



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

MARKUS PENTIKÄINEN

Voimalaitosturbiinin liukulaakerien tarkastaminen ultraäänellä

SÄHKÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA
2021

Tekijä(t) Pentikäinen, Markus	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Kuukausi Vuosi 19.01.2021
	Sivumäärä 35	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Voimalaitosturbiinin liukulaakereiden tarkastaminen ultraäänellä		
Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma		
Tiivistelmä Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla perinteisen ultraäänen ja vaiheistetun ultraäänen käyttöä turbiinin liukulaakereiden pinnoitteiden kiinnittävyyden tarkastuksessa. Työ tehtiin yhteistyössä Fortum Power and Heat Oy:n sekä Kiwa Inspecta Oy:n kanssa. Tarkastukset on aiemmin suoritettu käyttäen perinteistä ultraäänilaitteistoa. Aiemmissa tarkastuksissa havaittujen vika-alueiden määrittäminen ja seuranta on ollut hankalaa. Työssä selvitettiin vaiheistetun ultraäänilaitteiston mahdollisuuksia tarkastustarkkuuden, vikakoon määrittämisen ja raportoinnin suhteen verrattuna perinteiseen ultraäänilaitteistoon. Aiemmin käytössä olleet tarkastusohjeet päivitettiin ultraäänitarkastuksen osalta. Työ sisältää luonnoksen ultraäänitarkastusohjeesta pinnoitteen kiinnittävyyden varmistamiseksi. Tarkastusohjetta on hyödynnetty koekappaleiden tarkastuksissa. Työssä käytiin läpi myös perusteita näistä kahdesta ultraäänen tarkastus menetelmästä sekä ultraäänestä, höyryturbiinista, liukulaakereista ja niiden pinnoitusmenetelmistä yleisellä tasolla		
Asiasanat Ultraääni, vaiheistettu ultraääni, liukulaakeri, turbiini		

Author(s) Pentikäinen, Markus	Type of Publication Bachelor's thesis	Date Month Year 19.01.2021
	Number of pages 35	Language of publication: Finnish
Title of publication Powerplant turbine plain bearing inspection with ultrasonic		
Degree programme Electrical engineering		
Abstract Reason to make this thesis was to compare conventional ultrasonic and phased array when inspecting coating adhesion in turbine plain bearings. Thesis was made in cooperation with Fortum Power and Heat Oy and Kiwa Inspecta Oy. Earlier inspections were made by using conventional ultrasonic. Defect area size determination and tracking from previous inspections has been difficult. In this thesis phased array ultrasonic test possibilities to improve inspection accuracy, defect sizing and reporting compared to conventional ultrasonic were investigated. Previously used ultrasonic testing instructions were updated. Thesis includes draft of inspection instruction to ensure coating adhesion to bearing. Thesis includes basic information of these two different ultrasonic inspection applications as well basics of ultrasound, steam turbine, plain bearings and different coating methods of bearings		
<u>Key words</u> Ultrasonic, phased array, plain bearing, turbine		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 ULTRAÄÄNITARKASTUS.....	6
2.1 Ultraääni	6
2.2 Ultraäänilaitteen rakenne ja toimintaperiaate.....	6
2.2.1 Ultraäänen synnyttäminen	8
2.2.2 Normaali ultraääniluotaimien rakenne.....	8
2.2.3 Kaksoisnormaaliluotain (SE- / TR-luotain).....	9
2.3 Vaiheistettu ultraääni.....	10
2.3.1 Vaiheistettu ultraäänilaite	11
2.3.2 Vaiheistetun ultraäänilaitteen luotaimet	12
2.4 Ultraäänitarkastuksen datan tulkinta	15
3 VOIMALAITOS HÖYRYTURBIINI	16
3.1 Voimalaitosturbiinien laakerit	17
4 LIUKULAAKERIT	18
4.1 Liukulaakerin toimintaperiaate.....	18
4.2 Laakeripinnoitteet.....	19
4.2.1 Käsivalu-pinnoittaminen.....	19
4.2.2 Keskipakovalu-pinnoittaminen	20
4.2.3 Terminen ruiskupinnoittaminen.....	20
4.2.4 Termisen ruiskupinnoitteen vikatyypit	21
5 LAAKERIPINNOITTEIDEN TARKASTAMINEN	22
5.1 Tarkastusohjeet.....	23
5.2 Tarkastuksen suorittaminen perinteisellä ultraäänilaitteella	24
5.2.1 Tarkastaminen, jos takaseinäkaiku on saatavissa	24
5.2.2 Tarkastus ilman takaseinäkaikua	26
5.3 Tarkastaminen vaiheistetulla ultraäänilaitteella	27
6 KÄYTÄNNÖN KOKEET	28
6.1 Käytännön kokeiden tavoitteet	28
6.2 Koekappaleen tarkastaminen perinteisellä ultraäänilaitteistolla	28
6.3 Koekappaleen tarkastus vaiheistetulla ultraäänilaitteistolla.....	30
7 PÄÄTELMÄT	33
7.1 Tarkastusmenetelmien vertailu.....	33
7.2 Johtopäätökset	33

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on vertailla perinteisen ja vaiheistetun ultraäänen käyttöä liukulaakeripinnoitteiden tarkastuksissa. Tarkoituksena on parantaa voimalaitos höyryturbiinin liukulaakeiden määräaikaistarkastusten tarkkuutta sekä tarkastuksissa havaittujen vikojen raportointia mahdollistaen paremman seurannan jatkossa.

Työssä läpikäydään myös perusteita näistä kahdesta ultraäänen tarkastusmenetelmästä sekä ultraäänestä, höyryturbiinista, liukulaakereista ja niiden pinnoitusmenetelmistä yleisellä tasolla. Työhön kuuluu myös olemassa olevien tarkastusohjeiden päivittämiseen liittyvä ehdotelma tarkastusohjeesta ultraäänitarkastuksen osalta, jota on työssä hyödynnetty tarkastuksia tehdessä.

Työ tehdään yhteistyössä Fortum Power and Heat Oy:n ja Kiwa Inspecta Oy:n kanssa. Tarkastuslaitteiston tarjoaa Kiwa Inspecta Oy ja tarkastettavat kohteet Fortum Power and Heat Oy.

2 ULTRAÄÄNITARKASTUS

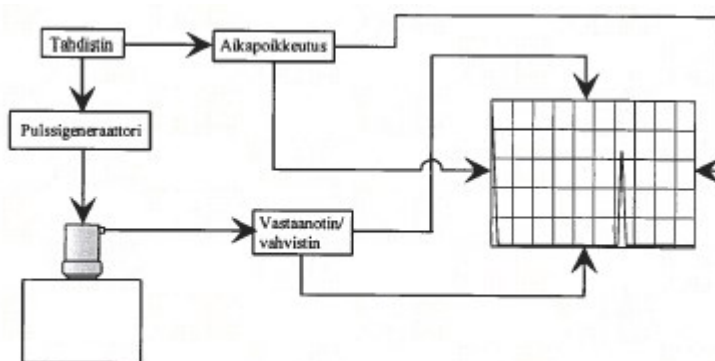
2.1 Ultraääni

Ultraäänellä tarkoitetaan ääntä, joka on ihmisen korvan kuuloalueen yläpuolella. Ultraääneksi luokitellaan yli 20kHz taajuudet. Nykyisillä laitteilla voidaan ultraääntä kehittää aina 1000 MHz taajuuteen asti. Ultraääni on atomien mekaanista aaltoliikettä, joka tarvitsee edetäkseen jonkin väliaineen. Ultraääni ei etene tyhjiössä ja vaimenee kaasuissakin nopeasti. Normaalisti väliaineina käytetään joko nesteitä tai kiinteitä aineita. [1]

Ultraääntä käytetään muun muassa ainetta rikkomattomassa tarkastuksessa (NDT) hitsausvirheiden kuten säröjen, liitosvikojen ja sulkeumien etsimisessä rakenteista ja hitseistä. Ultraäänellä voidaan myös mitata aineiden paksuuksia. Ultraäänen muita sovelluksia ovat esimerkiksi ultraäänihitsaus, ultraäänipesurit, lääketieteen ultraäänikuvantamiset ja monia muita eri alojen sovelluksia. [1]

2.2 Ultraäänilaitteen rakenne ja toimintaperiaate

Yleisimmin ultraäänitarkastuksissa käytetään pulssikaiku-tekniikkaa helposti mukana kannettavilla akkukäyttöisillä laitteilla. Pulssikaikutekniikalla tarkoitetaan ultraäänen muodostamista lähettämällä sähköpulsseja luotaimen kiteeseen, joka muodostaa värähdellessään ultraäänisignaalin. Laitteiden rakenne voidaan jakaa tiettyihin toiminnallisiin lohkoihin, kuten kuvasta 1 havaitaan. Laitteiden toiminta käydään seuraavassa läpi näiden lohkojen avulla.[2]



Kuva 1 Ultraäänilaitteen toiminta periaate [2]

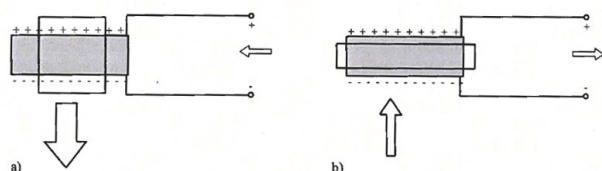
Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen A-näyttöinen pulssikaikutekniikkaa käyttävä tarkastuslaitteisto. Pulssigeneraattori tuottaa luotaimelle menevän vaihtojännitepulssin. Pulssintoistotaajuus ja sen muoto voivat olla eri tavoin säädettäviä eri laitteissa. Vastaanotin-vahvistin käsittelee luotaimelta tulevan pulssin näyttölaitteelle sopivaksi. Luotaimelta takaisin tulevan pulssin taso on vain murto-osa lähetetystä signaalista ja sitä on vahvistettava voimakkaasti ennen signaalin jatkokäsittelyä. Lisäksi signaali yleensä tasasuunnataan ennen näyttöä. Useissa laitteissa on myös mahdollista käyttää tasasuuntaamatonta ns. RF-signaalia jonkin yksittäisen kaiun tarkempaa tutkimista varten. [2]

Nykyisissä ns. digitaalisissa laitteissa käytetään erilaisia elektronisia näyttöjä kuten esim. elektroluminenssinäytöt. Tällaisten pikseleistä koostuvien näyttöjen ohjaus on hoidettu digitaalisesti ja taajuudeltaan ne ovat matalampia kuin katodisädeputket. Uusien näyttösovellutuksien kirkkaus ei ole riippuvainen pulssintoistotaajuudesta. Lisäksi rakenteestaan johtuen tämän tyyppiset näytöt mahdollistavat pienempikokoiset laitteet verrattuna katodisädeputkeen. [2]

Aikapoikkeutuksella tarkoitetaan näyttämää piirtävän pisteen projektiota aika-akselilla. Lisäksi aikapoikkeutuksen avulla säädetään etäisyysasteikko. Tahdistin tuottaa tietyn muotoista ja jännitteistä vertailupulssia, joka tahdistaa järjestelmän eri osien toiminnan toisiensa suhteen. [2]

2.2.1 Ultraäänen synnyttäminen

Ultraääniaallot ovat mekaanista aaltoliikettä ja jotta tarkastuksia voitaisiin suorittaa, tulee ultraääni synnyttää jollakin hallitulla tavalla. Käytännössä ultraääni synnytetään lähes aina pietsosähköisellä menetelmällä. Pietsosähköinen kide on muunnin, joka muuttaa sähköisen energian mekaaniseksi energiaksi ja päinvastoin. [2]



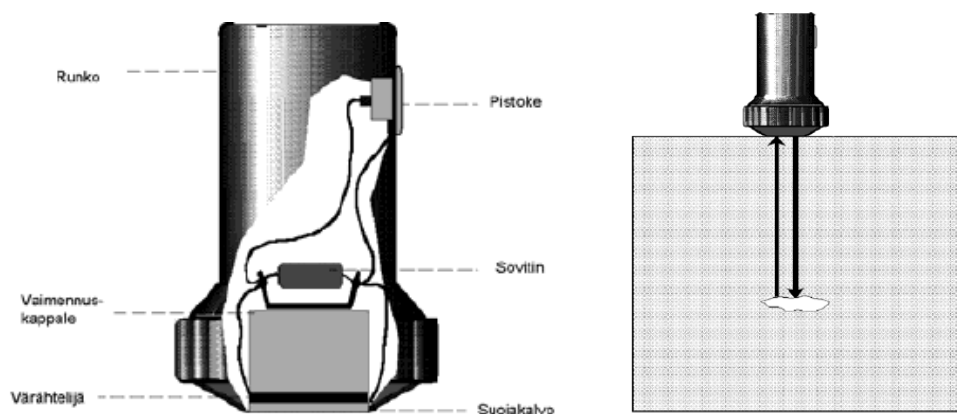
Kuva 2 Pietsosähköisen kiteen toiminnan esimerkki. [2]

Ultraäänilaitteen pulssigeneraattorista lähetetään kiteeseen sähköinen pulssi tietyllä pulssintoistotaajuudella, joka saa kiteen värähtelemään kuten kuvassa 2 (a) on esitetty. Pulssigeneraattorin lähettämä pulssi on voimakkuudeltaan joitakin satoja voltteja. Kide voi lähettää joko pitkittäisaaltoa tai poikittäisaaltoa. [2]

Jos kiteeseen kohdistetaan esim. äänenpaine, syntyy kiteen napojen väliin jännite kuten kuvassa 2 (b) on osoitettu. Pietsosähköisen kiteen värähtelytaajuuden määrittää kiteen paksuus. Mitä ohuempi kide on, sitä korkeampi on sen värähtelytaajuus, tällä tarkoitetaan luotaimen nimellistä taajuutta, yleensä 1-10MHz. [2]

2.2.2 Normaali ultraääniluotaimien rakenne

Normaaliluotain on yleisimpiä luotaintyyppisiä ja nimensä mukaan se lähettää ultraääntä tutkittavaan kohteeseen sen pinnan normaalin suunnassa. Yksikiteisessä luotaimessa sama kide lähettää ja vastaanottaa ultraäänen. Normaaliluotaimen rakenne on esitetty kuvassa 3, josta havaitaan, että kide on varsin lähellä tarkastettavaa pintaa, jolloin luotaimen viive on lyhyt. [2]

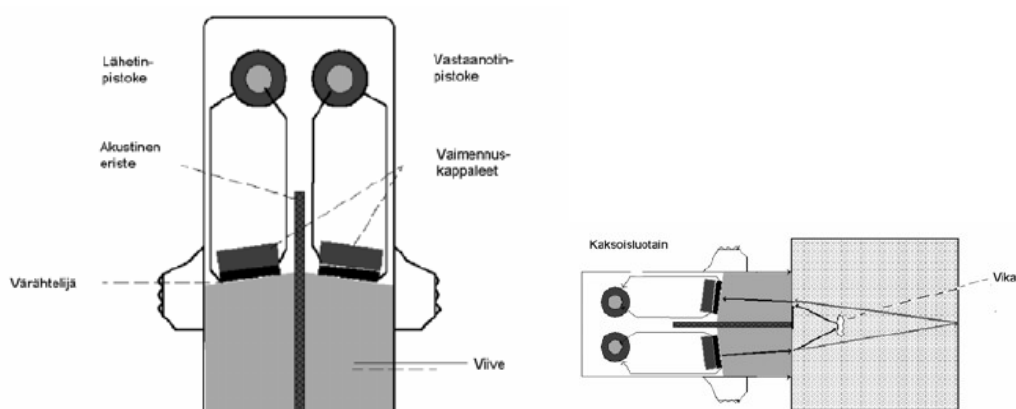


Kuva 3 Yksikiteisen normaaliluotaimen rakenne [2]

Normaaliluotaimet ovat tavallisesti pitkittäisaaltoa lähettäviä, mutta on olemassa myös poikittäisaaltoa lähettäviä normaaliluotaimia, joskin ne vaativat kiinteän kytkentäaineen. Normaaliluotaimia käytetään erilaisissa paksuusmittauksissa, levyjen laminaatitarkastuksissa, sekä valujen ja takeiden tarkastuksissa jne. [2]

2.2.3 Kaksoisnormaaliluotain (SE- / TR-luotain)

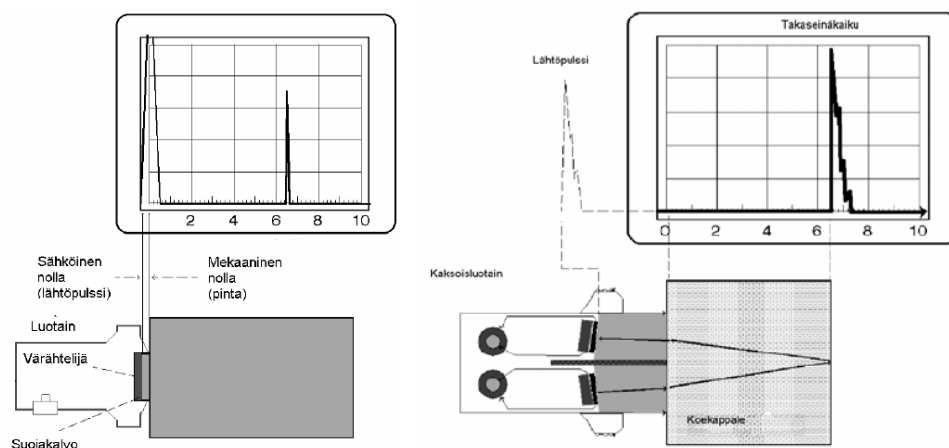
Kaksoisnormaaliluotaimessa on erilliset lähetin- ja vastaanotinkiteet, jolloin kiteiden materiaalit voivat olla erilaiset. Tällaisella ratkaisulla voidaan optimoida kiteiden ominaisuuksia toisista riippumatta. Rakenteeltaan kaksoisnormaaliluotain (kuva 4) poikkeaa yksikiteisestä normaaliluotaimesta sillä, että kiteet ovat kauempana tarkastettava pinnasta, jolloin luotaimen viive on pidempi. [2]



Kuva 4 Kaksoisnormaaliluotaimen rakenne [2]

Kaksoisnormaaliluotaimia käytetään pinta-alueiden tarkastuksiin sekä ohuiden kappa-
leiden paksuusmittauksiin. Kaksoisnormaaliluotaimet sopivat hyvin karheille pin-
noille, koska ne ovat vähemmän herkkiä kontaktin muutoksille.

Merkittävin ero kaksoisnormaali- ja normaaliluotaimen välillä näkyy käytännössä
siinä, että kaksoisnormaaliluotaimen pitkästä viiveestä johtuen lähtöpulssi voidaan
säätää laitteen näytön ulkopuolelle (kuva 5). Tämän johdosta saavutetaan hyvä lähie-
rotuskyky verrattuna normaaliluotaimen. [2]



Kuva 5. Kaksoisnormaali- ja normaaliluotaimen käytännön ero lähtöpulssia siirtä-
mällä. [2, 3]

2.3 Vaiheistettu ultraääni

Vaiheistettu ultraääni on ultraäänisovellus, jossa äänikeila muodostetaan interferenssiä
hyödyntäen, jolloin jokaista yksittäistä kide-elementtiä voidaan ohjata erikseen lait-
teiston ohjelmistolla. [4]

Lääketieteen vaiheistetun ultraäänen sovellukset ovat monille tuttuja. Niissä käytetään
korkeataajuisia ääniaaltoja luomaan yksityiskohtaisia kuvia mm. sisäelimistä. Vaiheis-
tetun ultraäänen teknologia ei rajoitu vain lääketieteen alalle. Vaiheistetun ultraäänen
kehittäminen aloitettiin 1960-luvulla ja ensimmäiset vaiheistetun ultraäänen sovelluk-
set toimitettiin lääketieteen alalle 1970-luvun alkupuolella. Kuvassa 6 esimerkkinä si-
kiöntutkimus perinteisellä vaiheistetun ultraäänen järjestelmällä. [4]



Kuva 6 Sikiötutkimus vaiheistetulla ultraäänellä [4]

Viimevuosien aikana vaiheistettujen ultraäänijärjestelmien käyttö on lisääntynyt teollisuudessa tuottamaan uusia tasoja informaation ja visuaalisen tiedon hankkimiseen ultraäänitarkastuksissa. Käyttökohteina hitsien ja liitosten tarkastaminen, sekä ainevahvuus profiloinnit, käytön aikaiset särötarkastukset ja monet muut sovellukset. [4]

2.3.1 Vaiheistettu ultraäänilaite

Vaiheistettu ultraäänilaite on järjestelmä, joka sisältää hienostuneen tietokonepohjaisen laitteiston. Laitteisto on kykenevä ohjaamaan monielementtisiä luotaimia, vastaanottamaan ja digitoimaan paluusignaaleista signaalitieto sekä piirtämään se monilla eri standardiformaateilla. Toisinkuin tavanomainen ultraäänitarkastuslaite, vaiheistettu ultraääni laite voi pyyhkäistä äänikeilan hajautetuilla kulmilla, lineaarisesti tai dynaamisesti fokuksituna useisiin eri syvyyksiin, jolloin joustavuus ja valmiudet tarkastuksessa kasvavat. Ohjelmisto, joka tunnetaan nimellä ”focal law calculator”, mahdollistaa yksityiskohtaiset viiveajat jokaisen elementtiryhmän laukaisuille. Ohjelmistolla voidaan muodostaa haluttu keilan muoto ottamalla huomioon luotaimen ja luotainkeilan ominaisuudet, sekä geometria ja akustiset ominaisuudet tarkastettavassa kappaleessa. [4]

Ohjelmoitu pulssitustaajuus asetetaan käyttöjärjestelmällä, joka laukaisee monia yksittäisiä aaltorintamia tarkastettavaan kappaleeseen. Nämä ääniaaltorintamat yhdistyvät rakentuen ja kumoten toisiinsa yhdistyen yhdeksi primääriaaltorintamaksi, joka kulkee tarkastettavan kappaleen läpi ja heijastuu takaisin säröistä, epäjatkuvuuksista, kohteen takaseinästä ja erimateriaalien rajapinnoista aivan kuten tavanomainen ultraääniaalto. Keilaa voidaan dynaamisesti ohjata eri astekulmiin, fokusoida tiettyihin syvyyksiin ja fokusoidun alueen kokoon sillä tavalla, että yksiluotain kokoonpanolla on mahdollista tutkia tarkastettava kohde monesta eri perspektiivistä. Tämä keilan ohjaaminen tapahtuu sekunnin murto-osassa, jonka aikana luotaimessa vaihtelee monet eri keilan astekulmat ja fokusoidut syvyydet. [4]



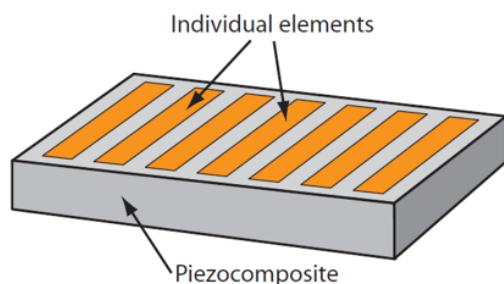
Kuva 7 Zetec Topaz 32 ja Olympus Omniscan SX vaiheistettu ultraäänilaite

2.3.2 Vaiheistetun ultraäänilaitteen luotaimet

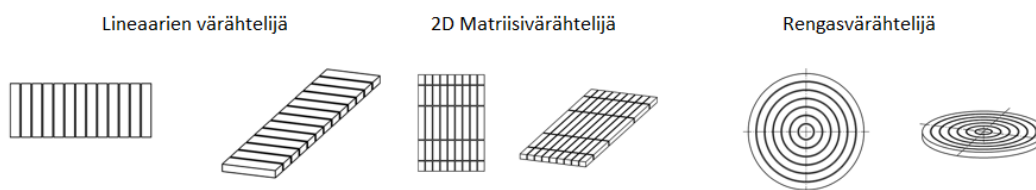
Perinteisen ultraäänien luotaimet sisältävät joko yhden tai useamman aktiivisen elementin joka lähettää ja vastaanottaa korkeataajuisia ääniaaltoja. Vaiheistetun ultraäänien luotaimet taas koostuvat anturikokoonpanoista, joissa on 16-256 pientä yksittäistä elementtiä, ja joita kaikkia voidaan pulssittaa erikseen (kuva 8 ja 9). Anturikokoonpanot voidaan yhdistää lineaarivärähtelijäksi, 2D matriisivärähtelijäksi, rengasvärähtelijäksi tai vielä monimutkaisemmiksi muodoiksi (kuva 10). [4]



Kuva 8 Tyypillisiä vaiheistetussa ultraäänilaitteistossa käytettäviä luotaimia [4]



Kuva 9 Tyypillinen monielementtisen luotaimen kokoonpano [4]

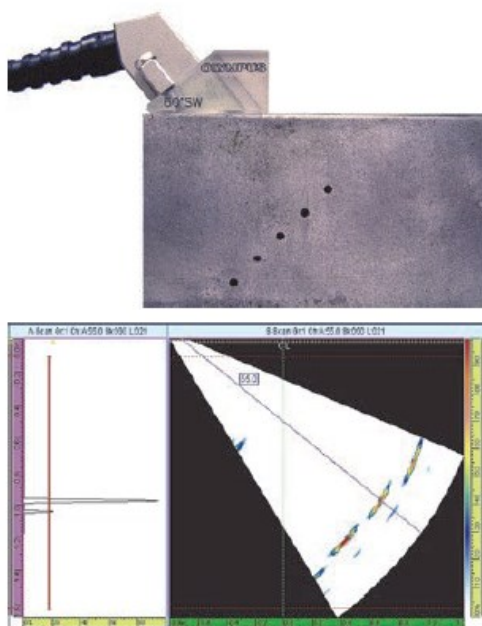


Kuva 10 Luotaimen sisäisen värähtelijän kokoonpanot [4]

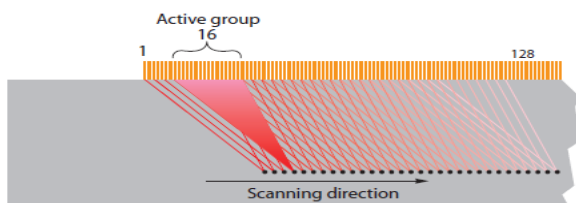
Kuten tavanomaisten luotaimien tapauksissa, vaiheistetun ultraäänen luotaimet voidaan suunnitella käyttökohteen mukaan. Luotaimien taajuuudet ovat tavallisesti 2-10MHz. Toisinkuin tavanomaisilla ultraäänitarkastuslaitteilla, vaiheistetulla ultraäänilaitteella voidaan pyyhkäistä äänikeila hajautetuilla kulmilla (kuva 11), lineaarisesti tai dynaamisesti fokusoituna useisiin eri syvyyksiin. [4]

Vaiheistettu ultraäänijärjestelmä hyödyntää aallon fysikaalisia ominaisuuksia. Se vaihtelee lähetettävien ultraäänipulssien sarjojen välillä tavalla, jolla jokaisen elementin tuottama yksittäinen aaltorintama yhdistyy toistensa kanssa. Tämä toiminto lisää

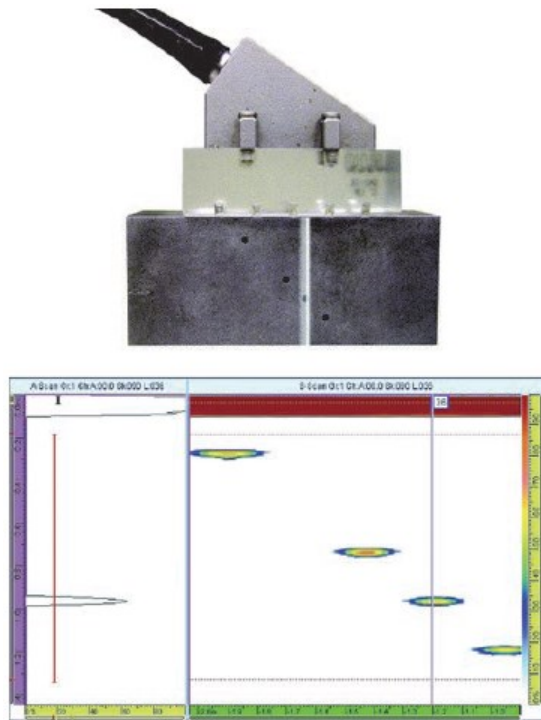
tai poistaa energiaa ennustettavin tavoin, jolla kyetään ohjaamaan ja muuttamaan keilan muotoa. Tämä saavutetaan pulssittamalla yksittäisiä elementtejä eri aikaan. (kuvat 12-14) Usein elementtejä pulssitetaan 4-32 elementin ryhmissä, jotta saavutetaan riittävä tehollinen herkkyys, joka vähentää ei haluttua keilan hajautumista ja mahdollistaa tarkemman fokusoinnin. [4]



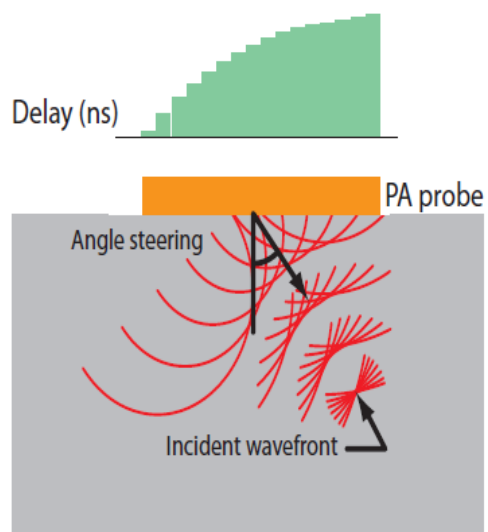
Kuva 11 Äänikeila hajautetuilla luotauskulmilla $35^{\circ} - 70^{\circ}$ [4]



Kuva 12 Esimerkki luotaimen sisällä tapahtuvasta lineaarisesta luotausliikkeestä kulmaluotauksessa. [4]



Kuva 13 Esimerkki luotaimen sisäisestä luotausliikkeestä normaaliluotauksessa 0° . [4]



Kuva 14 Normaaliluotaimella kulmaluotauksen mahdollistaminen elementtien viiveen säätämisellä. [4]

2.4 Ultraäänitarkastuksen datan tulkinta

Tässä kappaleessa käsitellyt asiat pohjautuvat alan koulutuksiin ja työkokemukseen perustuviin tietoihin.

Tarkastuksesta saadun datan tulkinta riippuu käytettävästä laitteistosta. On kyseessä sitten perinteinen ultraääni tai vaiheistettu ultraäänilaitteisto, peruseriaate on samankaltainen. Näytöllä näkyvät kaikupiikit tai väritykset indikoivat, että tarkastettavalla alueella on jokin joka heijastaa ääntä takaisin. Kyseessä voi olla eri materiaalien välinen rajapinta, vikaheijastaja tai kappaleen muodosta johtuvia heijastajia, kuten sisäisiä porauksia jne. Tarkastusdatan tulkintaa vaikeuttavat eri materiaalien rajapinnat, joissa äänikeila voi taittua ei-toivottuun suuntaan ja saatu kaikutieto ei välttämättä ole siellä missä laitteisto sen ilmoittaa olevan. Tarkastettavista kohteista tulisi olla kalibrointikappaleet, jotka vastaavat tarkastettavaa kohdetta, jolla todetaan, että laitteiston antamat tiedot pitävät paikkansa. Myös sisäiset muodot tai muokkaukset, kuten poraukset, voivat aiheuttaa virheellisen tulkinnan tapauksissa, joissa kappaleesta ei ole piirustuksia saatavilla.

Perinteistä ultraäänilaitteistoa käyttäessä tulkinta tapahtuu näytöllä näkyvistä kaikupiikeistä, joiden sijaintitiedot laite ilmoittaa. Sijaintitietoa hyödyntäen voidaan varmistua, onko näytöllä näkyvä kaiku vika vai esimerkiksi tarkastettavan kohteen nurkasta tuleva kaiku.

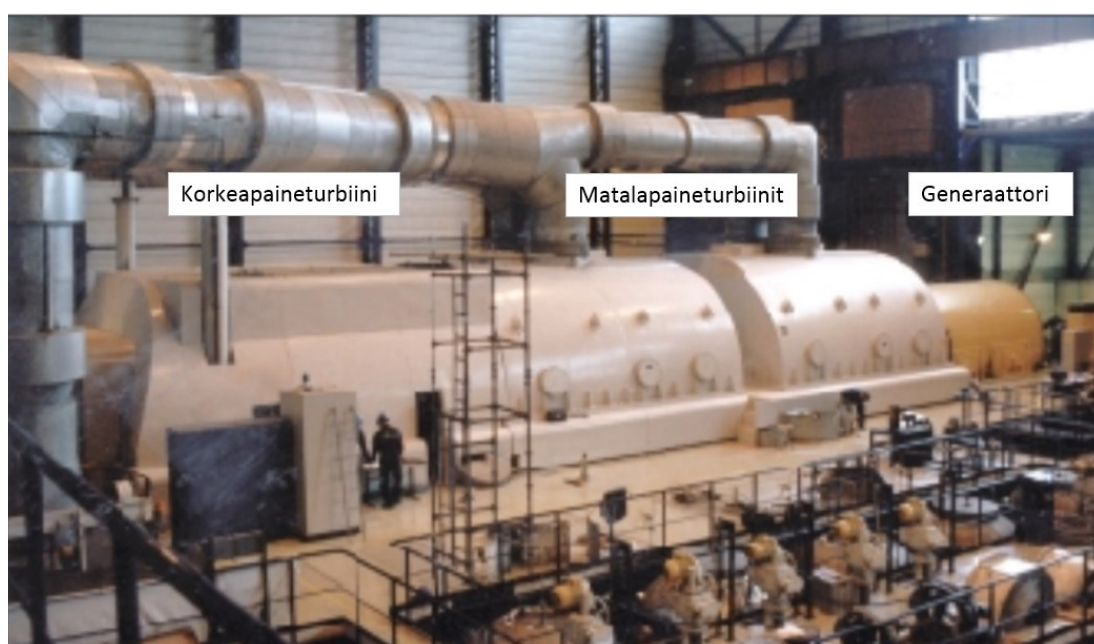
Vaiheistetulla järjestelmällä tulkinta vaihtoehtoja on useampia. Dataa voidaan tulkita samalla tavalla kuin perinteisellä järjestelmällä tai esimerkiksi scan-kuvissa näkyvistä väreistä. Jos laitteistoon on syötetty tarkastettavan kohteen tiedot, laitteistolla voidaan luoda malli esimerkiksi hitsistä, jolloin indikaatio piirtyy todelliseen kohtaan ja tästä voidaan tulkita, onko kyseessä vika.

3 VOIMALAITOS HÖYRYTURBIINI

Höyryturbiinin perustehtävä on muuttaa höyryn sisäinen energia mekaaniseksi liikeenergiaksi. Höyryturbiinit ovat useimmiten aksiaalisia eli höyryn virtaussuunta on akselin suuntainen. Turbiini koostuu useista vaiheista, joiden avulla höyryn lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi liikeenergiaksi. Yhdessä vaiheessa on paikallaan pysyvä staattorisiivistö ja pyörivään akseliin kiinnitetty roottorisiivistö. [5]

Höyryn nopeus kasvaa staattorisiivistössä sen paisuessa alempaan paineeseen. Höyry ohjataan roottorisiivistöön, joka pyörittää akselia. Paisuessaan alempaan paineeseen höyryn tilavuus kasvaa, jolloin jokaisen vaiheen paisuntatilan tulee olla edellistä suurempi. [5]

Turbiini jaetaan korkeapaineturbiiniin ja matalapaineturbiiniin. Voimalaitoksissa höyryturbiinia käytetään pyörittämään generaattoria, joka synnyttää sähkövirran. Höyryturbiinin mekaaninen hyötysuhde on jopa 0,9-0,96, joka tarkoittaa akselista saadun ja höyrystä otetun energian suhdetta. Jäljelle jäänyttä lauhdelämpöä voidaan edelleen käyttää lämmitykseen esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. [5]



Kuva 15 Turbiinin osat [6]

3.1 Voimalaitosturbiinien laakerit

Turbiini koostuu korkeapaineturbiinista ja kahdesta matalapaineturbiinista. Jokaisessa turbiinin osassa akselin molemmissa päissä on radiaalilaakerointi. Turbiini-generaattorin akseliyhdistelmässä on yksi aksiaalilaakeri, joka on sijoitettu turbiinin etupuolelle. Radiaalilaakerin puolikkaiden molemmilla sivuilla on rengaskehät. Molempiin kehiin on kiinnitetty valkometallipinnoitetut segmenttipalat ns. painetyynyt. Radiaalilaakereina käytetään paineöljyvoideltuja valkometallipinnoitteisia liukulaakereita.

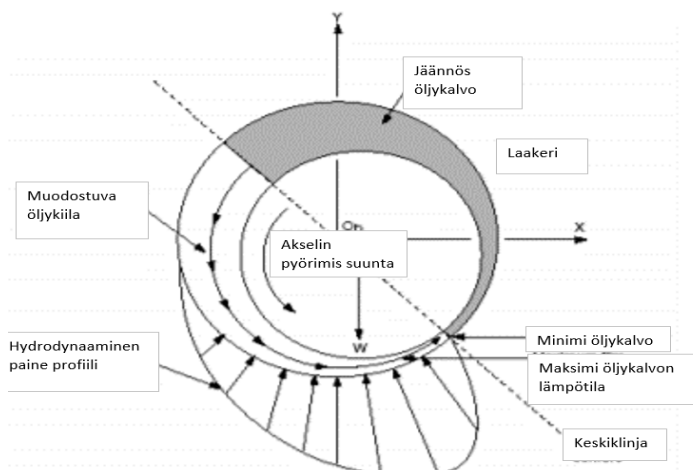
Yksittäinen laakeri koostuu kahdesta teräksisestä laakerinrungonpuolikkaasta, jotka on pinnoitettu valkometallipinnoitteella. [8]

4 LIUKULAAKERIT

4.1 Liukulaakerin toimintaperiaate

Liukulaakerit koostuvat tyypillisesti ohuesta laakeripinnoitekerroksesta, joka on valettu teräs- tai pronssikuoren päälle, jolla saavutetaan riittävä rakenteellinen kestävyys. [9]

Hydrodynaamisen laakerin perustarkoitus on luoda lähes kitkaton ympäristö pyörivän akselin tukemiseksi ja ohjaamiseksi. Tämän tyyppin laakereilla tarkoitus on luoda pyörivän akselin ja laakerin väliin riittävällä öljynpaineella voitelukalvo pyörivän ja liikukumattoman osan välille. Öljynpaineella kehitetään kalvo, joka erottaa pyörivän ja kiinteän osan. Käynnistettäessä ja pysäyttäessä tärkeää on riittävä nostoöljyn paine, jotta laakerin pinnoite ei vaurioidu tarpeettomasti. Kuvassa 16 esitetty öljyn käyttäytyminen laakerin ja akselin välissä. [7]



Kuva 16 Liukulaakerin toiminnan periaatekuva [7]

4.2 Laakeripinnoitteet

Laakerimetalli, jota kutsutaan myös babbitt-metalliksi, kehitettiin vuonna 1839 Isaac Babbittin toimesta. Alkuperäinen seos sisälsi 89,3% tinaa, 7,1% antimonia ja 3,6% kuparia. Tämä kaava on vielä joidenkin valmistajien käytössä nykyäänkin myyntinimillä ”Genuine Babbitt” tai ASTM B-23 Grade 2 Babbitt. Laakerimetallilla on ominaisuuksia, jotka auttavat vähentämään kitkaa, joka tekee siitä hyvän materiaalin käytettäväksi liukulaakereissa. [10]

Laakerienpinnoittaminen on prosessi, jossa suhteellisen pehmeät metallit liitetään vahvempaan tai jäykempään runkoon, joka kantaa akselin painon ja liikkeestä johtuvan mekaanisen rasituksen. Pinnoite, joka on pehmeämpi kuin akseli ja jolla on erinomaiset kitkaominaisuudet, estävät akselin vioittumisen pitkissä käyttöjaksoissa. Pinnoitemetallit, jotka yleisimmin tunnetaan valkometalleina, ovat tina tai lyijypohjaisia seoksia. Pinnoitusprosessissa suhteellisen pehmeä laakerimetalli liitetään vahvempaan kannattavaan runkoon, joka on tyypillisesti terästä, valurautaa tai pronssia. [11]

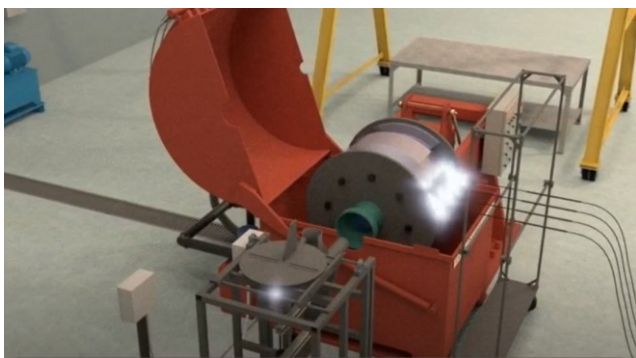
Laakerirunkoja voidaan pinnoittaa kolmella eri tavalla, käsin valamalla, keskipakovalulla tai ruiskupinnoittamalla. Keskipako-valu ja käsin valaminen ovat kaksi pinnoitus menetelmää, joita käytetään suurien laakerien valmistamisessa ja korjaamisessa. Teollisuudessa käytettävät laakerit yleensä korjataan sulattamalla vanha laakerimetalli rungosta ja käyttäen yhtä edellä mainituista kolmesta pinnoitus menetelmästä. [11]

4.2.1 Käsivalu-pinnoittaminen

Käsin valu-pinnoittamisessa valmistetaan sopiva valumuotti laakerin pinnoitettavan pinnan puolelle. Ennen valamista levitetään tartunta-aine, jonka jälkeen muotti asennetaan valettavan pinnan päälle. Laakeri esilämmitetään, jonka jälkeen sula pinnoite kaadetaan muottiin. Jäähdytymisen jälkeen muotti poistetaan ja pinta koneistetaan käyttökohdetta vastaavaksi. [12]

4.2.2 Keskipakovalu-pinnoittaminen

Keskipakovalu-pinnoittamisessa esim. liukulaakereiden kohdalla laakerin puolikkaan yhdistetään toisiinsa, jonka jälkeen kokonainen laakeri asetetaan pyörityslaitteeseen (kuva 17), jonka jälkeen laakeri esilämmitetään. Pinnoiteseos lämmitetään juoksevaksi ja kaadetaan pyörivän laakerin sisäpinnalle (kuva 18). Laakeri jäähdytetään vedellä, jolloin laakeripinnoite jähmettyy ja jää laakerin runkoon kiinni. Ennen laakerin asennusta pinnoitettu pinta vielä koneistetaan vastamaan käyttökohdetta. [13]



Kuva 17 Laakerin esilämmittäminen pyörityskoneessa [13]

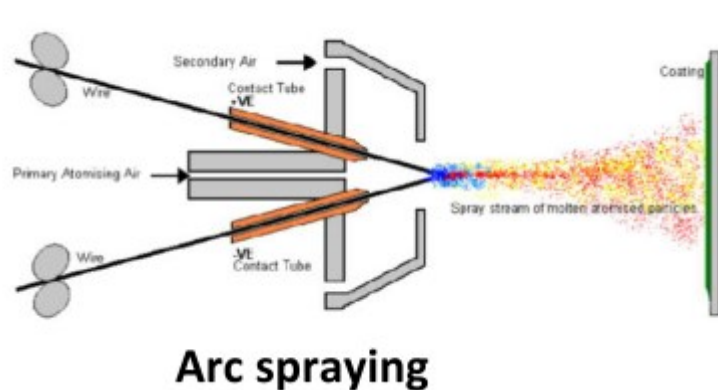


Kuva 18 Sulan pinnoitteen kaataminen laakerin sisäpinnalle [13]

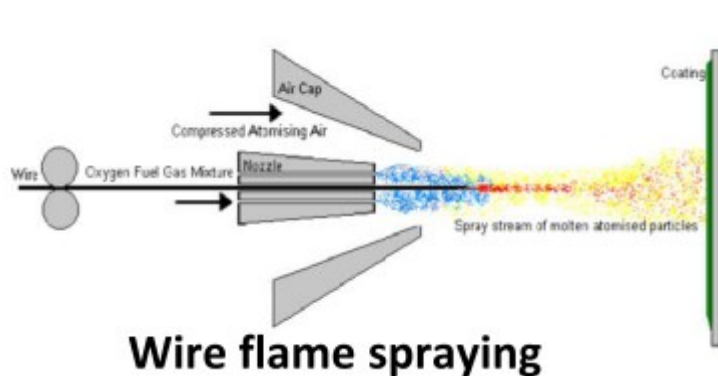
4.2.3 Terminen ruiskupinnoittaminen

Termisen ruiskupinnoittamisen valmistelu aloitetaan puhdistamalla laakeripinta huolellisesti vanhasta pinnoitteesta, esimerkiksi koneistamalla. Tämän jälkeen pinnasta poistetaan kaikki rasvajäämät. Pinnoittamisen onnistumisen kannalta hyvä pinnan puhdistus on tärkeää. Puhdistuksen jälkeen laakerin pinta puhalletaan teräsrakeilla, jotta pinnasta saadaan riittävän rosainen, jotta itse pinnoite sekä tartunta-aine tarttuvat

pintaan kiinni. Puhalluksen jälkeen tartunta-aine ruiskutetaan kaariruiskutuslaitteistolla (kuva 19). Tyypillinen tartuntakerroksen paksuus on 0,5 mm ja 1 mm välillä. Tartuntakerroksen jälkeen ruiskutetaan valkometalli lankaliekkiruiskutusmenetelmällä (kuva 20). Pinnoittaminen tapahtuu muutaman millin sadasosan kerroksissa. Pinnoittaminen on aikaa vievää työtä ja kokonaispinnoite paksuuden saavuttamiseksi esimerkiksi 4 mm pinnoittaminen vaatii useiden tuntien ruiskutustyön. Pinnoittamisen jälkeen suoritetaan loppukoneistus kohdetta vastaavaksi. [14]



Kuva 19 Tartunta-aineen kaariruiskutus [14]



Kuva 20 Valkometalli pinnoitteen lankaliekkiruiskuttaminen [14]

4.2.4 Termisen ruiskupinnoitteen vikatyypit

Tavallisimmat viat pinnoitteessa ovat pienet huokokset, jotka tavallisesti johtuvat pölystä, huonolaatuisesta langasta tai ruiskutusparametreistä. Harvemmin esiintyviä vi-

koja ovat rengasmaiset pintaan avautuvat viat kooltaan 1-3 mm, jotka havaitaan pintavirhetarkastus menetelmillä. Viat johtuvat huonosti sulaneista suuremmista pisaroista ruiskutettaessa pinnoitetta. Huonosti sulaneiden pisaroiden riskinä on, että pisarat voivat irrota käytön aikana ja tuhota koko pinnoitteen. On myös mahdollista, että ruiskupinnoituskerrosten väleissä on laminaatiota, joka johtuu puutteellisesta ruiskutuspölyn poistamisesta ruiskutuskerrosten välillä. [14]

5 LAAKERIPINNOITTEIDEN TARKASTAMINEN

Laakerimetallipinnoitteiden tarkastamiseen käytettyjä menetelmiä ovat silmämääräinen tarkastus, pintavirhetarkastus ja ultraäänitarkastus, jota käsitellään seuraavissa kappaleissa.

Silmämääräisellä tarkastuksella havaitaan mahdolliset suuremmat vikakohdat, esimerkiksi onko pinnoitteesta lähtenyt paloja irti, onko pinnoitteessa syviä ja pitkiä naarmuja tai näkykö reuna-alueilla pinnoitteen ja laakerin rungon välissä selkeä rako.

Pintavirhetarkastuksella tarkoitetaan tässä tapauksessa tunkeumanestetarkastusta, vaikkakin käytössä olevissa laakereissa voidaan hyödyntää laakerin sisältämää öljyä itse tunkeumanesteen sijaan. Uusissa laakereissa ja vastikään koneistetuissa laakereissa tunkeumanesteenä käytetään tavallisesti Ardroxin tai Bycotestin tuotteita, jotka ovat värillisiä nesteitä. Kyseisellä tarkastuksella pystytään varmentamaan laakeripinnoitteen kiinnittyvyys reuna-alueilla sekä onko pinnoite ehjä muilla alueilla. Yleisimmät vikaindikaatiot pinnoitteissa ovat reuna-alueen irtonaiset alueet ja näyttämät pintaan avautuvista huokosista (kuva 21). Mahdolliset halkeamat pinnoitteessa havaitaan myös kyseisellä menetelmällä. Kuvassa 22 on esitetty laakeripinnoitteen paikallisista korjauksista havaituista näyttämistä.



Kuva 21 Määräaikaistarkastuksessa havaitut näyttämät pintavirhetarkastuksessa



Kuva 22 Paikallisen laakeripinnoitteen korjauksessa havaittuja näyttämiä.

5.1 Tarkastusohjeet

Laakeripinnoitteiden ultraäänitarkastamiseen voidaan soveltaa standardia ISO-4386-1, joka määrittelee ultraäänitarkastuksen eri menetelmät, joilla varmistetaan laakerimetallin ja rungon välinen kiinnittyvyys toisiinsa. Tarkastus voidaan suorittaa metallisille monikerrosliukulaakereille, joissa on teräs- tai kuparirunko ja laakerimetallissa

on käytetty lyijy- ja tinapohjaista pinnoitetta. Pinnoitekerroksen paksuus on suurempi tai yhtä suuri kuin 0,5 mm. Valurautarungoille kyseistä standardia voidaan soveltaa tietyin rajoittein.

ISO 4386-1 mukaan perustarkastuksessa käytettävät luotaimet tulee valita koon ja taajuuden mukaan laakeripinnoitteen ja rungon mukaan sopivaksi. Tyypillisesti luotainten halkaisijat ovat 6 mm ja 24 mm väliltä ja taajuudet ovat 2 Mhz – 10 MHz. Alle 1 mm pinnoitteita tarkastaessa tulisi tarkastus suorittaa käyttäen kaksoiskideluotaimia. Tarkastus suositellaan tekemään laakeripinnoitteen puolelta. Jos laakerin halkaisija on liian pieni, tarkastus voidaan suorittaa rungon takapinnalta.

Määräaikaistarkastuksissa on kuitenkin havaittu, että kaikille ruiskupinnoitetuille laakeripinnoitteille ohjetta ei voida suoraan käyttää. Valamalla ja keskipakovalulla tehtyjen pinnoitteiden tarkastuksessa ei ole havaittu poikkeavuuksia ISO 4386-1 ohjeissa määritettyihin menetelmien luotettavuuteen.

5.2 Tarkastuksen suorittaminen perinteisellä ultraäänilaitteella

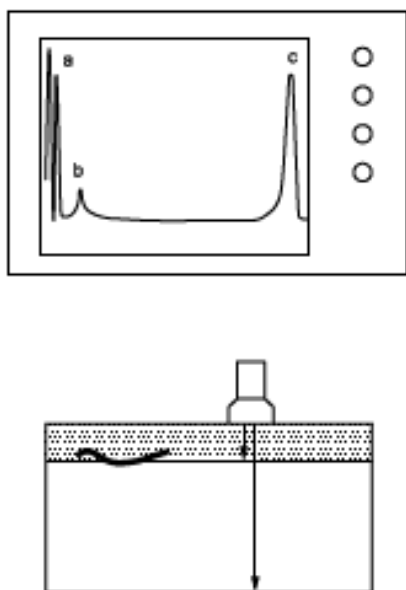
Tarkastusta suorittaessa ensin valitaan käyttöön sopiva luotain laakeripinnoitteen paksuuden ja laakerin sisähalkaisijan mukaan. Yleisesti luotaimen taajuus sijoittuu 2-10 MHz välille. Tämän jälkeen ultraäänilaitteisto kalibroidaan vastaamaan tarkastettavaa kohdetta kalibrointi kappaletta apuna käyttäen. Tällä varmistetaan, että laitteen ilmoittama äänitien pituus pinnoitteen pinnasta laakerin runkoon pitää paikkansa.

[15]

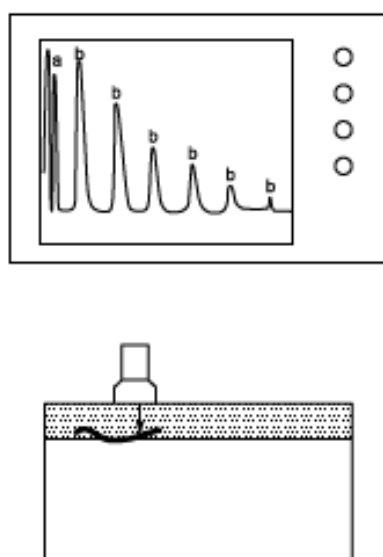
5.2.1 Tarkastaminen, jos takaseinäkaiku on saatavissa

Jos tarkastettavan kappaleen geometria sallii, tarkastus suoritetaan takaseinästä saatavaa kaikua sekä rungon ja pinnoitteen rajapinnasta saatavaa kaikua hyödyntäen. Vaatimuksena on, että takaseinäkaiku on saatavissa koko tarkastettavalta alueelta eikä välissä ole tyhjiä kohtia, kuten kanavia tai porauksia rungon sisällä.

Ultraäänilaitteen näytön pituudeksi asetetaan sellainen arvo, että laakerin rungon takaseinästä saatava kaiku mahtuu laitteen näytön oikeaan reunaan. Tämän jälkeen, nostetaan laitteen desibelivahvistus sellaiseen arvoon, että takaseinäkaiku on 80 % näytön korkeudesta. Kuvassa 23 esitetty hyvästä liitoksesta saatavat kaiut. Kun pinnoite on irti rungosta, takaseinäkaiku katoaa sekä rajapinnasta saatu kaikukorkeus kasvaa ja rajapintakaipun kerrannaiskaiut tulevat näkyviin (kuva 24). [15]



Kuva 23 Hyvä liitos (a) lähtöpulssi, (b) rajapintakaiku, (c) takaseinäkaiku [15]

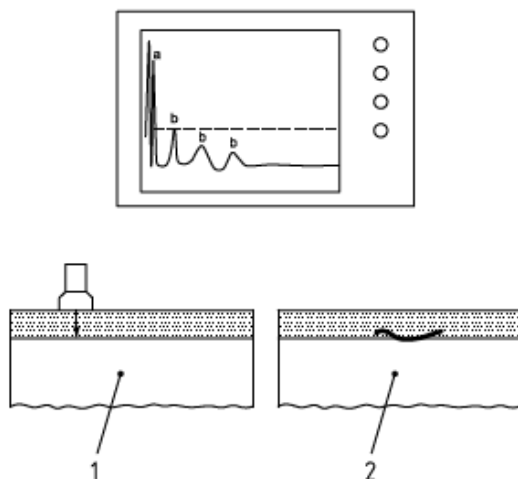


Kuva 24 Liitoksen rajapinnassa vika, (a) lähtöpulssi (b) rajapinta kaiku [15]

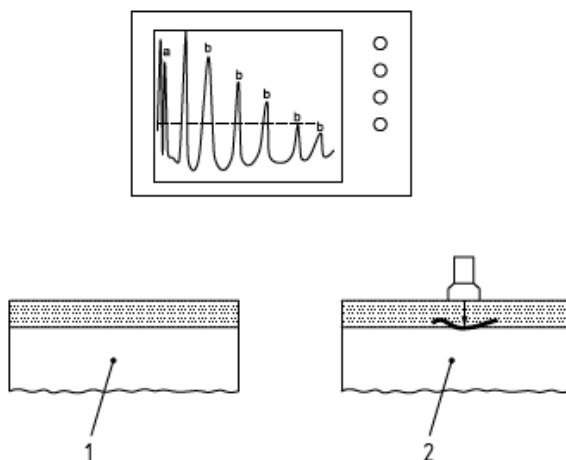
5.2.2 Tarkastus ilman takaseinäkaikua

Jos takaseinäkaikua ei voida hyödyntää kappaleen geometrian tai sisäisten poraus-ten/kanavien vuoksi, käytetään kalibrointikappaletta, jossa runkomateriaali ja laakeri-pinnoite, vastaavat tarkastettavaa kohdetta.

Kalibrointikappaleen rajapinnasta saatava kaiku asetetaan laitteen näytöllä 20% näytönkorkeuteen. Liitos on hyvä, kun rajapinnasta saatu kaiku vastaa kalibrointikappaleen rajapinnasta saatavaa kaikua kalibrointikappaleen ehjästä kohdasta (kuva 25). Pinnoitteen ja rungon välisessä liitoksessa on vikaa, jos rajapinnasta saadut kaiut vahvistuvat merkittävästi vertailukaikuihin nähden (kuva 26). [15]



Kuva 25 Hyvä liitos, (a) lähtöpulssi, (b) rajapintakaiku [15]



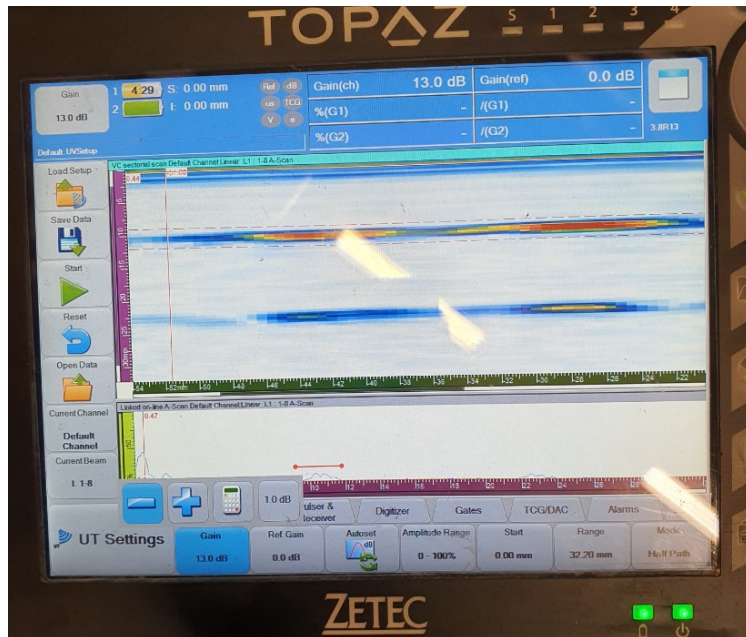
Kuva 26 Liitoksen rajapinnassa vika, (a) lähtöpulssi, (b) rajapintakaiku [15]

5.3 Tarkastaminen vaiheistetulla ultraäänilaitteella

Vaiheistetulla ultraäänilaitteella tarkastaminen voidaan suorittaa aivan kuten perinteisellä ultraäänilaitteella ja käyttää pinnoitteen kiinnittävyyden arvioinnissa rajapinnasta ja takaseinästä saatuja kaikuja, tai lineaarisena A-skannauksena. Kuvassa 27 on esitetty esimerkkinä hyvin kiinnittyneen pinnoitteen rajapinnasta saatava kaiku, joka näkyy sinisenä viivana 80 % näytön korkeudella ja tämän kaiun kerrannainen voidaan havaita haalean sinisenä viivana noin 40 % korkeudella näytössä. Kuvassa 28 on esitetty esimerkki huonosta pinnoitteen kiinnittävyydestä, vastaava ensimmäinen rajapinnasta saatava kaiku, joka aiemmin näkyi tasaisen sinisenä, on huonon liitoksen takia vahvistunut. Sinisen sävyn lisäksi havaitaan keltaisesta punaiseen muuttuva väri, joka kertoo kaiun vahvistumisesta. Myös kerrannainen on selkeästi vahvistunut ja muuttanut väriä haalean sinisestä tumman siniseksi, jonka keskialueella havaitaan myös keltaisen ja oranssin sävyjä.



Kuva 27 Esimerkki pinnoitteen hyvästä kiinnittävyydestä.



Kuva 28 Esimerkki huonosta pinnoitteen kiinnittävyydestä

6 KÄYTÄNNÖN KOKEET

6.1 Käytännön kokeiden tavoitteet

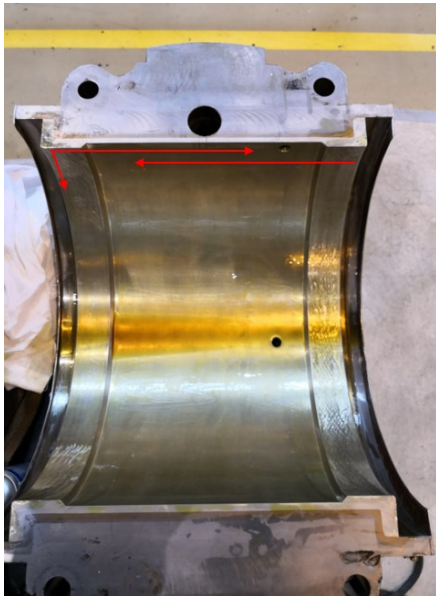
Koekappaleena käytetään voimalaitos turbiinin käytössä ollutta liukulaakeria. Tarkoituksena oli selvittää laakeripinnoitteen kiinnittvyys runkoon sekä perinteisellä että vaiheistetulla ultraäänitekniikalla menetelmien eroavaisuuksien ja havaintotarkkuuden vertailemiseksi.

6.2 Koekappaleen tarkastaminen perinteisellä ultraäänilaitteistolla

Koekappaleen tarkastaminen estyi korona-pandemian vuoksi. Näin ollen perinteisellä ultraäänellä tehtävän tarkastamisen kuvaus pohjautuu aiempiin kokemuksiin. Tarkastus aloitetaan varmistamalla laitteiston fyysinen kunto sekä vuosikalibroinnin voimassaolo. Tarkastuksessa kytkentäaineena käytetään öljyä ja luotaimeksi on valikoitu

V110 normaaliluotain. Tämän jälkeen kalibroidaan laitteisto apuna käyttäen valkometalli pinnoitteista porraspalaa, jotta ultraäänilaitteen näytölle saatu äänitien pituus vastaa todellista pinnoitteen paksuutta.

Kun laitteisto on kalibroitu ja on laadittu luotaussuunnitelma tarkastettavalle kohteelle, voidaan aloittaa kohteen tarkastaminen. Luotaaminen aloitetaan kuvassa 29 piirrettyjen nuolien mukaan kappaleen reunalta ja luotainta liikutetaan siten että luotauslinjojen limitys on riittävä (tyypillisesti 10-50 %) käyden läpi koko laakeripinnoitteen peittävä alue (kuva 29). Aiemmin tehdyssä tarkastuksessa havaittiin laakerin reunasta irrallaan oleva alue (kuva 30). Kyseinen laakeri on varastoitu varaosa eikä tarkastuksessa havaittu irrallinen pinnoitteen pinta-ala ollut merkityksellinen $< 1\text{cm}^2$.



Kuva 29 Pinnoitetun laakerin luotaus suunnitelma

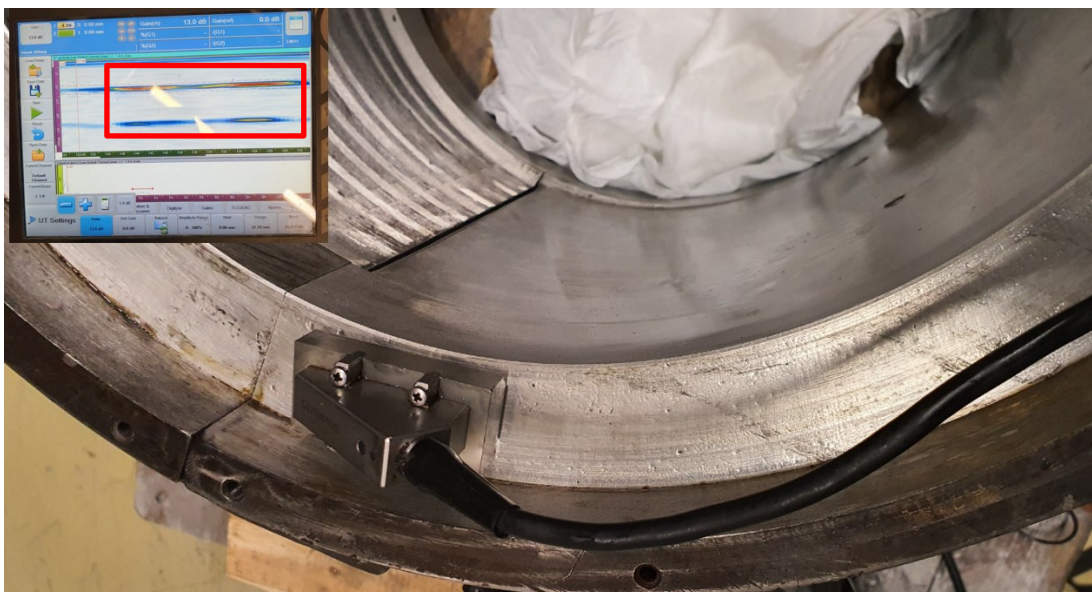


Kuva 30 Havaittu irtonainen alue laakerin reunassa

Kuvassa 30 on esitetty ultraäänilaitteen näytöllä näkyvät 3 kaikupiikkiä, jotka indikoivat irrallista pinnoitetta. Jos ensimmäisen piikin jälkeen ei olisi näkyvissä muita piikkejä ja kaikukorkeus olisi noin 20 % näytön korkeudesta, pinnoitteen kiinnittyminen olisi hyvä. Ultraäänellä havaittu irtonainen alue ei ole visuaalisesti nähtävissä muutoin kuin ultraäänilaitteen näytöllä olevista rajapinnan kaiuista saatavista kaikupiikeistä. Joissain tapauksissa pahasti vioittuneet alueet voidaan havaita visuaalisesti.

6.3 Koekappaleen tarkastus vaiheistetulla ultraäänilaitteistolla

Käytännön kokeet vaiheistetulla menetelmällä jäivät kokeiluasteelle saman syyn vuoksi kuin perinteisen ultraäänen käytön kohdalla. Tarkoitus oli rakentaa laitteisto siten, että laakerin koko pinnoitteen ala olisi saatu skannattua ja tulostettua kuvana tämän työn liitteeksi. Ennen korona pandemiaa ehdittiin käydä Loviisan voimalaitoksen varastolla kokeilemassa vaiheistetun ultraäänen toimivuutta. Kuvassa 31 on esitetty vastaava irrallinen pinnoitteen alue kuin esitettiin kuvassa 30.



Kuva 31 Varastolaakerissa havaittu irrallinen alue vaiheistetulla ultraäänellä

Tarkastuslaitteiston suunnittelussa pääsimme siihen vaiheeseen, että Omniscan MX vaiheistetulle ultraäänilaitteelle saimme tehtyä pulssianturi ja luotain kokoonpanon (kuva 32). Nämä koeajettiin metallilevyllä, jossa oli eri ainevahvuuksia (porraspala). Pulssianturina käytimme Olympus ENC1-2.5-DE anturia sen fyysisen koon ja ominaisuuksien soveltuessa hyvin tarkastettavaan kohteeseen.

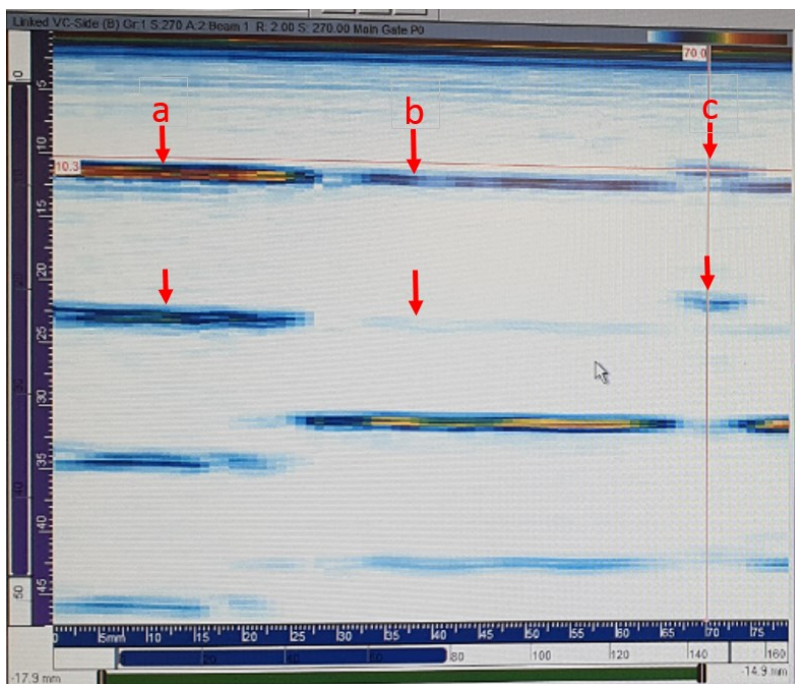
Toimivuuden varmistamisen jälkeen kokoonpanoa kokeiltiin valkometallilla pinnoitettuun kalibrointipalaan, jossa oli irrallinen pinnoite alue sekä toisessa päässä läpi poraus pinnoitteeseen asti. Kyseinen kalibrointikappale on suhteellisen pienikokoinen ja tästä syystä tarkkaa tarkastusdataa ei saatu kuin pieneltä alueelta.

Kalibrointi kappaleen tarkastuksesta voi kuitenkin päätellä, että vaiheistetulla ultraäänilaitteella ja pulssianturilla saadaan selkeä tieto irrallisesta alueesta (kuva 33) ja myös pulssianturia käytettäessä sijainti ja pituus irralliselle alueelle. Irrallinen alue on nähtävissä kuvan 33 kohdassa a). Ylimpänä näkyy ensimmäinen rajapinta-kaiku punertavana ja tämän jälkeen tasaisesti ilmestyvät kerrannaiskaiut tumman sinisenä haalistuen katsottaessa seuraavia kerrannaisia. Kuvassa 33 kohdassa b) esitetty ehjästä pinnoitteesta saatava rajapinta-kaiku sekä rajapinnasta saatava kerrannaiskaiku. Koekappaleen toisen päädyn porauksesta saatiin myös näyttämä skannauksella, mutta tämä ei kuitenkaan ole aivan niin selvästi havaittavissa johtuen porauksen pohjan muodosta.

Kartiomainen porauksen pohja sirottaa ääntä osittain sivuille eikä kohtisuoraan takaisin luotaimeen, kuten olisi tilanne jos pinnoite on irti rungosta. Kuvassa 33 kohdassa c) on esitetty kyseinen porauksesta saatava kaiku, sekä porauksesta saatu kerrannais-kaiku.



Kuva 32 Laitteistokokoonpano pulssianturilla



Kuva 33 Kalibrointi kappaleen skannaus a) irrallinen pinnoite b) ehjä pinnoite c) poraus

7 PÄÄTELMÄT

7.1 Tarkastusmenetelmien vertailu

Vaiheistetulla ultraäänellä tarkastaessa optimitapauksessa tarkastuksesta saadaan koko pinnoitteesta tallennettua datatiedot skannauksesta. Ohjelmistolla purettuna skannaus-tiedot voidaan muuttaa visuaalisesti havainnolliseen muotoon, kuten muodostaa levi-tyskuva pinnoitteesta, jolloin irralliset alueet näkyvät visuaalisesti esimerkiksi punai-sena alueena. Irrallinen alue on mittakaavassa todelliseen vikaan nähden, jolloin vika-alueen mitoittaminen on helppoa. Tulevissa määräaikaistarkastuksissa olisi mahdol-lista vertailla aiempina vuosina saatuja skannaustietoja ilman tarkastajasta johtuvaa virhettä vika-alueiden mitoittamisessa. Vaiheistetulla ultraäänilaitteella suoritettussa koetarkastuksessa myös havaittiin, että herkkyys vikakohtien löytymiseen on parempi kuin perinteisellä ultraäänellä kun käytetään scan-kuvaa jossa värialueet näytöllä indi-koivat kaikupiikkejä.

Perinteisellä ultraäänellä tarkastettaessa irrallisten alueiden raportoinnin tarkkuuteen vaikuttaa tarkastajan tarkkuudesta ja kyvystä mitoittaa vialliset alueet tarkastusta teh-dessä. Vika-alueiden tarkka mitoittaminen ja piirtäminen tarkastusta tehdessä on haas-tavaa kytkentäaineena käytettävän öljyn vuoksi. Vika-alueen mitoittamisesta ja piirtä-misestä johtuvien hankaluuksien takia tulevissa tarkastuksissa voi olla vaikea tulkita onko vika-alue laajentunut käyttöjakson aikana vai pysynyt samankokoisena. Eri tar-kastajien välillä saattaa olla eroja raportointitavassa, käytetyissä luotaimissa, kuin myös tarkastuslaitteissa. Myöskin inhimilliset virheet ovat mahdollisia suoritettaessa täysin manuaalista tarkastusta ilman tallennusmahdollisuutta.

7.2 Johtopäätökset

Vaiheistettu ultraäänilaitte vaatii perehdytyksen sekä koulutuksen kyseiseen laitteeseen perinteisen ultraäänitarkastuksen kurssin lisäksi. Perinteinen ultraäänilaitte löytyy jo-kaiselta vaaditun ultraäänitarkastus pätevyyden omaavalta. Vaiheistettuja ultraääni-laitteita on vähän verrattuna pätevyyksien omaaviin tarkastajiin korkean hankintahin-nan vuoksi ja myöskin koulutuksia kyseiselle laitteelle on harvakseltaan.

Vaiheistettu ultraääni olisi toistettavuuden ja raportoinnin kannalta parempi vaihtoehto verrattuna perinteiseen ultraääneen. Todennäköisesti jatkossa määräaikaistarkastukset tullaan jatkossakin suorittamaan perinteisellä ultraäänellä suurelta osin. Mahdollisesti ennen uudelleenpinnoitettavaksi lähettämistä voitaisiin varmistaa vaiheistetulla ultraäänellä vika-alueen koko ja muoto, jos vaiheistettu ultraäänilaite on saatavilla.

LÄHTEET

- [1] Wikipedia. Ultraääni. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Ultra%C3%A4%C3%A4ni> 3.4.2020
- [2] Ultraäänitarkastus 1, M. Ruha 2018
- [3] Ainettarikkomaton ultraäänitarkastus, johdatus perusteisiin. <https://www.sonar.fi/wp-content/themes/sonarfi/theme/ohjeet/ultraaanitarkastus.pdf> 19.2.2020
- [4] Olympus Phased Array Testing, Basic theory for industrial applications, 2014 <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa-pa-testing/>
- [5] Wikipedia. Höyryturbiini <https://fi.wikipedia.org/wiki/H%C3%B6yryturbiini> 22.7.2020
- [6] Doing it right: The Loviisa way, Simon Rippon 1999 <http://www2.ans.org/pubs/magazines/nn/docs/1999-10-2.pdf> 11.1.2020
- [7] A Motor Primer part 4 2003. http://www.beecomc.com/wp-content/uploads/2017/03/motorprimer_part4.pdf 19.2.2020
- [8] Haastattelu H. Jokineva Fortum Power and Heat Oy 29.4.2020
- [9] Ultrasonic inspection of Babbitt bearing liners <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-inspection-babbitt-bearing-liners> 19.2.2020
- [10] Babbitt metal – what is it and what do we use it for. <https://www.william-rowland.com/news/item/babbitt-metal-we-use-it-for> 7.4.2020
- [11] Metals Fabrication – Understanding the basics F.C Campbell 2013 (s. 348-349)
- [12] Text book Babbitt pour <https://www.youtube.com/watch?v=wZh2VZbqQiI>
- [13] Youtube. Centrifugal Babbitt casting machine. <https://www.youtube.com/watch?v=yrABlWEZV2U> 29.4.2020
- [14] Telatek Thermal Spraying – General presentation 29.4.2020 JR
- [15] ISO 4386-1:2019(E) International standard, Plain bearings-Metallic multilayer plain bearings - Non-destructive ultrasonic testing of bond of thickness greater than or equal to 0,5 mm

