

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Větrná elektrárna jako obrobek

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

Akademický rok 2012/2013

## **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

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Zdeňkovi Jandovi, Ph.D. za odborné konzultace, rady a připomínky, díky nimž bylo možné tuto práci zrealizovat.

Tato bakalářská práce vznikla za podpory projektu ESF OP VpK „Posílení spolupráce mezi vysokými školami, výzkumnými ústavami a průmyslovými partnery v Plzeňském kraji - CZ.1.07/2.4.00/17.0052“. Tento projekt napomohl při propojení výstupů bakalářské práce mezi aplikačním a akademickým prostředím.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Šolar	<b>Jméno</b> Zdeněk	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 / Strojírenská technologie – technologie obrábění		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Janda, Ph.D.	<b>Jméno</b> Zdeněk	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Větrná elektrárna jako obrobek		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	-------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	42	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	42	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Práce je zaměřena na poskytnutí uceleného pohledu na obrábění vybraných komponent větrných elektráren. U komponent jsou popsány technologie, nástroje, nástrojové materiály a řezné podmínky pro jejich obrobení podle doporučení výrobců Sandvik Coromant, Seco a Iscar. Cílem je porovnat produktivitu těchto výrobců a učinit z porovnání závěry. Mimo to jsou v práci popisovány vybrané specifické stroje, sloužící k obrábění komponent větrných elektráren.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Energetika, větrná elektrárna, konstrukční materiály, nástroje a nástrojové materiály, stroje, technologie.

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Šolar	Name Zdeněk
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 / 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>TITLE OF THE WORK</b>	Delete when not applicable	
	Wind Power Plant as a Workpiece	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

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

<b>TOTALLY</b>	42	<b>TEXT PART</b>	42	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The Bachelor's thesis is focused on providing a holistic view of wind power machining. Technologies, tools, tool materials and cutting conditions of Sandvik Coromant, Seco and Iscar are described according to the recommendations of the manufacturers. The main goal is to compare productivity of the manufacturers and make conclusions. Moreover the work describes selected specific machines which are used for machining of wind power components.
<b>KEY WORDS</b>	Energetics, wind power plant, construction materials, tools and tool materials, machines, technology.

## Přehled použitých zkratk a symbolů

VE	- větrná elektrárna
VBD	- vyměnitelná břitová destička
kW	- kilowatt
MW	- megawatt
μm	- mikrometr
mm	- milimetr
m	- metr
ot/min	- otáčky za minutu
V	- volt
kV	- kilovolt
CO <sub>2</sub>	- oxid uhličitý
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- oxid hlinitý
TiCN	- karbonitrid titanu
TiN	- nitrid titanu
cm <sup>3</sup> /min	- centimetr krychlový za minutu
kg	- kilogram
mm/min	- milimetr za minutu
MQL	- Minimum Quantity Lubrication
°C	- stupeň celsia
CNC	- computer numerical control

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Konstrukční materiály komponent větrných elektráren .....	10
2.1. Betonový základ .....	10
2.2. Stožár .....	10
2.3. Příruba pro spojení segmentů stožáru.....	11
2.4. Gondola .....	12
2.5. Hlavní hřídel .....	12
2.6. Nosný rám.....	13
2.7. Převodovka .....	13
2.8. Spojení generátorového hřídele .....	15
2.9. Generátor .....	15
2.10. Systém natáčení strojovny .....	15
2.11. Hydraulické systémy.....	15
2.12. Brzdový systém.....	15
2.13. Lopatky .....	15
2.14. Náboj rotoru .....	17
2.15. Ložiskový rám .....	18
3. Technologie, nástroje a nástrojové materiály pro obrábění VE .....	18
3.1. Příruba pro spojení segmentů stožáru.....	18
3.1.1. Soustružení (hrubování) příruby stožáru.....	19
3.2. Náboj rotoru.....	20
3.2.1. Operace prováděné na náboji rotoru .....	21
3.2.1.1. Čelní frézování .....	21
3.2.1.2. Vrtání děr .....	22
3.2.1.3. Rohové frézování.....	23
3.2.1.4. Frézování kruhovou interpolací.....	24
3.2.1.5. Vyvrtávání na čisto .....	25
3.2.2. Produktivita pro obrábění náboje .....	25
3.3. Hlavní hřídel .....	26
3.3.1. Operace prováděné na hlavní hřídeli.....	27
3.3.1.1. Soustružení - hrubování.....	27
3.3.1.2. Soustružení - na čisto.....	28
3.3.1.3. Vrtání krátkých děr .....	29
3.3.2. Produktivita pro obrábění hlavní hřídele.....	29
4. Stroje pro obrábění komponent VE.....	30
4.1. Obrábění ocelových a litinových komponent .....	30
4.1.1. Vertikální soustružnické centrum VTC-8000-H.....	30
4.1.2. Frézovací a vyvrtávací centrum typu FXR .....	31
4.1.3. Horizontální bruska pro externí a interní broušení HG-92 .....	32
4.1.4. Obráběcí centrum VLC 500.....	32
4.1.5. Obráběcí centrum U5-Bridge Type .....	33
4.1.6. Systém MEGAFLEX .....	33
4.2. Obrábění kompozitních komponent .....	34
4.3. Obrábění kořene lopatky .....	35



4.3.1.	Plně automatizované obrábění kořene lopatky.....	35
4.3.2.	Poloautomatizované obrábění kořene lopatky .....	35
4.3.3.	Robotické ořezávání a broušení .....	35
5.	Závěr.....	36
6.	Seznam použité literatury .....	37
7.	Příloha .....	40
7.1.	Výroba lopatky větrné elektrárny .....	40
7.1.1.	Infuzní technologie.....	40
7.1.2.	Předimpregnovaná vlákna .....	40
7.2.	Forma pro výrobu lopatek větrné elektrárny .....	41
7.3.	Systémy umístování vláken - Viper 7000 .....	42

## 1. Úvod

Využití větrné energie je jedním z nejvíce rozvíjejících se průmyslů v posledních dvou desetiletích, i nadále roste a stává se největším zdrojem obnovitelné energie.[1]

V dnešní době je snaha stavět stále větší stroje o průměru rotoru až 150 m se stožáry o výšce více než 100 m, s výkonem až 7,5 MW. Starší vnitrozemské elektrárny s výkony do 200 kW se demontují a nahrazují silnějšími, přestože jsou ještě provozuschopné. To znamená, že vyhlídky výrobců větrných elektráren do budoucna jsou příznivé. U stavby elektrárny je jeden podstatný údaj, který vymezuje, jak moc elektrické energie bude možno produkovat – výška. Čím vyšší větrnou elektrárnu postavíme, tím více energie bude produkovat. Je to způsobeno tím, že ve vyšších hladinách nad povrchem vane silnější vítr, a ten roztáčí lopatky turbíny.[3] To však znamená vyšší namáhání komponent větrných elektráren, což klade na výrobce těchto komponent vyšší požadavky. Ti musí používat materiály s dobrými mechanickými vlastnostmi a tím pádem se změní i výběr nástrojů.

Větrná elektrárna je souborem komponent sestavených do sebe až na místě pozdějšího fungování. Části elektrárny mohou vážit až několik stovek tun, a proto je důležité bezpečné ukotvení kolosu v zemi. K tomu slouží betonový základ. K němu je pomocí šroubů připevněn stožár, respektive několik segmentů stožáru spojených přírubami. Na vrcholu stožáru je otočný prstenec, k němuž je připevněna gondola. Ta obsahuje strojovnu – srdce větrné elektrárny. Samotná strojovna obsahuje součásti, pomocí nichž je mechanická energie přeměněna na elektrickou. Jedná se o hlavní hřídel, nosný rám, převodovku, spojení mezi převodovkou a generátorem, generátor, systém natáčení strojovny a hydraulické systémy větrné elektrárny. Posledním a nejdůležitějším článkem je rotor. Ten je uchycen ke gondole a zahrnuje náboj s připevněnými lopatkami.

Větrných elektráren je řada druhů a jednotlivé odlišnosti určují jejich konečnou funkci. Obecně je lze rozdělit na mikroelektrárny, které nedodávají energii do sítě a jejich výkony se pohybují do cca 1 kW. Dále malé elektrárny, které už slouží k napájení velkých zařízení nebo stavení a jejich výkony dosahují cca 15 kW. Nejvýkonnějšími jsou velké elektrárny, které napájejí vesnice a města. Tyto stroje dodávají vždy energii do sítě a výkon dosahuje stovky kW až jednotky MW. Vyráběny mohou být prototypy se svislou či vodorovnou osou rotace, nicméně první zmiňovaný se příliš nevyskytuje kvůli velkému dynamickému namáhání. K výrobě elektrické energie může být použito stejnosměrného, asynchronního či synchronního generátoru.[4] Dalším významným kritériem pro rozdělení větrných elektráren je druh stožáru. Ten se může vyrábět v provedení ocelový tubus, příhradová konstrukce nebo betonový prefabrikát. Betonový stožár začíná být ekonomicky výhodný pro elektrárny o výkonu větším než 1,35 MW a výšce stožáru vyšší než 80 m. Nejpoužívanější tedy stále zůstává ocelový tubus.[5] K výběru lokality pro stavbu větrné elektrárny jsou samozřejmě rozhodující povětrnostní podmínky. Ty jsou velice důležitým hlediskem, a proto se turbíny staví i na moři. Existují tzv. on-shore elektrárny, stavěné na souši a off-shore elektrárny, které mají spodní část ponořené ve vodě.

Tato práce se samozřejmě nemůže věnovat všem druhům větrných elektráren. Vzhledem k tomu, že cílem je objasnit obrábění jednotlivých komponent, bude se práce zabývat strojem, který v sobě ukrývá velké množství komponent, které se musí obrobit. Jedná se tedy o klasickou větrnou elektrárnu s ocelovým tubusem, určenou pro napájení měst.



Obr. 1.1 – Větrné elektrárny [6]

## 2. Konstrukční materiály komponent větrných elektráren

### 2.1. Betonový základ

Větrné elektrárny jsou vysoké stavby citlivé na vychýlení od svislice a pro jejich absolutní stabilitu musí být dobře připevněny k zemi. K tomu slouží betonový základ. Nejčastěji se používá čtvercového půdorysu. Pro zcela rovnou plochu se musí nejdříve vytvořit úzká betonová deska, na kterou posléze umístíme ocelový prstenec. Základ je vystlán armovacím železem a vyplněn betonem.[7]



Obr. 2.1.1 – Betonový základ VE [7]

### 2.2. Stožár

Stožár je sestaven z plechových dílů o délce přibližně 25 m. Takto vyřešené dělení na segmenty je použito z hlediska snadnější přepravy. Každý jednotlivý díl je ocelovým svařencem. Tloušťka plechu se pohybuje okolo 12 – 45 mm (výjimečně až 70mm), záleží na poloze segmentu ve stožáru. U paty to bývá 30 - 45mm, zatímco u vrcholu se pohybují tloušťky plechu od 12mm. Plechy se často dodávají jako polotovary v tabulích atypického rozměru, neboť u paty stožáru bývá jeho obvod i 12,5m. Před zpracováním plechů je jejich povrch tryskán liti-

novými broky, kvůli odstranění povrchové koroze a nečistot. Poté se z plechu pálí polotovary pro skružování. Vypalování se uskutečňuje současně třemi hořáky. Jeden pálí svisle půdorys a zbylé dva pálí technologické úkosy, kvůli pozdějšímu svařování. Na každém kusu se pak musí svařit podélný spoj. Svařovat se začne metodou MAG, což je svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (neboli metoda označována jako CO<sub>2</sub>). Spoj je dokončen metodou „svařování pod tavidlem“. Celkový segment pak tvoří několik prstenců. V první etapě se přivaří příruby pro šroubové spojení segmentů na krajní prstence. Kvůli přesnému navázání segmentů na sebe se sešroubují vždy dvě příruby k sobě a takto se přivařují k sousedním prstencům. Příruba se přivaří na prstenec horního segmentu a hned po té se k druhé přírubě přivaří prstenec spodního segmentu. Pokud jsou krajní prstence přivařeny, následuje sestavení a svaření celého segmentu. Ten je už připraven pro povrchovou úpravu. Nejprve se celý segment znovu otryská, aby se z povrchu odstranily nečistoty. Podle technologického postupu se pak nanáší barva. Často se používá technologie stříkání. Většinou si zákazník předepisuje polyuretánovou barvu. Tloušťka stříkaného povrchu se pohybuje okolo 240 μm.[8]

Materiálem je dle evropské normy EN 10025-2:2004 normalizačně vyžádaná konstrukční ocel S355K2+N, která už se nijak tepelně neupravuje. Jejimi hlavními charakteristikami je nízká mez kluzu s vhodností pro tváření za studena. Kategorie K2 jsou obecně vhodné pro všechny svařovací techniky.[8], [9]



Obr. 2.2.1 – Stožár VE [10]

### 2.3. Příruba pro spojení segmentů stožáru

Příruby se vyrábějí z normovaných ocelových desek obdélníkových profilů. Jedná se o normalizačně válcovanou, jemnozrnnou konstrukční ocel s nízkou mezí kluzu S355NL (označení dle evropské normy EN 10025-3:2004). Používají se především pro výrobu vysoce namáhaných svařovaných konstrukcí těžkých strojů či mostů. Zejména dobrá svařitelnost je u těchto přírub rozhodující, vzhledem k tomu, že jsou k nim přivařeny mohutné segmenty stožáru.

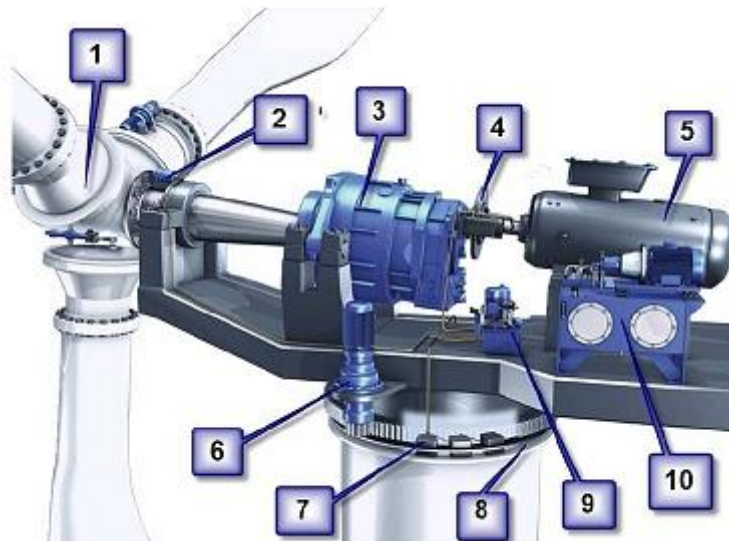
Do příruby se vyvrtávají díry pro šrouby. Těchto otvorů bývá 60 – 160 v jedné přírubě. Přesný počet záleží na průměru a umístění ve stožáru.[12], [8]



Obr. 2.3.1 – Příruba VE [13]

## 2.4. Gondola

Gondola je hlavou větrné elektrárny. Obsahuje strojovou část a je umístěná na vrcholu stožáru. Výrobci používají odlišné principy soustrojí a určují, jaké komponenty bude strojovna obsahovat. Strojovna větrné elektrárny je většinou umístěna ve sklolaminátové gondole.[14]



Obr. 2.4.1 – Gondola VE [15]

- 1...rotor s rotorovou hlaví
- 2...brzda rotoru
- 3...planetová převodovka
- 4...spojka a brzda generátoru
- 5...generátor
- 6...pohon natáčení strojovny
- 7...brzda točny strojovny
- 8...ložisko točny strojovny
- 9...hydraulický agregát brzd
- 10...hydraulický agregát změny geometrie lopatek rotoru

## 2.5. Hlavní hřídel

Hlavní hřídel větrné elektrárny přenáší točivý moment rotoru. Kinetická energie větru se přeneše přes hřídel do převodovky, kde se dosáhne vysoké rychlosti rotace. Tato rotační kinetic-

ká energie je v generátoru přeměněna v elektrickou energii. Hlavní hřídel větrné elektrárny je obvykle kovaná z tvrze a kalené oceli.[1]

Výrobci používají především nízkolegovanou ušlechtilou chrom-molybdenovou ocel 42CrMo4 a středně legovanou ušlechtilou chrom-nikl-molybdenovou ocel 34CrNiMo6 (označení dle evropské normy EN 10083-3:2006).[16]

Česká republika je jeden z největších výrobců hřídelí pro větrné elektrárny. K dodavatelům hřídelí pro světové výrobce větrných elektráren patří firma Pilsen Steel s.r.o. či Evraz Vítkovice Steel, a.s.[18]



Obr. 2.5.1 – Hlavní hřídel VE [19]

## 2.6. Nosný rám

Jedná se o litinu či svařenec, který drží celé hnací ústrojí turbíny a přenáší veškerou váhu komponent gondoly do stožáru větrné elektrárny.

Pro výrobu hlavního rámu bývá častěji použita tvárná litina EN-GJS-400-15 (označení dle evropské normy EN 1563:2011). Tento materiál se vyznačuje vysokou pevností a dobrou obrobitelností. Alternativou může být svařenec z ocelových plátů. [11], [20]



Obr. 2.6.1 – Nosný rám VE [21]

## 2.7. Převodovka

Převodovky větrných elektráren jsou konstruovány podle toho, o jaký typ větrné elektrárny se jedná. Kvůli častým změnám v zatížení se jedná o velmi namáhanou součást. Při některých poryvech mohou mít dokonce rázy od rotoru několikanásobně vyšší hodnotu oproti standardnímu zatížení. Proto je při návrhu počítáno s vysokým koeficientem bezpečnosti.

Pracovní otáčky rotorů se pohybují v rozmezí 5 – 20 ot/min. Vzhledem k takovýmto otáčkám rotorů jsou pak pracovní otáčky generátorů 1000, 1500 či 3000 ot/min a převodové poměry

jsou tedy 1:70 – 1:200. Pro přenesení několikamegawattového výkonu se volí několikastupňová planetová převodovka nebo kombinovaná několikastupňová převodovka, u které jsou první stupně planetové a poslední jeden či dva stupně jsou koaxiální.[22]

Ústrojí využívá planetárního převodového systému k přeměně nízkých rychlostí vysokého točivého momentu rotoru na vysoké rychlosti nízkého točivého momentu na vstupu do generátoru. Z převodovky se převede její vysoká rychlost na hřídel propojenou s generátorem.

Rychlost otáčení se obvykle pohybuje kolem 1500 ot/min.[1]

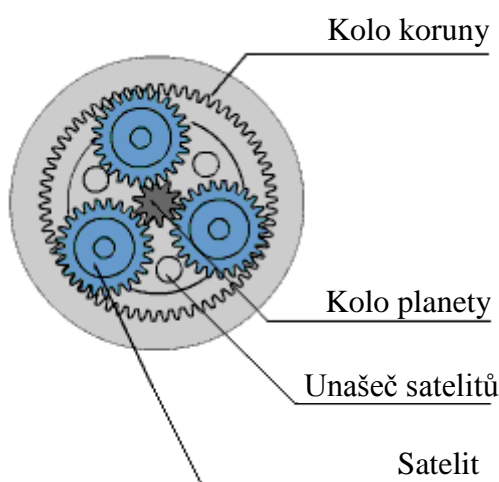
Použití tohoto druhu převodovky pro několikamegawattové výkony je velice výhodné vzhledem k samotné hmotnosti a hlučnosti stroje. Kombinací planetové a koaxiální převodovky dostaneme přijatelný kompromis výhod a nevýhod těchto dvou odlišných typů.

Zuby jsou obvykle cementovány pro získání povrchové tvrdosti při zachování houževnatosti jádra. Následně jsou broušeny kvůli mírným deformacím materiálu v průběhu cementace.

Samotná planetová převodovka zahrnuje kolo planety, satelity, kolo koruny a vše je usazeno do unašeče satelitů. Unašeč satelitů je vyroben z tvárné litiny EN-GJS-700-2 (označení dle evropské normy EN 1563-2005), ostatní části z nízkouhlíkové chrom-niklové oceli.[23]



Obr. 2.7.1 – Planetová převodovka [23]



Obr. 2.7.2 – Planetový převod [25]

## 2.8. Spojení generátorového hřídele

Přenos momentu z převodovky na generátor bývá proveden jednou ocelovou hřídelí, anebo pomocí dvou souosých hřídelí, spojených spojkou. Jedná se o pružnou spojkou, obsahující elementy gumy. Její funkcí je kompenzace náhlých výkyvů vznikajících od poryvů větru. [23], [26]

## 2.9. Generátor

Generátor je jedna z komponent větrné elektrárny, která transformuje mechanickou energii na elektrickou. Pro komerční účely je možno použít technologii jak synchronního tak asynchronního generátoru, dodávající střídavý proud o napětí 660V a vyšších. Záleží pouze na výrobcí, pro jakou koncepci větrné elektrárny se rozhodne. Začíná se používat i mnohapólových generátorů, které nepotřebují převodovku. U moderních elektráren je využíváno automatické regulace otáček. Toho je dosaženo například regulací natočení lopatek v kombinaci s převodovkou, která má zabudovaný systém proměnlivého převodového poměru. Tento systém zajišťuje plynulou změnu převodu. [27], [4]

## 2.10. Systém natáčení strojovny

Strojovna s rotorem větrné elektrárny se natáčí podle směru větru. Za to je zodpovědný systém natočení strojovny. Strojovna je usazena na otočné kuličkové ložisko. Vnější klec ložiska je připevněna ke stožáru a vnitřní klec k nosnému rámu.

Na rám strojovny jsou přidělané elektropohony, které podle pokynů řídicího systému otáčejí s gondolou. Těchto pohonů může být v rozměrných soustrojích až 6 kusů. Záleží na velikosti větrné elektrárny. Elektropohon obsahuje elektromotory s výkonem 2 – 2,5kW, několikastupňovou planetovou převodovku a pastorek.

Bohužel elektropohony nemohou zachytit zatížení, způsobené neustále se měnícím směrem proudění větru a otáčejícím se rotorem, jenž vyvolává gyroskopický moment. Tento problém je nejčastěji řešen pomocí čelistových brzd, které po požadovaném natočení gondoly zablokují danou polohu sevřením vnitřních čelistí kolem odpovídajícího vnějšího disku. [29]

## 2.11. Hydraulické systémy

Strojovna větrné elektrárny obsahuje více komponent, které ke své funkci využívají hydraulické systémy. Jedná se o brzdu generátorového hřídele, brzdu systému otáčení strojovny kolem svislé osy, brzdu rotoru. Hydraulický může být i systém natáčení lopatek. Záleží jen na výrobcí, jak moc zahrne do svých konstrukčních řešení hydrauliku. [30]

## 2.12. Brzdný systém

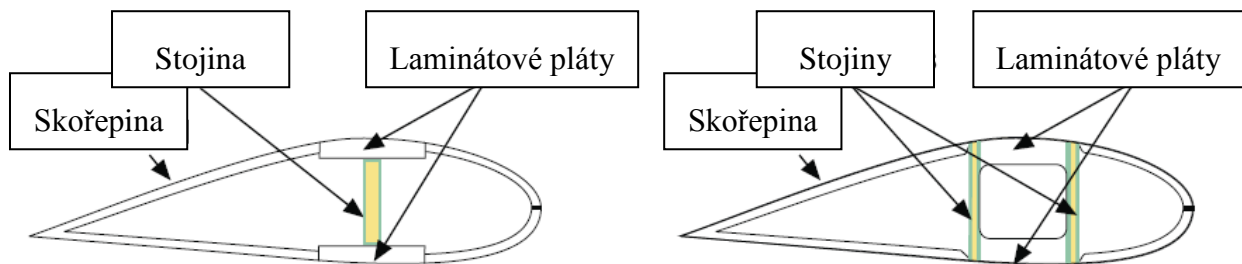
Brzdy větrných turbín musí odolat vyšším zátěžím a vyšším počtům cyklů než konvenční brzdný systém. Impuls, vyslaný za účelem zabrzdit rotor, může vycházet od snímače otáček rotoru, snímače rychlostí větru nebo je možné zabrzdit pomocí obsluhy. Větrné elektrárny jsou vybaveny mechanickou brzdou, umístěnou většinou za převodovkou. Ta může zabrzdit rotor za jakýchkoliv povětrnostních podmínek. Jedná se o diskovou brzdu, která se spouští pružinou při poklesu hydraulického tlaku. Mimo to se používají také aerodynamické brzdy, které zpomalí rotor, čímž zabrání mechanickému přetížení. [2]

## 2.13. Lopatky

Konstrukce lopatky musí být nejtlustší a nejsilnější u kořene. U kořene lopatky je totiž ohybový moment největší, na rozdíl od špičky, kde se blíží k nule. Uvnitř lopatky nejsou velká

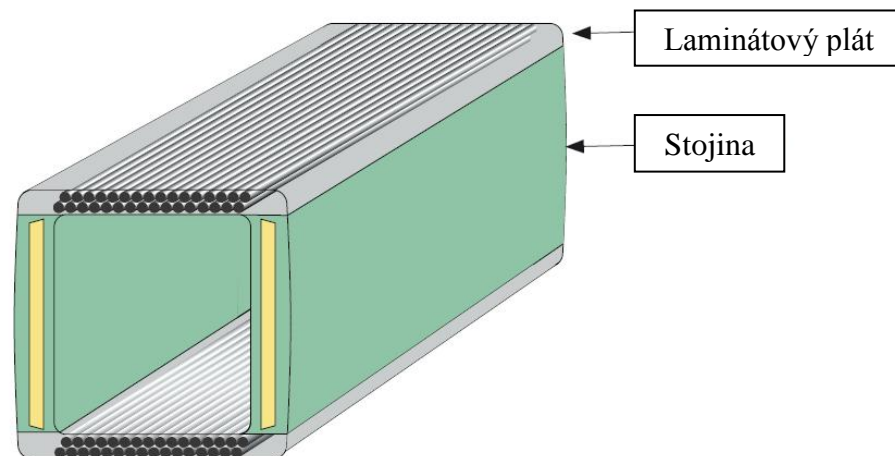


namáhání, a proto se kvůli snížení nákladů vyrábí lopatky duté pomocí skořepiny a vnitřních výztuží - nosníků. Každý nosník je složen ze stojin a laminátových plátů (viz Obr. 2.13.1 a Obr. 2.13.2). Skořepina lopatky má vysoký podíl vláken jdoucích diagonálně a jdoucích podél lopatky, a tak částečně zlepšuje pevnost v ohybu, ale hlavní funkcí skořepiny je přenést aerodynamické zatížení ze skořepiny do laminátových plátů. Používají se 2 typy, jak dosáhnout spojení stojin. Buď jsou pláty vyrobeny jako součást skořepiny a samostatná stojina je mezi ně přilepena, nebo jsou stojiny a pláty vyrobeny dohromady, tvořící jakýsi box, který je přilepen ke skořepině. Díky mnoha výhodám je často používán druhý typ výroby lopatek, tzv. technologie „box spar“.[31]



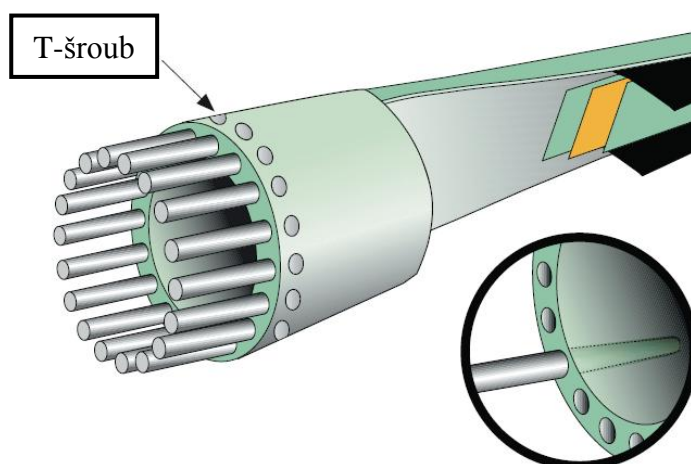
Obr. 2.13.1 – Konstrukce lopatky VE [31]

Základem této technologie jsou dva laminátové pláty, spojené pomocí dvou stojin. Tyto pláty jsou vytvořeny laminováním z prepregů (viz kap. 7.1.), podobně jako skořepina. Součástí stojiny je pěna, která zajistí stabilitu vzpěru.[31]



Obr. 2.13.2 – Technologie „box spar“ [31]

Kritickou částí konstrukce je kořen lopatky, protože přenáší veškeré zatížení na náboj. Spojení je zajištěno buď čepy, které jsou přilepeny k laminátové lopatce nebo mechanicky T-šrouby. Pro umístění šroubů musí mít laminát podstatnou tloušťku, která může být u velkých lopatek až 100mm.[31]

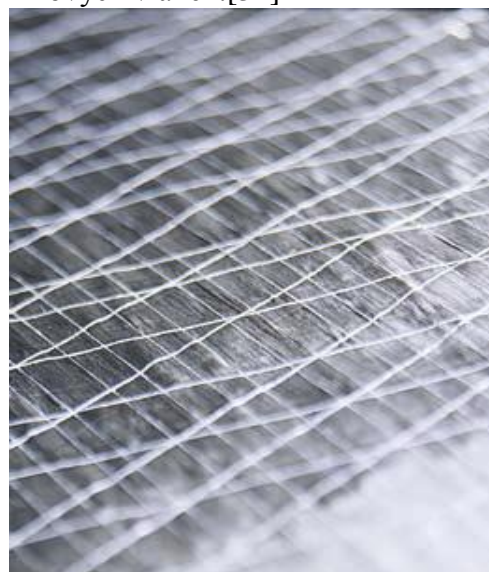


Obr. 2.13.3 – Kořen lopatky [31]

Moderní lopatky jsou vyráběny z FRP materiálu („fibre-reinforced plastics“). Jedná se o kompozitní materiál, který obsahuje polymer zpevněný vlákny. Tento materiál je v porovnání pevnosti a hmotnosti mnohem lepší než např. dřevo či kovy. Nejvíce používanými jsou skelná a uhlíková vlákna. Uhlíková vlákna jsou dvakrát pevnější než skelná vlákna a třikrát tužší. Vysoká tuhost také dovoluje pryskyřici odolávat únavovému opotřebení lépe díky snížení napětí v pryskyřici. Uhlíková vlákna jsou však mnohem dražší (7-8krát dražší než skelná vlákna), takže jsou používána pouze tam, kde jsou nepostradatelná k dosažení vysokých výkonů lopatek. A to u velkých rotorů o průměru kolem 80 metrů, protože je u nich obtížné dosáhnout dostatečné tuhosti bez přídatných zátěží. Tuhost lopatek zajišťují hlavně laminátové pláty, proto jsou hlavně tyto komponenty právě z uhlíkových vláken.[31]



Obr. 2.13.4 - Skelná vlákna [31]

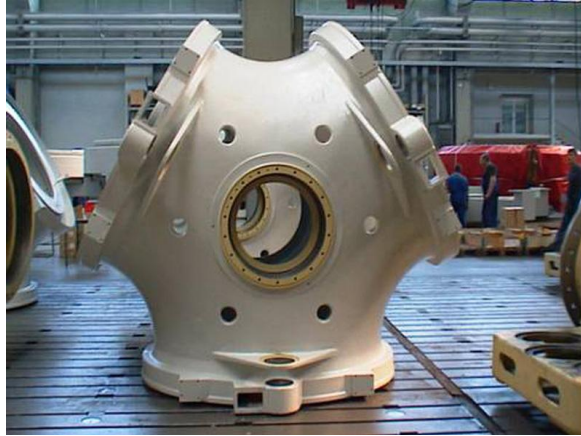


Obr. 2.13.5 - Uhlíková vlákna [31]

## 2.14. Náboj rotoru

Náboj rotoru větrné elektrárny je prvek, ke kterému je připojena hlavní hřídel a lopatky, které jsou strůjcem rozpořívány náboje. Jeho rotační pohyb je následně přenesen přes hřídel do převodovky. Moderní náboje rotoru navíc obsahují natáčecí systém k nastavení úhlu lopatek. Ten řídí výstupní výkon a v případě potřeby zpomaluje nebo zastavuje otáčení vrtule natočením listů ve směru proudění vzduchu. Výrobci často používají pro výrobu tvárnou litinu EN-

GJS-400-18-LT (označení dle evropské normy EN 1563:2011). Toto řešení je voleno z důvodu komplikovaného tvaru a požadavku na materiál, odolávat únavě.[23], [1]



Obr. 2.14.1 – Náboj rotoru VE [33]

## 2.15. Ložiskový rám

Pro stavbu každé větrné elektrárny je potřeba mnoho různých typů a velikostí ložisek, z nichž některá mají v průměru až několik metrů. Hlavní ložiska jsou uložena v ložiskovém rámu. Ten má za úkol pohlcovat nerovnoměrné zatížení způsobené náhlými změnami rychlostí hřídele. Ložiskový rám je obvykle odlitek. Použita bývá tvárná litina EN-GJS-400-15 (označení dle evropské normy EN 1563:2011).[11]



Obr. 2.15.1 – Ložiskový rám [34]

## 3. Technologie, nástroje a nástrojové materiály pro obrábění VE

Tato kapitola se věnuje technologiím, nástrojům a nástrojovým materiálům, které jsou použity pro obrábění komponent větrných elektráren. Jsou zde porovnány nástroje a řezné podmínky 3 výrobců. Pro toto porovnání bylo použito doporučených řezných podmínek výrobcem. Pokud výrobce udal řezné podmínky v určitých intervalech, byly s ohledem na produktivitu vybrány ty nejvyšší.

### 3.1. Příruba pro spojení segmentů stožáru

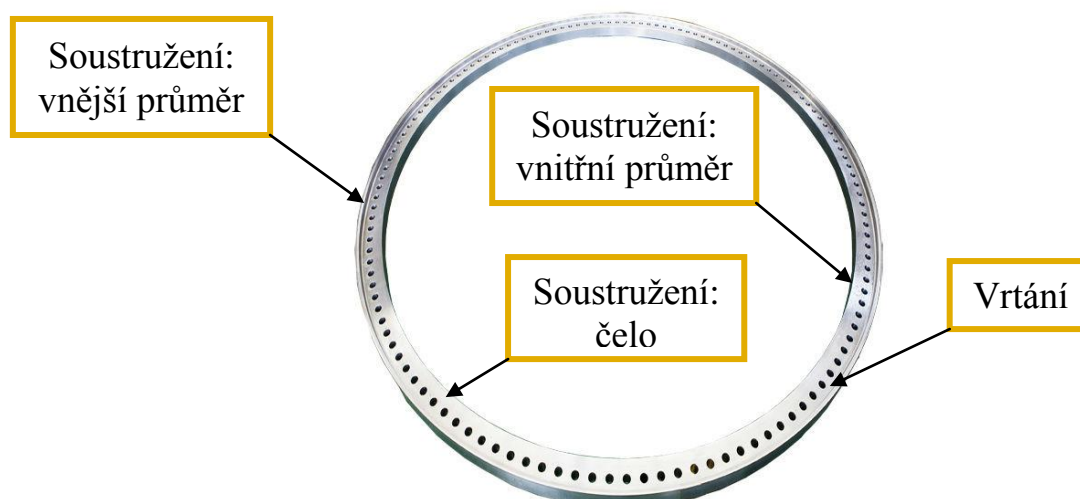
Jedná se o komponentu VE, která byla popsána v kapitole 2.3.

Na přírubě jsou prováděny operace: soustružení - hrubování (kap. 3.1.1.)

soustružení - načisto

vrtání

Jedná se o obrábění konstrukční válcované oceli S355NL.



Obr. 3.1.1 – Obrábění příruby pro spojení segmentů stožáru [35]

### 3.1.1. Soustružení (hrubování) příruby stožáru

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
Nůž	PCLNR 3232-19	MCLNL-24-8E	PSSNR/L 4040S-2507
VBD	CNMM 190624-HR	CNMM 646-R7	SNMG 250724-NR
Materiál	GC4225	TP2500	IC8250
Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	150	180	120
Posuv $f_n$ [mm/ot]	1,33	0,9	1
Hloubka řezu $a_p$ [mm]	10	8	15
Objem odebraného materiálu $Q$ [cm <sup>3</sup> /min]	1995	1296	1800

Tabulka 1 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro soustružení příruby [39], [11], [1], [58]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC4225. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny P (P10-P35). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a TiCN.

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením TP2500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P (P05-P35). Povlak tvoří vrstvy  $Al_2O_3$  a Ti(C,N).

Iscar doporučuje VBD s označením IC8250. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P10-P35) a M (M05-M20). Tato VBD je povlakována vícevrstevným povlakem, který je složen z TiCN,  $Al_2O_3$  a TiN.

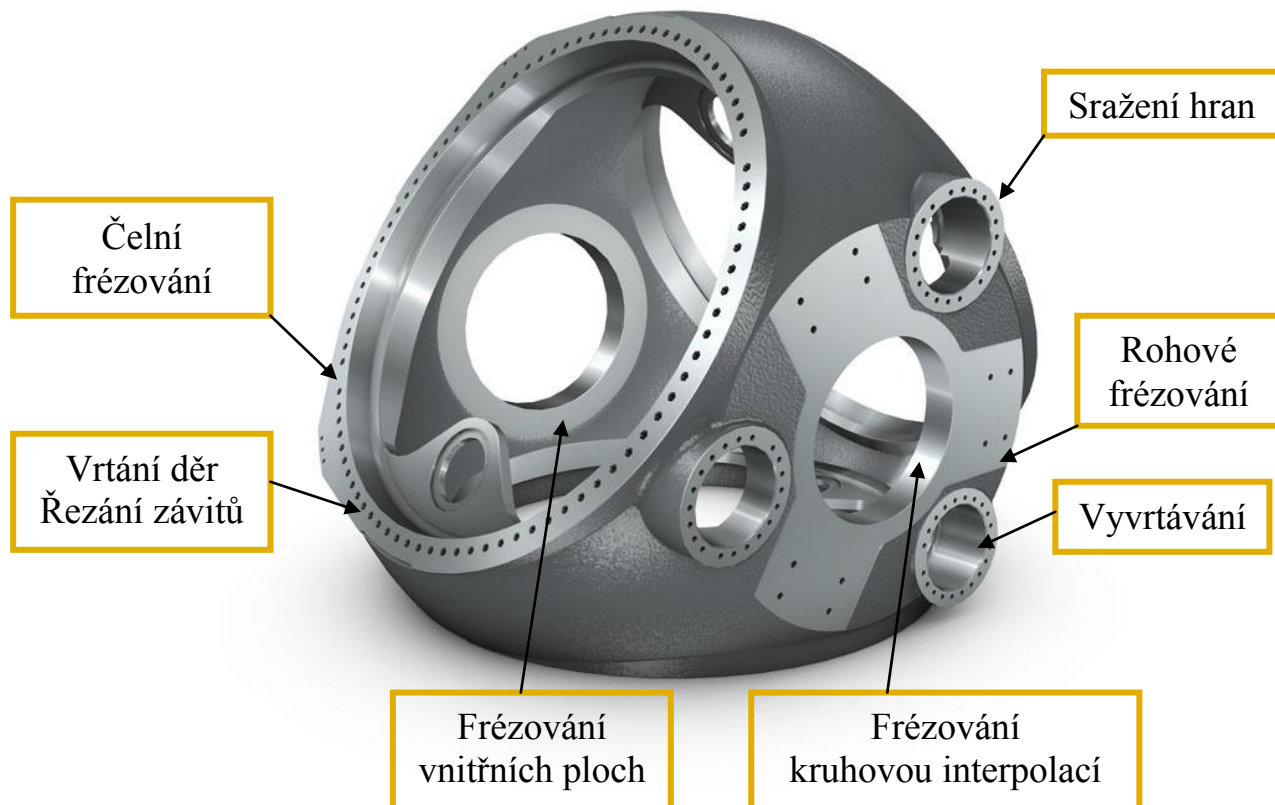
Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Sandvik Coromant (100%). Druhou nejvyšší produktivitu má Iscar (90,2%). Podstatně nižší produktivitu má firma Seco tools (65%).

### 3.2. Náboj rotoru

Jedná se o komponentu VE, která byla popsána v kapitole 2.14.

Na náboji jsou prováděny operace: čelní frézování (kap. 3.2.1.1)  
vrtání děr (kap. 3.2.1.2)  
rohové frézování (kap. 3.2.1.3)  
frézování kruhovou interpolací (kap. 3.2.1.4)  
vyvrtávání (kap. 3.2.1.5)  
frézování vnitřních ploch  
řezání závitů  
sražení hran

Jedná se o obrábění tvárné litiny EN-GJS-400-18-LT.



Obr. 3.2.1 – Obrábění náboje rotoru VE [36]

### 3.2.1. Operace prováděné na náboji rotoru

#### 3.2.1.1. Čelní frézování



Obr. 3.2.1.1 – Čelní frézování náboje rotoru VE [37]

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
<b>Fréza</b>	345-160Q40-13H	R220.48-8160-09-10S	SOF45 8/16-D160-12-40R
<b>VBD</b>	345R-1305M-KH	ONMU090520ANTN-M12	S845 SNMU 1305ANTR
<b>Materiál</b>	GC3220	MP1500	IC810
<b>Řezná rychlost <math>v_c</math> [m/min]</b>	200	240	200
<b>Posuv <math>f_z</math> [mm]</b>	0.25	0,65	0,2
<b>Hloubka řezu <math>a_p</math> [mm]</b>	5	4	6
<b>Objem odebraného materiálu <math>Q</math> [cm<sup>3</sup>/min]</b>	250	624	240

Tabulka 2 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro čelní frézování na náboji [36], [11], [1], [57]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC3220. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny K (K01-K30). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a TiN.

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením MP1500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny K (K05-K25). Povlak tvoří vrstvy TiCN a  $Al_2O_3$ .

Iscar doporučuje VBD s označením IC810. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P15-P30) a K (K10-K30). Tato VBD je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z AlTiN a TiN.

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Seco tools (100%). Podstatně nižší produktivitu mají firmy Sandvik Coromant (40,1%) a Iscar (38,5%).

### 3.2.1.2. Vrtání děr

	<b>SANDVIK COROMANT</b>	<b>SECO TOOLS</b>	<b>ISCAR</b>
<b>Vrták</b>	880-D2000L25-02	SD503-40-120-40R7	DR060-240-40-16-4D-N
<b>Střední VBD</b>	880- 0403W05H-P-GR	SPGX11T3-C1	SOMT 160512-DT
<b>Materiál střední VBD</b>	GC4230	T400D	IC808
<b>Okrajová VBD</b>	-	SCGX 120408 P2	-
<b>Materiál okrajové VBD</b>	-	DP200D	-
<b>Řezná rychlost <math>v_c</math> [m/min]</b>	180	45	200
<b>Posuv <math>f_n</math> [mm/ot]</b>	0,3	0,13	0,2
<b>Průměr nástroje D[mm]</b>	20	120	60
<b>Objem odebra- ného materiálu Q[cm<sup>3</sup>/min]</b>	270	175,5	600

*Tabulka 3 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro vrtání na náboji [36], [11], [1], [59]*

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC4014. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny P a K. Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z Ti(C,N) a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením DP200D. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P a K. Povlak tvoří vrstvy Ti(C,N) a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Iscar doporučuje VBD s označením IC908. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P15-P30), M (M20-M30) a K (K20-K40). Tato VBD je povlakována povlakem Ti-AlN.

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Iscar (100%). Podstatně nižší produktivitu mají firmy Sandvik Coromant (45%) a Seco tools (29,3%).

### 3.2.1.3. Rohové frézování

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
<b>Fréza</b>	490-080C6-14H	R220.69-8160-18-12AN	T490 FLN D080-07-27-R-13
<b>VBD</b>	490R-140420M-PH	XOMX180620TR-M14	T490 LNMT 1306PNTR
<b>Materiál</b>	GC3040	MP2500	IC810
<b>Řezná rychlost <math>v_c</math> [m/min]</b>	200	250	240
<b>Posuv <math>f_z</math> [mm]</b>	0.2	0,5	0,25
<b>Hloubka řezu <math>a_p</math> [mm]</b>	5	12,5	12
<b>Objem odebr. materiálu <math>Q</math>[cm<sup>3</sup>/min]</b>	200	1562,5	720

Tabulka 4 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro rohové frézování na náboji [36], [11], [1],[57]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku VBD s označením GC3040. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny K30 (K20-K40). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a TiCN.

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením MP2500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P (P20-P30) a M (M20-M25). Povlak tvoří vrstvy o  $Al_2O_3$  a Ti(C,N).

Iscar doporučuje VBD s označením IC928. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P20-P50), M (M20-M30) a K(K15-K40). Tato VBD je povlakována povlakem TiAlN.

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Seco tools (100%). Téměř poloviční produktivitu má Iscar (46,1%). Podstatně nižší produktivitu má firma Sandvik Coromant (12,8%).



### 3.2.1.4. Frézování kruhovou interpolací

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
<b>Fréza</b>	R390-160Q40-18M	R220.21-0080-SC12.6A	T490LNKD80-128-4-INT50-13
<b>VBD</b>	R390-180616M-KM	SCET120630T-MD16	T490 LNMT 1306PNTR
<b>Materiál</b>	GC3040	MP2500	IC810
<b>Řezná rychlost <math>v_c</math> [m/min]</b>	200	250	240
<b>Posuv <math>f_z</math> [mm]</b>	0,35	2	0,25
<b>Hloubka řezu <math>a_p</math> [mm]</b>	15	2	12
<b>Objem odebr. materiálu <math>Q</math>[cm<sup>3</sup>/min]</b>	1050	1000	720

Tabulka 5 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro frézování kruh. interpolací na náboji [36], [11], [1], [57]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC3040. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny K30 (K20–K40). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a TiCN.

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením MP2500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P (P20-P30) a M (M20-M25). Povlak tvoří vrstvy  $Al_2O_3$  a Ti(C,N).

Iscar doporučuje VBD s označením IC908. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P15-P30), M (M20-M30) a K (K20-K40). Tato VBD je povlakována povlakem TiAlN.

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců mají pro tuto operaci Sandvik Coromant (100%) a Seco tools (95,2%). Nižší produktivitu má firma Iscar (68,6%).

### 3.2.1.5. Vyvrtávání na čisto

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
Vyvrtávací nástroj	A28-R825C- 046025A	A731002	TCH A.L 200
VBD	TCMT 11 03 04-KF	CCMT09T308W-F1	CCMT 120404-16
Materiál	GC3005	TP2500	IC5005
Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	120	325	250
Posuv $f_n$ [mm/ot]	0,15	0,23	0,25
Hloubka řezu $a_p$ [mm]	0,5	0,3	0,2
Objem odebraného materiálu $Q$ [cm <sup>3</sup> /min]	9	22,425	12,5

Tabulka 6 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro vyvrtávání na náboji [36], [11], [1], [59]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC3005. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny K (K10) a P (P10). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a  $Ti(C,N)$ .

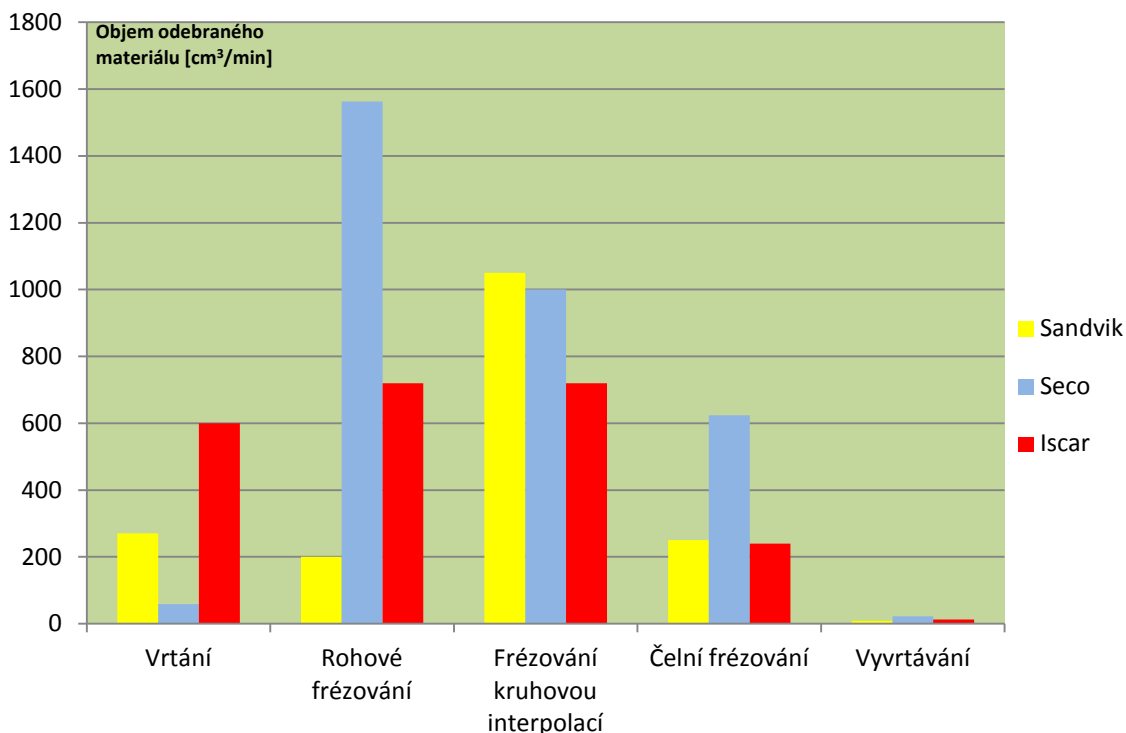
Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením TP2500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P (P05-P35). Povlak tvoří vrstvy  $Al_2O_3$  a  $Ti(C,N)$ .

Iscar doporučuje VBD s označením IC428. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P05-P15) a K (K05-K20). Tato VBD je povlakována vícevrstevným povlakem, který je složen z  $TiC$  a  $Al_2O_3$ .

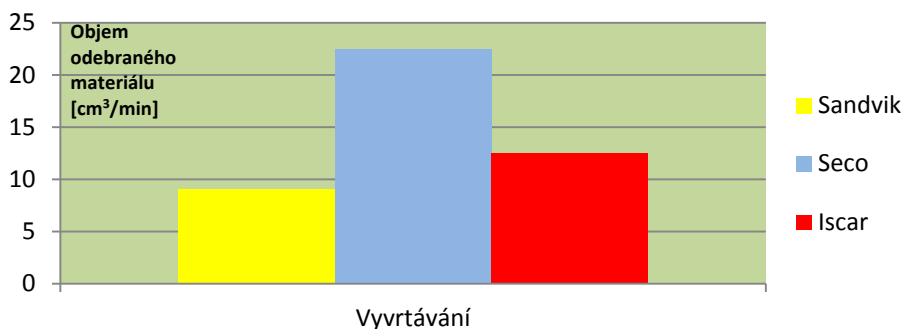
Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Seco tools (100%). Podstatně nižší produktivitu má firma Iscar (55,7%). Nejnižší produktivitu má Sandvik Coromant (40,1%).

### 3.2.2. Produktivita pro obrábění náboje

Porovnání produktivity vychází z doporučených řezných podmínek jednotlivých výrobců (viz tabulky 1, 2, 3, 4, 5, 6).



Graf 1 - porovnání produktivity na náboji



Graf 2 - detail produktivity při vyvrtávání na náboji

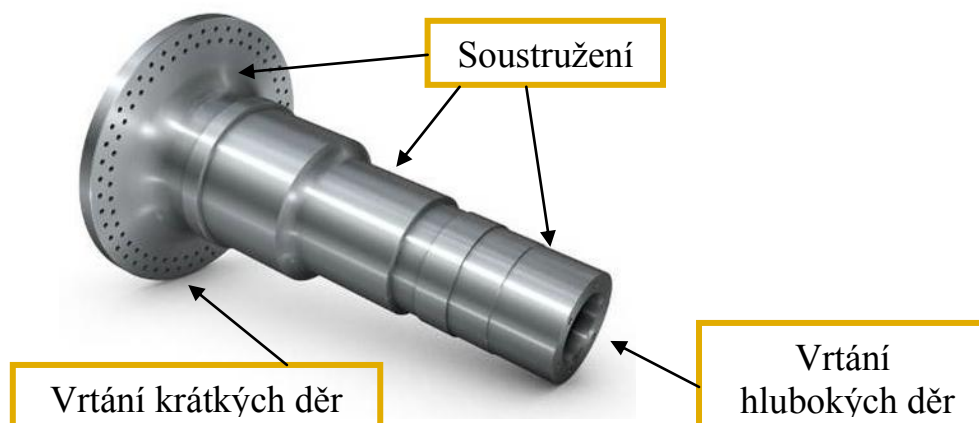
Nejvíce produktivní nástroje a nástrojové materiály z porovnávaných výrobců má pro operace na náboji firma Seco tools. Druhou nejvyšší produktivitu mají nástroje a nástrojové materiály firmy Iscar. Nejnižší produktivitu má firma Sandvik Coromant.

### 3.3. Hlavní hřídel

Jedná se o komponentu VE, která byla popsána v kapitole 2.5.

Na hřídeli jsou prováděny operace: soustružení - hrubování  
soustružení - na čisto  
vrtání hlubokých děr  
vrtání krátkých děr

Jedná se o obrábění nízkolegované ušlechtilé chrom-molybdenové oceli 42CrMo4 či středně legované ušlechtilé chrom-nikl-molybdenové oceli 34CrNiMo6.



Obr. 3.3.1 – Obrábění hlavní hřídele VE [38]

### 3.3.1. Operace prováděné na hlavní hřídeli

#### 3.3.1.1. Soustružení - hrubování

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
Nůž	Coromant Capto C10	BLBNR6060V50	PSSNR/L 4040S-2507
VBD	SCMT 380932-R5	LNMX501432	SNMG 250724-NR
Materiál	GC4235	TP3500	IC8250
Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	90	40	120
Posuv $f_n$ [mm/ot]	1,8	2,2	1
Hloubka řezu $a_p$ [mm]	30	45	15
Objem odebraného materiálu $Q$ [cm <sup>3</sup> /min]	4860	3960	1800

Tabulka 7 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro soustružení-hrubování na hřídeli [56], [11], [1], [58]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku VBD s označením GC4235. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny P (P35) a M (M25). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a  $Ti(C,N)$ .

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje s označením TP3500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P (P20-P40) a M (M20-M35). Povlak tvoří vrstvy  $Al_2O_3$  a  $Ti(C,N)$ .

Iscar doporučuje VBD s označením IC8250. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P10-P35) a M (M05-M20). Tato VBD je povlakována vícevrstevným povlakem, který je složen z  $TiCN$ ,  $Al_2O_3$  a  $TiN$ .

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Sandvik Coromant (100%). Druhou nejvyšší produktivitu má Seco tools (81,5%). Podstatně nižší produktivitu má firma Iscar (37%).

### 3.3.1.2. Soustružení - na čisto

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
<b>Nůž</b>	Coromant Capto	DCLNR 3232P12-M	SSBCR/L 2525M-12
<b>VBD</b>	DNMX 150616-WMX	CNMG120412W-M3	SCMT 120404-14
<b>Materiál</b>	GC4215	TP2500	IC8250
<b>Řezná rychlost <math>v_c</math> [m/min]</b>	220	330	280
<b>Posuv <math>f_z</math> [mm]</b>	0,8	0,4	0,3
<b>Hloubka řezu <math>a_p</math> [mm]</b>	3	1	4
<b>Objem ode- braného mate- riálu <math>Q</math>[cm<sup>3</sup>/min]</b>	528	132	336

Tabulka 8 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro soustružení na čisto na hřídeli [56], [11], [1], [58]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC4215. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupiny P (P15), K (K25) a H (H15). Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z  $Al_2O_3$  a  $Ti(C,N)$ .

Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením TP2500. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P (P05-P35). Povlak tvoří vrstvy  $Al_2O_3$  a  $Ti(C,N)$ .

Iscar doporučuje VBD s označením IC8250. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P10-P35) a M (M05-M20). Tato VBD je povlakována vícevrstevným povlakem, který je složen z  $TiCN$ ,  $Al_2O_3$  a  $TiN$ .

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Sandvik Coromant (100%). Druhou nejvyšší produktivitu má Iscar (63,6%). Podstatně nižší produktivitu má firma Seco tools (25%).

### 3.3.1.3. Vrtání krátkých děr

	SANDVIK COROMANT	SECO TOOLS	ISCAR
<b>Vrták</b>	880-D3900C5-04	SD503-40-120-40R7	DR060-240-40-16-4D-N
<b>Střední VBD</b>	880-07 04 06H-C-GR	SPGX 12T3-C1	SOMT 160512-DT
<b>Materiál střední destičky</b>	GC1044	T400D	IC808
<b>Okrajová VBD</b>	880-07 04 W12H-P-GR	SCGX 120408-P2	-
<b>Materiál okrajové destičky</b>	GC4024	DP200D	-
<b>Řezná rychlost <math>v_c</math> [m/min]</b>	250	45	200
<b>Posuv <math>f_z</math> [mm]</b>	0,2	0,13	0,2
<b>Průměr nástroje D[mm]</b>	39	120	60
<b>Objem odebraného materiálu Q[cm<sup>3</sup>/min]</b>	487,5	175,5	600

Tabulka 9 - geometrie, materiál a doporučené řezné podmínky VBD pro vrtání krátkých děr na hřídeli [56], [11], [1],[59]

Sandvik Coromant doporučuje vyměnitelnou břitovou destičku s označením GC4024. Jedná se o VBD ze slinutého karbidu, vhodného pro obrábění skupin P a K. Tato destička je povlakovaná vícevrstevným povlakem, který je složen z TiCN a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

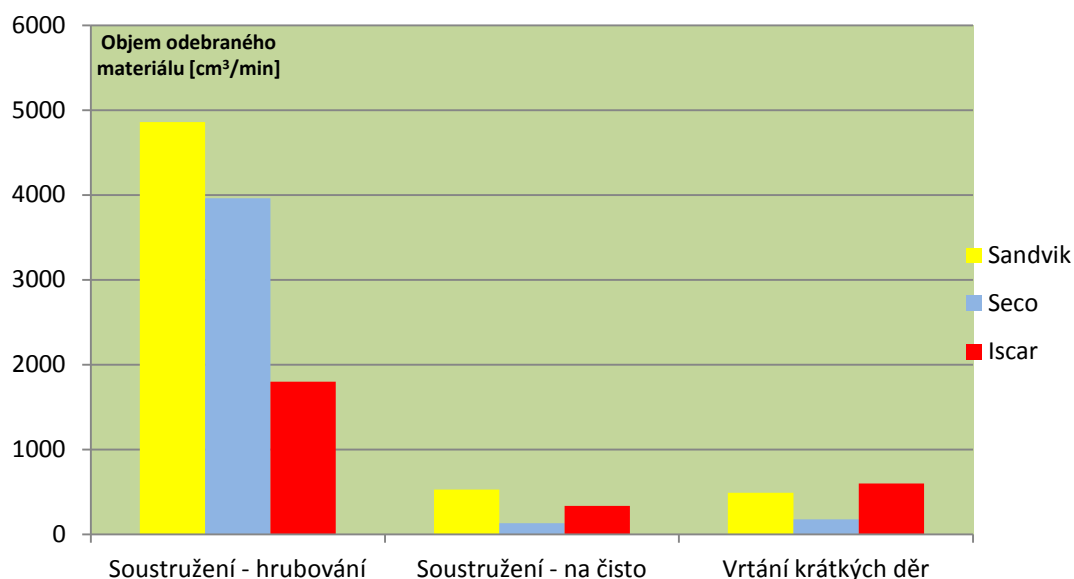
Seco tools zde pro dané obrábění doporučuje VBD s označením DP2000. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění materiálů skupiny P a K. Povlak tvoří vrstvy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Ti(C,N).

Iscar doporučuje VBD s označením IC808. Tato břitová destička je vhodná pro obrábění skupiny P (P15-P30), M (M20-M30) a K (K20-K40). Tato VBD je povlakována povlakem TiAlN.

Nejvyšší produktivitu z porovnávaných výrobců má pro tuto operaci Iscar (100%). Druhou nejvyšší produktivitu má Sandvik Coromant (81,3%). Podstatně nižší produktivitu má firma Seco tools (29,3%).

### 3.3.2. Produktivita pro obrábění hlavní hřídele

Porovnání produktivity vychází z doporučených řezných podmínek jednotlivých výrobců (viz tabulka 7, 8, 9).



Graf 3 - porovnání produktivity obráběcích operací prováděných na hřídeli

Nejvíce produktivní nástroje a nástrojové materiály z porovnávaných výrobců má pro operace na hřídeli firma Sandvik Coromant. Druhou nejvyšší produktivitu mají nástroje a nástrojové materiály firmy Iscar. Nejnižší produktivitu má firma Seco tools.

## 4. Stroje pro obrábění komponent VE

Největším rozdílem mezi standardním obráběním a obráběním součástí větrných elektráren je v jejich rozměrnosti. Tomu jsou samozřejmě také přizpůsobeny obráběcí stroje. Rozměrné komponenty často nejsou vyráběny jen v malých dávkách, a to je i případ větrných elektráren. Komponenty jsou extrémně namáhány nerovnoměrným zatížením větru. Průměrně je větrná elektrárna v provozu 120000 hodin, a proto je požadována nejvyšší kvalita. Ta je však ohrožena, pokud výrobci volí komplikovanou výrobní technologii, při které dochází k častým přepnutím obrobku (komponenty). [50]

### 4.1. Obrábění ocelových a litinových komponent

#### 4.1.1. Vertikální soustružnické centrum VTC-8000-H

Stroj VTC-8000-H firmy Danobat nabízí vysokou produktivitu a univerzálnost. Hlavní konstrukční prvky jsou vyrobeny z litiny, kvůli zabránění vibracím a zajištění maximální tuhosti stroje. Díky velikosti pracovního stolu a dlouhým posuvům je tento stroj vhodný k obrábění příruby pro spojení segmentů stožáru větrné elektrárny. [41]

Max. soustružený průměr [mm]	8000
Průměr stolu [mm]	7000
Výkon motoru stroje [kW]	48-71-105
Výkon vřetena [kW]	37
Max. hmotnost obrobku [kg]	150000
Posuv vřetena v ose „x“ [mm]	8800
Posuv vřetena v ose „z“ [mm]	2000

Tabulka technických specifikací soustružnického centra VTC-8000-H [42]



Obr. 4.1.1 – VTC-8000-H [42]

#### 4.1.2. Frézovací a vyvrtávací centrum typu FXR

FXR vyvrtávací a frézovací centrum firmy Soraluce disponuje širokou škálou volitelných funkcí a příslušenství, jako jsou různé frézovací a vyvrtávací hlavy, systém automatické výměny nástrojů, pomocné stoly a mnoho dalších. Díky tomu je jedním z nejflexibilnějších center na trhu. Výborně se hodí pro obrábění nábojů větrných elektráren. [44]

Podélný posuv v ose „x“ [mm]	6000-30000
Vertikální posuv v ose „y“ [mm]	až 8000
Posuv v ose „z“ [mm]	až 1900
Výkon vřetena [kW]	100
Rychloposuv [mm/min]	20000

Tabulka technických specifikací frézovacího a vyvrtávacího centra FXR[43]



Obr. 4.2.1 – FXR [45]



### 4.1.3. Horizontální bruska pro externí a interní broušení HG-92

Horizontální bruska HG-92 pro broušení středních a velkých dílů má zajištěnu vysokou tuhost díky jejím hlavním konstrukčním prvkům z perlitické litiny. K dispozici jsou brusné kotouče konvenční, diamantové i kotouče z kubického nitridu boru. Tento stroj firmy Danobat je vhodný pro broušení hlavních hřídel větrných elektráren. [40]

Vzdálenost mezi hroty	5000mm
Max. délka k broušení	5000mm
Max. váha mezi hroty	5000kg
Max. průměr brus. kotouče	1015mm
Max. brusný průměr	850mm

Tabulka technických specifikací horizontální brusky HG-92[46]



Obr. 4.3.1 – HG-92 [46]

### 4.1.4. Obráběcí centrum VLC 500

Tento multifunkční stroj firmy EMAG je vhodný pro kompletní obrobení velkých dílů na jedno upnutí. Integrované technologie umožňují měkké a tvrdé obrábění, přerušované řezy, soustružení, vrtání, frézování, broušení, těžké obrábění s vynikající přesností. Základ stroje tvoří vysoce kvalitní polymer granit.[47]

Průměr sklíčidla [mm]	500
Oběžný průměr [mm]	820
Podélný posuv v ose „x“ [mm]	2350
Podélný posuv v ose „z“ [mm]	700

Tabulka technických specifikací obráběcího centra VLC 500 [47]



Obr. 4.4.1 – VLC 500 [47]

#### 4.1.5. Obráběcí centrum U5-Bridge Type

Jedná se o obráběcí 5-osé centrum firmy MAG. Rozsah a flexibilita obráběcího centra U5-Bridge Type činí tento stroj ideálním k obrábění rozměrných částí větrných elektráren. Hlavně velký rozsah osy „x“ umožňuje výrobcům uspořádat pracovní prostor tak, aby bylo dosaženo maximálních výkonů.[48]

Podélný posuv v ose „x“ [mm]	4627
Podélný posuv v ose „y“ [mm]	5000
Podélný posuv v ose „z“ [mm]	1525
Rozpětí stolu [mm]	volitelné
Hmotnost obrobku [mm]	neomezená
Rychloposuv [m/min]	20

Tabulka technických specifikací obráběcího centra U5-Bridge Type [48]

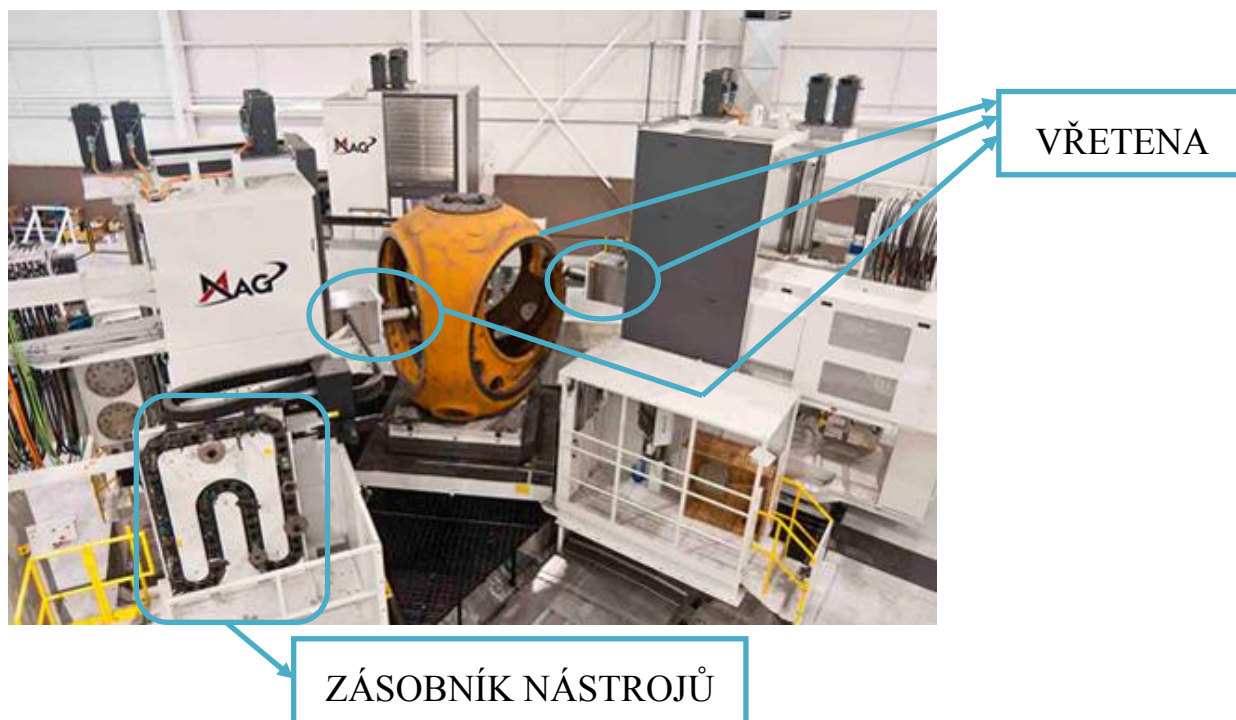


Obr. 4.5.1 – U5-Bridge Type [48]

#### 4.1.6. Systém MEGAFLEX

Jedná se o specializovaný systém pro obrábění náboje větrných elektráren převzatý z automobilového průmyslu a uzpůsobený pro obrábění velkých obrobků. Firma Astraeus obrábí náboje o hmotnosti až 18144kg a její produkce se pohybuje kolem 18000 kusů nábojů za rok.

Systém MEGAFLEX je založen na 3 vyvrtávačkách MAG FTR 5000 pracujících současně na třech čelech, ke kterým budou v budoucnu připojeny lopatky. Pracovní stůl má možnost rotace kolem osy y. Systém zahrnuje koncept procesu, naprogramování, systém strojů a zásobníky nástrojů (Obr. 4.9.3). Systém vykonává až 20 obráběcích operací (frézování, vrtání, zahlubování) na jedno upnutí, ve velice krátkém čase a za dodržení přesných tolerancí. Ve firmě Astraeus vyrábějí běžně 1 náboj za směnu. Při procesu je aplikováno MQL (Minimum Quantity Lubrication), tedy minimální přimazávání.[37]



Obr. 4.9.1 - Systém MEGAFLEX [37]



Obr. 4.9.3 – Detail zásobníku nástrojů [37]

## 4.2. Obrábění kompozitních komponent

Mezi obráběním kompozitních materiálů a obráběním kovů jsou značné rozdíly v mnoha aspektech. Hlavním rozdílem je tvorba třísky. Tu břit při obrábění kompozitního materiálu nevytváří stříhem, ale odlamováním materiálu. Dochází k odřezávání měkké pryskyřice a zároveň k odlamování tvrdých vláken výztuže. Výsledným odpadem je tedy prach a jemné měkké třísky. Reakce na obráběcí nástroj se může lišit podle složení a vlastností jednotlivých

složek kompozitu. Důležitými faktory při obrábění kompozitu jsou volba nástroje a vytváření správného řezu. To znamená volba geometrie a dobrá odolnost proti opotřebení nástrojů.[55]

### 4.3. Obrábění kořene lopatky

Firma MAG nabízí řešení pro obrábění kořene lopatky.

#### 4.3.1. Plně automatizované obrábění kořene lopatky

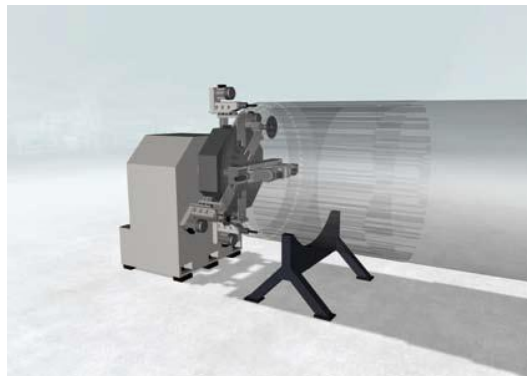
Zahrnuje dělení, frézování, vyvrtávání a montáž šroubů. Stroj je navržen tak, aby byla umožněna rychlá výměna lopatky. Modularita systému zvyšuje produktivitu a výkon.[52]



Obr. 4.8.1.1 – Plně automatizovaný stroj [52]

#### 4.3.2. Poloautomatizované obrábění kořene lopatky

Jedná se o efektivní řešení pro menší dávky. Toto řešení zahrnuje dělení, frézování, vyvrtávání.[52]



Obr. 4.8.2.1 – Poloautomatizovaný stroj [52]

#### 4.3.3. Robotické ořezávání a broušení

Využití šestiosých robotů k odstranění otřepů.[52]



Obr. 4.8.3.1 – Robotické stroje [52]

## 5. Závěr

Větrná elektrárna jako celek je složena z mnoha komponent, jejichž materiálem je převážně ocel a litina. Tomu také odpovídají zvolené materiály vyměnitelných břitových destiček. U výrobců Sandvik Coromant, Seco a Iscar je patrné, že pro obrábění příruby používají VBD aplikační skupiny P. Skupina P je doporučována pro obrábění oceli. To vyhovuje i konstrukční oceli S355NL příruby. Pro obrábění náboje používají většinou VBD aplikační skupiny K, která je doporučována pro obrábění litiny. To opět vyhovuje tvárné litině EN-GJS-400-18-LT náboje. Posledním zkoumanou součástí byla hlavní hřídel větrné elektrárny. Pro tuto komponentu používají vybraní výrobci VBD aplikační skupiny P, která je opět doporučována pro obrábění oceli. To vyhovuje oceli 42CrMo4 či 34CrNiMo6 hlavní hřídele.

Hlavním cílem práce bylo porovnat produktivitu zmíněných výrobců. Všichni tito výrobci používají nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Povlaky břitových destiček byly vesměs stejné nebo podobné. Výrobci používají hlavně povlak  $Al_2O_3$ , který poskytuje tepelnou a chemickou ochranu a povlak TiCN, kvůli ochraně proti mechanickému opotřebení. Jako substrát destičky je použit slinutý karbid, zaručující dostatečnou tvrdost pro vysoké řezné podmínky. Dosahuje vynikající odolnosti břitu, a to především díky přítomnému kobaltu.

Porovnání produktivity bylo docíleno díky shromáždění doporučených řezných podmínek pro dané operace těchto výrobců. Pokud výrobce udal řezné podmínky v určitých intervalech, byly vybrány ty nejvyšší. Po zpracování výsledků je vidět, že pro obrábění na náboji je obecně nejlepší produktivita nástrojů a nástrojových materiálů od firmy Seco tools. Druhé nejlepší produktivity obecně dosáhla firma Iscar a třetí se umístila firma Sandvik Coromant. Pro obrábění hřídele je obecně nejlepší produktivita nástrojů a nástrojových materiálů od firmy Sandvik Coromant. Druhé nejlepší produktivity obecně dosáhla firma Iscar a třetí se umístila firma Seco tools. (viz. Graf 1, 2, 3).

Součástí práce je také popis specifických strojů pro obrábění komponent větrných elektráren.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] ISCAR. *Wind Power Industry*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.iscar.com/Catalogs/zip/Wind%20Power%20Brochure/Wind%20Power%20Brochure.pdf>>
- [3] Grohmann, J. *Levnější stavba větrných elektráren*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.ekobydleni.eu/vetrna-energie/levnejsi-stavba-vetrnych-elektren>>
- [4] Mágr, J. *Větrné elektrárny*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/489/obnovitelne-zdroje/Vetrne%20elektrarny.pdf>>
- [5] Česká společnost pro větrnou energii. *Stožár*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>>
- [6] The Green Initiative Fund. *Wind Power*. Dostupné z WWW:  
<[http://votetgif.com/wp-content/uploads/2012/07/wind\\_power.jpg](http://votetgif.com/wp-content/uploads/2012/07/wind_power.jpg)>
- [7] Česká společnost pro větrnou energii. *Betonový základ*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>>
- [8] Česká společnost pro větrnou energii. *Ocelový tubusový stožár*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229>>
- [9] Salzgitter Flachstahl. *S355K2+N*. Dostupné z WWW:  
<[http://www.szmt.de/MDB/downloadcenter\\_en/Hot\\_rolled\\_products\\_Steel\\_grades/Non\\_alloy\\_structural\\_steels/Non\\_alloy\\_structural\\_steels\\_S355K2\\_N.pdf](http://www.szmt.de/MDB/downloadcenter_en/Hot_rolled_products_Steel_grades/Non_alloy_structural_steels/Non_alloy_structural_steels_S355K2_N.pdf)>
- [10] BBC. *Mabey Bridge wind turbine factory opens in Chepstow*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.bbc.co.uk/news/uk-wales-13373962>>
- [11] SECO TOOLS AB. *Wind power*. Dostupné z WWW:  
<[http://www.secotools.com/CorpWeb/north\\_america/Literature\\_brochures/Wind\\_Power\\_Brochure\\_Master\\_LR.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/north_america/Literature_brochures/Wind_Power_Brochure_Master_LR.pdf)>
- [12] Salzgitter Flachstahl. *S355NL*. Dostupné z WWW:  
<<http://szfg-werkstoff.asco.de/en/matselect/pdf/WARM/S355NL.pdf>>
- [13] Shandong Iraeta Heavy Industry Co.Ltd. *Wind Power Flange*. Dostupné z WWW:  
<<http://iraeta.manufacturer.globalsources.com/si/6008845473365/pdtl/Wind-power/1053582219/Wind-Power-Flange.htm>>
- [14] Česká společnost pro větrnou energii. *Strojovna větrné elektrárny*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektarny/324>>
- [15] Vojáček, A. *El. energie z větrných elektráren - 1.díl - problematika řízení*. Dostupné z WWW:  
<<http://automatizace.hw.cz/el-energie-z-vetrnych-elektren-1dil-problematika-rizeni-0>>
- [16] VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. *Výrobky pro energetiku*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.vitkovicemachinery.com/18/cs/node/426>>
- [18] Česká společnost pro větrnou energii. *Hlavní hřídel větrné elektrárny*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/cz/clanky/hlavni-hridel-vetrne-elektarny/325>>
- [19] Shandong tongyu group co.,ltd. *Wind Turbine Main Shaft*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.tradeindia.com/fp345662/Wind-Turbine-Main-Shaft.html>>
- [20] FOCAM spol. s. r. o. *Normy*. Dostupné z WWW:  
<[http://www.focam.cz/\\_data/norms\\_48\\_1.xls](http://www.focam.cz/_data/norms_48_1.xls)>
- [21] Česká společnost pro větrnou energii. *Nosný rám strojovny*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/cz/clanky/nosny-ram-strojovny/326>>
- [22] Česká společnost pro větrnou energii. *Převodovka větrné elektrárny*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektarny/327>>
- [23] Bonus Energy A/S. *The Wind Turbine*. Dostupné z WWW:  
<<http://users.wpi.edu/~cfurlong/me3320/DProject/BonusEnergy-1998.pdf>>

- [25] ORIENTAL MOTOR USA CORP. *Planetary Gears*. Dostupné z WWW:  
<<http://www.orientalmotor.com/newsletter/PN-Geared.htm>>
- [26] Česká společnost pro větrnou energii. *Spojení mezi převodovkou a generátorem*. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/spojeni-mezi-prevodovkou-a-generatorem/328>>
- [27] Česká společnost pro větrnou energii. *Generátor větrné elektrárny*. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/generator-vetrne-elektrarny/329>>
- [29] Česká společnost pro větrnou energii. *Systém natáčení strojovny*. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/system-nataceni-strojovny/330>>
- [30] Česká společnost pro větrnou energii. *Hydraulické systémy větrné elektrárny*. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/hydraulicke-systemy-vetrne-elektrarny/331>>
- [31] Gurit. *Wind Turbine Blade Structural Engineering*. Dostupné z WWW: <[http://www.gurit.com/files/documents/3\\_Blade\\_Structure.pdf](http://www.gurit.com/files/documents/3_Blade_Structure.pdf)>
- [32] <http://factory.dhgate.com/wind-generator/iron-casting-wind-turbine-rotor-hub-p37532239.html>
- [33] HegerGuss. *Products for wind turbines*. Dostupné z WWW: <<http://www.heberguss.com/en/products/wind-energy/>>
- [34] Schaeffler Group USA, Inc., INA USA Corp. *Rolling Bearings enhance wind turbine rotor shaft performance*. Dostupné z WWW: <<http://news.thomasnet.com/fullstory/Rolling-Bearings-enhance-wind-turbine-rotor-shaft-performance-594285>>
- [35] Ms. Helen Han. *Wind Tower Flanges*. Dostupné z WWW: <[http://luyang.en.alibaba.com/product/280891720-210700190/Wind\\_Tower\\_Flanges.html](http://luyang.en.alibaba.com/product/280891720-210700190/Wind_Tower_Flanges.html)>
- [36] Sandvik Coromant. *Hub*. Dostupné z WWW: <<http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Windpower/flip/Hub/pdf/Hub.pdf>>
- [37] MAG. *New MEGAFLEX machining system blows away cycle time for wind-hub production*. Dostupné z WWW: <<http://www.mag-ias.com/en/mag-news/press-archive/archive/archive2/press-archive/2012/article/article/new-megaflex-machining-system-blows-away-cycle-time-for-wind-hub-production.html>>
- [38] Sandvik Coromant. *Main Shaft*. Dostupné z WWW: <[http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Windpower/flip/MainShaft\\_Met/pdf/MainShaft\\_Met.pdf](http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/Windpower/flip/MainShaft_Met/pdf/MainShaft_Met.pdf)>
- [39] Sandvik Coromant. *Best practice - Connecting ring*. Dostupné z WWW: <<http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/windpower/Pages/Best-practice---Connecting-ring.aspx>>
- [40] Danobatgroup. *High precision grinding machines*. Dostupné z WWW: <<http://www.slideshare.net/DANOBAT/danobat-grinding>>
- [41] Danobatgroup. *VTC-8000-H*. Dostupné z WWW: <<http://www.danobatlathes.com/media/uploads/pdf/vertical-lathe-VTC-8000-H.pdf>>
- [42] Danobatgroup. *Forging and Rings - Vertical Lathes*. Dostupné z WWW: <<http://www.danobatgroup.com/en/lathe-machines/turning-centre/vtc-h>>
- [43] Danotabgroup. *FLOOR TYPE MILLING BORING MACHINES*. Dostupné z WWW: <<http://www.danobatgroup.com/en/milling-boring/floor-type/fxr>>
- [44] Danobatgroup. *FLOOR TYPE MILLING-BORING CENTRE*. Dostupné z WWW: <<http://www.danobatgroup.com/files/floor-type-milling-boring-machines-fxr.pdf>>
- [45] Danobatgroup. *Machine-tools allied with the wind*. Dostupné z WWW: <<http://press.danobatgroup.com/wp-content/uploads/Wind-power-machining-tools.pdf>>

- [46] Danobatgroup. *HORIZONTAL EXTERNAL & INTERNAL GRINDING MACHINE HG*. Dostupné z WWW: <<http://www.danobatgroup.com/en/grinding-machines/horizontal/external-internal/hg>>
- [47] Emag. *Vertical multi-function production machine*. Dostupné z WWW: <<http://www.emag.com/machines/turning-machines/universal-vlc/vlc-500.html>>
- [48] Mag. *U5 Universal Machining Center*. Dostupné z WWW: <<http://www.mag-ias.com/en/mag/products-services/milling/gantry-and-portal-mills/u5-portal-mill.html#Applications>>
- [49] MAG. *MAG introduces new VIPER® gantry fiber placement system for supersize wind energy and aerospace parts – first unit acquired by Astraeus Wind Energy*. Dostupné z WWW: <<http://www.mag-ias.com/en/mag-news/press-archive/archive/archive2/press-archive/2012/article/article/mag-introduces-new-viperR-gantry-fiber-placement-system-for-supersize-wind-energy-and-aerospace-par.html>>
- [50] Deliš, M. *Snadné obrábění náročných dílů*. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/snadne-obrabeni-narocnych-dilu.html>>
- [51] MAG. *Solution For The Wind Turbine Industry*. Dostupné z WWW: <[http://www.mag-ias.com/fileadmin/user\\_upload/Mag\\_One/downloads/broschueren/100910\\_MAG\\_wind\\_turbine\\_industry\\_en\\_low.pdf](http://www.mag-ias.com/fileadmin/user_upload/Mag_One/downloads/broschueren/100910_MAG_wind_turbine_industry_en_low.pdf)>
- [52] MAG. *Automated Systems For Wind Blade Manufacturing*. Dostupné z WWW: <[http://www.mag-ias.com/fileadmin/user\\_upload/Mag\\_One/Brochuere/100614\\_MAG\\_Wind\\_Solutions\\_US\\_low.pdf](http://www.mag-ias.com/fileadmin/user_upload/Mag_One/Brochuere/100614_MAG_Wind_Solutions_US_low.pdf)>
- [53] Škorpík, J. *Větrné turbíny a ventilátory*. Dostupné z WWW: <<http://www.transformacni-technologie.cz/vetrne-turbiny-a-ventilatory.html>>
- [54] Česká společnost pro větrnou energii. *Výroba rotorového listu větrné elektrárny*. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/vyroba-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/315>>
- [55] SÝKORA, R. *Bakalářská práce – Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň: ZČU, 2012
- [56] Sandvik Coromant. *Best practice - Main Shaft*. Dostupné z WWW: <<http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industriesolutions/windpower/Pages/Best-practice---Main-shaft.aspx>>
- [57] Iscar. *Milling tools*. Dostupné z WWW: <<http://www.iscar.cz/Catalogs/zip/CMS%20Catalogs/Milling%20Systems%20catalog.pdf>>
- [58] Iscar. *Turning and threading tools*. Dostupné z WWW: <<http://www.iscar.cz/Catalogs/zip/CMS%20Catalogs/Turning%20and%20Threading%20Tools.pdf>>
- [59] Iscar. *Hole making tools*. Dostupné z WWW: <<http://www.iscar.cz/Catalogs/zip/CMS%20Catalogs/Hole%20Making%20Tools.pdf>>



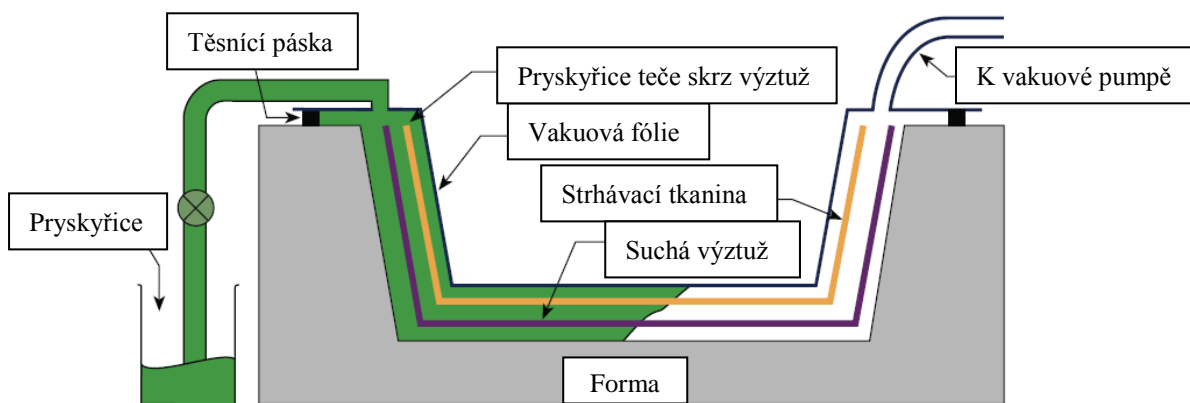
## 7. Příloha

### 7.1. Výroba lopatky větrné elektrárny

Výroba lopatek je možná dvěma způsoby. Buď pomocí infuzní technologie pro výrobu kompozitů, nebo pomocí předimpregnovaných vláken - tzv. prepregů (polotovary k výrobě vláknových kompozitů). První zmíněná technologie je sice levnější, výrobci však velice často vyrábí lopatky pomocí prepregů. Důvodem pro volbu druhé zmíněné technologie jsou lepší vlastnosti pryskyřice, nižší hmotnost a snazší využití uhlíkových vláken (infuze uhlíkových vláken je velmi obtížná).[31]

#### 7.1.1. Infuzní technologie

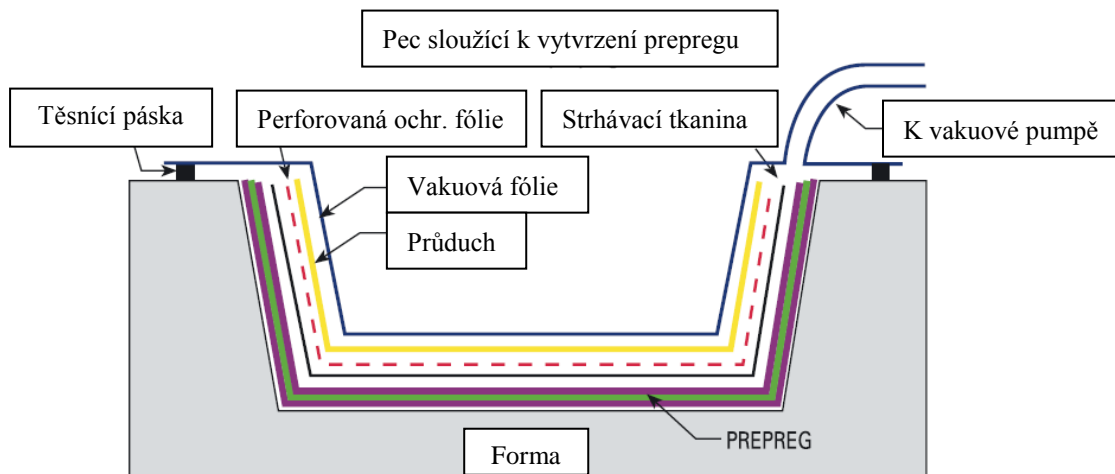
Princip infuze spočívá v tom, že se nasaje pryskyřice do tkaniny pomocí vakua. Vakuum snižuje tlak na jednom konci zásobníku tkaniny, umožňujíc atmosférickému tlaku tlačit pryskyřici skrz vlákna.[31]



Obr. 7.1.1.1 – Výroba lopatky infuzní technologií [31]

#### 7.1.2. Předimpregnovaná vlákna

Postupným kladením tkaniny do formy a prosycováním pryskyřicí se dosáhne kompozitu lopatky. Pryskyřice má vysokou viskozitu, a proto umožňuje snadnou manipulaci a řezání. Následuje vytvrzení ve vakuu při teplotách mezi 80 – 120°C.[31]



Obr. 7.1.2.1 – Výroba lopatky pomocí prepregů [31]

Prepregy jsou často dodávány v podobě role. Pokrývání povrchu formy prepregy závisí na tkanině (druhy vláken, orientace, šití, vzor) a druhu pryskyřice.

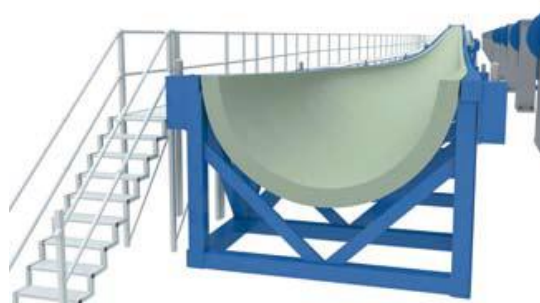
Pryskyřice je při pokojové teplotě napůl v pevném stavu. Viskozita musí být významně redukována k umožnění impregnace. K dosažení tohoto cíle slouží dva způsoby. Buď je tak usku-  
tečněno pomocí rozpouštědla nebo pomocí tepla. U prepregů používaných ve větrných elek-  
trárnách je viskozita snížena za pomoci tepla. Prepregy jsou skladovány při nízké teplotě. Před pokládáním musí být nahřáty na pokojovou teplotu. Před vytvrzením musí být odstraněn vzduch z laminátu. [31]



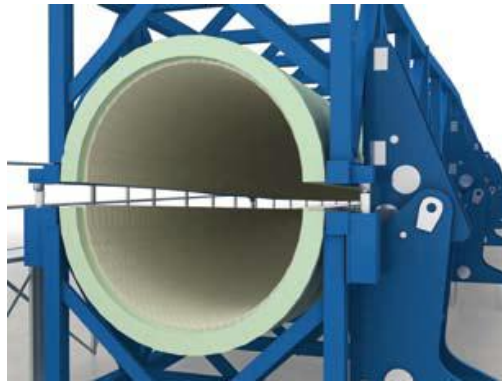
Obr. 7.1.2.2 – Výroba lopatky větrné turbíny [53]

## 7.2. Forma pro výrobu lopatek větrné elektrárny

Forma je vyrobena jako negativ tvaru. Samotná výroba formy je velice drahá. Kvůli velikosti lopatek se formy vyrábějí z jednotlivých, zhruba 1,5m širokých dílů, které se následně spojí. Pomocí CNC frézek se vyfrézuje přesný tvar. Materiálem formy bývá často umělé dřevo nebo hliník. Forma je vsazena do ocelového rámu, aby byla zajištěna tuhost. V konečné fázi je povrch formy ještě broušen a leštěn. Forma a rám jsou navrženy tak, aby šli oba díly lopatek dobře slepit k sobě. [54]



Obr. 7.1.3.1 – Forma a polovina lopatky [52]



Obr. 7.1.3.2 – Spojení částí forem [52]

### 7.3. Systémy umístování vláken - Viper 7000

Viper 7000 je vertikální portálový šestiosý stroj sloužící k výrobě komponent z kompozitních materiálů. Tyto stroje jsou převážně určeny pro solární, větrný, ale i letecký průmysl. Systém disponuje výrobním procesem nahřívání a pokládání prepregových pásků. Zahrnuje mnoho dalších patentovaných funkcí, jakými jsou zhutňování válcem, odstranění podkladové fólie či řez jakéhokoliv prepregového pásku. Stroj je hojně využíván při výrobě lopatek větrných elektráren, a to především při výrobě skořepiny, laminátového plátu nebo příčníků.[49]



Obr. 4.6.1 – Viper 7000 [51]