro vysokotlaké a středotlaké části turbíny
- **Svařovaný rotor** - rotor vyrobený pomocí technologie svařování z jednotlivých částí rotoru, též označovaný jako rotor kombinovaný  
- může být svařen z různých materiálů a užití nachází hlavně u nízkotlakých dílů parní turbíny
- **Skládaný rotor** - rotor poskládaný z částí, zejména hřídele a oběžných kol



Obr. 5 Celokový rotor parní turbíny [IV]



### 1.4.2. Lopatky

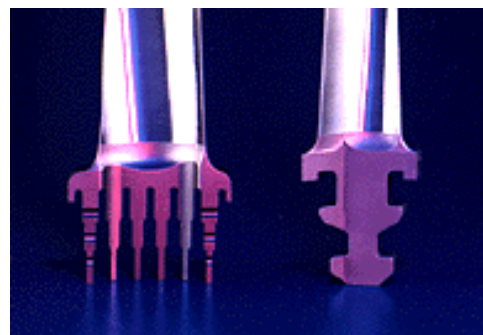
**Oběžné lopatky** – jsou součástmi pohyblivého lopatkového kola umístěného na rotoru. Proto se někdy nazývají rotorové lopatky nebo pracovní lopatky. Profil lopatek může být konstantní nebo proměnný. Lopatky jsou děleny podle dílu parní turbíny, ve kterém působí. Vysokotlaké oběžné lopatky jsou krátké a nejsou tedy tolik namáhány od odstředivých sil. Tyto lopatky musí odolávat zejména vysokým teplotám páry, které dosahují hodnot kolem 600 °C. Lopatky v nízkotlakém dílu (koncové lopatky) naopak pracují za nižších teplot, ale jejich listy mohou dosahovat až délek přes 1000 mm. Například nejdelší oběžná lopatka na turbíně instalované v JETE má délku přes 1200 mm. Lopatka je upevněna k disku kola turbíny pomocí závěsu (nožky). Závěsy mají různé konstrukční provedení. Běžně užívané jsou stromečkového typu, vidličkového typu (kolíkové nožky) a rybinový závěs.



Obr. 6 Různé tvary oběžných lopatek a jejich závěsů [V]

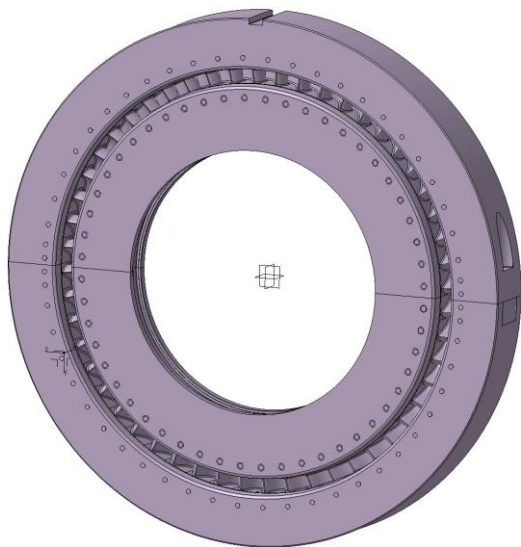


Obr. 7 Stromečkový závěs [VI]

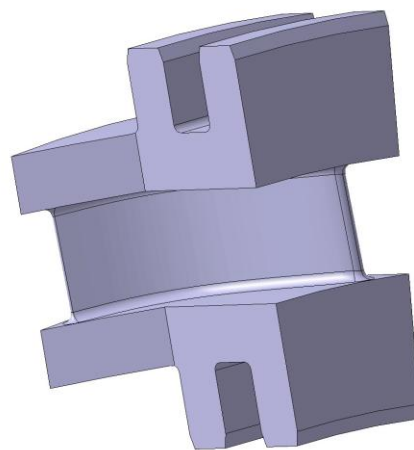


Obr. 8 Vidličkový závěs (vlevo) a rybinový závěs [VII]

**Rozváděcí lopatky** – Lopatky mění směr páry, aniž by se sami otáčely (statorové lopatky) a převádí proud páry na lopatky oběžné. Lopatky jsou uloženy v rozváděcím kole (viz **obr. 9**). Rozváděcí lopatka se na první pohled pozná tím, že má 2 závěsy, za které se uchycují do rozváděcího kola (viz **obr. 10**).



*Obr. 9 Rozváděcí kolo [VIII]*

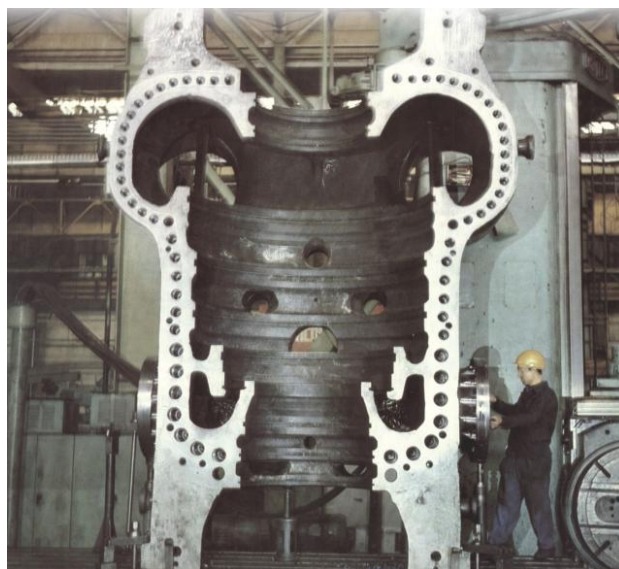


*Obr. 10 Rozváděcí lopatka [VIII]*

Lopatky oběžné a rozváděcí jsou si tvarem i funkcí podobné, avšak lopatky mají různě namáhání, které může vést i k rozdílné volbě materiálu.

### 1.4.3. Skříň turbíny

Skříň turbíny je robustní odlitek velkých rozměrů, ve kterém je horizontálně uložen rotor parní turbíny. Rotační pohyb rotoru je umožněn ložisky umístěnými mimo skříň parní turbíny v ložiskových stojanech. Tento způsob umístění zabraňuje kontaktu ložisek s pracovním médiem turbíny. V zúžené části skříňe (nahore a dole) na **obr. 11** je místo pro ucpávkové části. Skříň musí zajistit přesné uložení rotoru, tlumit rázy, udržet páru v prostoru turbíny atd.



*Obr. 11 Odlitek skříňe [IX]*

## 2. KOSTRUKČNÍ MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU

- Zpracováno dle [2],[13]

### 2. 1. Požadované materiálové vlastnosti

Materiály částí turbíny jsou specificky namáhané. Pracují v prostředí, které vyžaduje od materiálů vlastnosti jako: vysoká žárovevnost, odolnost proti tečení (creep), zvýšená odolnost proti korozi, nízká tepelná roztažnost a dobré vnitřní tlumení. Důležité jsou také dobré technologické vlastnosti a samozřejmě rozhoduje i cena konstrukčního materiálu. V energetickém průmyslu je snaha stále zvyšovat účinnost tepelných elektráren a rostou i požadavky na snižování množství škodlivých emisí. Toho se docíluje pomocí zvyšování parametrů páry, tj. teploty a tlaku páry na vstupu do parní turbíny. Kvůli vyšším parametrům páry se vývoj ocelí směřuje k větší dokonalosti a efektivnosti pro podmínky tohoto prostředí.

### 2. 2. Vliv jednotlivých přísadových prvků [2]

#### 2.2.1. Chrom

Jednoduché chromové oceli bez přídavku jiných přísadových prvků se vyznačují poměrně malou odolností proti tečení. Přesto je chrom přísadou ve většině nízkolegovaných ocelí již od začátku jejich vývoje, kdy se přidával do molybdenových ocelí ke zvýšení plasticity při porušení při tečení, ke zlepšení korozní odolnosti a k potlačení sklonu ke grafitizaci. V ocelích Cr12 je hlavním účelem takto vysoké přísady zabezpečit vyhovující žáruvzdornost až do teplot kolem 600 °C.

#### 2.2.2. Molybden

Vliv molybdenu je v přímé závislosti na typu a morfologii přítomné karbidické fáze. Molybden se rozpouští hlavně ve feritu a tím žárovevnost oceli stoupá. V ocelích CrV se Mo projevuje příznivě do 1%.

#### 2.2.3. Wolfram

Vzhledem k jeho příbuznosti s Mo má obdobný vliv na žárovevnost.

#### 2.2.4. Vanad

Karbid vanadu  $V_4C_3$  má tendenci vylučovat se v jemné, disperzní formě vzhledem k značné aktivační energii difuze vanadu. Pomalu hrubne a velice účinně může proto zvyšovat žárovevnost. V ocelích Cr12 vanad při vyšších koncentracích může vytvářet karbonitrid, který se morfologicky ani distribučně neliší od  $V_4C_3$ .

## 2.3. Konstrukční materiály jednotlivých částí

### 2.3.1. Materiály turbínových rotorů

Vývoj materiálů pro turbínové rotory jde s rozvojem parametrů a velikosti parních turbín. Rotor je nejvýznamnější součástí turbíny a má vysoké nároky na vlastnosti materiálu, které jsou však obtížně splnitelné. Na rotoru působí velké odstředivé síly a při spouštění z normální teploty je povrch zatěžován vysokou teplotou páry, zatímco jádro je chladné.

#### Požadavky na materiál rotoru:

- Vysoké hodnoty meze pevnosti a meze kluzu
- Odolnost vůči tečení (creepu)
- Schopnost odolávat vysokým teplotám a rozdílu teplot v průřezu rotoru
- Odolnost vůči porušení únavou
- Minimální rozdíly ve vlastnostech v celém objemu rotoru

Na materiály pro rotory se využívá často speciálních způsobů výroby (např. využití vakua) a ocel musí projít během výroby řadou zkoušek, aby byla splněna podmínka minimálních rozdílů vlastností napříč průřezem.

#### Nízkolegované oceli pro turbínové rotory

Tyto slitinové oceli pro turbínové rotory jsou legovány osvědčenými prvky, jako jsou – Cr, Mo, V, Ni, W. Tyto oceli jsou vyvinuty a v provozu vyzkoušeny pro výrobu velkých rotorů klasických elektráren. Do této skupiny patří oceli ČSN 15320, ČSN 15335, (T56) a T 67. Jejich chemické složení je v *tabulce 1*.

Tabulka 1 Chemické složení čs. nízkolegovaných ocelí na turbínové jednotky.

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V	Ti
ČSN 15 320	0,20 0,28	0,40 0,80	0,15 0,40	1,10 1,40			0,55 0,75	0,15 0,30	
ŠKODA T 56 ČSN 15 335	0,20 0,27	0,25 0,50	0,25 0,50	1,0 1,50	max. 0,30	0,40 0,70	0,45 0,65	0,65 0,85	-
ŠKODA T 67	0,25 0,30	0,65 0,85	max. 0,50	1,00 1,40	0,65 0,80	0,50 0,70	0,50 0,70	0,70 0,85	0,05 0,20

Ocel ČSN 15320 je určena pro práci v rozsahu teplot 400 až 520 °C a při nižších žárovevých požadavcích až do 560 °C. Vyrábějí se z ní turbínové rotory o průměru přes 1000 mm, hmotnost výkovků až do 20 tun.

### Zahraníční modifikované oceli Cr12 pro turbínové rotory:

Mezi nejrozšířenější oceli této třídy patří ty s obchodním názvem Turbotherm 20MW (X20CrMoV 1 21) a Turbotherm 20MWV (X22CrMoWV 1 21)

Tabulka 2 Chemické složení v %

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V
Turbotherm 20MW	0,2	0,6	0,3	12	0,6	-	1	0,3
Turbotherm 20MWV	0,2	0,6	0,3	12	0,8	0,5	1	0,3

### Modifikované oceli Cr12 pro turbínové rotory - ČR

Pro výrobu středních a velkých výkoveků hřídelí jsou v současné době k dispozici modifikované oceli Cr12. Chemické složení je uvedeno v **tabulce 3**.

Tabulka 3 Chemické složení v % ocelí používaných v ČR

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V	Ti
ČSN 17126 (T58)	0,16÷0,22	0,6÷1	0,6	11÷12,5	0,5÷1	1,6÷2,2	-	0,1÷0,25	-
ČSN 17134	0,17÷0,23	0,5÷1	0,25÷0,6	10÷12,5	0,3÷0,8	-	0,8÷1,2	0,2÷0,35	-
ČSN 17135	0,17÷0,24	0,5÷1	0,25÷0,6	10,6÷12,5	0,3÷0,8	0,4÷0,8	0,4÷0,7	0,2÷0,35	0,03÷0,15

Ocel ČSN 17135 je obdobou zahraniční oceli Turbotherm a navíc obsahuje malé množství Ti.

Ocel ČSN 17126 (T58) byla vyvinuta ve společnosti ŠKODA Plzeň a je vhodná pro menší a střední výkovek.

### 2.3.2. Materiály lopatek parních turbín

„Obecně platí, že každá značka oceli, která byla osvojena pro výrobu turbínových rotorů (jež je technologicky vzhledem i k požadované objemové rovnoměrnosti mechanických vlastností náročnější), se může použít i pro výrobu lopatek. Značky vyvinuté speciálně pro turbínové lopatky mají obvykle výrazně vyšší žárovevné hodnoty.“ [2]

#### Lopatky rozváděcí (statické)

Požadavky na materiál statické lopatky:

- pevnost v ohybu a krutu (namáhání od tlaku proudícího média)
- odolnost vůči únavě (kmitání lopatek)
- schopnost odolávat vysokým teplotám

#### Lopatky oběžné (pracovní)

Pro oběžné lopatky je nejdůležitější požadavkem na materiál vysoká odolnost proti tečení.

Další požadavky na materiál oběžné lopatky:

- vysoká mez únavy
- vysoký součinitel útlumu kmitů

#### Modifikované žárovevné vysokochromové oceli na lopatky.

Tyto materiály byly vyvíjeny pro teplotní oblast 570- 600°C (teplota páry). Při této teplotě mohou pracovat nejexponovanější části parních turbín velkých výkonů. Vysokochromové oceli mají vysoký součinitel útlumu kmitů, dobré hodnoty meze únavy, ale mají však při vyšších teplotách nižší žárovevnost. Vývoj se proto orientoval na vysokochromové oceli s přísadou dalších prvků zvyšujících žárovevnost (Mo, W, V).

#### Modifikované oceli Cr12 používány na žárovevné lopatky v ČR a ve světě

K výrobě lopatek jsou určeny zejména oceli ČSN 17126 (T 58) a ČSN 17132 (POLDI AK 2 MW).

Tabulka 4 Chemické složení v %

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V
ČSN 17126 (T58)	0,16÷0,22	0,6÷1	0,6	11÷12,5	0,5÷1	1,6÷2,2	-	0,1÷0,25
ČSN 17132	0,18÷0,26	0,5÷1,2	0,5	10,5÷12,5	0,4	-	0,4	0,2÷0,6



## Korozivzdorné oceli na koncové lopatky

Koncové lopatky parních turbín jsou jedním z nejdůležitějších materiálových a technologických problémů v konstrukci velkých parních turbín. Koncová lopatka se liší od vysokotlaké a středotlaké zejména velikostí. Z toho plyne značná délka, hmotnost a odstředivá síla. Tyto skutečnosti výrazně zvyšují požadavky na pevnostní vlastnosti lopatek. Vzhledem k relativně nízkým teplotám (100- 150°C) intenzivně působí na povrch lopatky pracovní prostředí (vlhká pára).

Pro náročné požadavky vyhovuje nerezavějící nízkouhlíková ocel Cr12 (ČSN 17121, ČSN 17027).

V ČR byla vyvinuta pro koncové lopatky ocel ŠKODA T 60, jejíž chemické složení je uvedeno v *tabulce 5*.

Tabulka 5 Chemické složení oceli T60 v %

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	Mo	V	Ti (Nb)
ČSN 17134 (T 60)	~ 0,25	~ 0,80	~ 0,60	~12,50	~ 1,80	~1,00	~ 0,60	~ 0,25	~0,50

## Ochrana koncových lopatek proti erozi

Kondenzující vodní páry v nízkotlaké části postupně vytvářejí kapičky vody. Údery kapiček vody o povrch oběžných lopatek (náběžná hrana volného konce) způsobují rozrušování materiálu lopatek. Tento děj se nazývá eroze. Problém erozivních účinků není zanedbatelný a způsobuje vážné potíže při provozu turbín. Problém se řeší konstrukční změnou nebo materiálovým řešením například ochrana lopatek tenkými vrstvami nebo kalením náběžné hrany. Těmito úpravami částečně zvýšíme ochranu proti erozi, avšak nedocílíme úplného zamezení eroze.



Obr. 12 Korozně erozivní poškození niklové slitiny [X]

### 2.3.3. Materiály litých skříní

Volba oceli na lité skříně vychází především z pracovní teploty turbíny. Účelem legování je především vytvořit podmínky pro dosažení požadované žáropevnosti a případně žáruvzdornosti. Ocel musí mít příznivé slévárenské vlastnosti a musí být svařitelná – opravy odlitku a konstrukční úpravy. U odlitků se mohou po určitém čase vlivem tepelné únavy (změny teploty) objevit trhliny.

Pracovní teplota (teplota páry) parních turbín se posunula k teplotě 600°C a trendem je další zvyšování až k teplotám 700°C. Pro nižší úrovně teploty si zatím vystačíme s nízkolegovanými oceli, popř. s modifikovanými Cr12 oceli.

Tabulka 6 Oceli používané v současné době

Ocel	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W
17CrMo(V)55	0,15÷0,20	0,50÷0,80	0,30÷0,50	~0,035	0,03	1,0÷1,5	~0,30	0,45÷0,55	0,05÷0,12	-
ČSN 422744	0,11÷0,18	0,45÷0,70	0,20÷0,50	0,045	0,045	0,50÷0,70	~0,40	0,40÷0,60	0,20÷0,35	-
ČSN 422745	0,11÷0,14	0,45÷0,70	0,20÷0,50	0,035	0,035	0,40÷0,60	~0,40	0,85÷1,05	0,20÷0,35	-
ČSN 42 2740	0,12÷0,18	0,10÷0,60	0,25÷0,50	0,035	0,035	1,00÷1,50	~0,30	0,40÷0,60	0,50÷0,70	0,40÷0,70

Ocel 17 CrMo(V)55 byla odvozena z oceli typu CrMo17CrMo55 s malou přísadou V. Je vhodná pro funkční díly parních turbín jaderných elektráren pro nižší teploty syté páry. Hlavním legujícím prvkem z hlediska žáropevnosti je ve všech ocelích vanad, který zvyšuje hodnoty žáropevnosti.

#### Modifikované oceli Cr12 na lité součásti parních turbín

Pro teploty nad 580°C volíme z modifikovaných ocelí Cr12. Problémem těchto litých ocelí může být nehomogenita lité struktury a její stejnoměrnost.

Vývoj se soustředil na ocel typu Cr11MoV, která má označení ARM. Tato ocel se používá na odlévání odlitků pro nadkritickou teplotu páry. Chemické složení oceli ARM 10 je uvedené v *tabulce 7*.

Tabulka 7 Chemické složení a žáropevné vlastnosti oceli ARM 10

Značka	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Žáropevnost [MPa]			
	[hmotn. %]							Za 10 <sup>4</sup> h při		Za 10 <sup>5</sup> h při	
	550°C	600°C	550°C	600°C							
42 2916	0,16	0,4	0,1	10,2	0,2	0,9	0,2	159	97	122	73
(ARM 10)	0,22	0,7	0,4	11,8	0,6	1,2	0,35				

Obsah P = max. 0,035 %; obsah S = max 0,030%.



Společnost Škoda vyvinula ocel - ŠKODA T59, která je typem oceli Cr12WV a od oceli ŠKODA T58 se lišila nižším obsahem C, což bylo příčinou její nižší žárovevnosti. Chemické složení této oceli je uvedeno v *tabulce 8*.

Tabulka 8 Chemické složení a žárovevné vlastnosti oceli ŠKODA T59

Značka	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Žárovevnost [MPa]			
	[hmotn. %]							Za 10 <sup>4</sup> h při		Za 10 <sup>5</sup> h při	
								550°C	600°C	550°C	600°C
T 59	0,10 0,18	0,6 1,0	max. 0,6	12,0 13,5	0,5 1,2	0,5 0,8	0010 0,20	125	74	88	51

Obsah P = max. 0,040 %; obsah S = max 0,040%.

### 2.3.4. Nové a moderní konstrukční materiály pro energetický průmysl

Zpracováno dle [8], [9], [10], [11]

Současné národní a mezinárodní projekty výstavby nových elektráren dokazují, že i nadále budou v následujících letech využívány pro výrobu elektrické energie zejména fosilní paliva a to i přes velký pokrok ve využívání alternativních zdrojů.

Vysoké ekonomické tlaky a náklady na ochranu životního prostředí vedou ke zvyšování účinnosti tepelných elektráren. Zvyšování účinnosti se dosahuje především zvýšením parametrů páry, což je navýšení teploty páry nad 600 °C a tlaku páry na vstupu do turbíny kolem 30 MPa (v současnosti). Jedna z nejúčinnějších tepelných elektráren je vystavěna v Číně, blok Waigaoqiao III má účinnost kolem 46 % a k výrobě 1 kWh spotřebuje 320 g uhlí a vypouští 761 g CO<sub>2</sub>. Konstruktoři parních turbín však mají za cíl do roku 2015 postavit elektrárnu s účinností 50 %. Takováto elektrárna by spotřebovala pouze 288g uhlí na 1 kWh a emitovala by 669 g CO<sub>2</sub>. Avšak parametry páry pro tento případ by dosahovaly hodnot přes 700 °C a 35 MPa. Vysoké parametry páry vyžadují vývoj nových konstrukčních materiálů, které těmto podmínkám odolávají a jsou schopny v nich pracovat.

Vývoj se zaměřuje na varianty vycházející z legované oceli P91. Mezi takovéto materiály patří 9% chromová ocel s označením P92, Nf616, P93 a pro teploty nad 700 °C slitiny na bázi niklu (rafinovaná směs z vysoce pevných kovů, jako jsou nikl a chrom s trochou železa). Mezi tyto materiály patří Alloy 740 označovaná jako Inconel s maximálním teplotním limitem 770 °C. Tyto materiály stojí 5 – 10krát víc než chromová ocel, jež se používá dnes. Z důvodu vysokých nákladů by se niklové slitiny využili pouze na nejvíce namáhané součásti v oblasti s nejvyšší teplotou.

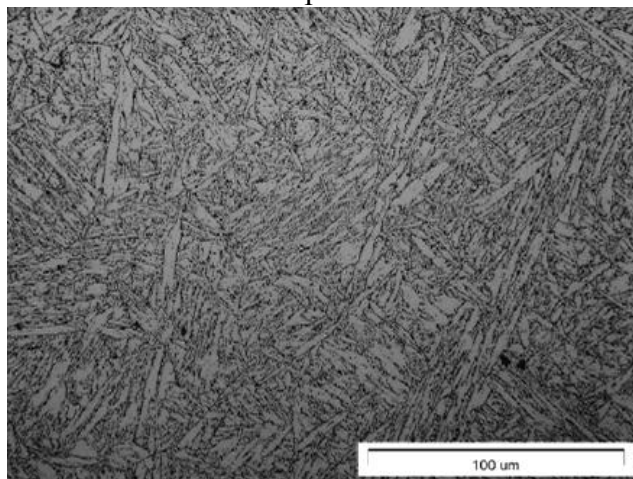
Nicméně před zavedením těchto nových ocelí do průmyslového využití je nutné provést mnoho dlouhodobých zkoušek, které by potvrdily možnost užití za vyšších teplot. Zkoušky jsou prováděny ve zrychlovači – zařízení modelující zrychleně procesy tečení a tepelné degradace materiálového vzorku.

Tabulka 9. Vývoj parametrů tlaků a teploty páry

Lokalita	Japonsko	USA	Evropa
Dnes	605°C-613°C 25 MPa	593°C 27MPa	600°C-605°C 28 - 30MPa
Nejbližší budoucnost	630°C 25MPa	620°C-650°C 28MPa	600-625°C 28 - 30MPa
Cíl 2014/15	~700°C 35MPa	760°C 35MPa	700-720°C 35MPa

### Ocel P92 (ASTM A335 P92, X10CrWMoVNB 9 - 2)

- feriticko martenzitická ocel s 9 % Cr navržena pro využití v energetických zařízeních s nadkritickými parametry páry. Jde o modifikaci starší konstrukční oceli označené jako P91 (ASTM A335 P91, X10CrMoVNB 9 - 1), oproti které je ocel P92 legována wolframem (1,5 – 2,0 hm. %) a niobem (0,04 – 0,09 hm. %) pro zvýšení creepové odolnosti. Mikrostruktura oceli P92 po výchozím tepelném zpracování je tvořena popouštěným martenzitem s tvrdostí přibližně 230 HV10 – viz *obr. 13*.



Obr. 13 Mikrostruktura výchozího stavu oceli P92 tvořená popuštěným martenzitem [XI]

Tabulka 10. Chemické složení oceli P92 v %

Materiál	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	B	W	Fe
Ocel P92	~0,1	~0,6	~0,3	~0,177	~0,006	~9,5	~0,2	~0,5	~0,18	~0,59	~0,41	~1,9	Bal.

### Inconel

- Inconel je obchodní název pro slitiny na bázi Ni-Cr-Co + přísady Al, Ti popřípadě Mo, W, Nb. Tyto slitiny jsou výrazně žáruvzdornější než železné slitiny. Slitiny Inconel jsou charakteristické pro svoji vysokou pevnost, korozivzdornost a mohou být použity ve velkém rozsahu teplot. Díky širokému teplotnímu rozsahu mají slitiny Inconel velký rozsah využití, např. pro výrobu nádrží raket na tuhá paliva, pro komponenty parních a plynových turbín a dají se využít i pro kryogenní aplikace. V energetickém průmyslu se používají například šrouby z tohoto materiálu, které spojují skříň turbíny. V tabulce 11. je příklad složení Inconelu 740, který je určen pro použití v energetickém průmyslu.

Tabulka 11. Chemické složení slitiny Inconel 740 v %

Materiál	C	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Nb	Mn	Fe	Si	Mo
Inconel 740	~0,03	Bal.	~25,0	~0,5	~20,0	~0,9	~1,8	~2,0	~0,30	~0,7	~0,5

## 3. NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY PRO ENERGETICKÝ PRŮMYSL

### 3. 1. Požadované vlastnosti řezných materiálů

Zpracováno dle [4], [14], [15] a [16]

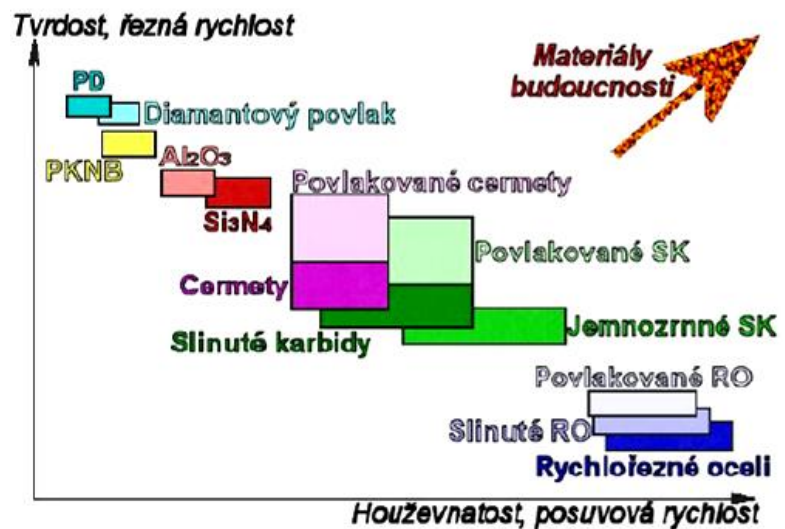
Volba řezného materiálu je závislá na vlastnostech materiálu obrobku, na předpokládaném zatížení při obrábění, požadované produktivitě a také ekonomice procesu obrábění.

Nástroj řeze kov, protože je relativně ostřejší a tvrdší než obrobek. Ale současná situace v oblasti vysoké produktivity je mnohem komplexnější. Nástroj vhodný pro jednu operaci obrábění, musí mít proto vhodnou kombinaci geometrie břitu a řezného materiálu.

Základní obecné požadované vlastnosti pro řezné materiály jsou tyto:

- tvrdost (vyšší tvrdost alespoň o 5 až 6 HRC než obráběný materiál při teplotách řezání)
- houževnatost
- pevnost v tlaku a ohybu
- tepelná vodivost
- součinitel tření
- chemická stálost

Obrobitelnost  
korozivzdorné oceli se zásadně liší od obrobitelnosti většiny konstrukčních materiálů. Všeobecně platí: čím vyšší je podíl legujících prvků v korozivzdorné oceli, o to náročnější a nákladnější je obrábění.



Obr. 14 Vlastnosti řezných materiálů[16]

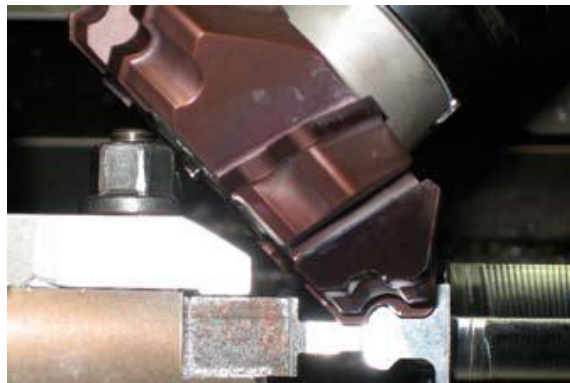
Pro obrábění žáruvzdorných materiálů, korozivzdorných ocelí se využívají zejména tyto řezné materiály:

- Rychlořezná ocel (HSS)
- Slinuté karbidy
- Cermety

### 3.1.1. Rychlořezná ocel – HSS

Rychlořezná ocel je slitinová ocel s 0,65 až 1,45 % uhlíku, s vysokým obsahem chromu a wolframu. Nástroje z rychlořezných ocelí jsou v určitých oblastech obrábění stále nezastupitelné. Největší výhodou HSS je vysoká houževnatost oproti ostatním řezným materiálům. Ke zvýšení trvanlivosti nástrojů v řezu značně přispívá deponace tenkých vrstev. Pro nástrojové oceli se používá metoda nanášení vrstev PVD a nanášené vrstvy jsou nejčastěji TiN, TiC, TiCN, TiAlN.

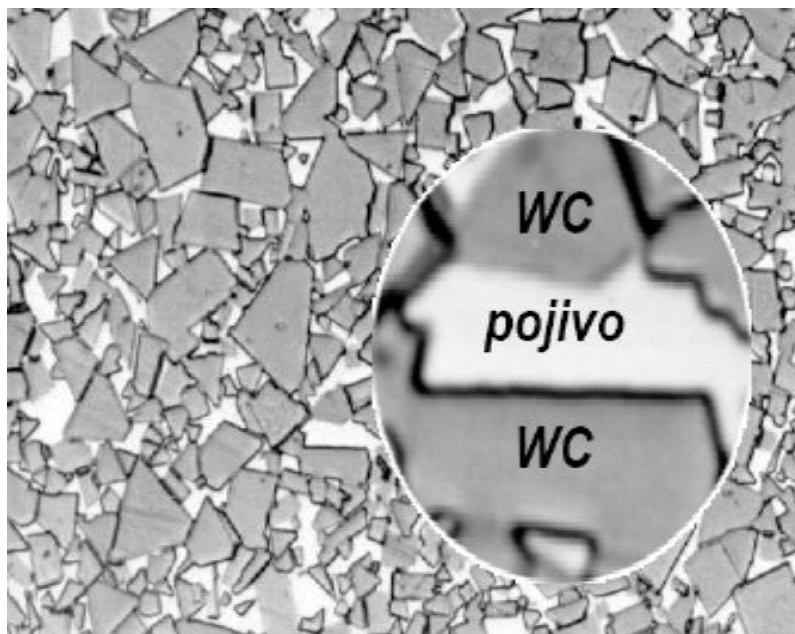
V energetickém průmyslu se často používají celistvé nástroje z HSS, které mohou být opatřeny povlaky pro zvýšení trvanlivosti a zlepšení třecích vlastností. Rychlořezná ocel je používána například na tvarové frézy pro výrobu zámek lopatek turbíny.



Obr. 15 Frézování závěsu lopatky [XIV]

### 3.1.2. Slinuté karbidy

Slinutý karbid je řezným materiálem, který je produktem práškové metalurgie a je vyroben z různých karbidů a kovového pojiva. Mezi nejdůležitější karbidy patří karbid wolframu (WC), karbid titanu (TiC), karbid tantalů (TaC) karbid niobu (NbC). Jako pojivo se téměř vždy využívá kobalt (Co). Velikost tvrdých částic se pohybuje kolem 1 až 10  $\mu\text{m}$  a jejich množství tvoří 80 – 95 % celkového objemu řezného materiálu.



Obr. 16 Struktura slinutého karbidu[16]

Vlastnosti SK značně kolísají, pokud se jedná o tvrdost a houževnatost. Hlavními rozdíly u druhů používaných obvykle pro výrobu vyměnitelných destiček jsou:

- typ a velikost tvrdých částic
- druh kovového pojiva a jeho podíl
- výrobní technologie a kvalita výroby

Velká zrna způsobují houževnatost SK, zatímco zrna malá udělují slinutému karbidu relativně vysokou tvrdost.

Při porovnání s ocelí je slinutý karbid podstatně tvrdší a má mnohem vyšší pevnost v tlaku, je ovšem citlivější na namáhání tahem.

Pro obrábění korozivzdorných ocelí a žáruvzdorných materiálů podle klasifikace ISO slinutých karbidů je určena skupina M (žlutá). Přesnější informace o určitém řezném materiálu udávají jednotliví výrobci.

V každé skupině jsou uvedena čísla, která udávají různé požadavky na obrábění.

M10: Soustružení - střední až vysoké řezné rychlosti, malé až střední průřezy třísek.

M20: Soustružení, frézování - střední řezné rychlosti, střední průřezy třísek.

M30: Soustružení, frézování, čelní soustružení při středních řezných rychlostech - střední až velký průřez třísky.

M40: soustružení, soustružení tvarů, upichování, zejména na automatických strojích

P	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 legované oceli tříd 13, 14, 15, 16 nástrojové oceli uhlíkové (191..., 192..., 193...) nástrojové oceli legované (193... až 198...) uhlíková ocelolitina skupiny 26 (4226...) nízko a středně legované ocelolity skupiny 27 (4227...) feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (třídy 17..., lité 4229...)
M	austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné
K	šedá litina nelegovaná i legovaná (4224...) tvárná litina(4223...) temperovaná litina (4225...)
N	neželezné kovy, slitiny Al a Cu
S	speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	zvyšované oceli s pevností nad 1500 Mpa kalené oceli 48 až 60 HRC tvrzené kokilové slitiny 55 až 85 HSh

Obr. 17 Klasifikace SK [XII]

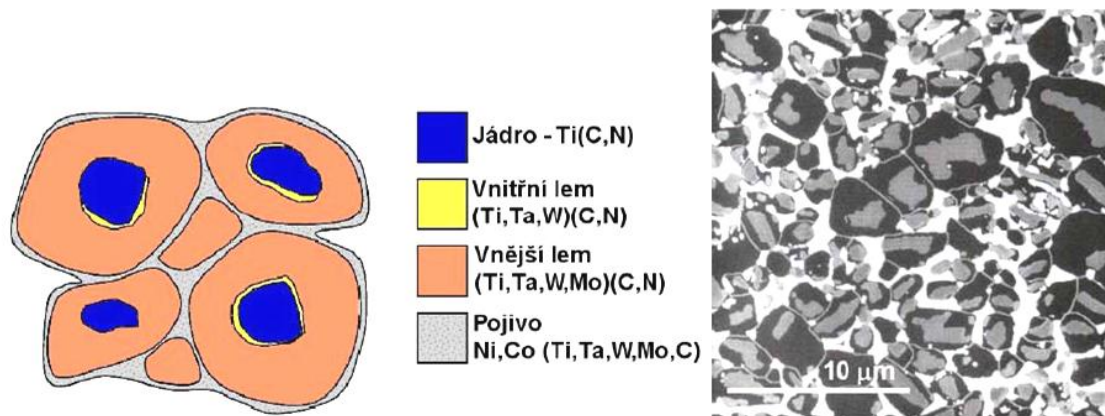
Povlaky SK: karbid titanu TiC (šedý), nitrid titanu TiN (zlatý), oxid hlinitý Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (černý), karbonitrid titanu TiCN.

Tloušťka vrstvy: podle zvolené technologie povlakování (PVD, CVD), obecně 5 -15 μm.



### 3.1.3. Cermety

Cermet je společný název pro všechny tvrdé kovokeramické materiály, u nichž jsou tvrdé složky tvořeny karbidem titanu (TiC), karbonitridem titanu (TiCN) nebo nitridem titanu (TiN). Zkratka cermet vznikla ze slov CERAmic-METal a znamená, že řezný materiál má keramické částice s kovovým pojivem. Mechanické vlastnosti cermetů vykazují výhodnou kombinaci tvrdosti řezné keramiky a houževnatosti kovu. Výroba je prováděna podobně jako u slinutých karbidů, jedná se tedy o práškovou metalurgii.



Obr. 18 Složky a struktura cermetu[16]

Cermety jsou vhodné pro vysoce náročné operace a dají se výhodně použít při obrábění (soustružení, frézování) korozivzdorných ocelí.

#### Vlastnosti cermetů

- Vysoká odolnost proti opotřebení hřbetu a opotřebení ve tvaru žlábků na čele
- Vysoká chemická stabilita a tvrdost za tepla
- Malý sklon k vytváření nárůstku
- Malý sklon k oxidačnímu opotřebení



Obr. 19 Cermetové VBD [XIII]

## 4. METODY OBRÁBĚNÍ V ENERGETICKÉM PRŮMYSLU

### 4. 1. Klasické technologie obrábění v energetickém průmyslu

Zpracováno dle: [12], [14], [17]

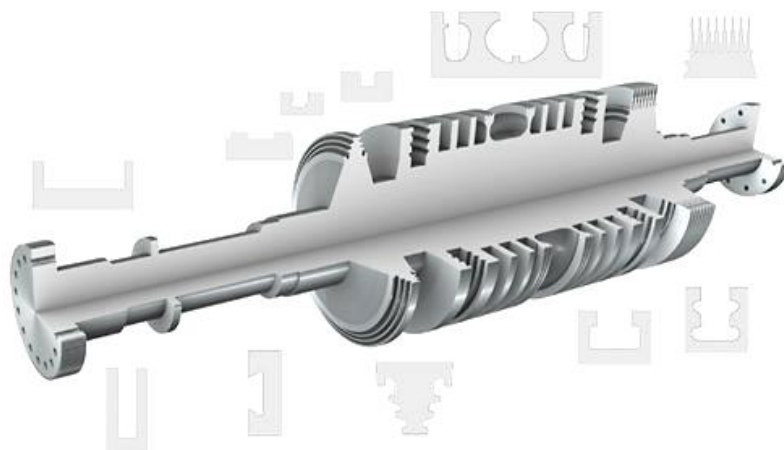
V energetickém průmyslu se při výrobě parní turbíny využívají technologie obrábění jak klasického rázu tak i speciální, které jsou přímo určené pro jednotlivé operace. V energetickém průmyslu se vyskytují obrobky od relativně malých částí až po obrovské díly (skříň turbíny), které vyžadují velké obráběcí stroje. Základní používané technologie obrábění jsou tyto:

- Soustružení (kapitola 4.1.1.)
- Frézování (kapitola 4.1.2.)
- Protahování (kapitola 4.1.3.)
- Vrtání (kapitola 4.1.4.)
- Vyvrtávání (kapitola 4.1.5.)
- Broušení (kapitola 4.1.6.)
- Leštění (kapitola 4.1.7.)

#### 4.1.1. Soustružení

Jedná se o technologii třískového obrábění, sloužící především k výrobě vnitřních či vnějších rotačních ploch. Při soustružení se obrábí na soustruhu pomocí jednobřitého nástroje, který se nazývá soustružnický nůž. Na soustruhu je však možné provádět i další operace, jako je například vrtání děr či řezání závitů. Základní kinematický pohyb je rotace obrobku. Nástroj (soustružnický nůž) koná další pohyby – posuv a přísuv.

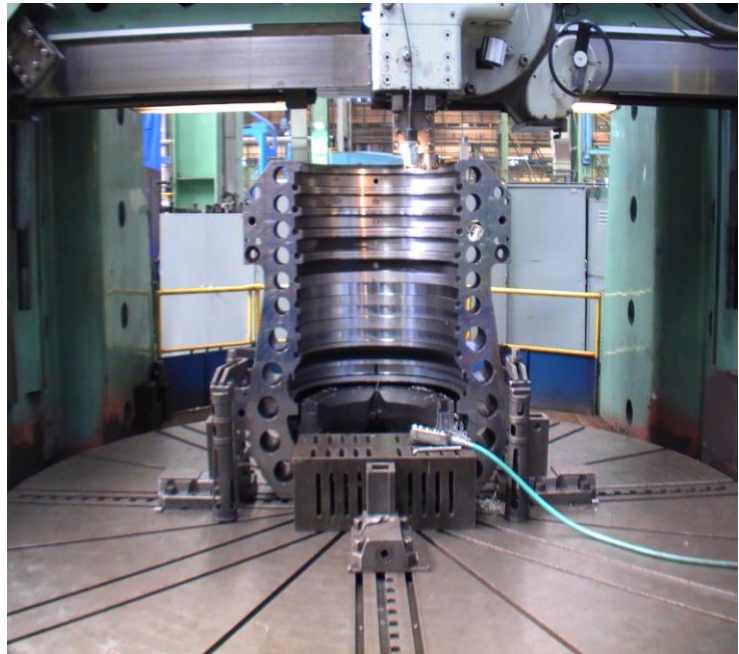
V energetickém průmyslu se využívají k soustružení stroje jak s vodorovnou osou rotace obrobku, tak se svislou osou rotace obrobku. Soustruhy se svislou osou rotace se nazývají karusely. Technologie obrábění soustružením je například použita při výrobě rotoru parní turbíny, kde nejnáročnější jsou drážkovací operace.



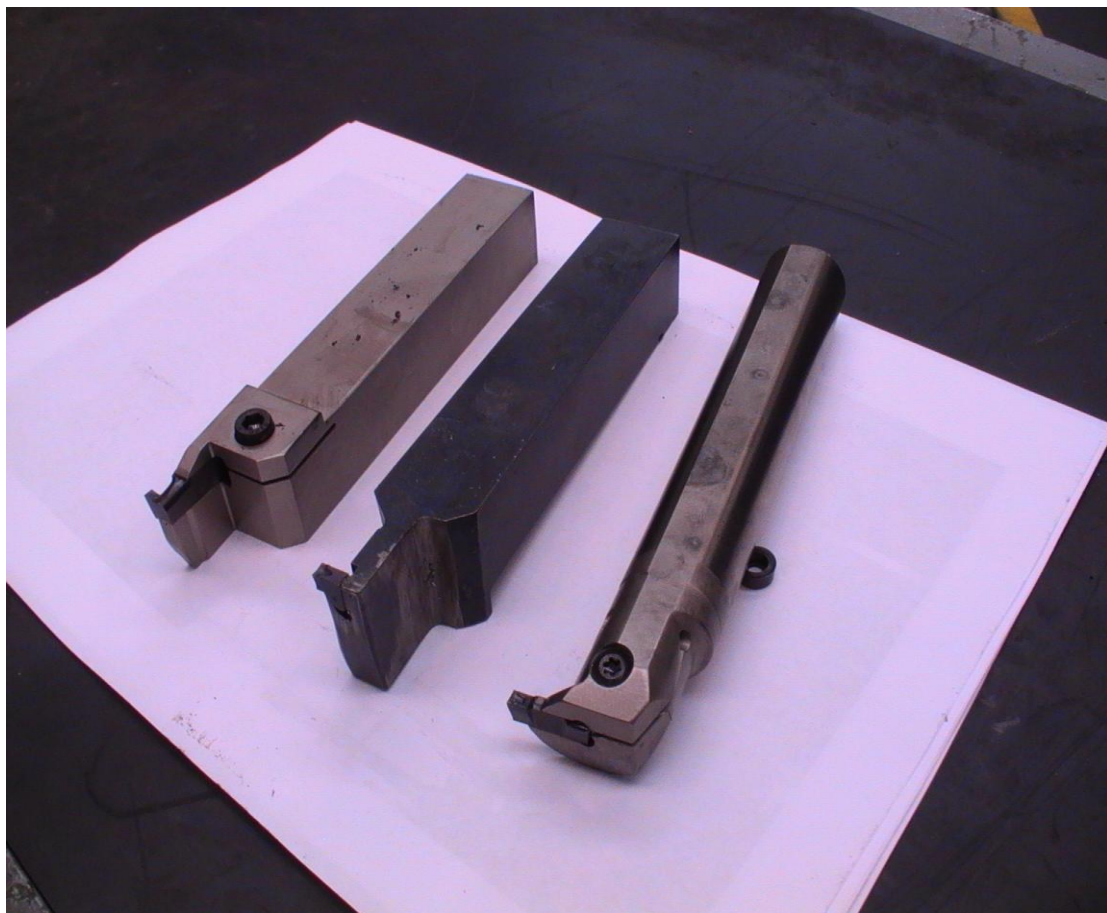
Obr. 20 Rotor parní turbíny s jednotlivými možnými drážkami [IV]



Technologie soustružení se významně využívá nejenom v oblasti výroby nových komponentů, ale také v oblasti opravárenství parních turbín, jak je možné vidět na *obr. 21*. Zde je zachycena rekonstrukce drážek skříňě turbíny prováděná na karuselu. Nástroje používané pro výrobu a rekonstrukci drážek jsou na *obr. 22*. Tyto nástroje jsou nasazeny ve výrobě společnosti Škoda Power s.r.o. a jedná se o zapichovací nože s klasickým upínáním v nožové hlavě za tělo nože.



*Obr. 21 Oprava drážek tělesa na karuselu [12]*



*Obr. 22 Nástroje pro výrobu drážek [12]*

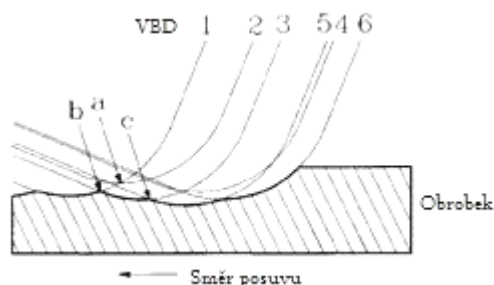
#### 4.1.2. Frézování

Frézování je produktivní technologie třískového obrábění často používaná k výrobě vnějších a vnitřních rovinných ploch, obecných zakřivených ploch včetně rotačních. K odebrání materiálu slouží u frézování několikabřítý nástroj zvaný fréza a technologie je prováděna na frézce (stroj). Základní kinematický pohyb koná nástroj a jedná se o pohyb rotační. Obvykle další pohyby (přímočaré - posuv, přísvuv) vykonává obrobek. Řezný proces je přerušovaný, každý zub nástroje odebrá samostatnou třísku proměnné tloušťky.

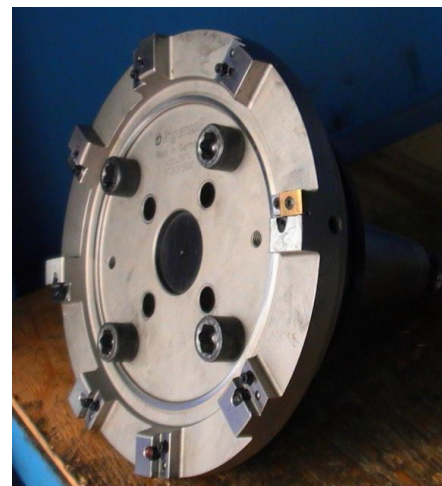
Při výrobě parní turbíny se podle složitosti tvaru obráběné součásti volí technologie 3 – osého frézování pro tvarově jednodušší součásti nebo 4 a více osého frézování pro tvarově náročné součásti.

Ve společnosti Škoda Power s.r.o. využívají 3 - osého frézování například k obrábění dělicích rovin těles parních turbín. Technologie je prováděna na CNC horizontální frézce HCW – 3.

Jednotlivá tělesa parních turbín se skládají ze dvou podélně rozdělených částí. V dělicí rovině parních turbín se nepoužívá žádné těsnění a dochází tedy u těles ke styku kov na kov. Z toho důvodu je požadováno od obrobených ploch dělicí roviny vysoké přesnosti z důvodu parotěsnosti v provozu. Proto je použita frézovací hlava osazena pouze jednou VBD (*Obr. 24.*) z důvodu nepřesnosti v uložení jednotlivých destiček. Nepřesnost v uložení VBD by způsobila nevhodnou stopu viz *Obr. 23.*



Obr. 23 Vliv uložení VBD na kvalitu povrchu [XXIV]



Obr. 24 Frézovací hlava Ingersoll [12]



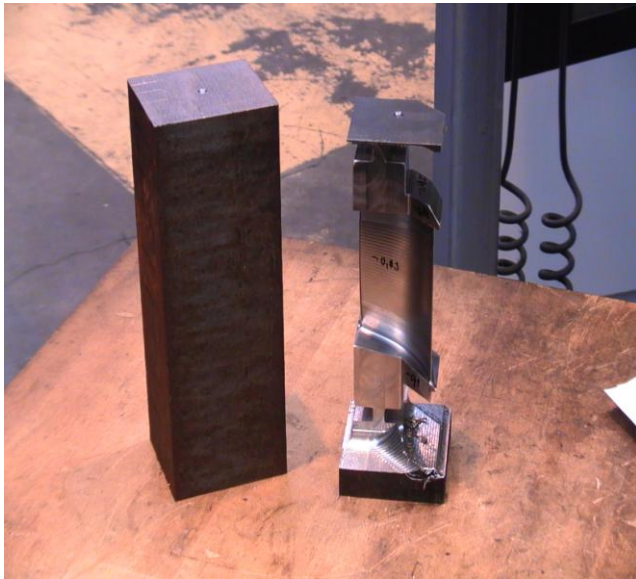
Obr. 25 Frézování nízkotlakého tělesa [12]



Obr. 26 Středotlaké těleso parní turbíny [IV]



Dalšími frézovanými komponentami parní turbíny jsou lopatky a to jak oběžné tak rozváděcí. Menší (vysokotlaké) lopatky se vyrábí z vhodných tyčových materiálů viz **obr. 27**. Polotovary pro frézování lopatek nízkotlakého dílu parní turbíny jsou výkovek viz **obr. 28**.

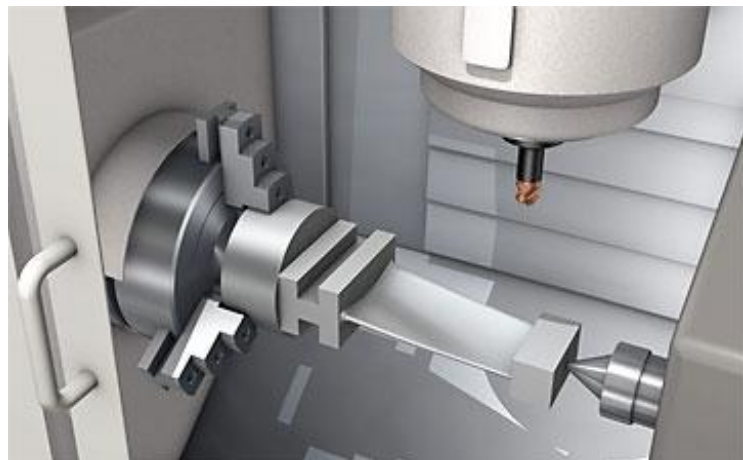


Obr. 27 Polotovar pro výrobu lopatky [12]



Obr. 28 Polotovar lopatky – výkovek [12]

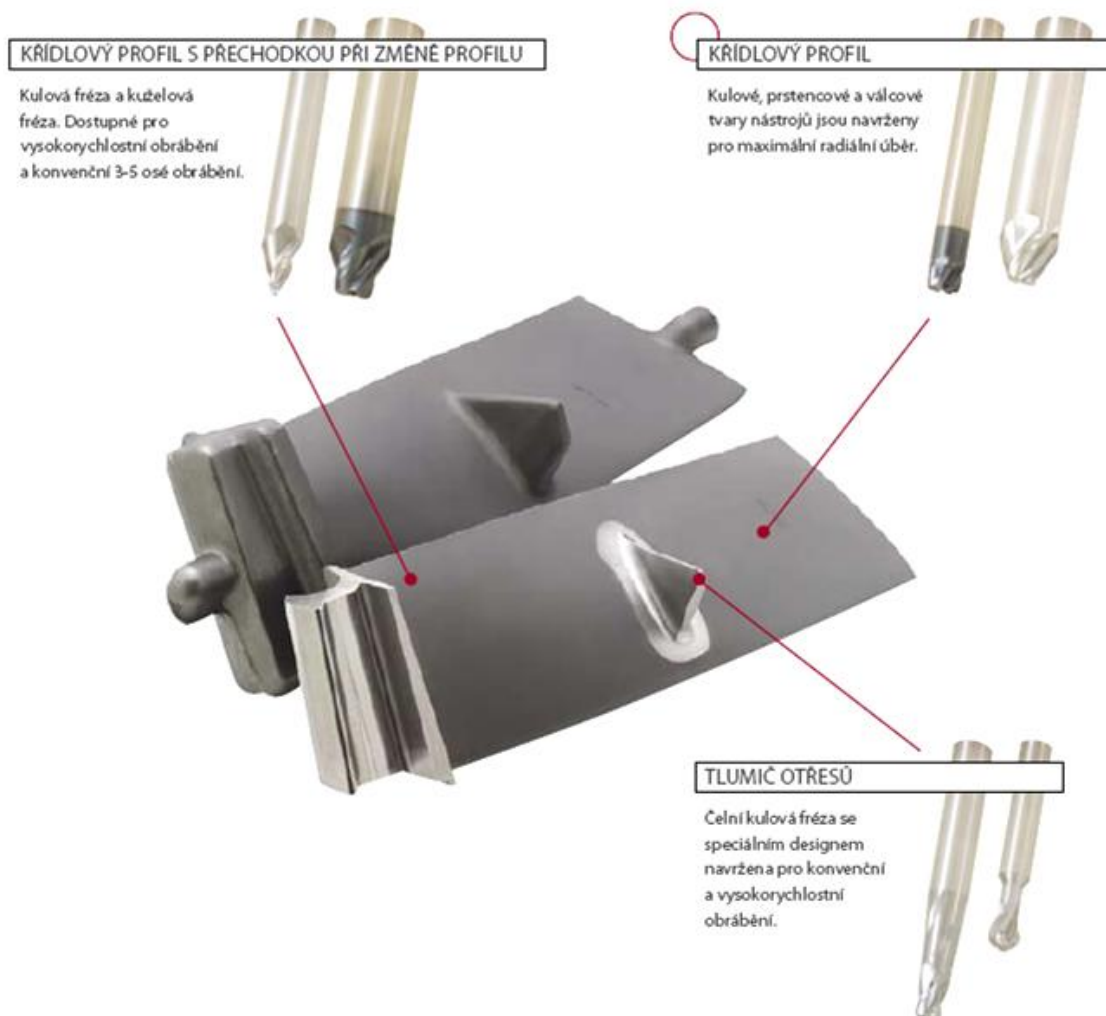
V současnosti se složitý křídlový tvar lopatky frézuje pomocí moderních 5 – osých frézovacích center. 5 - osé řízení umožňuje řídit tři navzájem kolmé osy X, Y, Z a naklonění nástroje kolem dvou rotačních os nebo místo naklonění nástroje je nainstalován rotační stůl se dvěma otočnými osami manipulující s obrobkem.



Obr. 29 5 – osé frézování lopatky [XV]

Pro tyto operace vyvíjejí výrobci nástrojů speciální optimalizované nástroje přímo určené pro jednotlivé operace. Jako příklad je uvedena optimalizovaná řada nástrojů od společnosti UNIMERCO. Nové karbidové nástroje nahrazující nástroje z HSS díky delší životnosti a výrazně vyšší rychlosti obrábění podstatně snižují náklady na výrobu lopatek parní turbíny.

Optimalizované nástroje od společnosti UNIMERCO pro výrobu lopatek parní turbíny [3]



### Karbidová kuželová čelní fréza

Tato dokončovací fréza se čtyřmi zuby slouží k frézování závěsů turbínových lopatek. Řezná rychlost  $v_c = 50$  m/min a posuv na zub  $f_z = 0,075$  mm. Řezná část je opatřena povlakem s označením C7 PLUS. Jedná se o gradientní, nanokompozitní povlak černé barvy vhodný pro obrábění s minimálním množstvím chladicí kapaliny. Povlak odolává teplotám až  $t = 1100$  °C a dosahuje tvrdosti 45 GPa. Tloušťka povlaku  $2,5 \pm 0,5$   $\mu\text{m}$ .



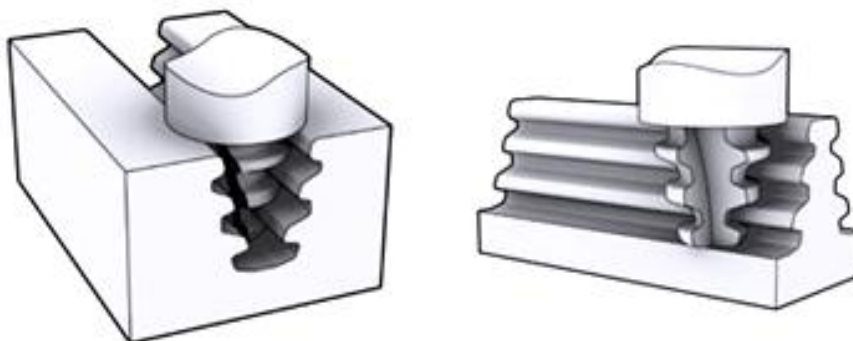
U oběžných lopatek se ve společnosti Škoda Power s.r.o. nejdříve vyfrézuje závěs (nožka) lopatky a až poté následuje frézování křídlového profilu, viz *obr. 30*.



*Obr. 30 Postup výroby oběžné lopatky [12]*

Aby bylo možné lopatky upevnit k rotoru pomocí závěsů, musí se aplikovat technologie frézování i na rotor, kde se touto metodou vyrobí drážky závěsů. Drážky závěsů jsou místem pro upevnění lopatek v rotoru. U monolitních rotorů patří tato operace mezi nejvíc časově náročné.

S nárůstem celosvětové spotřeby energie se zvyšuje i požadavek na výrobce turbín vyrábět více zařízení. Velká pozornost je proto věnována i snížení časů výroby rotorů parních turbín a drážek pro uchycení lopatek. Časových úspor a snížení nákladů se dosahuje náhradou HSS tvarových nástrojů za nové nástroje s destičkami a monolitní karbidové nástroje. Nové nástroje mají větší trvanlivost a umožňují produktivnější obrábění. Těmito optimalizacemi nástrojů pro energetický průmysl se zabývají např. společnosti Sandvik Coromant, SECO a UNIMERCO.



*Obr. 31 a) Vnitřní frézování (drážka v rotoru)*

*b) Vnější frézování (závěs lopatky) [XVI]*



### Příklady sad monolitních karbidových nástrojů

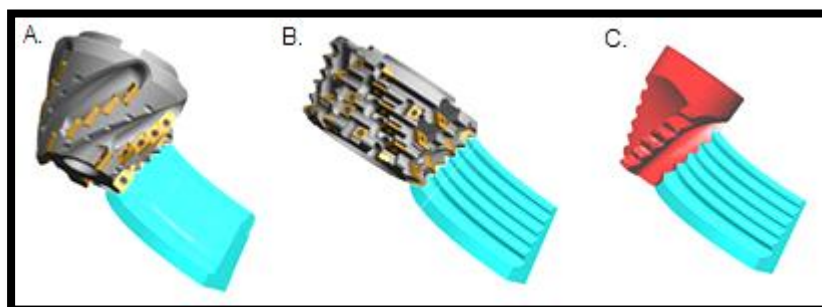
Na **obr. 32** je znázorněna po krocích výroba přímé drážky do rotoru parní turbíny. První dva nástroje vyhrubují drážku a další 3 nástroje postupně dosáhnou finálního tvaru drážky. Nástrojové řešení společnosti SECO.



Obr. 32 Výroba drážky – společnost SECO [XVI]

### Příklad sady nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami a monolitního karbidového

Na **obr. 33** je znázorněno vnější obrábění zahnutého závěsu lopatky. První nástroj je hrubovací fréza s VBD, která vytvoří výchozí tvar. Druhý nástroj je polodokončovací a tvar je dokončen monolitní karbidovou tvarovou frézou. Nástrojové řešení společnosti SECO.



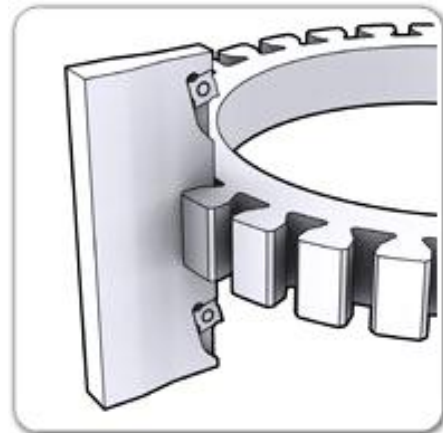
Obr. 33 A. hrubování, B. polodokončování, C. dokončování monolitní karbidovou frézou[XVI]

### 4.1.3. Protahování

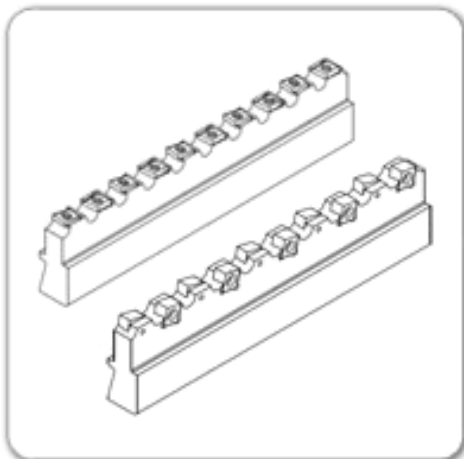
Velmi produktivní a přesná metoda obrábění rovinných nebo přímkových zakřivených ploch. Nevýhodou je velmi drahý nástroj – protahovací trn. Základní řezný pohyb je přímočarý a obvykle jej vykonává nástroj. Posuv (přisuv) je dán konstrukcí nástroje (postupným zvyšováním zubů). Nástroj je vícebřitý, kdy má břit tvar profilu protahovaného otvoru. Jeden nástroj slouží pro hrubovací, polodokončovací a dokončovací operace. Nejjednodušší protahovací nástroj se svým tvarem podobá hrubému pilníku. Je to mírně se zužující plochá tyč opatřená řadami zubů ve směru podélné osy nástroje. Vysoce vyvinuté nástroje mají velmi složitě řešenou konstrukci tvaru a zubové části nástroje. Je však zachován základní axiální, vícezubý tvar nástroje.

V energetickém průmyslu se dají protahovat drážky lopatkových závěsů u skládaných rotorů, kde jsou rotory složeny z jednotlivých oběžných kol.

Dříve se protahovací trny vyráběly pouze z HSS. Tyto nástroje měly omezenou životnost danou počtem ostření – ztráta rozměru trnu. V současnosti je trendem pro hromadnou výrobu použití protahovacích trnů s vyměnitelnými karbidovými destičkami, u kterých je dosahováno až pětinasobně vyšší řezné rychlosti v porovnání s nástroji z HSS. Tyto nástroje umožňují velkou úsporu nákladů.



Obr. 34 Protahování drážky závěsu[XVII]



Obr. 35 Příklady protahovacích segmentů[XVI]



Obr. 36 Použití protahovacích trnů [XVI]

#### 4.1.4. Vrtání

Vrtání je technologie obrábění sloužící k výrobě vnitřních rotačních válcových, kuželových a tvarových ploch. Pojem vrtání také zahrnuje další způsoby obrábění, jako vystružování, vyhrubování a zahlubování. Společné pro tyto operace je rotační pohyb nástroje (případně obrobku) se současným přímočarým pohybem. Vyhrubování a vystružování slouží k dosahování vyšších kvalitativních parametrů a zahlubování slouží k úpravě tvaru otvoru. Z technologického hlediska rozeznáváme vrtání normálních otvorů a vrtání hlubokých otvorů. Hluboké otvory označujeme ty s poměrem  $l/d = 10/1$ , kde  $l$  je délka otvoru a  $d$  je průměr vrtané díry.

Vrtací nástroje můžeme rozdělit právě na nástroje na výrobu normálních otvorů a na nástroje k výrobě dlouhých otvorů. Zvláště u nástrojů na vrtání hlubokých otvorů je požadován přívod řezné kapaliny k ostří nástroje, aby bylo možné plynule odvádět třísky z vrtaného otvoru. Pro vrtání krátkých otvorů je typickým nástrojem šroubovité vrták.

Vrtací operace jsou při výrobě parní turbíny velmi časté. Prováděné vrtání je jak klasické se svislou osou rotace tak vrtání horizontální, které je popsáno níže, jako speciální technologie obrábění viz kapitola 4.2.1.

Velké množství vyráběných otvorů je na skříni parní turbíny. Na **obr. 37** jsou vidět otvory vyvrtané v dělicí rovině. Při konečné montáži obou částí skříně do otvorů přijdou šrouby, které jsou duté. Do dutiny šroubu se vloží termočlánek a po zahřátí šroubu se zajistí maticí. Posléze, když materiál šroubu zchladne, šroub se smrští a vytvoří předpětí.



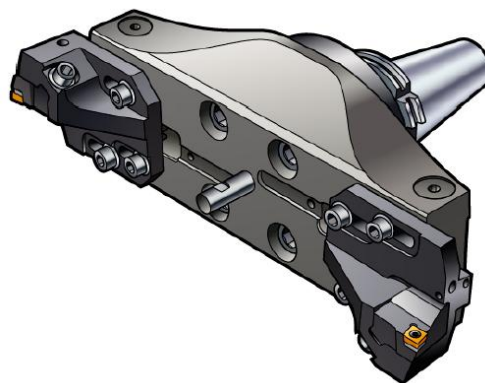
*Obr. 37 Vrtané otvory v dělicí rovině skříně parní turbíny [12]*



#### 4.1.5. Vyvrtávání

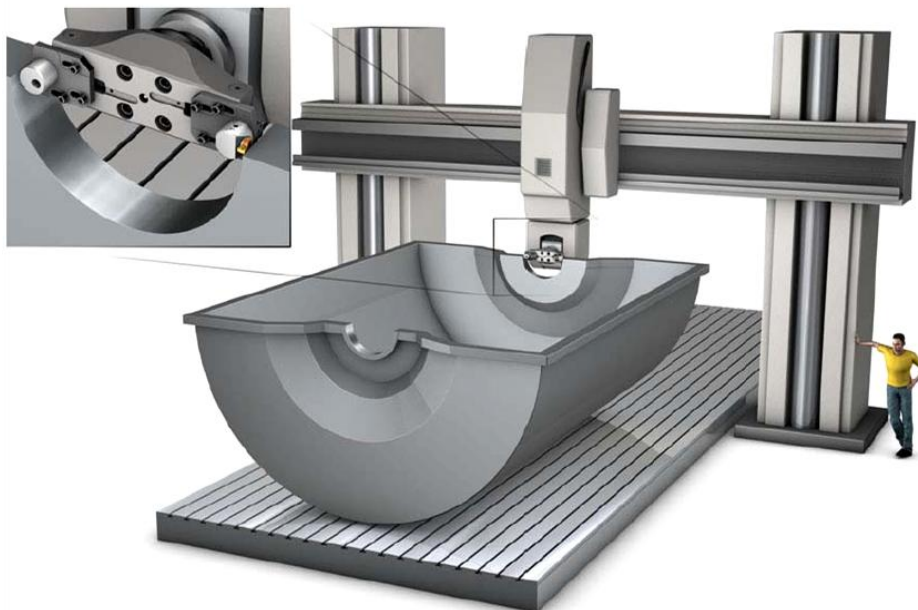
Vyvrtávání je technologie určená k výrobě přesných válcových, kuželových a tvarových ploch. Hrubý otvor je v obrobku předem vyroben. Výhodou této technologie je její produktivita vycházející z velkých úběrů, jednoduchý nástroj a dosahovaná vysoká kvalita vývrtní. Jak geometrická, tak rozměrová. Základní řezný pohyb při vyvrtávání je rotační a koná jej nástroj.

Nejjednodušší nástroje pro vyvrtávání jsou vyvrtávací nože (podobné soustružnickým nožům), které se upínají do vyvrtávacích tyčí různými způsoby a pro větší průměry se používají vyvrtávací hlavy, viz **obr. 38**. Stroje se nazývají vyvrtávačky a ty jsou děleny podle provedení na stolové (pro menší součásti – vedlejší pohyby koná pracovní stůl) a deskové vyvrtávačky (pro velké obrobky). Deskové vyvrtávačky nemají pracovní stůl, obrobek je upínán na nepohyblivou upínací desku.



Obr. 38 Vyvrtávací hlava [XXIII]

V energetickém průmyslu při výrobě kondenzačních turbín nachází technologie vyvrtávání svojí aplikaci například při výrobě a dokončování otvorů, které byly při výrobě skříně turbíny předlity. Viz **obr. 39**, kde je vyobrazeno portálové obráběcí centrum, na kterém je obráběna skříň parní turbíny.



Obr. 39 Aplikace vyvrtávání při výrobě skříně parní turbíny [XXIII]

#### 4.1.6. Broušení

Broušení je technologie pro obrábění obvykle tvrdších materiálů, které nelze obrábět jinými nástroji s klasickými řeznými materiály. Často se broušení využívá jako dokončovací operace z důvodu vysoké přesnosti a dosahované kvality obrobeného povrchu. Broušení je technologie obráběním mnohabřitým nástrojem. Břity jsou zde zrna brusiva, která jsou rozmístěna nepravidelně po povrchu brousícího kotouče. Hlavní řezný pohyb koná nástroj, další pohyby koná obrobek. Velikost odebírané třísky je u této technologie výrazně nižší než u výše popisovaných technologií obrábění.

Brousící nástroj je tvořen zrna brusiva, která jsou pojivem spojena v tuhé těleso s určitým tvarem, tvrdostí a strukturou nebo se v určitých případech používají volná zrna brusiva ve formě brusných pasta a prášků.

Umělý korund je nejvíce využívaným brousícím materiálem a je vhodný pro broušení ocelí, které se využívají v energetickém průmyslu. Jsou různé druhy umělého korundu. Hnědý korund získaný tavením bauxitu v obloukových pecích se označuje A 96 (obsahuje cca 96 %  $Al_2O_3$ ) a černý korund A 85 (obsahuje cca 85 %  $Al_2O_3$ ). Tavením čistého kysličníku hlinitého se získává bílý korund A 99 a přidáním kysličníku chromu do tavby bílého korundu se dostává korund růžový A 98. Zrna růžového korundu se vyznačují vyšší houževnatostí, než mají zrna bílého korundu.

V dnešní době je technologie broušení nahrazována přesným soustružením nebo frézováním. Těmito metodami je možno dosáhnout až hodnot drsností, které jsou až na hranici broušení a přitom je dosaženo daleko větší produktivity výroby. Avšak jsou stále operace, kde je použití broušení nejvhodnější volbou. Viz níže kapitola 4.2.2.

#### 4.1.7. Leštění

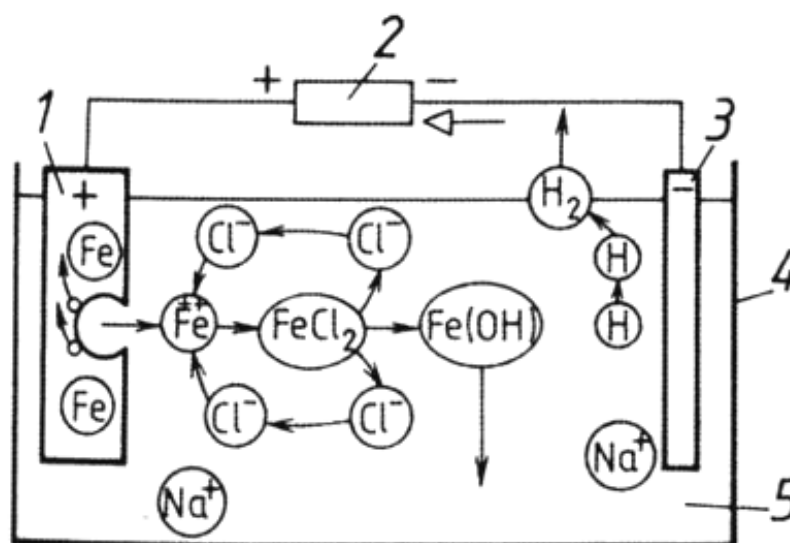
Jedná se o dokončovací metodu obrábění, při které nedochází ke změně rozměrové ani geometrické přesnosti obrobku. Dochází pouze ke změně mikrodrsnosti a vzhledu. Nejčastěji se součásti leští textilními nebo plstěnými kotouči. U součástí s vyšší drsností používají se plstěné kotouče, které mají na obvodu nalepená malá zrna brusiva nebo se využívají leštící pasty.

Tato technologie se využívá v energetickém průmyslu pro dokončování listu lopatky. Metodu lze provádět ručně, ale některé firmy již metodu dokázaly robotizovat.



*Obr. 40 Leštění oběžné lopatky robotem [XVIII]*

Finální povrchové úpravy lze také docílit pomocí metody elektrochemického obrábění (ECM). ECM je obrábění elektricky vodivých a zároveň elektricky rozpustných materiálů, při kterém dochází k současnému působení elektrického proudu a elektrolytu dochází k místnímu rozpouštění materiálu obrobku a tím k úběru materiálu na povrchu obráběné součásti. Technologie je určena zejména pro těžko obrobitelné materiály, kde dosahuje větší produktivity než například u broušení.



Obr. 41 Princip elektrochemického obrábění  
1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda),  
4 – pracovní vana, 5 – elektrolyt [XIX]

Podle dostupných informací se tato technologie v současnosti využívá spíše v leteckém průmyslu, kde se elektrochemicky obrábí menší lopatky z obtížně obrobitelných materiálů a v automobilovém průmyslu například pro části turbodmychadla. V energetickém průmyslu má využití spíše elektrochemické leštění, které je jednou z metod ECM. Elektrochemické leštění může být aplikováno na lopatky parní turbíny.

Elektrochemické leštění funguje na principu, že na vrcholcích mikronerovností je vyšší proudová hustota než v prohlubeninách dochází tam k většímu úběru materiálu. Nerovnosti se postupně vyrovnávají a vzniká hladký a lesklý povrch.

Zvyšování účinností parních turbín a přechodem na nové hůře obrobitelné materiály, které jsou však schopny plnit svou funkci v náročnějším prostředí, může být metoda elektrochemického obrábění vhodným řešením například pro obrábění nejvíce namáhaných vysokotlakých lopatek.

## 4.2. Speciální technologie

Popisované speciální technologie jsou nasazeny ve výrobě parních turbín ve společnosti Škoda Power s.r.o.

### 4.2.1. Svrtávání rotorů

Jedná se o unikátní technologii horizontálního vrtání, vyhrubování a vystružování, která slouží k přípravě otvorů pro kolíky. Pomocí kolíků se uchycují oběžné lopatky s vidličkovým závěsem do rotoru parní turbíny.



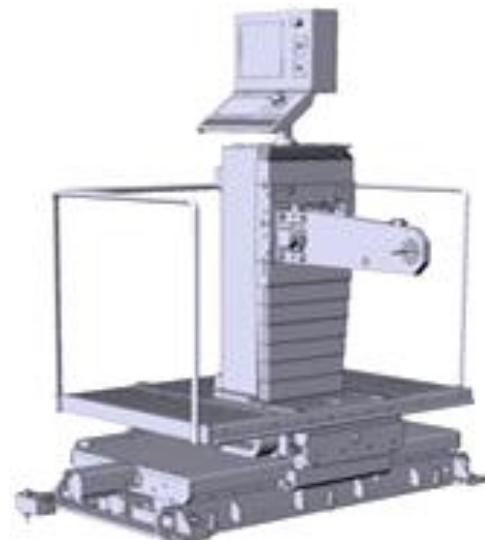
Obr. 42 Vidličkový závěs [XX]

### Obráběcí stroje

Ve společnosti Škoda Power s.r.o. mají pro tuto operaci obrábění dva stroje. Menší NC řízená vrtačka určená pro menší rotory o hmotnosti 6 - 7 tun a velká vrtačka pro velké rotory o hmotnosti až 100 tun. Aby bylo možné natáčet velké rotory do požadované polohy, jsou rotory uloženy na speciálních podpěrách. Pokud je potřeba rotor natočit, podpěry se napustí olejem a vzniklý olejový film nadzdvihne rotor v řádech setin mm. Rotor se potočí na olejové vrstvě a olej z podpěry se odčerpá.



Obr. 43 NC svrtávací zařízení pro menší rotory [12]



Obr. 44 3D model NC vrtacího zařízení [XXI]

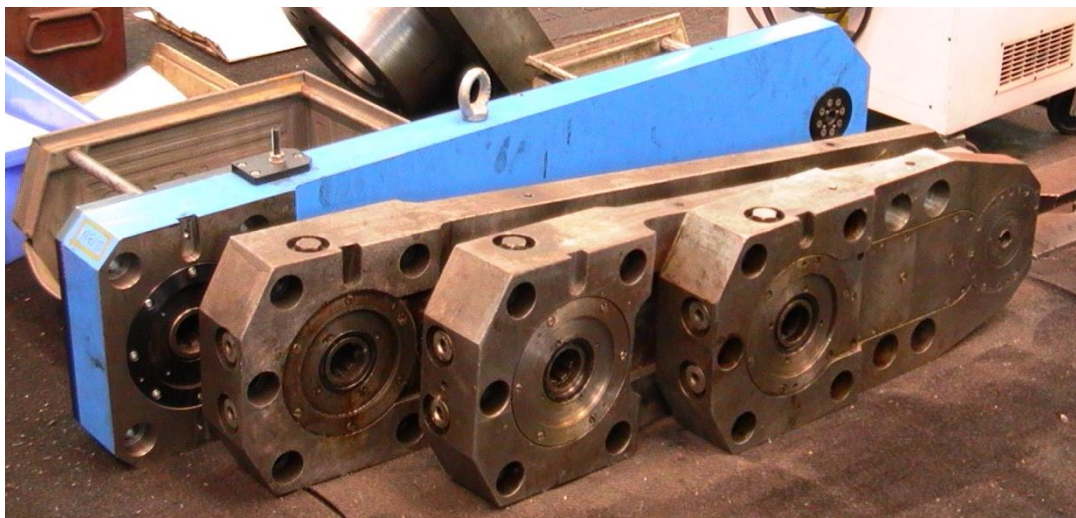




*Obr. 45 NC svrtávací zařízení pro velké rotory [12]*

### Vrtací zařízení

Největší problémem při výrobě děr pro kolíky je malý prostor mezi jednotlivými oběžnými koly turbíny. Z tohoto důvodu se používají speciální štíhlá ramena. Jedna strana ramena se upevní na vřeteno vrtačky (podle *obr. 46* levá strana ramena) a přes vnitřní převod, který je realizován ozubenými koly nebo ozubeným řemenem, se přenáší točivý moment na druhou stranu ramene, kde je uložen nástroj. Nástroje jsou uloženy také speciálně a to opět z důvodu ušetření prostoru.



*Obr. 46 Vrtací ramena [12]*

## Nástroje

Používané vrtáky jsou vyrobeny z rychlořezné oceli (HSS) a jsou upínány za Morse kužel dlouhý 27 mm (Morse 1, Morse 2). Vrtáky jsou dvoubřité s drážkou ve šroubovici a nejsou opatřeny povlakem. Průměry vrtáků jsou závislé na průměru použitých kolíků. Otvory pro kolíky od  $\varnothing$  11 mm do  $\varnothing$  18 mm se předvrtávají.

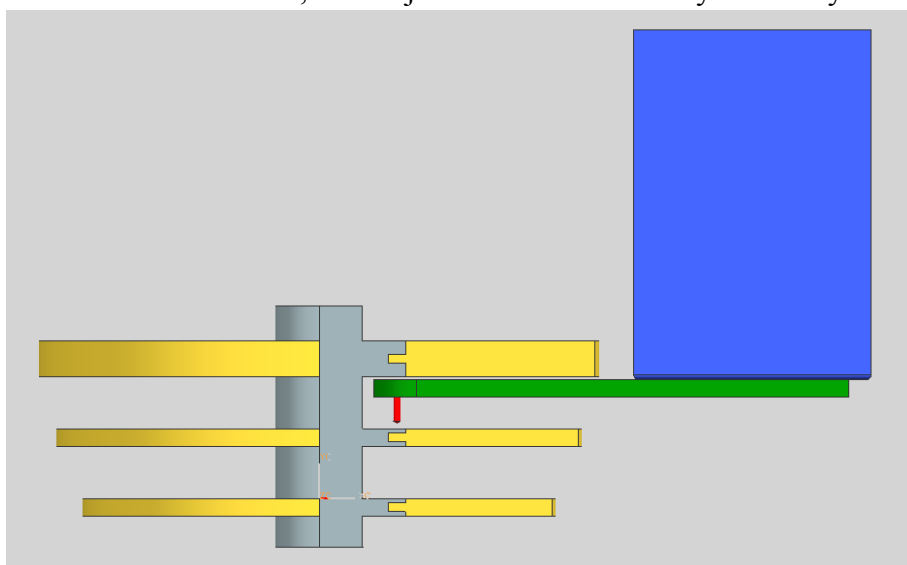
Výstružníky jsou oproti zvyklostem uloženy na pevno. Materiál výstružníků je HSS a nástroj je povlakovaný. Po vystružení dosahuje předepsaná drsnost povrchu otvoru Ra 0,8.



Obr. 47 Nástroje pro výrobu otvorů pro kolíky [12]

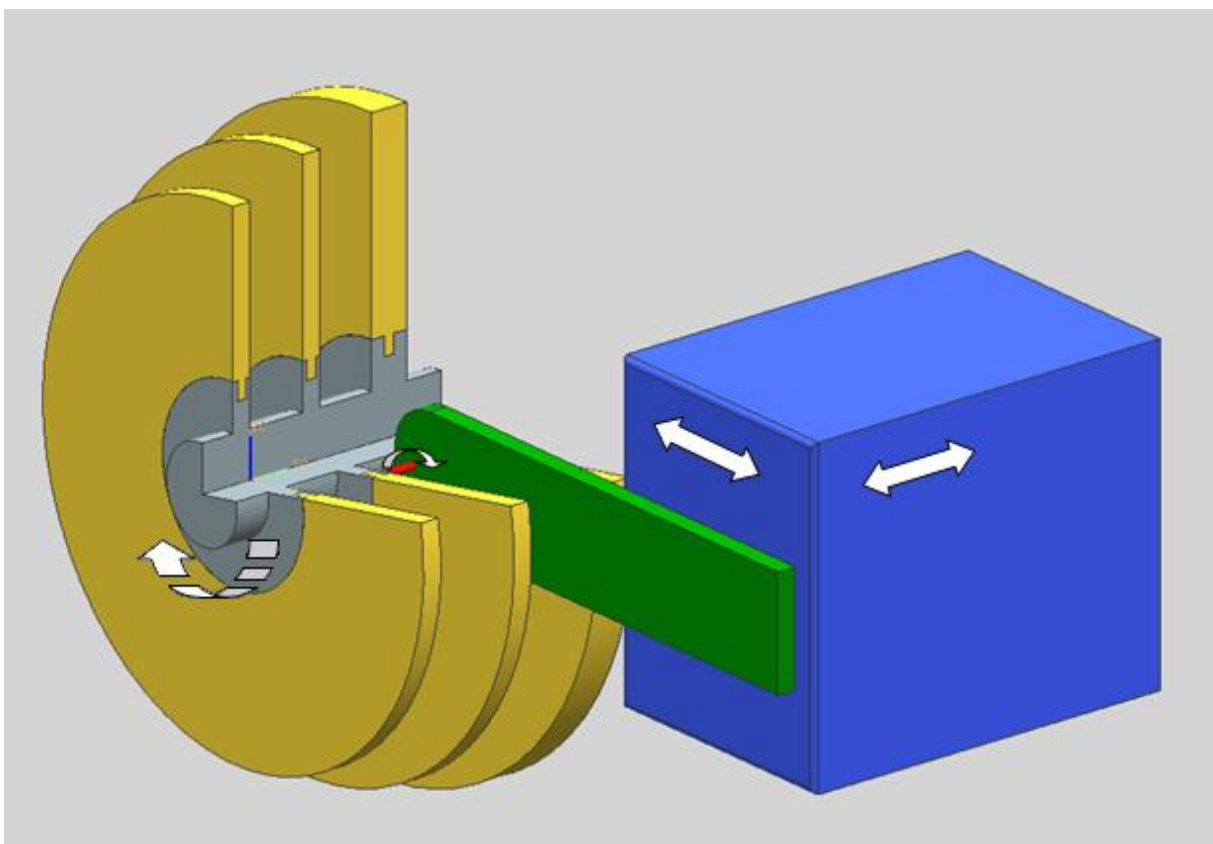
## Řezné podmínky

U klasického vrtání je nástroj upnutý v ose vřetena. V tomto případě je však nástroj upnutý mimo osu vřetena ve vrtacím rameni, které je charakteristické svým dlouhým a úzkým tvarem. Řezné podmínky při svrtávání jsou díky snížení tuhosti použitím vrtacího ramena nižší než u tradičního vrtání. Zejména posuvy jsou nižší vůči normativům. Nepředvrtané otvory mají cca o 1/3 nižší hodnotu posuvů a předvrtané nižší o 1/4 vůči normativům.



Obr. 48 Svrtávání – pohled shora

Na zjednodušeném modelu **obr. 48** a **obr. 49** je popsána operace svrtávání rotoru a lopatek. Vrtací zařízení je vyznačeno modrou barvou. K zařízení je upevněno vrtací rameno (zelená barva) a v něm je upnutý nástroj (červená barva). Šedou barvu má rotor parní turbíny a žlutou barvou jsou zjednodušeně znázorněny oběžné lopatky. Šipky označují pohyby jednotlivých částí. Rotor se pomocí natáčedla otočí pouze o pár stupňů do požadované polohy svrtávání. Následně vrtací zařízení vykoná posuv a přísuv a dostává se do prostoru mezi oběžná kola. Z vrtacího zařízení se převede krouticí moment přes rameno na nástroj. Provede se svrtání lopatky a rotoru a po vyjetí nástroje z otvoru se opět natočí rotor o pár stupňů k další lopatce a vyvrtá se další otvor. Takto se postup stále opakuje, dokud nejsou svrtány všechny lopatky daného oběžného kola. Poté se vyjede z prostoru a analogicky se svrtají všechna ostatní oběžná kola. Posledním krokem je zajištění otvorů kolíky, které se provádí manuálně.



*Obr. 49 Svrtávání – Zjednodušený model*

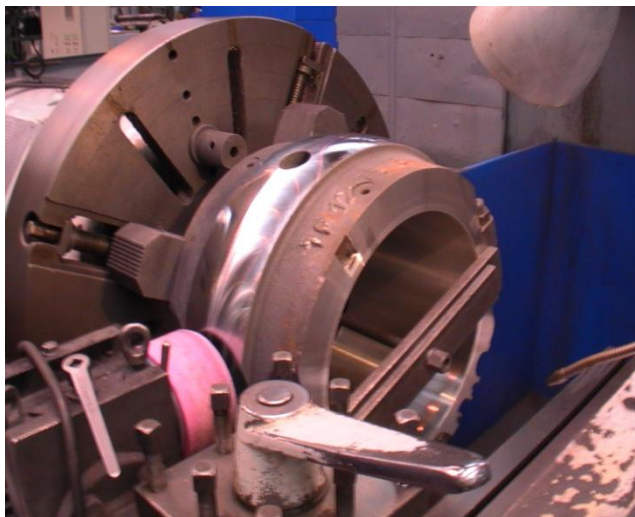


#### 4.2.2. Broušení kulové plochy

Další speciální technologií je výroba kulové plochy na pánvi ložiska parní turbíny. Kulová plocha vzniká broušením pomocí hrncového kotouče. Ložisková pánev je část axiálně-radiálního ložiska, ve které je uložen rotor parní turbíny. Rotor je vlivem vlastní hmotnosti a účinkem provozních podmínek deformován a právě axiálně radiální ložisko umožňuje tyto deformace.

#### Obráběcí stroj

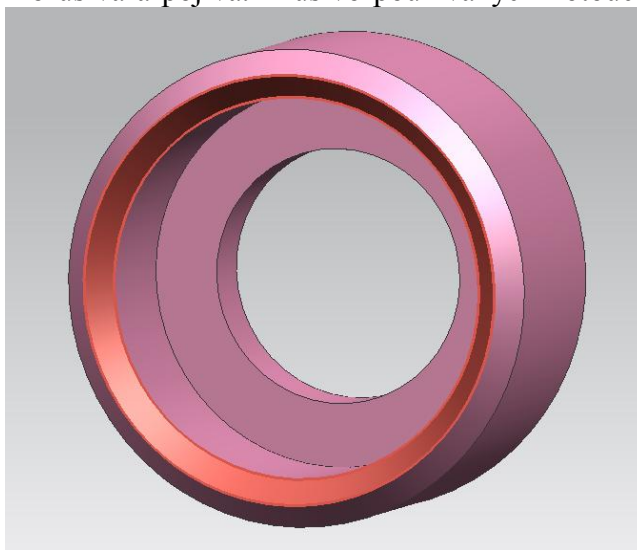
Broušení se provádí na upraveném čelním soustruhu, kde je na lící desce upnutá pánev ložiska. Na supportu je upevněna speciální hlava s vlastním zdrojem točivého momentu (elektromotor). Elektromotor přímo roztáčí brusný kotouč.



Obr. 50 Broušení na čelním soustruhu [12]

#### Nástroj

Aby došlo k vytvoření části kulové plochy na pánvi ložiska, využívá se hrncového brusného kotouče. Společnost Škoda Power s.r.o. odebírá brusné kotouče pro tuto technologii od firmy Tyrolit. Brusný kotouč se skládá z brusiva a pojiva. Brusivo používaných kotoučů pro obrábění ocelí, je umělý korund ( $Al_2O_3$ ), který dává brusnému kotouči charakteristickou růžovou barvu. Materiál těchto nástrojů nese obchodní název Elektrit. Pojivo je keramické (označováno V). Brusný kotouč musí být před nasazením na stroj ohraněn obsluhou stroje. Kotouč brousí vnitřní ohraněnou stranou, která je na **obr. 51** vyznačena červenou barvou. Průměr brusného kotouče je závislý na šířce ložiskové pánve. Průměr kotouče musí být větší než šířka broušené plochy.



Obr. 51 Ohraněný brusný kotouč

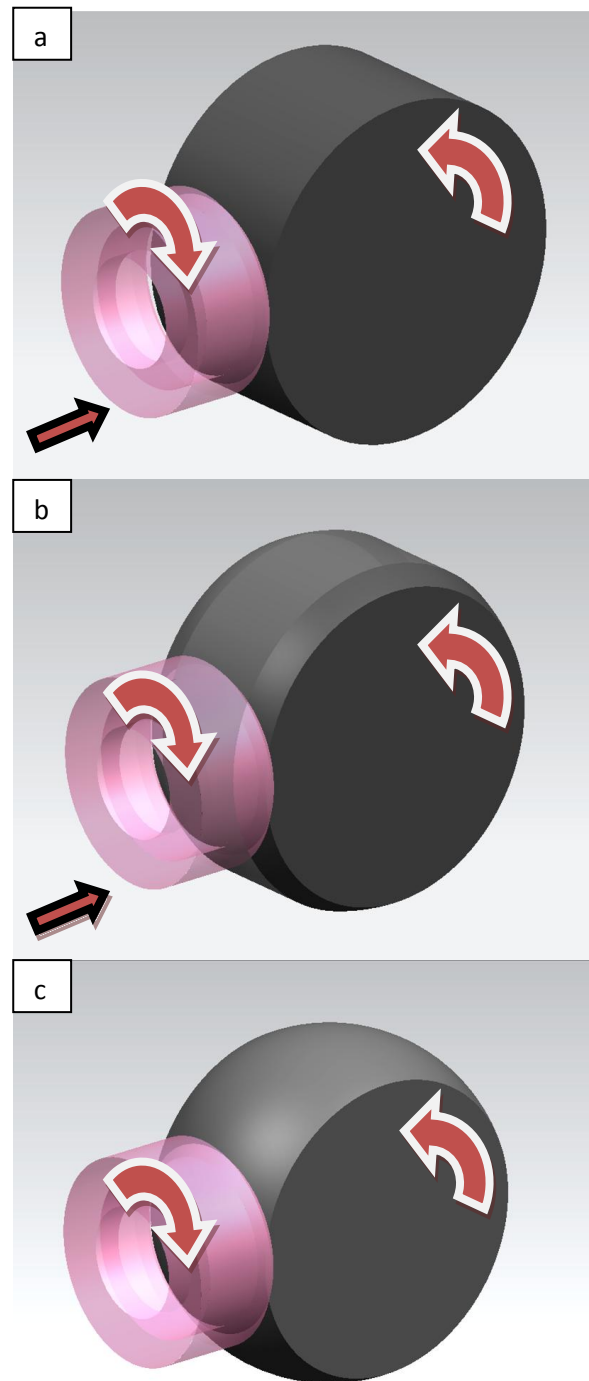
## Kinematika broušení

Základní kinematický pohyb koná brusný kotouč- rotační pohyb. Otáčky brusného kotouče jsou dány otáčkami elektromotoru a jsou tedy přibližně 3000 ot/min. Zároveň se otáčí také ložisková pánev upnutá na lícni desce. Rychlost otáčení vřetena čelního soustruhu se pohybuje v rozsahu 7-8 ot/min. Brusný kotouč se přisouvá v rozsahu hodnot 0,01 - 0,02 mm/ot. k ložiskové pánvi. Z důvodu malého přísuvu je operace velmi časově náročná.

Vznik kulové plochy je zobrazen na zjednodušeném obrázku (**Obr. 52**). Pro názornost na jakém principu technologie pracuje, představuje ložiskovou pánev válec šedé barvy.

**Obr. 52 (a)** ukazuje stav, kdy ještě není brusný kotouč v kontaktu s válcem. Po určitém přisunutí kotouče, začne vznikat na okrajích válce kulová plocha - **obr. 52 (b)**. Postupným přisouváním brusného kotouče se obráběné plochy rozšiřují, až se spojí a vytvoří jednu část kulové plochy - **obr. 52 (c)**. Po broušení zůstane na obrobku charakteristická křížová stopa, která vzniká současným pohybem nástroje a obrobku.

Ve skutečnosti není ložisková pánev válcová, ale už má kulovou plochu předem obrobenou. Na tuto plochu se nanese žárový nástřík a na tomto nástříku je následně broušena kulová plocha pomocí této technologie obrábění. Žárový nástřík dosahuje vysoké tvrdosti a to až hodnot 66 HRC. Právě z důvodů vysoké tvrdosti jsou hodnoty přísuvu malé. Při větším přísuvu může dojít k vylamování vrstvy žárového nástříku.

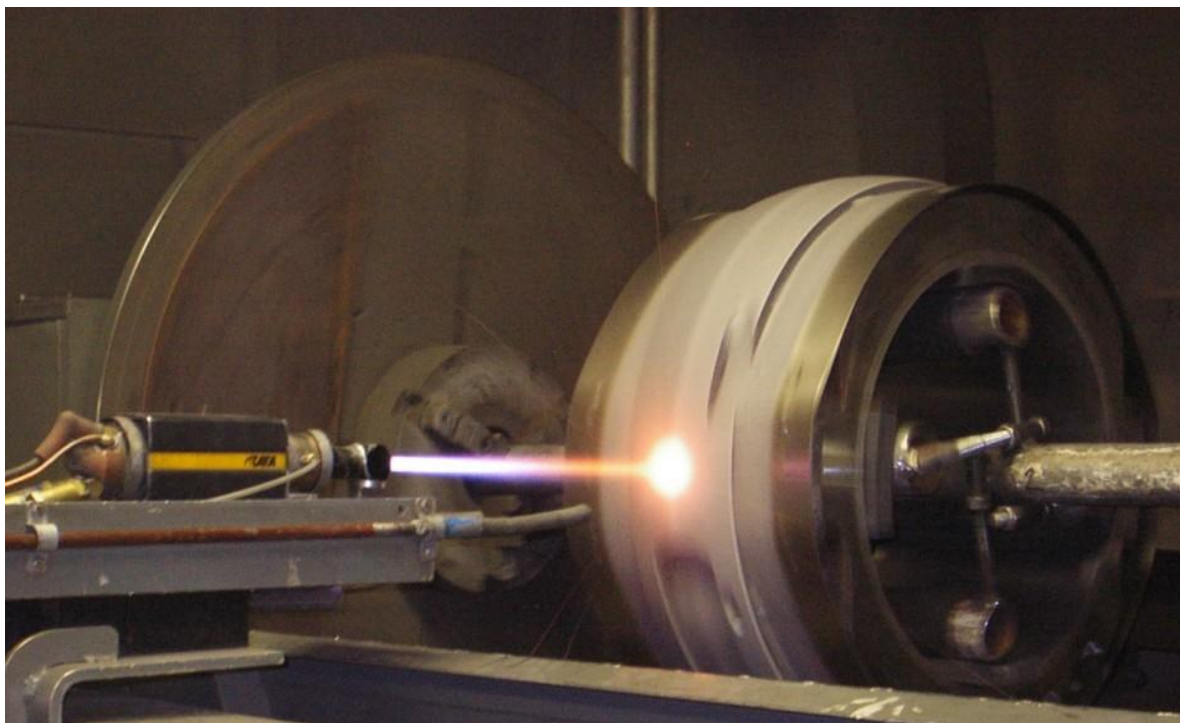


Obr. 52 Kinematika broušení

## Žárové nástřiky

Žárový nástřik je proces vytváření povlaků o tloušťce větší než 50  $\mu\text{m}$ , kdy je nanášený materiál ve formě prášku (případně drátu) přiváděn do zařízení, kde dojde k jeho natavení a urychlení směrem k povlakované součásti. Po dopadu na substrát dojde k výraznému plošnému rozprostření částice a k jejímu rychlému utužení. Tím se vytváří povlak s charakteristickou strukturou a specifickými vlastnostmi. [7]

V energetice se žárové nástřiky odolné proti korozi, erozi a abrazi používají k renovaci povrchu lopatek parní turbíny. Další skupinou jsou povlaky odolné proti mechanickému opotřebení s vynikajícími kluznými vlastnostmi, které jsou právě použité na ložiskové pánvi, na které je následně broušena kulová plocha. [7]



*Obr. 53 Aplikace žárového nástřiku na ložiskovou pánev [XXII]*

## 5. HODNOCENÍ A ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat přehled používaných technologií v energetickém průmyslu v současné době. Práce je zaměřena na obrábění komponent parní turbíny.

V práci jsou zmapovány používané konstrukční materiály. Právě požadavky kladené na konstrukční materiály jsou ovlivněny některými trendy v energetickém průmyslu. Hlavním trendem je zvyšování energetické účinnosti elektráren při současném snižování množství škodlivých emisí. Toho se dociluje zvyšováním provozní teploty a tlaku páry až na hodnoty nad 700°C a 35 MPa. Vyšší provozní parametry páry vyžadují nové materiály s vlastnostmi, které jsou schopné těmto podmínkám odolat.

U nástrojů je trendem, z důvodu časových úspor a snížení nákladů, náhrada celistvých tvarových HSS nástrojů za monolitní karbidové nástroje a nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Optimalizací nástrojů pro jednotlivé operace se umožní rychlejší obrábění, zvýší se trvanlivost a sníží se potřebný počet nástrojů.

Základní používané technologie obrábění v energetickém průmyslu při výrobě parní turbíny jsou tyto:

- Soustružení
- Frézování
- Vrtání
- Broušení
- Protahování
- Leštění

V současné době je trendem nahrazování technologie broušení přesným soustružením a frézováním. Dále se využívá moderního 5ti – osého frézování pro výrobu obrobků složitějších tvarů a je snaha ruční leštění lopatek parní turbíny mechanizovat za pomoci robotů.

Ve společnosti Škoda Power s.r.o. jsou používány dvě unikátní technologie obrábění, které jsou popsány v rámci kapitoly „Speciální technologie obrábění“. Jedná se o technologii svrtávání rotorů a lopatek parní turbíny, která je využívána z důvodu nedostatku prostoru mezi oběžnými koly, kde není možno vrtat klasickým způsobem. Druhou speciální technologií je výroba části kulové plochy broušením na ložiskové pánvi parní turbíny. Kulové plochy se dosahuje pomocí hrncového tvaru kotouče a vzájemnou kinematikou nástroje a obrobku.

## 6. LITERATURA

- [1] SKÁLOVÁ, Jana. *Fyzikálně metalurgický slovník*. Vyd. 2. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 90 s.
- [2] KOUTSKÝ, J. *Materiály tepelně energetických zařízení*. Vyd. 1. Plzeň : ZČU Plzeň - ediční středisko, 1991. 119 s.
- [3] *Kyocera-unimerco.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-11-02]. Energetický průmysl - Nástrojová řešení pro lopatky turbín . Dostupné z WWW: <<http://nozebra.ipapercms.dk/Unimerco/012/CZ/PM/0121242PMMLCZturbine/>>.
- [4] Sandvik Coromat. *Příručka obrábění*. Vyd. 1. Praha : Scientia, 1997.
- [5] STANĚK, Jiří; NĚMEJC, Jiří. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Vyd. 1. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 62 s.
- [6] IBLER, Zbyněk, et al. *Technický průvodce energetika*. Vyd. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 616 s.
- [7] *Zcu.cz* [online]. 2005 [cit. 2011-11-02]. KMM - žárové nástřiky. Dostupné z WWW: <<http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/index.html>>.
- [8] Siemens testuje materiály pro turbínu operující při 700 °C. *Technický týdeník*. 7.4.2009, 7, s. 24.
- [9] PURMENSKÝ, Jaroslav; FOLDYNA, Václav; MATOCHA, Karel. Perspektivní žárupevné oceli a jejich vlastnosti a praktické využití. In . Hradec nad Moravicí : [s.n.], 2006. s. 12.
- [10] SVOBODOVÁ, Marie. Aplikační omezení oceli P92. *ALL FOR POWER* [online]. 2009, 7, [cit. 2011-11-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.allforpower.cz/clanek/aplikacni-omezeni-zaropevne-oceli-p92/>>.
- [11] HRACHOVINA, Petr. Nové směry a trendy ve vývoji materiálů pro energetiku. *ALL FOR POWER* [online]. 2008, 9, [cit. 2011-11-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.allforpower.cz/clanek/nove-smery-a-trendy-ve-vyvoji-materialu-pro-energetiku/>>.
- [12] VNITROPODNIKOVÉ ZDROJE SPOLEČNOSTI Škoda Power s.r.o. Doosan Company
- [13] Sylabus přednášek KMM/MEZ
- [14] SOVA, František. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vyd. Plzeň, 2001. ISBN 80-7082-823-4.
- [15] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2

- [16] Sylabus přednášek KTO/PNO
- [17] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění: Elektrochemické obrábění. *Mmspektrum* [online]. 2007, roč. 2007, č. 10 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>
- [18] KŘENEK, Vladimír. *Člověk a energie*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 191 s. ISBN 80-704-3489-9.
- [19] BLOCH, Heinz P. *A Practical Guide to Steam Turbine Technology*. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1996, 348 s. ISBN 0-07-005924-1.



## OBRÁZKY - Internetové zdroje

- [I] <http://www.materialsengineer.com/CA-Creep-Stress-Rupture.htm>
- [II] [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing\\_power/pages/how-it-works.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing_power/pages/how-it-works.aspx)
- [III] [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing\\_power/steam\\_turbines/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing_power/steam_turbines/pages/default.aspx)
- [IV] [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing\\_power/pages/grooving-solutions.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing_power/pages/grooving-solutions.aspx)
- [V] [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/Images/stork-turbo-blading-large\\_tcm1023-103507.jpg](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/stork-turbo-blading-large_tcm1023-103507.jpg)
- [VI] <http://stork.en.ecplaza.net/>
- [VII] [http://www.gti-power.com/turbine\\_package\\_parts.aspx](http://www.gti-power.com/turbine_package_parts.aspx)
- [VIII] [https://www.civ.cvut.cz/others/ansys\\_meeting/data/12\\_AUM\\_Sbornik/Sekce\\_A\\_Mechanical/Misek-Pevnostni\\_analyza\\_rozvadcich\\_kol\\_parnich\\_turbin.PDF](https://www.civ.cvut.cz/others/ansys_meeting/data/12_AUM_Sbornik/Sekce_A_Mechanical/Misek-Pevnostni_analyza_rozvadcich_kol_parnich_turbin.PDF)
- [IX] <http://utz.ru/eng/catalog/id/50>
- [X] <http://www.materialsengineer.com/CA-Creep-Stress-Rupture.htm>
- [XI] [http://www.archivesmse.org/vol48\\_1/4813.pdf](http://www.archivesmse.org/vol48_1/4813.pdf)
- [XII] <http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202012%20CZ%20PROG.pdf>
- [XIII] [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/technical\\_guide/materials/cutting\\_tool\\_materials/cermet/Pages/Cermet-%28CT%29.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/technical_guide/materials/cutting_tool_materials/cermet/Pages/Cermet-%28CT%29.aspx)
- [XIV] <http://nozebra.ipapercms.dk/Unimerco/012/CZ/PM/0121242PMMLCZturbine/>
- [XV] [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing\\_power/steam\\_turbines/pages/turbine-blade.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing_power/steam_turbines/pages/turbine-blade.aspx)
- [XVI] <http://www.secotools.com/cs/Global/Segment-Solutions/OilGas-Solutions/Aeroengine-machining-examples/>
- [XVII] <http://www.secotools.com/cs/Global/Segment-Solutions/OilGas-Solutions/Drilling-equipment-examples1/>
- [XVIII] <http://www.flickr.com/photos/robotstudio/4049645747/in/photostream/>
- [XIX] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>
- [XX] <http://www.pilotts.com/wp-content/uploads/2009/12/3-steam-blades-web.png>
- [XXI] <http://www.skm-lit.cz/produkce/triskove-obrabeni>

[XXII] <http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/images/12/fotogalerie/23.jpg>

[XXIII] [http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Condensing/eng/CondensingPower\\_TurbineHousing1.pdf](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Condensing/eng/CondensingPower_TurbineHousing1.pdf)

[XXIV] [http://ac.els-cdn.com/S0141635997000433/1-s2.0-S0141635997000433-main.pdf?\\_tid=cc77ee74cb4bf982aecf49492da2f1a3&acdnat=1336950749\\_a44f5b99fe46d21d581fe93e411080eb](http://ac.els-cdn.com/S0141635997000433/1-s2.0-S0141635997000433-main.pdf?_tid=cc77ee74cb4bf982aecf49492da2f1a3&acdnat=1336950749_a44f5b99fe46d21d581fe93e411080eb)