



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO

RADIAALIKOMPRESSORIN JUOKSUPYÖRÄN VALMISTUS KONEISTAMALLA

Lappeenrannassa 12.12.2007

Markku Nikku
0257072
ENTE 4

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energia- ja ympäristötekniikan osasto

Markku Nikku

Radiaalikompressorin juoksupyörän valmistus koneistamalla

Esitetty kandidaatintyö seminaarissa, Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa, 13.12.2007.

12.12.2007

20 sivua

6 kuvaa

1 taulukko

Tarkastaja: Prof. Jari Backman

Ohjaaja: Prof. Jari Backman

Hakusanat: radiaalikompressor, juoksupyörän valmistus, 5-akseli, viisiakselinen, koneistaminen

Keywords: radial, centrifugal compressor, impeller, blisk, manufacturing, 5-axis, five-axis,
machining

Työssä on tarkasteltu radiaalikompressorin juoksupyörän valmistamista koneistamalla viisiakselisella työstökoneella sekä vertaillaan sitä muihin valmistustapoihin. Lisäksi työssä on esitelty lyhyesti viisiakselisessa koneistamisessa käytettäviä työkaluja ja juoksupyörien materiaaleja.

Erityiset kiitokset: Jari Selesvuo, Imatran Kone Oy ja Astex Engineering Oy

SISÄLTÖ

1	Johdanto	1
2	Radiaalikompressori.....	1
3	Valmistusmenetelmät.....	2
3.1	Koneistamisen edut	4
3.2	Koneistamisen haasteet	4
4	Viisiakselisen koneistuksen valmistusketju	5
4.1	Tietokoneavusteinen suunnittelu ja valmistus	6
4.1.1	Valmistuksen suunnittelun haasteet	7
4.2	Koneistaminen viisiakselisella työstökoneella.....	8
4.2.1	Työstökoneen akselit.....	8
4.2.2	Työstökoneen ominaisuudet	10
4.2.3	Koneistamisen valmistelut	10
4.2.4	Koneistamisen vaiheet	11
4.2.5	Koneistamisen ongelmat	12
4.2.6	Työkalut	13
5	Materiaalit	15
5.1.1	Alumiini	15
5.1.2	Teräs.....	16
5.1.3	Titaani	16
5.1.4	Superseokset	17
6	Kustannukset.....	17
7	Valmistusaika.....	18
8	Yhteenvedo	20

Lähteet

Kuvat

Kuva 1. Radiaalikompressorinosat	2
Kuva 2. Radiaalikompressorin juoksupyörä	5
Kuva 3. Työstökoneen akselit.....	8
Kuva 4. Deckel Maho DMU 70eVolution koneistuskeskuksen akselit.....	9
Kuva 5. Haas VF-6 TR koneistuskeskuksen akselit	9
Kuva 6. Aihio, tiivisteurat ja kiinnityspaletti.....	11
Kuva 7. Pallopäätyökalu.....	14
Kuva 8. Työkaluja.....	15

Taulukot

Taulukko 1. Valmistusmenetelmät	2
---------------------------------------	---

1 Johdanto

Turbokoneiden valmistus asettaa monia haasteita valmistustekniikalle. Juoksupyörissä esiintyvät geometriat voivat olla hyvin monimutkaisia sisältäen kaarevia pintoja, joissa on sekä kuperuutta että koveruutta. Tämän lisäksi juoksupyörissä pinnanlaatuvaatimukset ovat korkeat sekä toleranssit tiukat. Valmistusvirheitä tai poikkeamia geometriasta ei voida sallia suurten pyörimisnopeuksien takia.

Myös materiaalien valinta on haasteellista käytössä esiintyvien suurten paineiden ja lämpötilojen takia. Lisäksi juoksupyörien on kestävä suuria rasituksia ja kulumista. Silti juoksupyörien siivet ovat usein hyvin ohuita.

Tässä työssä tarkastellaan radiaalikompressorin juoksupyörän valmistamista koneistamalla sekä luodaan lyhyt katsaus käytettyihin materiaaleihin. Työssä käytetään jonkin verran valmistustekniikan termistöä, johon voi tutustua esimerkiksi lähteen 9 avulla.

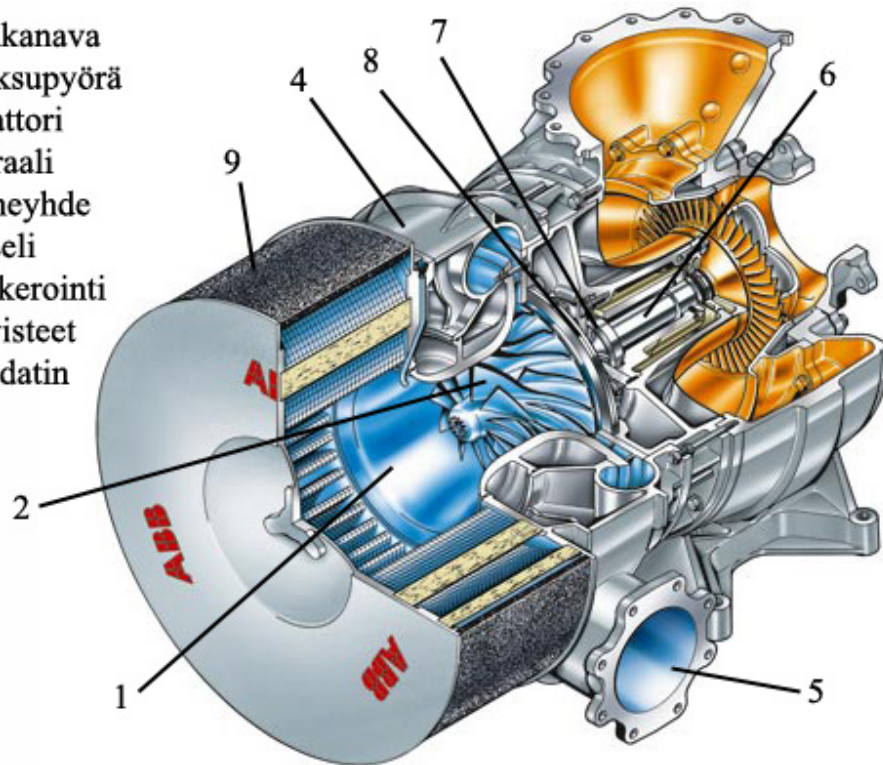
2 Radiaalikompressor

Kompressor on laite, jolla kaasun paine saadaan nostettua suuremmaksi. Radiaalikompressorilla tarkoitetaan kineettistä kompressoria, jossa juoksupyörän pyörimisliikkeen avulla saavutetaan paineenousu.

Kuvassa 1 on esitetty radiaalikompressorin pääosat, joihin kuuluvat juoksupyörä (voidaan kutsua myös nimillä roottori tai impelleri), staattori, spiraali (tai pesä), akseli, sisääntuloaukko (imuyhde), ulostuloaukko (paineyhde), laakerointi ja tiivisteet.

Kompressor liitetään moottoriin, joka pyörittää akselia saaden näin juoksupyörän pyörimään. Juoksupyörä kohdistaa sen vaikutusalueella oleviin kaasumolekyyleihin keskeisvoiman, jonka vaikutuksesta niiden nopeus kasvaa. Kaasun kiihtyessä kulkeutuu se juoksupyörän sisäkehältä ulkokehälle ja poistuu juoksupyörästä huippunopeudella jättöreunalla. Tämän jälkeen se kulkee staattorin läpi, jolloin kaasun virtausnopeus laskee ja paine nousee. Kaasu johdetaan spiraalista käyttökohteeseen ulostulolaipan läpi. Sisääntuloon muodostuu pyörimisliikkeen ansiosta alipaine, johon virtaa uutta kaasua ja näin kompressor imee jatkuvasti lisää kaasua.

1. Imukanava
2. Juoksupyörä
3. Staattori
4. Spiraali
5. Paineyhde
6. Akseli
7. Laakerointi
8. Tiivisteet
9. Suodatin



Kuva 1. Radiaalikompressorinosat

/k1/

3 Valmistusmenetelmät

Juoksupyörien valmistus voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla. Yleisimpiä menetelmiä on esitelty ja vertailtu taulukossa 1.

Taulukko 1. Valmistusmenetelmät

Menetelmä	Edut	Haitat
Koneistaminen	<ul style="list-style-type: none"> - Hyvä tarkkuus ja pinnanlaatu - Ei vaadi erillistä viimeistelyä - Nopeat muutokset mahdollisia 	<ul style="list-style-type: none"> - Kalliimpaa kuin valaminen massatuotannossa - Suurien kappaleiden valmistus ei onnistu
Valaminen	<ul style="list-style-type: none"> - Halpa massatuotannossa - Toimii myös suurilla kappaleilla 	<ul style="list-style-type: none"> - Hyvä laatu vaatii usein viimeistelyn koneistamalla - Muutokset ja tuotanto hitaita
Hitsaaminen	<ul style="list-style-type: none"> - Kappaleiden valmistus voidaan toteuttaa yksinkertaisemmilla koneilla - Sallii suurten kappaleiden valmistuksen yksinkertaisemmin 	<ul style="list-style-type: none"> - Ei voida soveltaa monimutkaisille geometrioille - Soveltuu huonosti massatuotantoon - Saumojen viimeistely koneistamalla - Vaatii viimeistelyn

Taulukossa 1 esitettyjen tapojen lisäksi on olemassa myös muita valmistustapoja kuten esimerkiksi juottaminen ja takominen, mutta koska ne eivät ole turbotekniikan kannalta yleisiä valmistustapoja, ei niitä käsitellä tämän työn yhteydessä. Hyviin tarkkuuksiin johtavat myös sähköiset (EDM) tai sähkökemialliset (ECM) menetelmät, joilla päästään, ainakin teoriassa, jopa mikrometriä tarkkuuksiin ja materiaalin kovuudesta riippumatta työkalu ei kulu. Nämä tekniikat soveltuvat hyvin turbokoneen osien valmistukseen ja niitä käytetään yleensä muottien valmistuksessa. /1,2,3/

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan vain juoksupyörien valmistusta viisiakselikoneistamalla. On tärkeää huomata, että valamisessa käytettävät muotit voidaan, ja usein valmistetaan, koneistamalla. Lisäksi on otettava huomioon, ettei valamisella päästä yhtä hyvään pinnanlaatuun kuin koneistamalla ja tämän vuoksi valamalla valmistetut juoksupyörät viimeistellään koneistamalla, jos niiltä vaaditaan hyvää pinnanlaatua. /1,3,5,6/

Valmistustekniikka on voimakkaasti sidoksissa valmistettavan juoksupyörän kokoon. Pienet juoksupyörät tehdään koneistamalla umpiaihioista. Keskisuurten juoksupyörien lähtökohtana voi olla myös tarkkuusvalu, jonka jälkeen pinnat viimeistellään koneistamalla. Tarkkuusvalu säästää materiaalikustannuksia ja koneistamiseen kuluva aikaa, mutta valumuotin valmistukseen kuluva aika on moninkertainen umpiaihio-koneistuksen aikaan verrattuna. Suurilla juoksupyörillä umpiaihion materiaalihukka kasvaisi moninkertaiseksi ja koneistavan laitteen koko ja myös hinta nousisivat kohtuuttomiksi. Koneistus voidaan tehdä pienemmillä koneilla, mutta tällöin jouduttaisiin yleensä kiinnittämään ja irrottamaan kappale useita kertoja, mikä pidentää läpimenoaikaa ja kasvattaa virheiden mahdollisuutta. Tämän vuoksi suuret juoksupyörät voidaan joko tarkkuusvalaa ja koneistaa tai vaihtoehtoisesti koneistaa tai valaa osissa, koota hitsaamalla ja koneistaa lopuksi haluttuun pinnanlaatuun liitoskohtien osalta. /5,6,10/

Riippumatta materiaalin homogeenisyydestä ja valmistustekniikasta, koneistamalla osissa tai valamalla juoksupyörä tarvitsee yleensä vielä erillisen tasapainotuksen. Juoksupyörän laadun mittana voidaankin käyttää tasapainotuksen tarvetta. Mitä vähemmän juoksupyörää tarvitsee tasapainottaa, sitä parempi se on ja sitä parempi on sen valmistusmenetelmä. Suurnopeustekniikassa sallittu epätasapaino riippuu pyörimisnopeudesta, esimerkiksi 30 000 kierrosta minuutissa pyörivän juoksupyörän tasapainotuksen tarve ei saa ylittää 10 grammaa

materiaalia. Tasapainotus tapahtuu tasapainotuskoneessa poistamalla esimerkiksi juoksupyörän takaa pieneltä alueelta ohut kerros materiaalia. /6,10/

3.1 Koneistamisen edut

Kuten jo aikaisemmin on todettu, pienet ja keskisuuret juoksupyörät on mielekkäintä tehdä koneistamalla yhdestä ahiosta. Tässä saavutetaan useita etuja:

Yhdestä ahiosta koneistettaessa ei tarvitse huomioida kuin muutamia toleransseja kuten esimerkiksi akselireiän tolerointi. Vastaavasti useasta osasta kokoamalla joudutaan eri osien liitokset toleroimaan toistensa suhteen ja mahdollisesti viimeistelemään liitoksen pintoja liittämisen jälkeen sekä tasapainottamaan esimerkiksi koneistamalla. /5,6/

Myös lämpölaajenemista on helpompi hallita, kun juoksupyörä on samaa kappaletta, milloin lämpötilaerot kappaleessa tasaantuvat useasta osasta koottua paremmin. Yhdessä osasta valmistetun kappaleen lujuus on myös suurempi kuin koottujen. Esimerkiksi hitsaamalla kootuissa kappaleissa hitsaussauman lähettyvillä voi esiintyä haurautta, vaikka sauma itsessään olisi jopa lujempi kuin materiaali. /5,6/

Automatisoinnin ansiosta koneistaminen on nopeaa ja tarkkuus ja laatu erinomaista. Nykyisten koneistuskeskusten tarkkuudet ovat hyviä, käytännössä jopa mikrometrien luokkaa ja sadasosa asteita kulmilla. /5,6,10/

3.2 Koneistamisen haasteet

Juoksupyörien koneistamisessa ongelmaksi muodostuu usein niiden monimutkainen geometria. Juoksupyörissä on usein kaarevia muotoja sekä kuperia että koveria, niin sanottuja vapaita pintoja. Myös vaaditut toleranssit ovat tiukkoja, yleensä millimetrin ja asteen sadasosa. Tämä asettaa haasteita sekä koneistulaitteille että valmistusohjelmistoille. Tarkastellaan esimerkiksi kuvan 2 juoksupyörää. /1,3,4,10/

Kuvasta 2 nähdään, että juoksupyörän siivet muodostuvat kolmiulotteisista vapaista pinnoista. Siipien väliin jäävät solat ovat kapeita ja siivet ohuita, paksuudeltaan vain muutamia

millimetrejä. Tällaisen kappaleen valmistaminen on hankalaa, sen valmistaminen kokoamalla on erittäin työlästä ja koneistaminenkin haasteellista. /1,4,5/

Siinä missä yksinkertaiset geometriat voidaan valmistaa käyttämällä kolmiakselista työstökoneita, vaatii mielivaltaisia pintoja sisältävän juoksupyörän valmistus viisiakselista (tai jopa kuusiakselista) työstökoneita. Koska kolmiulotteisia pintoja ei voida koneistaa käsiohjauksella tyydyttävällä tarkkuudella, ovat tällaiset työstökoneet numeerisesti ohjattuja ja niiden ohjelmoinnissa käytetään hyväksi tietokoneita ja erityisiä valmistusohjelmistoja. /1,3,4,5,6,10/



Kuva 2. Radiaalikompressorin juoksupyörä

/k2/

4 Viisiakselisen koneistuksen valmistusketju

Juoksupyörien suunnittelussa ja koneistamisessa käytetään poikkeuksetta tietokoneen apua. Tämä on suoraa seurausta kolmiulotteisten pintojen työstämisen vaikeudesta manuaalisesti. Tietokoneohjaus ja automaatio ovat suuressa osassa koko valmistusketjun aikana. Seuraavaksi esitetään kooltaan keskikokoisen juoksupyörän valmistuksen vaiheet pääpiirteissään. Valmistuksesta voidaan jaotella suunnittelu-, valmistusohjeidenluonti- ja koneistusvaihe.

4.1 Tietokoneavusteinen suunnittelu ja valmistus

CAD-ohjelmilla voidaan laatia sähköinen kuva juoksupyörästä, jota voidaan käyttää suoraan kappaleen valmistuksessa. CAD-sovelluksella suunnitellaan kappaleen geometria suoraan kolmiulotteisena, jolloin todellisen kappaleen pinnoista saadaan malli valmistukseen. Kuvaa laadittaessa käytetään kappaleesta sen todellisia mittoja ja määritellään sen lopullinen geometria. Jos mahdollista, sähköiseen kuvaan voidaan liittää myös toleranssit. /5,6,8/

Tämän jälkeen geometria siirretään CAM-ohjelmistoon, jossa määritellään kappaleen koneistus. Nykyiset CAM-ohjelmistot tunnistavat kolmiulotteiset pinnat, porattavat, sorvattavat ja jyrstävät muodot suoraan CAD-dokumentista. Tämä ominaisuus helpottaa ja nopeuttaa valmistuksen suunnittelua valtavasti. Pintamalleista ohjelmisto muodostaa lastuamisstrategiasta, työkalun lastuamisalasta ja kulmasta riippuen työstöradat, joilla kyseinen pinta saadaan koneistettua. Optimaalisessa tapauksessa suunnittelijan tarvitsee vain valita pinta, syöttää lastuamisarvot, työstövarat ja -kulmat, valita koneistustapa (lastuamisstrategia) ja valita käytettävät työkalut kullekin työvaiheelle ohjelman automaattisesti tunnistuessa koneistettavat piirteet ja työjärjestyksen. Juoksupyörän symmetrisyyttä voidaan käyttää hyväksi. Usein tarvitsee suunnitella vain yhden (tai kahden jos kaksi erilaista siipeä, vrt. kuva 6) siiven koneistus ja käyttää sitä kaikkiin siipiin. Joihinkin CAM-ohjelmiin voidaan myös asettaa suoraan halutut pinnanlaatuvaatimukset, toleranssit sekä muut vaatimukset, joista ohjelmisto laskee lastuamisarvot. Lastuamisarvoilla tässä tarkoitetaan muun muassa lastunpaksuutta ja lastuamisnopeutta. Nämä arvot saadaan joko työkalukohtaisesti työkaluoppaista tietylle materiaalille tai kokemusperäisesti. /5,6,8,9,10/

Valmistusohjeiden toimivuutta ja ohjelman käyttäytymistä tutkitaan simuloinnin avulla suoraan CAM-ohjelmassa. Simuloinnissa voidaan yrittää optimoida läpimenoaikaa sekä varmistetaan, ettei kappaleen koneistusohjeissa ole karkeita virheitä. Ohjelmistot sisältävät yleensä automaattisen törmäyksen tunnistuksen kappaleeseen tai työstövaroihin jolloin simulointi pysähtyy ongelmakohtaan. /5,6,9,10/

Valmistusohjelmasta saadaan näin niin sanottu CL-data (Cutter Location data), joka sisältää muun muassa tiedon kappaleen valmistuksessa käytetyistä työkalun liikeradoista, työstöarvoista ja muista asetuksista. Tämä tieto esitetään standardin mukaisesti, jolloin se on kuin valmis NC-ohjelma, jota ei ole spesifioitu millekään tietylle valmistuskoneelle. Jotta CL-datassa kuvattu

NC – ohjelma saadaan käyttöön, se täytyy kääntää postprosessorilla valmistuskoneelle sopivaksi koodiksi. Kääntäminen tapahtuu ohjelmistoissa täysin automaattisesti postprosessorin ansiosta, ja vaikka ohjelmat ovat pitkiä, valmistuvat ne hyvin nopeasti nykyisillä tietokoneiden laskentatehoilla. Tämän jälkeen valmistus voidaan aloittaa välittömästi materiaaliainion, käytettyjen työkalujen ja koodin koneeseen syöttämisen jälkeen. Kooditiedoston koko voi vaihdella geometriasta riippuen muutamasta megatavusta aina satoihin megatavuihin. /5,9,10/

Jos halutaan simuloida koodin toimivuutta koneistavassa laitteessa, se voidaan simuloida vielä NC-muodossa erillisellä ohjelmalla. Tällöin simulaatioon lisätään työkalun lisäksi työkalun pidike, kara ja kappaleen kiinnittimet. Näin voidaan varmistaa, ettei koneistuksessa tapahdu törmäyksiä, joita CAM-simuloinnissa ei voitu todeta. /5,8/

On olemassa CAD/CAM-ohjelmistoja, jotka on suunniteltu erityisesti viisiakseliseen koneistukseen ja turbokoneiden komponenttien, kuten juoksupyörien, valmistusta varten. Nämä ohjelmat sisältävät muun muassa työkalunohjaukseen vaikuttavia algoritmeja, joilla pyritään vähentämään ylimääräisiä työkalun liikkeitä ja näin pienentämään kokonaisvalmistusaikaa. /1,4,5/

4.1.1 Valmistuksen suunnittelun haasteet

Käytännössä valmistuksen suunnittelu on kuitenkin edellä esitettyä paljon vaikeampaa. Suunnittelijalta vaaditaan hyvää kolmiulotteista ajattelua ja kykyä hahmottaa jopa viiden akselin yhtäaikaista liikettä. Tässä korostuu myös simuloinnin tärkeys valmistuksen suunnittelun apuna. Suunnittelijan kokemuksen ja asiantuntevuuden merkitys korostuu varsinkin työkalujen ja lastuamisarvojen valinnassa, koska teräpalojen kulumisesta aiheutuvat terärikot voivat aiheuttaa juoksupyörään virheen, joka voi johtaa kappaleen hylkäämiseen. Kaikki lastuamisstrategiat eivät sovellu kaikille juoksupyörille, materiaaleille ja työkaluille, vaan jokaisessa uudessa työssä on löydettävä kokemuksen mukaan kokeilemalla sopivat lastuamisarvot ja –strategiat materiaalin, geometrian ja toistensa suhteen. /5,6,10/

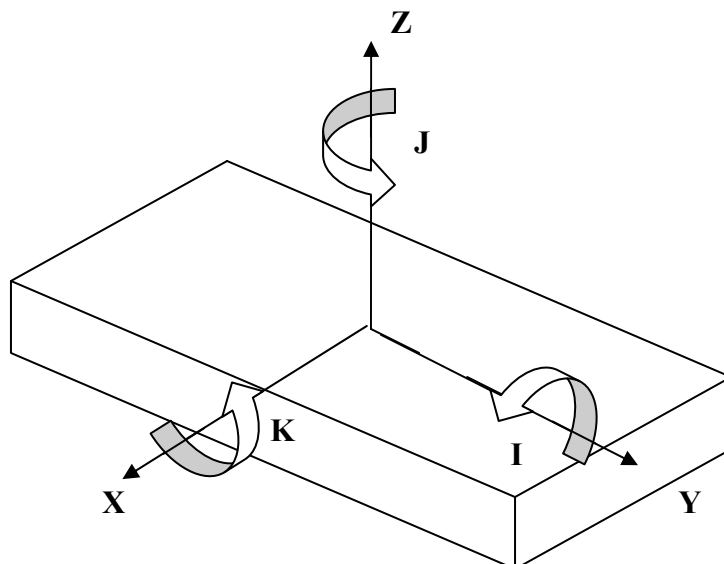
Vaikka simulointi on muodostunut hyvin tärkeäksi valmistuksessa, ei simuloinnilla pystytä ennustamaan muun muassa materiaalin käyttäytymistä tai eri strategioiden toimivuutta. Tämän vuoksi joudutaan juoksupyöristä valmistamaan prototyyppisiä, joilla eri valmistustapoja voidaan kokeilla. Valmistusta muokataan näiden kokeiden perusteella. Tämä on aikaa vievää ja myös

kallista. Voidaankin puhua ensimmäisen juoksupyörän hinnasta, johon kehitystyö lasketaan sisältyväksi. Tarkemmin hintoja ja kustannuksia on käsitelty kappaleessa 6. Kun ensimmäinen hyväksytty juoksupyörä saadaan valmiiksi, voidaan valmistusohjeita yrittää parantaa tai käyttää niitä valmistuksessa. /5,6,8,10/

4.2 Koneistaminen viisiakselisella työstökoneella

4.2.1 Työstökoneen akselit

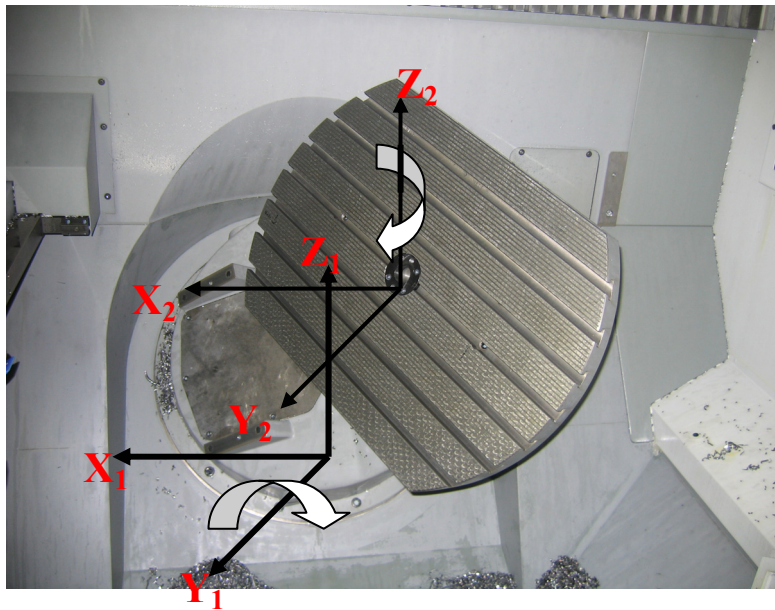
Kuten jo aiemmin mainittiin, yksinkertaisia juoksupyöriä voidaan valmistaa myös muilla kuin viisiakselisilla työstökoneilla. Kuitenkin monimutkaisemmat geometriat johtavat väistämättä siihen, että koneen akselien määrää on kasvatettava. Kuvasta 3 käyvät ilmi työstökoneen akselit.



Kuva 3. Työstökoneen akselit.

Huomion arvoista on se, että viisiakselisuus voidaan toteuttaa useammalla kuin yhdellä tavalla. Esimerkiksi riippuen koneesta voi pöytä tai vaihtoehtoisesti kara liikkua usean akselin suuntaan tai molemmat voivat liikkua. Kuvassa 4 on esitetty Deckel Maho DMU 70eVolution koneistuskeskuksen akselit. Kuvasta nähdään, että kiinnityspöytä pyörii vain oman z-akselinsa ympäri (J), jonka lisäksi pöydän kiinnitysvarsi pyörii vain y-akselin ympäri (I) karan (ei kuvassa) liikkua x-, y- ja z-suunnissa. Koneistuskeskus voi myös olla viisiakselisesti paikantuva, jolloin liikkeet viiden akselin suhteen ovat mahdollisia, mutta eivät yhtä aikaa. Tällaisia koneita kutsutaankin puoliakselisiksi, esimerkiksi 3 yhtäaikaista liikesuuntaa tarkoittaa 3,5-akselista konetta. Aidon viisiakselisuuden määritelmä onkin viiden akselin yhtäaikainen liikuttamismahdollisuus. Pyöritettäessä karaa tai pöytää tiettyihin suuntiin, joutuu 4,5-akselinen

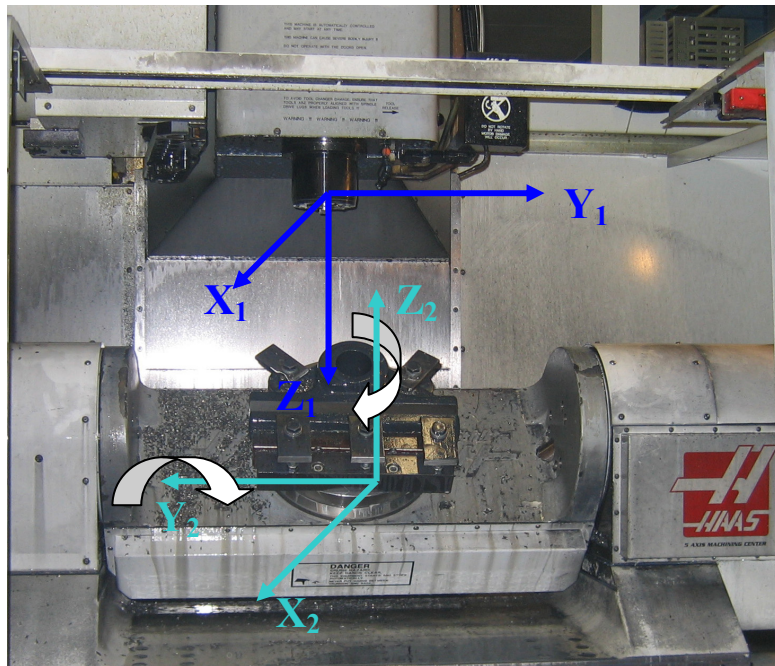
kone tekemään enemmän liikkeitä kuin aidosti viisiakselinen kone. Useita kertoja toistuessaan tällaiset liikkeet pidentävät merkittävästi kappaleen valmistusaikaa. /5,6,9,10/



Kuva 4. Decker Maho DMU 70eVolution koneistuskeskuksen akselit.

/k4/

Kuvassa 5 puolestaan on esitetty aidon viisiakselisen koneistuskeskuksen, Haas VF-6 TR, akselisto. Kara liikkuu x-, y- ja z-suunnissa ja pöytä voidaan pyörittää y- ja z-akselin ympäri.



Kuva 5. Haas VF-6 TR koneistuskeskuksen akselit.

/k7/

4.2.2 Työstökoneen ominaisuudet

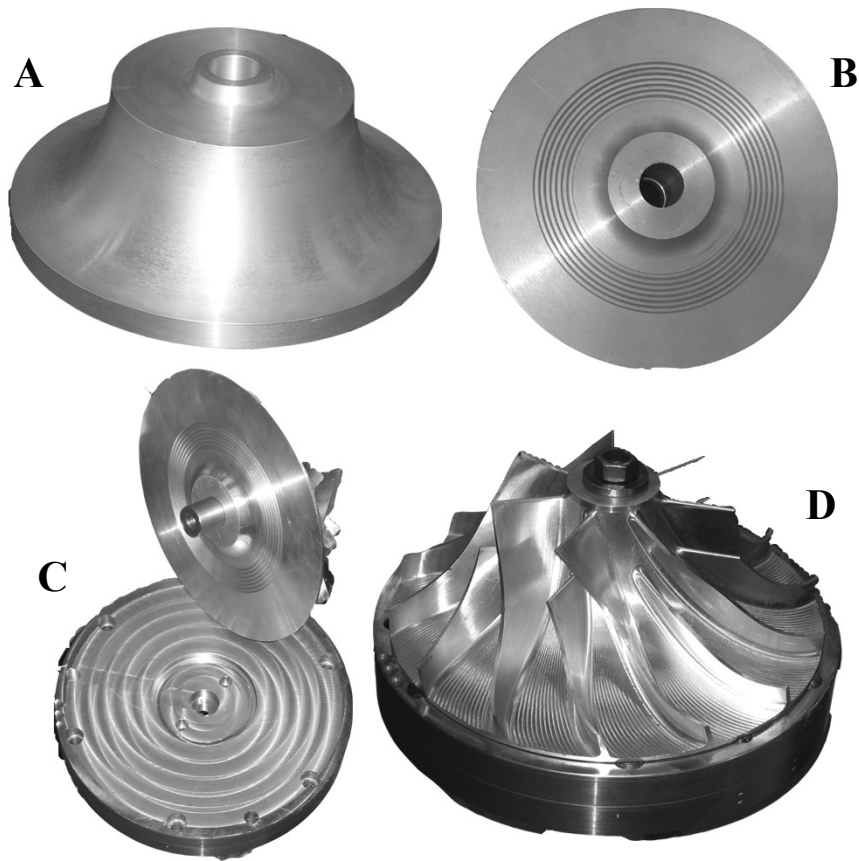
Viisiakselisen koneistuksen etuja on, että sillä voidaan koneistaa monimutkaisia geometrioita yhdellä kiinnityksellä. Tämän seurauksena koneen käyttöaika ja tuottavuus kasvavat ja uudelleen kiinnittämisestä johtuvat virheet vähenevät. Joskus juoksupyöriä koneistettaessa aihio on järkevää nostaa leikkauspöydän tasosta ylöspäin, jotta kappaletta päästään koneistamaan myös alaviistosta. /5,6,10/

Monissa koneistuskeskuksissa on valmiina tai lisäominaisuutena työkalun kulumisen ja pituuden valvonta ja karatehon tarkkailu, kuten myös törmäyksien tunnistus. Tosin pieniä työkaluja käytettäessä näihin ei voida luottaa sokeasti ja käyttäjän on valvottava koneistusta. /5,6,9/

Kaikki viisiakseliset koneet eivät sovellu juoksupyörien valmistamiseen. Koska viimeistelyssä joudutaan tekemään useita pieniä liikkeitä, täytyy työstävän laitteen moottorien olla sopivia näin hienovaraisille liikkeille. Riittävään tarkkuuteen päästään servomoottoreilla sekä lineaarimoottoreilla, joita käytetään yleensä suurnopeuskoneistuksessa. Pitkäkartisia työkaluja käytettäessä tulee huomata, että kallistettaessa terää kappaleen pinnalla hiukan joutuu kara tai pöytä tekemään huomattavasti suuremman liikkeen. Työstökoneen ohjaimelta vaaditaan, että ohjauksen tulee olla tasainen, sillä töksähtelevä terän liikuttelu jättää jälkensä kappaleeseen ja huonontaa pinnanlaatua. Töksähtely voi johtua myös tiedonsiirto-ongelmista, jos ohjain saa tiedon lähiverkon välityksellä tai ohjaus hoidetaan suoraan tietokoneelta. /5,6,10/

4.2.3 Koneistamisen valmistelut

Ennen varsinaista viisiakselista koneistamista tarvitaan materiaaliaihio, josta juoksupyörä valmistetaan. Jos koneistus tehdään umpiaihioista, tapahtuu aihion valmistaminen yleensä pyörötangosta, jonka halkaisija on sopivasti juoksupyörän halkaisijaa isompi. Tangosta sahataan sopivan mittainen aihio ja tämän jälkeen aihio sorvataan molemmilta puolilta. Koska sorvauksessa voidaan käyttää tavallista sorvia, on se järkevintä, sillä näin säästetään kalliimpaa koneistuskeskusaikaa. Sorvauksen jälkeen saadaan koneistuskeskukselle valmis aihio (kuva 6 A), jossa on akselinreikä ja tiivisteurat (B).



Kuva 6. Aihio, tiivisteurat ja kiinnityspaletti.

/k7/

Tämän jälkeen kappale voidaan kiinnittää palettiin, joka puolestaan kiinnitetään koneistuskeskuksen pöytään. Kiinnityksessä aihio ja paletti tulee asemoida tarkasti paikalleen koneen pöydän suhteen ja kiinnittää ne tukevasti, etteivät ne pääse liikkumaan koneistuksen aikana. Kuvassa 6 C juoksupyörän ja paletin samankeskisyys on toteutettu holkilla ja aihio on kiinnitetty pultilla navasta palettiin. Kun paletti on saatu koneistuskeskuksen pöytään kiinni ja työkalut, lastuamisnesteet ja NC-ohjelma ovat ajettu koneeseen, voidaan koneistaminen aloittaa.

4.2.4 Koneistamisen vaiheet

Koneistamisesta voidaan erotella, tavasta riippuen, 2-4 erillistä vaihetta. Vaiheiden lukumäärä tulee rouhintojen ja viimeistelyjen lukumääristä. Vaiheiden välillä työkalua vaihdetaan, yleensä suuremmasta pienempään. Tässä esitetään juoksupyörien koneistamisessa käytetty 4-vaiheinen koneistus vaiheittain.

- 1) Karkea rouhinta, jossa poistetaan suuria määriä materiaalia ja saadaan pääpiirteisesti näkyviin geometria ja kappaleen päämuodot. Yleensä työkaluna on suora tappijyrsin.
- 2) Hieno rouhinta tai välirouhinta, jossa ajetaan kaikki geometrian muodot näkyviin ja lähelle lopullisen kappaleen mittoja. Yleensä työkaluna on suora tappijyrsin tai pallopää.
- 3) Esiviimeistely, jossa poistetaan rouhinnasta jäänyttä materiaalia niin, että vain viimeistelyvara jää jäljelle. Työkaluna on pallopäinen kokometallinen tai kääntöpalallinen työkalu.
- 4) Viimeistely, jonka aikana poistetaan hyvin ohut kerros materiaalia ja jonka jälkeen kappale on toimintamitoissaan. Käyttämällä pientä syöttöä ja poistamalla ohutta lastua, saadaan hyvä pinnanlaatu. Työkalu on lähes poikkeuksetta pallopäinen.

Rouhinnalla tarkoitetaan työstöä, jossa aihioista poistetaan mahdollisimman paljon ainetta, jonka vuoksi rouhinnassa käytetään suuria työkaluja ja tämän seurauksena pinnanlaatu jää heikoksi. Viimeistelyssä aihioista poistetaan vain vähän materiaalia käyttäen pientä työkalua ja näin saavutetaan haluttu pinnanlaatu. Työkaluja on käsitelty enemmän seuraavassa kappaleessa. /5,9,10/

Koneistamalla päästään usein hyvään pinnanlaatuun, mutta haluttaessa vieläkin korkeampaa pinnanlaatua, voidaan pinta esimerkiksi kiillottaa. /2,3,5,6,10/

4.2.5 Koneistamisen ongelmat

Juoksupyöriä koneistettaessa joudutaan usein käyttämään pitkiä ja hoikkia työkaluja. Työkalut kiinnitetään työkalupidikkeellä työstökoneen karaan, joka pyörittää työkalua. Ajettaessa suurilla nopeuksilla nämä työkalut joutuvat kovalle koetukselle. Työkalut kuumenevat työstämisessä kitkan takia sekä niihin kohdistuu suuria voimia. Nämä olosuhteet voivat aiheuttaa koneistuksessa työkalun taipumista tai värähtelyä työkalussa ja juoksupyörässä. Taipuminen ja värähtely johtavat valmistusvirheisiin ja huonoon laatuun tai jopa työkalun, juoksupyörän tai työstökoneen rikkoutumiseen. Myös materiaalin käyttäytyminen ja muodonmuutokset voivat tuottaa ongelmia. /1,4,5,6,10/

Värähtelyä voidaan ehkäistä käyttämällä sopivia lastuamisarvoja ja kiinnittämällä kappale tukevasti. Juoksupyörien valmistuksessa värähtelyä voidaan ehkäistä muun muassa työstämällä siipi kerrallaan, jolloin jäljellä olevasta umpiaihioista saadaan tukea. Toinen vaihtoehto on täyttää virtauskanavat tukiaineella, kuten esimerkiksi vahalla. /5,6,10/

Työkalujen kuumenemista voidaan hallita suihkuttamalla lastuamismestettä työkalun ja koneistettavan kohdan pinnalle. Lastuamismeste toimii samalla voiteluaineena. Aihion tulee olla kiinnitetty tarkasti palettiin ja paletti työstökoneen pöytään. Epätarkkuudet kiinnityksen suhteen siirtävät samansuuruisen epätarkkuuden kaikkiin kappaleen mittoihin. /9,10/

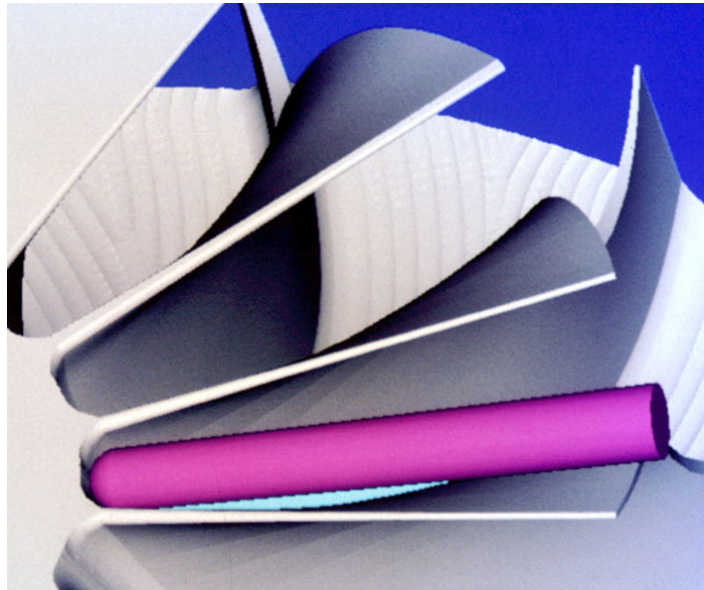
4.2.6 Työkalut

Viisiakselisessa koneistuksessa ja juoksupyörien koneistamisessa tarvitaan hieman tavallisesta koneistuksesta poikkeavia työkaluja, toki tavallisiakin voidaan käyttää.

Juoksupyörien koneistuksessa työkalut voivat olla joko pikaterästä tai kovametallisia. Pikateräksen etuina ovat niiden yleisyys ja sitä kautta halpa hinta. Lisäksi niillä voidaan lastuta suuremmalla pinta-alalla kuin kovametallilla. Haittapuolena ovat pienempi syöttö ja lastuamisnopeus jotta työkalut eivät tylsy. Kovametallisilla työkaluilla voidaan käyttää suurempaa syöttöä ja lastuamisnopeutta, mutta ne ovat kalliita ja matalamman syvyyslastun vuoksi niillä joudutaan tekemään useampi työkierto. /9,10/

Pyöreät muodot kappaleessa tarkoittavat käytännössä sitä, että työkalunkin tulee sisältää pyöreyttä. Näin säästetään valtavasti aikaa, kun pyöreät muodot voidaan koneistaa muutamalla kierroksella eikä useilla kierroksilla, jos käytettäisiin suorapäistä työkalua. /5,6,10/

Juoksupyörän geometria ja materiaali määräävät käytettävien työkalujen pituuden, paksuuden ja muodon. Pyrkimyksenä on käyttää niin paksua ja lyhyttä työkalua kuin mahdollista hyvän tukevuuden saavuttamiseksi. Jotta juoksupyörässä päästäisiin siivekkeiden välissä oleviin virtauskanaviin, tarvitaan työkaluilta pidempiä varsia. Varren pituuden määrää suurin mitta solan pohjalta siiven ulkoreunaan. Työkaluja hoikentaa niiden tarve mahtua ahtaisiin kanaviin ja jotta työkalua voitaisiin kallistella erilaisiin kulmiin. Kuvassa 7 on esitetty pallopäätyökalun käyttöä juoksupyörän virtauskanavassa, esimerkiksi viimeisteltäessä siiven pintaa ja pyöristystä solan ja siiven liitoskohdassa. /5,6,10/



Kuva 7. Pallopäätyökalu.

/k5/

Rouhinnassa ja viimeistelyssä käytetään erilaisia työkaluja. Eri materiaaleille on omat työkalunsa, koska materiaalilla on suuri vaikutus työkalujen kuumenemisen ja kulumisen kannalta. Työkalut voivat olla täysmetallisia tai kääntöpalallisia.

Kuvassa 8 on esitetty muutamia työkaluja. A: kokometallinen suora tappijyrsin, B: kokometallinen pallopää, C: kokometallinen kartiopää, D: kääntöpala pallopää, E: kääntöpala elliptisellä päällä. /1,5,6,10/

Huomion arvoista on, että useimmilla työkaluilla voidaan päättää kuinka suurta pinta-alaa työkalusta käytetään kerralla materiaalin poistoon. Se, kuinka suuri osa työkalusta lastuaa kerralla, riippuu lastuttavasta pinnasta ja lastuamisstrategiasta. Usein siipien rouhinnassa ja viimeistelyssä on mahdollista käyttää koko työkalun pituutta lastuamiseen (flank milling) (kuva 8: A, B ja C), kun taas solien rouhinnassa ja viimeistelyssä vain koko työkalun päätä tai osaa siitä (point milling) (kuva 6: D ja E). Pitkillä alueilla lastuamisessa saavutetaan lyhyempiä koneistusaikoja koska materiaalia voidaan poistaa yhdellä työkierrolla enemmän. Lisäksi pallopäisillä työkaluilla pään pitää olla kulmassa pintaan nähden, jottei lastuamisalue kutistuisi olemattoman pieneksi. Mitä lähempänä työkalu on lastuttavan pinnan normaalia, sitä pienempi on lastuamisala. Vaikka pinnanlaatu on yleensä hyvää, on jyrsintä epävakaa työkalun kärjen pyrkiessä poikkeamaan työstöreitiltä. /1,5,6,10/



Kuva 8. Työkaluja.

/k6/

5 Materiaalit

Radiaalikompressorin juoksupyörään kohdistuu valtavia voimia sen käytön aikana. Sen tulee kestää suurta keskeiskiihtyvyyttä, siipiin kohdistuvaa vääntömomenttia sekä korkeita lämpötiloja. Juoksupyörässä kaasun puristuessa sen lämpötila muuttuu paineen funktiona ja se vaihtelee voimakkaasti juoksupyörän eri osissa, sisääntulon imulämpötilasta, joka yleensä ympäristön lämpötila, aina poistoreunan loppulämpötilaan, joka voi olla satoja asteita. Tämä aiheuttaa myös lämpöjännityksiä juoksupyörään ja sen siipiin. Lisäksi juoksupyörän on kestävä myös väsymistä eikä siinä saa esiintyä muodonmuutoksia.

5.1.1 Alumiini

Keventämällä juoksupyörää voidaan keskeisvoimien suuruutta pienentää. Tähän päästään käyttämällä kevytmetalleja kuten alumiinia. Alumiinin lujat seokset ovat yleinen juoksupyörien valmistusaine ja ne voidaan valmistaa valamalla, takomalla, meistämällä tai koneistamalla. Hyvä esimerkki on sinkkiseosteinen 7075 alumiini, jolla korkea lujuus ja hyvä korroosionkesto.

Alumiinin seoksien lämpölaajeneminen pitää huomioida suunnittelussa. Lopulliset halutut ominaisuudet saadaan lämpökäsittelyillä, kuten erkauttamishehkuttamalla, karkaisulla tai vanhentamisella. Jollei koneistuksen pinnanlaatu on riittävä, voidaan sitä parantaa kiillottamalla. Alumiini anodisoidaan, jolloin sen pintaan muodostuu oksidikerros, joka parantaa korroosion, kulumisen ja kuumuudenkestoa eli pidentää juoksupyörän kestoikää. Lämpötilan noustessa yli 200 °C alumiinin lujuusominaisuudet heikkenevät kuitenkin huomattavasti. /3,6,10/

5.1.2 Teräs

Suurilla painesuhteilla, puristettaessa ilmaa normaali ilmanpaineesta yli viiteen baariin, materiaaliksi voidaan valita joko niukkaseosteista tai kromiseostettua terästä. Seosteräksillä saavutetaan suuri lujuus, kestävyys ja kuumuudenkestävyys, jotka ovat parempia kuin alumiinilla ja titaaniin verrattuna edullinen hinta. Haittapuolena on teräksen suuri ominaispaino sekä lujuuden heikkeneminen korkeissa lämpötiloissa. Terästä, varsinkin kovia seosteräksiä, koneistettaessa työkalu kuumenee voimakkaasti ja tällä on epäedullisia vaikutuksia työkalun kestävyuteen. /3,5,6/

5.1.3 Titaani

Haluttaessa vieläkin suurempaa lujuutta ja kuumuudenkestoa ovat titaani ja sen eri seokset hyvä vaihtoehto. Titaani on terästä kevyempää, omaa hyvät kuumalujuusominaisuudet sekä kestää hyvin kulumista kuten austeniittinen teräskin. Titaanilla on erittäin korkea lujuus/paino-suhde muihin kevytmetalleihin nähden. Titaaniseokset kestävät jopa 450–500 Celsius-asteen lämpötiloja menettämättä ratkaisevasti lujuuttaan, joten niitä voidaan käyttää silloin, kun lämpötilat nousevat alumiinille ja teräkselle liian suuriksi. Titaanin kovuus aiheuttaa erityisvaatimuksia työkaluille, varsinkin kuumuuden- ja kulumisenkestävyyden kannalta. /2,3/

Huomaamisen arvoista on, että materiaali elää työstämisen aikana lämpölaajenemisen johdosta, mutta myös työstön jälkeen. Tämän vuoksi kappaleen lämpölaajenemista tulee tarkkailla, jotta saavutettaisiin oikean kokoinen ja muotoinen lopputuote. /6/

5.1.4 Superseokset

Tarve korkeampaan kuumuudenkestoon ja lujuuteen on aiheuttanut materiaalien kehitystä, jonka seurauksena on syntynyt useita niin sanottuja superseoksia. Superseokset koostuvat yleensä nikkelin, koboltin ja kromin seoksista. Näistä seoksista ainakin osa sopii erinomaisesti turbokonetekniikan materiaaliksi ja pinnoitteiksi, näistä mainittakoon muun muassa Hastelloy ja Inconel. Superseosten käyttöä rajoittaa erittäin korkea hinta, joka voi olla jopa satoja euroja kilolta! /7,10/

6 Kustannukset

Juoksupyörän valmistaminen koneistamalla vaati kohtuullisen suuria investointeja. Aiemmin viisiakselisten koneistuskeskusten hinnat olivat liian suuria useille kotimaisille konepajoille. Nykyään koneistuskeskusten hinnat ovat laskeneet kohtuulliselle tasolle ja koneistuskeskukset ovat yleistyneet konepajateollisuudessa. Seuraavaksi käsitellään investointi- ja valmistuskustannuksia yleisellä tasolla ja esitetään arvioita hinnoista.

Valmistuksessa käytetyt CAD- ja CAM-ohjelmistot ovat hintaluokassa 10 000–30 000 euroa. Hintaan vaikuttavat merkittävästi ohjelmiston ominaisuudet. Tämän lisäksi ohjelmistoja täytyy päivittää. Ylläpitokustannukset ovat noin 10 % investointikustannuksista vuodessa. Tämän lisäksi henkilökuntaa tulee kouluttaa ohjelmistojen käyttämisessä. Kurssien hinnat vaihtelevat kouluttajan mukaan luokassa 300-600 euroa päivässä. /5,6,10/

Viisiakselisten koneiden hinnat ovat satoja tuhansia euroja, riippuen koneen merkistä ja ominaisuuksista. Pienten koneiden hinnat vaihtelevat 100 000-300 000 euron välillä, kun taas suuremmilla koneilla vaihteluväli on 300 000-500 000 euroa. Koneen hintaan vaikuttavista ominaisuuksista mainittakoon karateho ja -nopeus, valmistettavien kappaleiden koko ja minkälaisella tekniikalla kone on toteutettu, esimerkiksi minkälaisilla moottoreilla koneen liikkeet saadaan aikaan. Koneen ohjain kuuluu yleensä koneen hintaan. Koneistuskeskukselle tarvitaan työkalujärjestelmä, joka sisältää työkalut eri materiaaleille ja työkalupidikkeet. Lisäksi tarvitaan työkaluasema, jos konetta halutaan ajaa miehittämättömänä. Perushinnan lisäksi koneisiin on saatavilla lisävarusteita ja päivityksiä, esimerkiksi karanopeuden tai pikaliikenopeuden nostamista varten. Lisävarusteiden hinnat vaihtelevat sadoista euroista tuhansiin euroihin ja ne voivat nopeasti muodostaa merkittävän osan pienen koneistuskeskuksen

hankintahinnasta. Lisäksi tarvitaan lastuamisessa käytettävät nesteet ja voiteluaineet sekä työkalut työstettäville materiaaleille. /5,6,10/

Valmistuskustannukset ovat huomattavasti investointikustannuksia pienempiä. Riippuen kappaleen koosta, materiaalista ja valmistuksen lähtökohdista materiaali-, palkka- ja koneistuskustannukset (sähkö, nesteet, terät ja huolto) voivat vaihdella toisiinsa nähden. Koneistajan palkka on yleensä 10-15 euroa tunnissa, vaihdellen kokemuksen ja osaamisen mukaan. Koneen käyttökustannukset, sisältäen lastuamismesteet, sähkön ja työkalut, ovat pienillä koneilla 25-40 euroa tunnissa. /5,6,10/

Valmistettavien juoksupyörien sarjakoko vaikuttaa hintaan voimakkaasti. Ensimmäisen toimivan juoksupyörän valmistaminen on kallista, koska se voi vaatia useampia prototyyppisiä ja koneistaminen tehdään yleensä vaiheittain, jolloin se vie enemmän aikaa. Kun löydetään kokeilemalla ja simuloimalla sopivat lastuamisarvot ja -tavat ja haluttu geometria on saatu kerran valmistettua hyväksytyksi, voidaan vastaavanlaisia juoksupyöriä valmistaa haluttu määrä samalla NC-ohjelmalla. Nykyisten koneistuskeskusten tarkkuus on erittäin hyvä, jonka vuoksi juoksupyörät ovat käytännössä identtisiä sillä edellytyksellä, että materiaali pysyy samanlaisena ja työkalujen kuluminen pysyy hallinnassa. Pienissä, muutaman kappaleen sarjoissa pilottikappaleen kustannukset näyttelevät valtaosaa kokonaiskustannuksista, kun taas suurissa sarjoissa kustannukset jakautuvat tasaisemmin ja tämän vuoksi suurilla sarjoilla kokonaiskustannukset ovat suhteessa huomattavasti edullisempia. /5,6,10/

7 Valmistusaika

Käydään tässä läpi erään juoksupyörän valmistamisen aikaskaala ja eri valmistusvaiheiden ajat. Kyseessä oli halkaisijaltaan 287,5 mm ja korkeudeltaan 115 mm juoksupyörä jonka suunniteltu pyörimisnopeus oli 30 000 kierrosta minuutissa. Pinnanlaatuvaatimus siivissä $R_a=1,6 \mu\text{m}$ ja muualla $R_a=3,2 \mu\text{m}$. Juoksupyörän materiaalia oli alumiini 7075-T6. Kuvassa 6 D on esitetty valmis juoksupyörä kiinnitettynä palettiin.

CAD-mallista valmistusohjeiden laatiminen CAM-ohjelmistolla ja ohjelman testaaminen vei 2 työviikkoa yhdeltä ihmiseltä. Kiinnittimien suunnitteluun ja valmistukseen kului yksi päivä. Juoksupyörän aihion valmistaminen sorvaamalla kesti noin 30 minuuttia, samoin kuin

kappaleen kiinnitys ja asettaminen sekä irrottaminen koneistuskeskukseen yhteensä 30 min. Koneistukseen kului 6 tuntia, jonka jälkeen kappale oli valmis tasapainotettavaksi ja anodisoitavaksi. Näiden toimintojen kestoajoja ei valitettavasti ollut tiedossa niiden tapahduttua toisaalla. /10/

Oheinen esimerkki osoittaa, valmistuksen suunnitteluun kuluva aika on ylivoimaisesti suurin, seuraavana tulee koneistusaika, oheisten tietojen puitteissa. Suunnittelu- ja koneistusaika ovat sidoksissa juoksupyörän kokoon ja geometrian monimutkaisuuteen sekä käytettävän työstökoneen nopeuteen. Suurnopeustyöstökoneilla voidaan koneistukseen kuluva aikaa lyhentää. Juoksupyörän koon kasvaessa, kasvaa koneistukseen kuluva aika suunnittelu-aikaa huomattavasti nopeammin, monimutkaisemmat geometriat kasvattavat molempia aikoja. /10/

8 Yhteenveto

Tässä työssä esitetyt seikat antavat käsityksen siitä miten juoksupyöriä voidaan valmistaa koneistamalla ja mitä valmistuksessa vaaditaan. Juoksupyörillä suunnittelu ja valmistus ovat aina tapauskohtaisia.

Vaikka automatisointi ja simulointi ovat lisääntyneet valtavasti ja tulevat jatkossakin lisääntymään, on juoksupyörien koneistaminen silti haaste niin suunnittelijalle, koneistajalle, ohjelmistoille kuin työstökoneille. Tietotaito ja osaaminen yleisellä tasolla eivät ole suoraan siirrettävissä juoksupyörien valmistukseen vaan siihen on syvennyttävä erikseen.

Taloudellisesti juoksupyörien valmistaminen vaatii isoja investointeja. Vaikka koneiden hinnat ovat laskeneet, ei silti monella pienyrityksellä ole resursseja aloittaa valmistusta. Lisäksi maailmalla on jo useita tämän alan osaajia, joiden kanssa kilpailemaan lähteminen vaatii suurta panostusta ja osaamista alalta.

Lähteet

- /1/ Höijärvi, Kari, 1988. Computer aided machining of turbomachinery blades. Diplomityö, LTKK, Lappeenranta. 67 s.
- /2/ Brown, James, 1998. Advanced machining technology handbook. USA, McGraw-Hill. 507 s. ISBN 0-07-008243-X
- /3/ Judge, Arthur W. 1960. Small gas turbines and free piston engines, Lontoo, Chapman&Hall Ltd. 328 s.
- /4/ Välimäki, Kari. 1985. Virtauskoneen roottorin tietokoneavusteinen suunnittelu. Diplomityö. Lappeenranta. LTKK Energiatekniikan laitos. 58 s.
- /5/ Selesvuo, Jari, diplomi-insinööri, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto. Haastattelu 18.10.2007
- /6/ Mauravaara, Aimo, työnjohtaja, Imatran Kone Oy ja Melartin, Marko, koneistaja, Imatran Kone Oy, haastattelu 15.11.2007
- /7/ Kirssi, Antti. 2007. Höyrykattiloiden kuumankestävät materiaalit. Kandidaatintyö. Lappeenranta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto. 31 s.
- /8/ Aaltonen, Kalevi. Torvinen, Seppo, 1997. Konepaja-automaatio. Porvoo, WSOY. 309 s. Sarja: Konepajan tuotantotekniikka. ISBN: 951-0-21439-6
- /9/ Aaltonen, Kalevi. Andersson, Paul. Kauppinen, Veijo. 1997. Koneistustekniikat. Porvoo, WSOY. 322 s. Sarja: Konepajan tuotantotekniikka ISBN: 951-0-21437-X.
- /10/ Astikainen, Esa, diplomi-insinööri ja Kärkkäinen, Vesa, cnc-koneistaja, Astex Engineering Oy, Haastattelu 5.12.2007

Kuvalähteet

- /k1/ [http://www02.abb.com/global/gad/gad02007.nsf/images/BC6953AB872BC9D7C1256FCD006E36F0/\\$File/TPL_A%20Kopie.jpg](http://www02.abb.com/global/gad/gad02007.nsf/images/BC6953AB872BC9D7C1256FCD006E36F0/$File/TPL_A%20Kopie.jpg), vierailtu 4.12.2007, muokkaus: Markku Nikku. Päivitetty: 15.11.2007
- /k2/ <http://www.rsg-technologies.com/images/impeller1.jpg>, vierailtu 14.11.2007.
- /k4/ kone: Imatran Kone Oy, 15.11.2007, valokuva ja muokkaus: Markku Nikku.
- /k5/ <http://www.nrec.com/products/cam.htm>, vierailtu 10.10.2007
- /k6/ työkalut A,B,D ja E: Imatran Kone Oy, 15.11.2007, valokuva ja muokkaus: Markku Nikku, työkalu C: <http://www.sorbyuk.co.uk/conshelx.html>, vierailtu 29.11.2007
- /k7/ kone: Astex Engineering Oy, 5.12.2007, valokuva ja muokkaus: Markku Nikku