

Mikael Nevala

3D-TULOSTETUN RUOSTUMATTOMAN TERÄKSEN MIKRORAKENTEEEN VAIKUTUS ULTRAÄÄNEEN

**3D-TULOSTETUN RUOSTUMATTOMAN TERÄKSEN MIKRORAKENTEEN
VAIKUTUS ULTRAÄÄNEEN**

Mikael Nevala
Opinnäytetyö
Syksy 2024
Konetekniikka, tuotantotekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikka, tuotantotekniikka

Tekijä: Mikael Nevala

Opinnäytetyön nimi: 3D-tulostetun ruostumattoman teräksen mikrorakenteen vaikutus ultraääneen

Työn ohjaajat: Esa Törmälä (OAMK) ja Jussi Pyhälä (Inspecta Oy)

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2024

Sivumäärä: 40 + 1 liite

Opinnäytetyössä tutkittiin ultraäänen käyttöä 3D-tulostettuun ruostumattomaan teräkseen ja ultraäänen käyttäytymistä 3D-tulostetussa materiaalissa sekä selvitettiin, vaikuttaako tulostuskulma ja mikrorakenne ultraäänen kaikuun. Lisäksi työssä tutkittiin, voiko tulevaisuudessa käyttää ultraääntä tulostetun teräksen NDT-tarkastamiseen.

Työ sisältää teoriaosuuden lisäävästä materiaalitekniikasta, ultraäänestä sekä vaiheistetusta ultraäänestä ja NDT-tarkastuksen perusteista. Työvaihe toteutettiin huhtikuussa 2024. Tällöin tulostetut kappaleet olivat hallussa ja käsitelty tarkastusta varten sopiviksi. Työvaihe sisälsi neljän ruostumattomasta teräksestä tulostetun kappaleiden tarkastuksen ja luotauksen vaiheistetulla ultraäänellä. Luotauksesta saatu data kerättiin tietokoneelle ja käsiteltiin yhdessä työn ohjaajan kanssa. Datasta pääteltiin vaikuttaako tulostettujen testikappaleiden mikrorakenne ultraäänen kaiun kulkeutumiseen ja tutkittiin, tapahtuuko mitään sellaista virhettä, joka voisi konkreettisesti estää tällaisten kappaleiden todenmukaisen tarkastuksen tulevaisuudessa.

Metallien 3D-tulostaminen on yleistynyt kaupallisesti laajasti ympäri maailmaa sekä 3D-tulostamisen teknologia ja osaaminen ovat kehittyneet viimeisten vuosikymmenten ajan. On tärkeää tutkia, voiko materiaalia lisäävällä valmistustekniikalla luotujen kappaleiden rakennetta ja eheyttä tarkastaa NDT-menetelmin. Tulevaisuudessa tällä menetelmällä luotujen osien käyttökohteena voi olla teollisuuden koneiden komponentit tai ilmailu- ja avaruusalan tuotteet, joiden laadun ja seurannan tasot ovat korkeat.

Asiasanat: metallien 3d-tulostus, vaiheistettu ultraääni, materiaalia lisäävä valmistus, NDT-tarkastus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Production Engineering

Author: Mikael Nevala

Title of thesis: The Effect of the Microstructure of 3D-Printed Stainless Steel on Ultrasound

Supervisors: Esa Törmälä (OAMK) and Jussi Pyhälä (Inspecta Oy)

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2024

Number of pages: 40 + 1 appendix

The thesis investigated the use of ultrasound in 3D-printed stainless steel and the behavior of ultrasound in 3D-printed material. It also examined whether the printing angle and microstructure affect the ultrasound echo. Additionally, the study explored the potential for using ultrasound for NDT (Non-Destructive Testing) of printed steel in the future.

The work includes a theoretical section on additive manufacturing technology, ultrasound, phased array ultrasound, and the basics of NDT inspection. The practical phase was carried out in April 2024, during which the printed parts were prepared for inspection. This phase involved inspecting and scanning four 3D-printed stainless steel parts using phased array ultrasound. The data collected from the scans was processed on a computer in collaboration with the supervisor. The data was analyzed to determine if the microstructure of the printed test pieces affects the propagation of the ultrasound echo and to identify any errors that could hinder the accurate inspection of such parts in the future.

3D printing of metals has become commercially widespread globally, and the technology and expertise in 3D printing have advanced over the past decades. It is important to investigate whether the structure and integrity of parts created using additive manufacturing techniques can be inspected using NDT methods. In the future, parts created with this method could be used in industrial machinery components or aerospace products, where high levels of quality and monitoring are required.

Keywords: metal 3d-printing, phased array ultrasonic testing, additive manufacturing, NDT inspection

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	3D-TULOSTAMINEN	7
2.1	Jauhepetiteknikka	8
2.2	Sideaineen ruiskutus	9
2.3	Materiaalin ruiskutus	10
2.4	Laminointi	11
2.5	Materiaalin pursotus	12
2.6	Allasvalopolymerisaatio	13
2.7	Materiaalin ja lämmön kohdistus	14
3	NDT-TARKASTUS	15
4	ULTRAÄÄNI	17
4.1	Ultraäänen tuottaminen	17
4.2	Ultraäänilaitteen rakenne	18
4.3	Normaaliluotain	19
4.4	Kaksoisnormaaliluotain (SE-/TR-luotain)	20
4.5	Kulmaluotain	21
5	VAIHEISTETTU ULTRAÄÄNI	22
5.1	Vaiheistettu ultraäänilaitte	22
5.2	Vaiheistetun ultraäänen luotaimet	24
6	TUTKIMUSTYÖN TOTEUTUS	26
6.1	Koekappaleen valmistus	26
6.2	Tutkimuksen esivalmistelu	27
6.3	Luotaussuunnitelma ja toteutus	30
7	TULOKSET	32
8	POHDINTA	37
	LÄHTEET	38
	LIITTEET	41

1 JOHDANTO

Metallien 3D-tulostaminen on yleistynyt paljon maailmalla ja Suomessa, ja 3D-tulostamisen teknologia ja osaaminen ovat kehittyneet viimeisten vuosikymmenten ajan. 3D-tulostamisella voidaan tulostaa monimutkaisiakin kappaleita teollisuuteen, esimerkiksi venttiilin runkoja, auton varaosia sekä ilmailu- ja avaruusalan tuotteita.

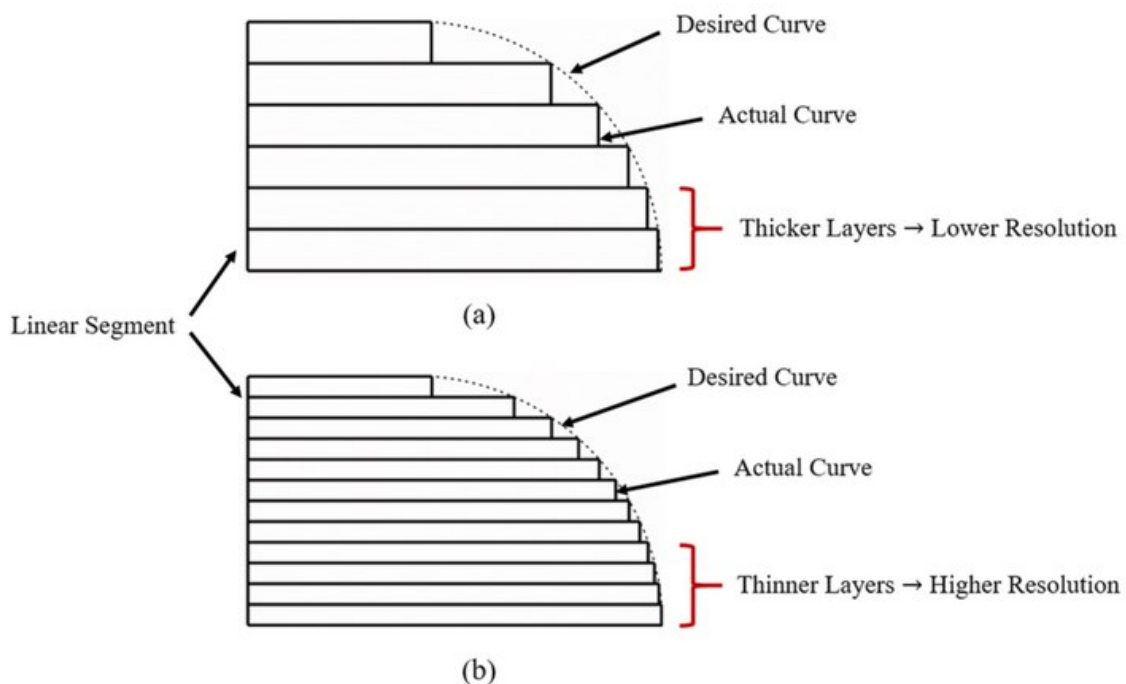
Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, miten ultraääni käyttäytyy 3D-tulostetussa ruostumattomassa teräksessä NDT-tarkastuksen näkökulmasta. Työssä on tarkoitus testata neljä testikappaletta, jotka kukin on tulostettu eri tulostuskulmalla, sekä kokeilla voiko tulostetusta metallista tehtyjä osia tarkastaa ultraäänimenetelmällä tulevaisuudessa. Työssä käydään läpi 3D-tulostamisen ja ultraäänen sekä vaiheistetun ultraäänen teoriaa ja tarkastusmenetelmää.

Opinnäytetyössä on tarkoituksena tarkastaa vaiheistetulla ultraäänellä neljä tulostettua kappaletta, joiden mitat ovat 51 mm x 50 mm x 200 mm. Kappaleet on tulostettu 0 asteen, 30 asteen, 60 asteen ja 90 asteen tulostuskulmaan. Kappaleiden tulostuskerrosvahvuus on 50 mikrometriä. Kappaleisiin koneistetaan yksi sivu luotuspinnaksi luotettavamman tuloksen saamiseksi ja tarkastettavan kappaleen lopulliset mitat olivat täten 50 mm x 50 mm x 200 mm. Jokaisen kappaleen päihin koneistetaan poikkileikkaussuunnassa 3 millimetrin läpiporaukset kuvaamaan havaittavaa sisäistä vikaa. Luotaus suoritetaan molempiin suuntiin kappaleesta jo aiemmin tehtyä ohjausjigiä avuksi käyttäen, sillä tällä pyritään poistamaan tulosten kannalta virhetekijöitä.

Opinnäytetyö tehdään yhteistyössä Inspecta Oy:n kanssa. Inspecta Oy on yksi maailman suurimmista tarkastus-, testaus- ja sertifiointiyrityksistä. Kyseinen yritys on keskittynyt tarkastamaan koneomaisuutta laajasti eri teollisuuden aloilla (1). Inspecta Oy tarjoaa opinnäytetyölle vaiheistetun ultraäänen tarkastuslaitteiston sekä siihen kuuluvat tarvikkeet ja tilat. Opinnäytetyöhön tarvittavat 3D-tulostetut ruostumattoman teräksen testikappaleet toimittaa ulkoinen kolmas osapuoli.

2 3D-TULOSTAMINEN

Materiaalia lisäävä valmistus eli tutummin 3D-tulostaminen on materiaalia lisäävää valmistustekniikkaa, eli kappale valmistetaan 3D-mallin pohjalta yleensä kerroksittain yksi poikkileikkaussuunta kerrallaan. 3D-tulosteita voi tehdä useista erilaisista materiaaleista, kuten komposiitista, betonista, muovista, keraameista, metallista ja muoveista. Suuri hyöty metalleja tulostettaessa on se, että monimutkaistenkin kappaleiden tekeminen on mahdollista. Mitä ohuemman kerroksen tulostaa, sitä tarkempi työnjälki on (kuva 1). (2; 3.)



KUVA 1. Havainne tulostuksen kerrospaksuuden vaikutuksesta kaarevien pintojen tarkkuuteen (4)

3D-tulostusmenetelmiä on useita. Lähtökohtaisesti tulostusmenetelmät eroavat toisistaan kerrosten tulostamisella tai liittämällä toisiinsa sekä materiaalin lähtöolomuodolla. Eri valmistusmenetelmien välillä on suuresti vaihtelua materiaaliominaisuuksissa, mekaanisissa ominaisuuksissa sekä mittatarkkuuksissa. Lisäksi tulostusmenetelmät vaikuttavat siihen, miten nopeaa valmistus on sekä minkälaista jälkikäsittelyä kappaleet tarvitsevat. Materiaalia lisäävä valmistustekniikka on käännteinen prosessi poistavan valmistustekniikan menetelmille, esimerkiksi jrsinnälle tai sorvaukselle. (2; 3.)

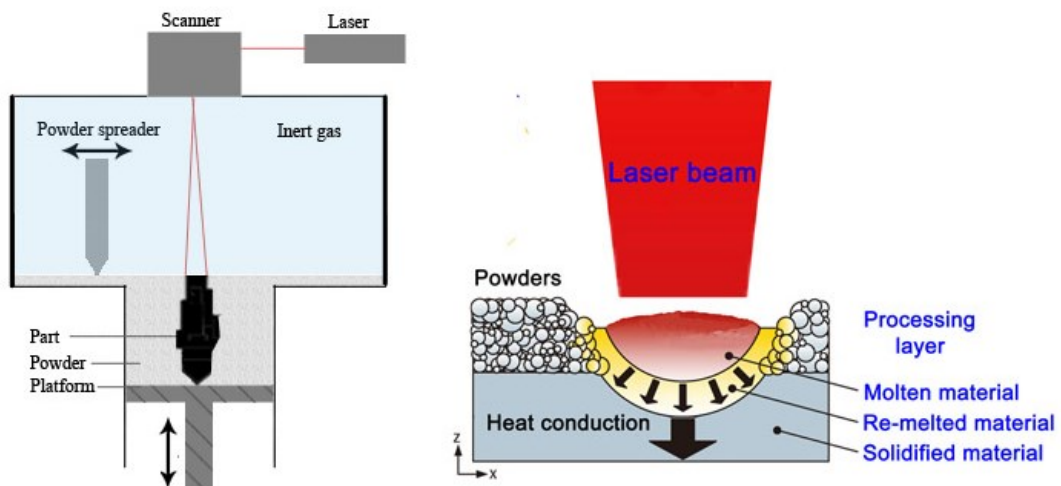
2.1 Jauhepetiteknikka

Jauhepetiteknikassa tulostettava materiaali on jauheena. Tässä tekniikassa jauhe kovetetaan sulattamalla tai sintraamalla kuitulaserilla. Sintraavissa järjestelmissä jauhe lämmitetään siihen pisteeseen, että jauhepartikkelit tarttuvat molekyyliatasolla toisiinsa. Sulattavissa järjestelmissä voidaan tuottaa huomattavasti suurempaa lämpöä ja sulattaa jauhe täysin, mikä mahdollistaa täysin kiinteän tulostuskappaleen. (2.)

Jokaisen valmistuneen tulostuskerroksen jälkeen jauhepeti laskeutuu kerrosvahvuuden verran alaspäin ja uusi jauhekerros levitetään. Jauhepetiteknikoiden etuja ovat tiiviit tulosteet, tarkkuus ja hyvät mekaaniset ominaisuudet. Materiaalit, jotka soveltuvat jauhepetiteknikalla tulostamiseen ovat muovit, keraamit ja metallit. Metalleja tulostettaessa haasteena on kappaleen tukemisen tarve, mutta muille materiaaleille jauhe toimii itsessään tukirakenteena. (1; 5.)

Jauhepetiin perustuvia tekniikoita on monia. Kuitenkin yleisimmät ovat

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM) (kuva 2)
- Direct Metal Laser Sintering (DLMS)
- Electron Beam Melting (EBM). (1.)



KUVA 2. Havainne SLM-tekniikasta (6)

Kaikissa jauhepetiteknikoissa, joissa tulostetaan metalleja, käytetään suljettua tulostuskammiota. Tulostuskammio suojataan suojakaasulla hapettumisen ja tulostusmateriaalin reagoinnin

estämiseksi. Suojakaasuvaatimukset vaihtelevat eri metalleja tulostettaessa. Teräksen kanssa käytetään yleisesti tyypeä ja esimerkiksi titaanin kanssa käytetään argonia. (5.)

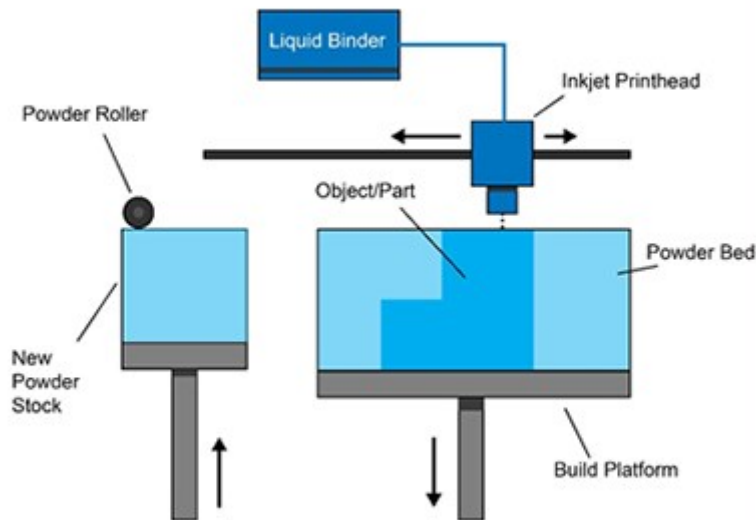
Jauhepetiteknikalla tulostetun kappaleen lopputulokseen ja laatuun vaikuttavat useat tekijät ja niitä hallitaan parametreilla, esimerkiksi

- sulan koolla
- lämmön säteilyllä ja johtumisella
- kuitulaserin teholla
- jauhepartikkelin koolla
- tuki ja lämpönielujen koolla ja sijainnilla
- kammion lämpötilalla
- sula-alueiden etäisyydellä.

Metalleille tyypillisiä muuttujia ovat lämpökuormitus ja jännitys, joten on tärkeää suunnitella tulostus- ja tukimateriaali tarkoitukseen sopiviksi. (5.)

2.2 Sideaineen ruiskutus

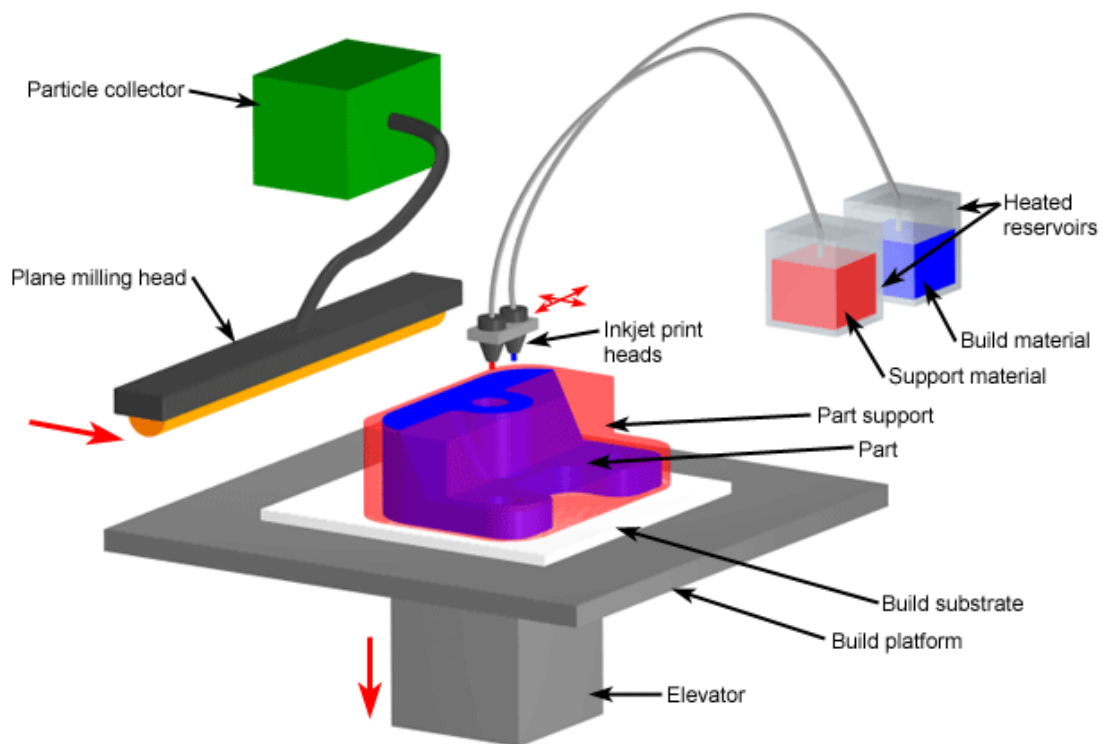
Sideaineen ruiskutus muistuttaa tekniikkana jauhepetitekniikkaa. Suulakkeen kautta ruiskutetaan side- tai liima-aine jauhepetiin, joka sitoo materiaalin tulostettavaan kappaleeseen (kuva 3). Jauhe itsessään toimii tukirakenteena tulostettavalle kappaleelle. Sideaineen ruiskutus mahdollistaa metallin tulostamisen ilman sulattamista, mikä laajentaa mahdollisuuksia käyttää useampaa eri metallityyppiä. Metallin lisäksi tulostettavana materiaalina voidaan käyttää tärkkelystä, polymeerejä, kipsiä tai hiekkaa. (2.)



KUVA 3. Havainne sideaineen ruiskutusmenetelmästä (7)

2.3 Materiaalin ruiskutus

Materiaalin ruiskutustekniikka muistuttaa musteruiskutulostimen toimintaperiaatetta. Tässä tekniikassa ruiskutetaan useista suuttimista ultraviolettivalolla kovetettavaa materiaalia nestemäisessä olomuodossa (kuva 4). Pelkästään materiaalin ruiskutus ei riitä, vaan sekaan ruiskutetaan tukimateriaalia, joka pitää tulosteen kasassa. Tukimateriaali poistetaan tulostuksen jälkeen kappaleesta lämpökäsittelyllä tai vedellä. Tällä tekniikalla voidaan ruiskuttaa kappaleita, joiden osa-alueet koostuvat eri materiaaleista. Materiaalin ruiskutuksessa voidaan käyttää materiaalina polymeerejä, keraameja ja metalleja. (2.)

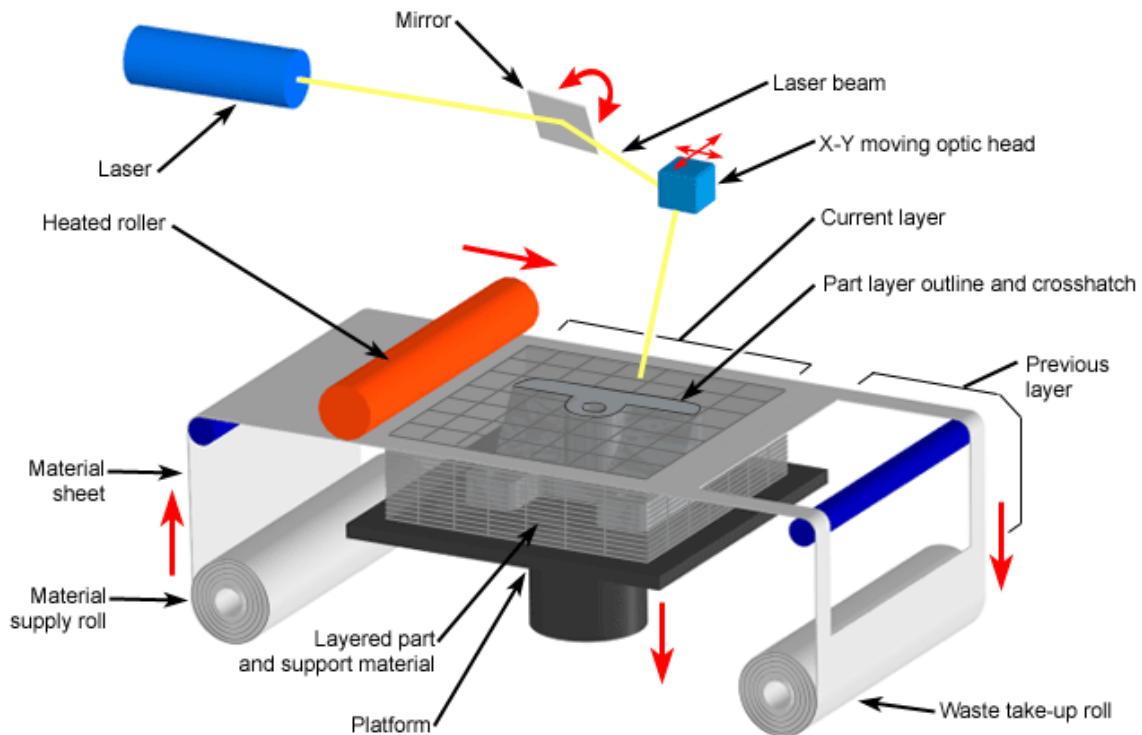


Copyright © 2008 CustomPartNet

KUVA 4. Havainne materiaalin ruiskutustekniikasta. (8)

2.4 Laminointi

Laminointitekniikassa käytetään nauhoja tai levyjä, jotka liitetään yhteen ultraäänihitsaamalla, liimaamalla, lämmöllä tai puristuksella (kuva 5). Tämä tekniikka vaatii ylimääräistä CNC-työstöä, koska jokainen liitetty kerros leikataan siihen haluttuun muotoon terällä tai laserilla. Materiaaleina voidaan esimerkiksi käyttää metallia, muovia tai paperia. Laminoituja kappaleita tehdään usein esteettisiin tai visuaalisiin malleihin, eivätkä ne sovi rakenteelliseen käyttöön. Tekniikka vaatii suhteellisen vähän energiaa, koska materiaalin liittäminen ei tapahdu sulattamalla. (2; 9.)



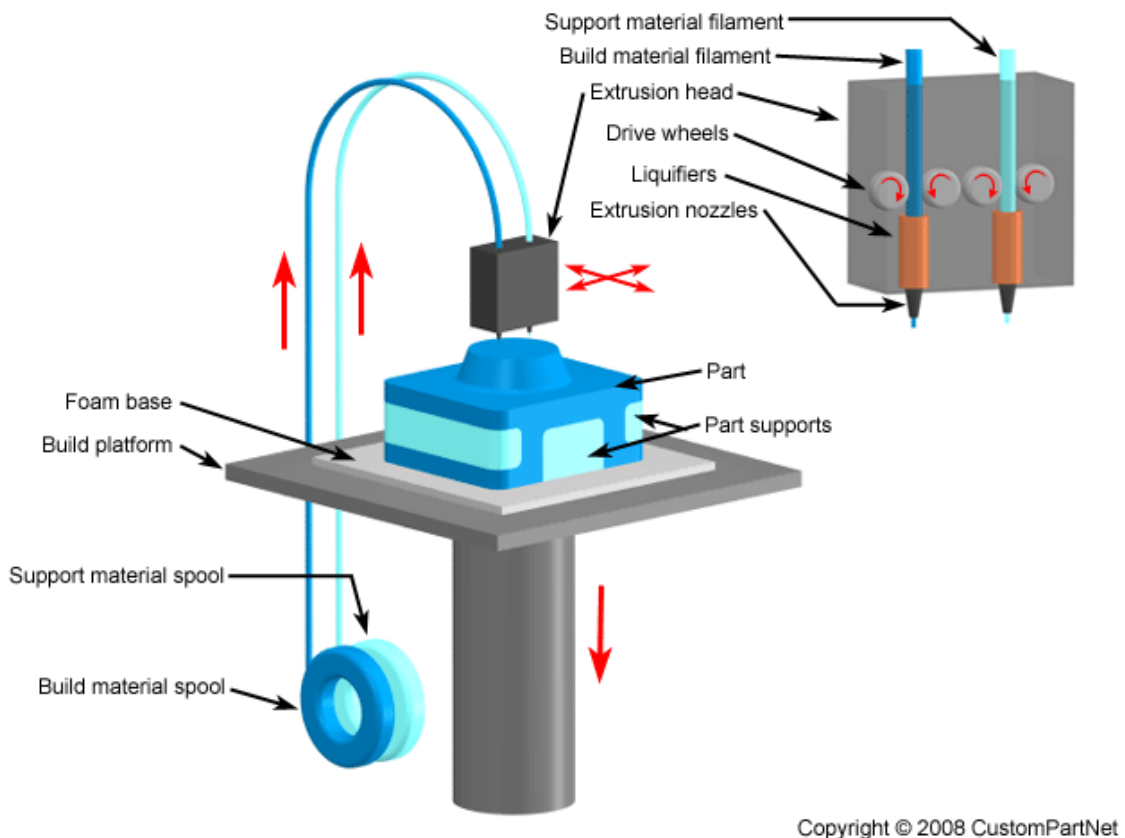
Copyright © 2008 CustomPartNet

KUVA 5. Havainne laminointitekniikasta. (10)

2.5 Materiaalin pursotus

Materiaalin pursotustekniikassa tulostettava materiaali pursotetaan kiinteänä suuttimeen. Tekniikka vaatii korkeita lämpötiloja. Suuttimessa on resistiivinen lämmitin, joka lämmittää materiaalin notkeaksi, lähes sulamispisteeseen. Täten materiaali on helppo pursottaa kerros kerrokselta. Tulostimen suutin liikkuu x-, y- ja z-akselin suuntaisesti. Tulostettava materiaali pursotetaan paineella ja se liimautuu edelliseen kerrokseen välittömästi kovettumalla. Tulostettavan kappaleen tukirakenne tulostuu samasta materiaalista tai erikseen valitusta tukimateriaalista. (Kuva 6.) (2; 11; 12.)

Tyypillisesti materiaalin pursotustekniikalla tulostetaan termoplastisia polymeerejä. Tulostuksia on jo kokeiltu keraameista ja metallitahnasta. Tulostuksen laatu vaihtelee paljon asetettujen parametrien mukaan, mutta silti tulostetuilla kappaleilla on taipumus suureen huokoisuuteen, sekä tarkkuus ja pinnanlaatu ovat heikkoja. Materiaalin pursotuslaitteisto ja materiaalit ovat suhteellisen halpoja, joten ne ovat yleisiä kuluttajilla harrastekäytössä. (2; 11; 12.)

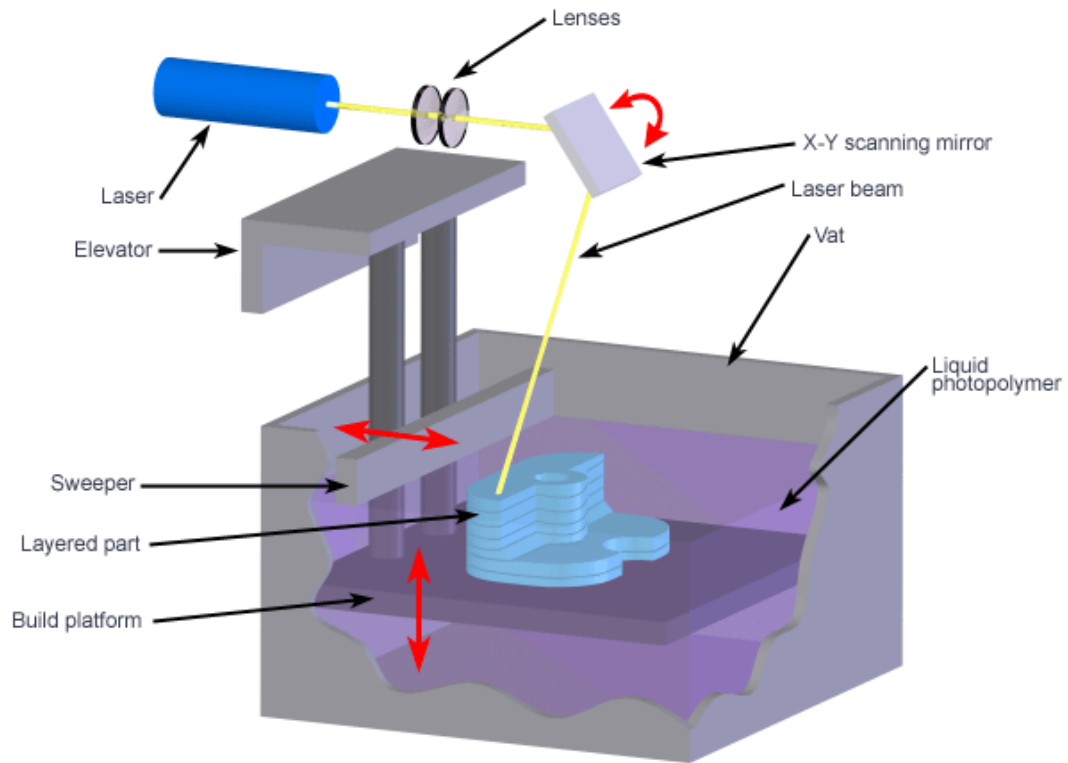


Copyright © 2008 CustomPartNet

KUVA 6. Havainne materiaalin pursotustekniikasta (10)

2.6 Allasvalopolymerisaatio

Allasvalopolymerisaatiossa käytetään päämateriaaleina säteilykovettuvia, nestemäisiä valopolymeerejä tai hartseja. Menetelmässä on myös mahdollista valmistaa kappaleita keraamista. Useimmat valopolymeerit reagoivat ultraviolettivaloon, mutta myös jotkin näkyvän valon menetelmät ovat käytössä. Nämä valosäteilytykset aiheuttavat materiaalissa kemiallisen reaktion, joka kovettaa materiaalin kiinteäksi. Tässä tekniikassa altaaseen lisätään tulostettavan kerrospaksuuden verran hartsia ja se kovetetaan. Tämän jälkeen tulostusalue siirtyy, tulostettavaa materiaalia lisätään ja näitä toistetaan, kunnes tulostettava kappale on valmis. Tällä menetelmällä voidaan tulostaa noin 1–3 cm tunnissa. Tulostetun kappaleen pinnanlaatu on hyvin tarkka ja allasvalopolymerisaatiolla voidaan tulostaa todella yksityiskohtaisia kappaleita. Jälkikäsittelynä valmiista kappaleesta valutetaan ylimääräinen materiaali pois sekä pinnat huuhdellaan puhtaiksi. Lopullisen kovettumisen saavuttamiseksi kappale voidaan käsitellä ultraviolettisuunissa. Uunin jälkeen kappaleen voi vielä viimeistellä hiomalla ja kiillottamalla. Yleensä tällä tekniikalla tehdään valumalleja ja prototyyppisiä. (Kuva 7.) (2; 11; 13.)



Copyright © 2008 CustomPartNet

KUVA 7. Havainne allasvalopolymerisaatiosta. (14)

2.7 Materiaalin ja lämmön kohdistus

Materiaalin ja lämmön kohdistuksessa tulostusalueelle kohdistetaan lämpöenergiaa sekä sulatettavaa materiaalia jauheena tai lankana. Yleisimmin käytettyjä materiaaleja ovat metallijauheet, mutta tulostukseen voidaan käyttää myös polymeerejä tai keraameja. Sulatukseen vaadittava lämpöenergia voidaan tuottaa plasmalla, elektronisuihkulla tai laserilla. (2.)

3 NDT-TARKASTUS

NDT-tarkastus on ainetta rikkomatonta tarkastusta, eli tarkastettavaa kohdetta ei tarvitse rikkoa haluttujen tarkastustoimenpiteiden vuoksi. NDT-tarkastuksia sovelletaan muun muassa valmistuksen seurantaan, kehittämiseen tai valvontaan, materiaalin eheyden määrittelyyn, valmistuksen ja asennuksen laadunvarmistukseen tai tuotekehityksen tueksi. Laitokset ja laitteet tarkastetaan niihin kohteisiin soveltuvilla NDT-menetelmillä, jotta täytettäisiin niille asetetut määräykset ennen niiden käyttöönottoa. Rikkomaton aineenkoetus on standardien alaista toimintaa. Tarkastuksia suorittavilta henkilöiltä vaaditaan standardien mukaiset pätevyudet. (15.)

NDT-menetelmät jaotellaan kahteen eri luokkaan: pinta- ja volymetrisiin tarkastusmenetelmiin.

Yleisimpiä NDT-menetelmiä ovat

- ultraäänitarkastus
- radiografinen tarkastus
- visuaalinen tarkastus
- tunkeumanestetarkastus
- magneettijauhetarkastus
- pyörrevirtatarkastus. (15.)

Materiaaliviat tulostetuilla kappaleilla

Vikojen syntymisen syyt materiaalia lisäävässä valmistuksessa voivat olla erilaisia, mutta niiden aiheuttamat viat voivat olla huomattavan samanlaisia. Jauhepetimenetelmässä monen tulostusprosessissa tapahtuvan asian summa voi johtaa materiaalivirheeseen, joka taas voi johtaa seuraavaan virheeseen. Hitsauksessa ja valuissa esiintyvien virheiden samankaltaisuus voi muistuttaa jauhepetimenetelmällä tulostettujen kappaleiden materiaalivikoja, joita ovat esimerkiksi huokoisuus, sulkeumat ja geometriset virheet. (16.)

Muutama esimerkki tulostusprosessista syntyvistä vioista:

- Hapetta pääsee suojakaasutettuun tulostuskammioon, mikä johtaa tulostettavan teräksen oksidoitumiseen, mikä johtaa pistekorroosioon ja epätasaiseen tulostuskerrokseen, liialliseen pinnankarheuteen tai huokosiin.
- Tulostuskammion lämpötilan muutos on liian korkea tulostettavan kappaleen tilavuuteen nähden, mikä johtaa delaminoitumiseen, epämuodostumiin tai mikrohalkeiluun, jotka puolestaan johtavat epätasaiseen tulostuskerrokseen, liialliseen pinnankarheuteen tai huokosiin. (16.)

Perinteisesti valmistetuilla valetuilla, taotuilla ja hitsatuilla osilla on pitkäikäiset standardit vikatyypeille, mutta tulostetuille osille ei ole. Siksi voidaankin hyödyntää vanhoja vertailustandardeja ja NDT-proseduureja tulostettuihin osiin ammatillista harkintaa käyttäen. Kunnes hyväksytty standardi tulostettujen osien vikojen luokitteluun ja siihen liittyvien NDT-menetelmien havaitsemisrajat teknisesti merkityksellisille vioille on vahvistettu, tulostettujen osien hyväksymiskriteerit pysyvät suunnittelutasolla. NDT-menetelmiä soveltamalla kuitenkin voidaan havaita, mitoittaa ja paikantaa tulostettujen osien virheitä niin sisäisesti kuin ulkoisestikin. (16.)

4 ULTRAÄÄNI

Kaikki ääniaallot ovat atomien mekaanista aaltoliikettä ja ihminen voi kuulla taajuusalueella 16 Hz – 20 kHz olevat äänet. Yli 20 kHz:n ääniaaltoja kutsutaan yläääniksi, eli ultraääniksi. Nykyaikaisilla laitteilla voidaan tuottaa ultraääntä 1000 MHz:iin asti. Ääni tarvitsee edetäkseen väliaineen, joka voi olla kaasua, nestettä tai kiinteää ainetta. Ääni ei etene tyhjiössä ja kaasuissakin vaimenee nopeasti. (16.)

Tässä työssä käytetään koekappaleisiin vaiheistettua ultraäänimenetelmää mahdollisten epäjatkuvuuksien havaitsemiseksi. Ultraäänitarkastuksella voidaan mitata materiaalin paksuutta sekä havaita esimerkiksi sisäisiä hitsausvirheitä kuten sulkeumia, liitosvikoja ja säröjä. Ultraäänitarkastuksen lisäksi ultraääntä voidaan soveltaa esimerkiksi ultraäänipuhdistuksessa, kaikuluotauksessa tai lääketieteessä sikiön ultraäänikuvantamisessa. (18.)

4.1 Ultraäänen tuottaminen

Jotta voidaan suorittaa tarkastuksia, täytyy ultraääni tuottaa ensin hallitusti. Ultraääni voidaan tuottaa muutamilla eri menetelmillä, mutta käytännössä se tuotetaan lähes aina pietsosähköisellä menetelmällä. Pietsosähköinen kide muuttaa sähköisen energian mekaaniseksi ja päinvastoin. Kide on pinnoitettu sähköä johtavalla kerroksella, joka toimii kiteen elektrodina. (18.)

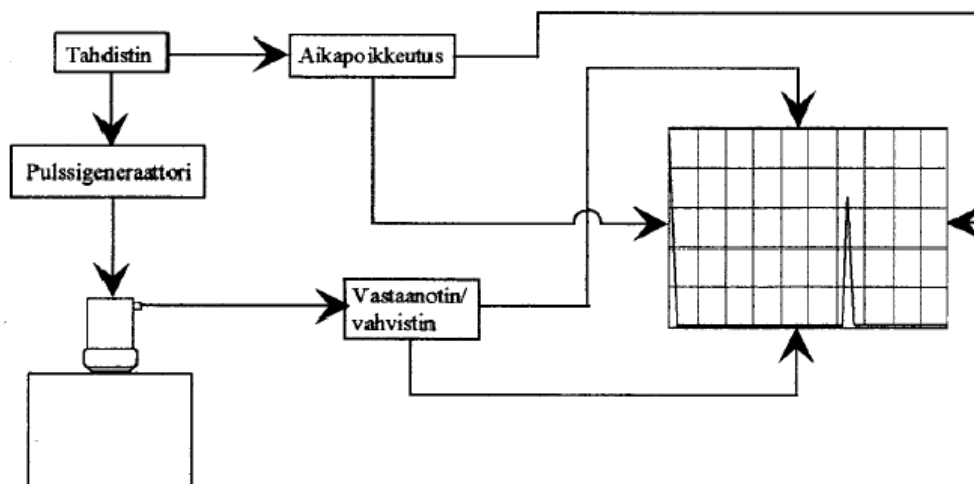
Pulssigeneraattorista lähetetään pietsosähköiseen kiteeseen sähköinen pulssi asetetulla pulssintoistotaajuudella, joka aiheuttaa kiteen värähtelyn. Pulssigeneraattorin lähettämä pulssi on voimakkuudeltaan satoja voltteja. Yleensä tarkastuksia suoritetaan kiteillä, jotka lähettävät pitkittäisaaltoa. Poikittaisaaltoa lähettäviä kiteitä on myös olemassa, mutta niiden käyttö tarkastuksissa on harvinaisempaa. Aaltomuodonmuutos tapahtuu tutkittavan kappaleen pinnassa. Pietsokeraameilla saadaan lähetettyä kiteestä haluttua aaltolajia säätämällä polarisaation suuntaa. (18.)

4.2 Ultraäänilaitteen rakenne

Ultraäänitarkastuksissa käytetään yleisimmin kannettavia akkukäyttöisiä pulssikaikulaitteita (kuva 8). Pulssigeneraattori tuottaa vaihtojännitepulssin luotaimelle. Pulssin muotoa ja toistotaajuutta voidaan säätää laitekohtaisesti. Luotaimelta tulevaa pulssia on vahvistettava voimakkaasti ennen signaalin jatkokäsittelyä, koska tuleva pulssi on vain murto-osan lähetetystä signaalista. Signaali yleensä tasasuunnataan ennen näyttölaitetta. Laitekohtaisesti on myös mahdollista käyttää tasasuuntaamatonta radiotaajuutta (RF-signaali) jonkin yksittäisen kaiun tarkempaa tutkimista varten. Vahvistin sisältää yleensä myös suodattimia, joilla saadaan kohinaa pois. Vahvistustaso on laajasti säädettävissä, jotta kaikki signaalit saadaan säädettyä sopiville tasoille. (18.)

Digitaalisissa ultraäänilaitteissa käytetään erilaisia elektronisia näyttöjä, esimerkiksi elektroluminenssinäyttöjä, kuten taas vanhemmissa ultraäänilaitteissa on käytetty katodisädekuvaputkea. Elektroluminenssinäyttöjen ohjaus on digitaalista ja taajuudeltaan ne ovat matalampia kuin katodisädeputket, yleisimmin alle 60 Hertziä. Näytön rakenteen takia nykyään saadaan laitteista valmistettua fyysisesti pienempiä verrattuna katodisädeputkeen. (18.)

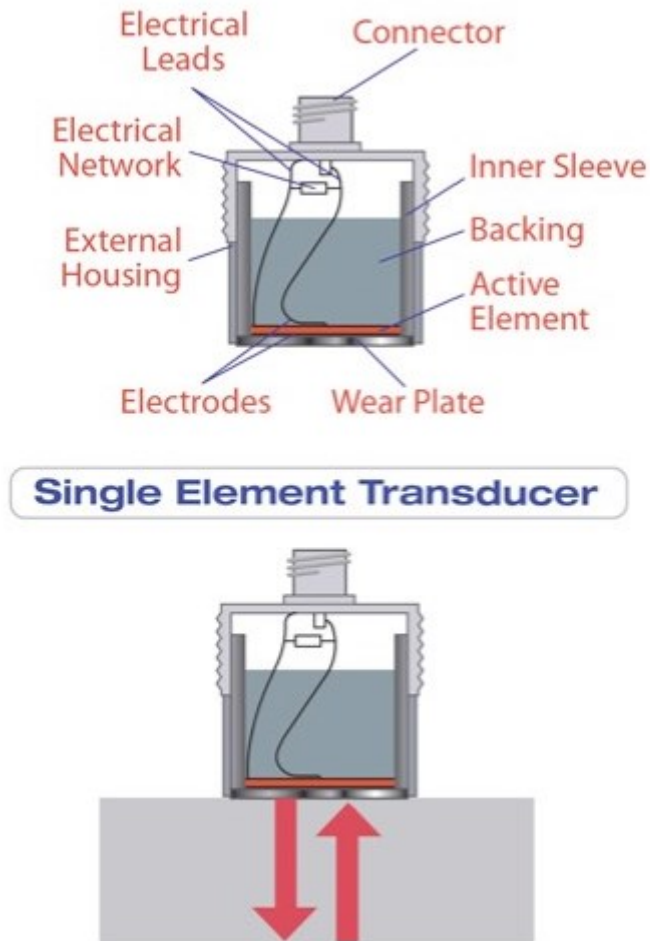
Aikapoikkeuksella tarkoitetaan näyttämää piirtävän pisteen projektiota aika-akselilla ja aikapoikkeuksen avulla säädetään etäisyysasteikkoa. Tahdistin tuottaa ja tahdistaa tietyn muotoista ja jännitteistä vertailupulssia järjestelmän eri toimintojen suhteen. (18.)



KUVA 8. Pulssikaikulaitteiston toimintaperiaate (18)

4.3 Normaaliluotain

Normaaliluotain eli nollaluotain on yleisimpiä luotaintyyppiä ja lähettää ultraääntä kohteeseen sen pinnan normaalin suunnassa. Yksikiteisessä luotaimessa kide lähettää ja vastaanottaa ultraääntä. Kuvassa 9 on näytetty yksikiteisen normaaliluotaimen rakenne, josta havaitaan kiteen sijainti lähellä tarkastettavaa kappaletta, joka vaikuttaa luotaimen lyhyeen viiveeseen. (18.)

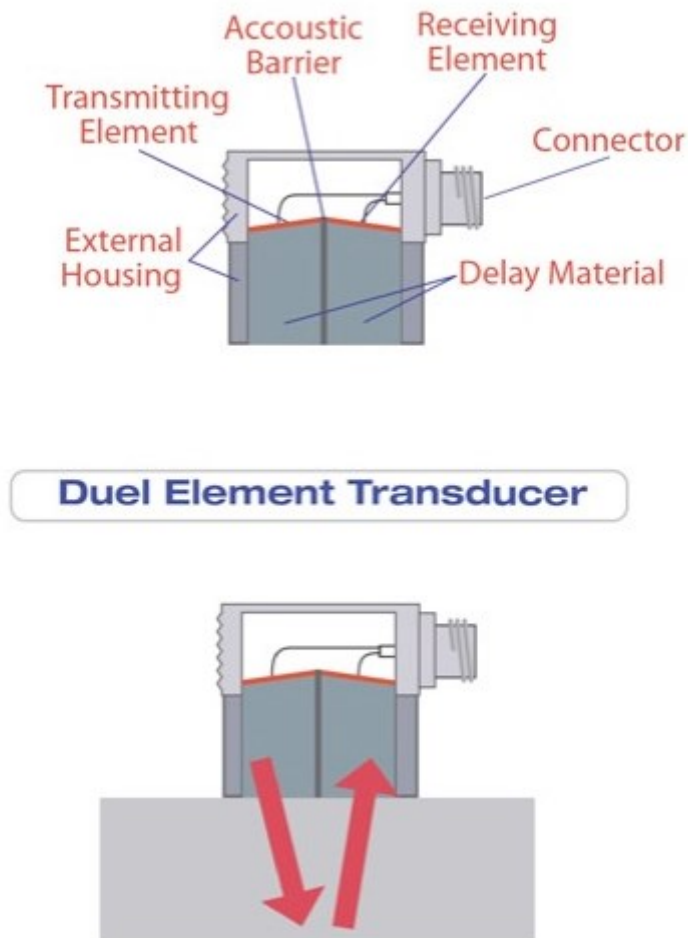


KUVA 9. Yksikiteisen normaaliluotaimen rakenne (17)

Normaaliluotaimet lähettävät tavallisesti pitkittäisaaltoa, mutta on olemassa myös poikittäisaaltoa lähettäviä luotaimia. Poikittäisaaltoa lähettävät normaaliluotaimet tarvitsevat kiinteän kytkentäaineen. Normaaliluotaimia käytetään yleensä paksuusmittaukseen sekä takeiden, valujen ja perusaineen laminaarisuuden tarkastamiseen. (18.)

4.4 Kaksoisnormaaliluotain (SE-/TR-luotain)

Kaksoisnormaaliluotaimessa on kaksi kideä, joista toinen lähettää ja toinen vastaanottaa ultraääntä. Tästä syystä kiteiden materiaalit voivat olla erilaiset, ja kiteiden ominaisuuksia voidaan optimoida toisistaan riippumatta. Kuvassa 10 on näytetty kaksoisnormaaliluotaimen rakenne, ja siitä voidaan havaita rakenteellinen ero yksikiteiseen normaaliluotaimen nähden sillä, että kiteet ovat kauempana tarkastettavasta kappaleesta, joten viive on pidempi. (18.)

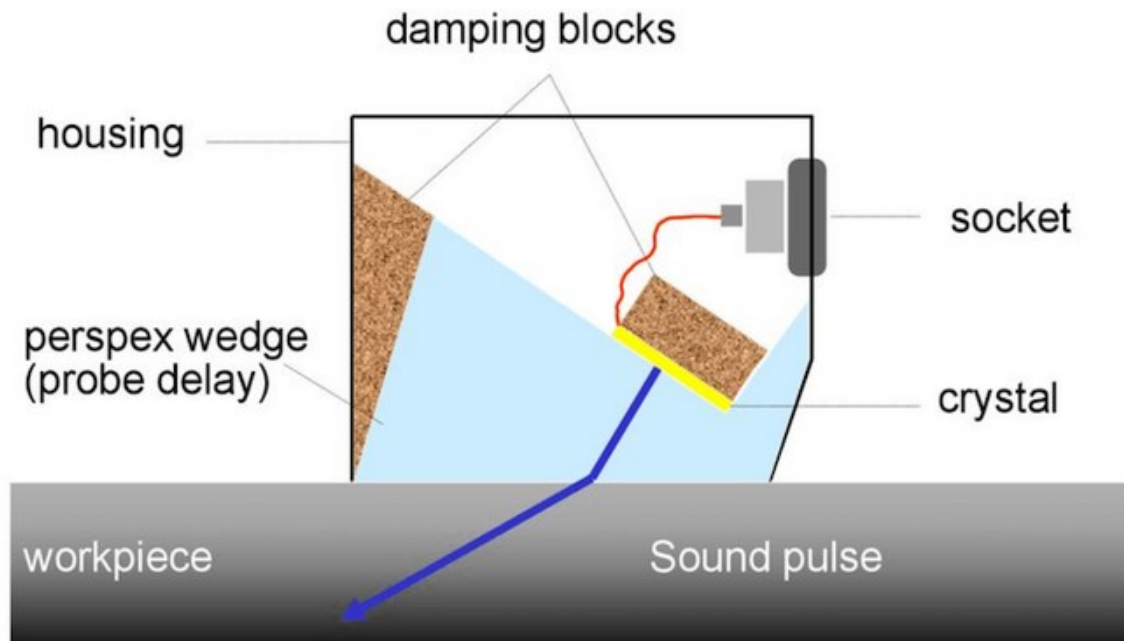


KUVA 10. Kaksoisnormaaliluotaimen rakenne (17)

Kaksoisnormaali- ja normaaliluotaimen merkittävin ero on ultraäänen viive. Kaksoisnormaaliluotaimen pitemmän viiveen takia lähtöpulssi voidaan säätää näyttölaitteen ulkopuolelle, minkä ansiosta saavutetaan hyvä lähierotuskyky normaaliluotaimen verrattuna. Kaksoisnormaaliluotaimia käytetään pinta-alueiden tarkastuksiin ja ohuempien kappaleiden paksuusmittauksiin. Kaksoisnormaaliluotaimet ovat lisäksi vähemmän herkkiä kontaktin muutokselle, joten ne soveltuvat paremmin karheille pinnoille. (18.)

4.5 Kulmaluotain

Kulmaluotain lähettää ultraääntä kohteeseen pinnan normaalin nähden olevassa kulmassa (kuva 11). Tyypillisiä suuntakulmia ovat 35 astetta, 45 astetta, 60 astetta ja 70 astetta. Kulmaluotaimen kulma pitää paikkaansa teräksellä, mutta muilla materiaaleilla vaikuttaa materiaalin tiheys, eli kulma muuttuu äänennopeuksien suhteen mukaan. Rakenteellisesti kulmaluotaimet ovat kiinteäkulmaisia tai luotaimen kulmaa vaihdetaan irtokiilalla. (18.)



KUVA 11. Kulmaluotaimen rakenne (19)

Kulmaluotaimia käytetään yleisimmin hitsien tarkastuksiin, mutta myös kohteisiin, johon halutaan ultraäänen menevän tietyssä kulmassa. Kulmaluotaimissakin voi olla erilliset lähetin- ja vastaanotinkiteet. (18.)

5 VAIHEISTETTU ULTRAÄÄNI

Vaiheistettu ultraäänitekniikka on ultraäänisovellus, joka perustuu monivärähtelevän luotaimen käyttöön, jossa jokaista värähtelijää voidaan ohjata elektronisesti erikseen. Täten voidaan suunnata ultraäänikeila haluttuun suuntaan, suorittaa luotausliike elektronisesti liikuttamatta luotainta sekä fokusoida keila haluttuun syvyyteen. Muuttuvan kulman ansiosta varmistuu epäjatkuvuuksien hyvä havaittavuus niiden asennosta riippumatta. (21; 22.)

Vaiheistetun ultraäänen sovellutukset lääketieteessä voi olla monelle tutumpi käsite. Näissä sovelluksissa käytetään korkeataajuisia ääniaaltoja yksityiskohtaisiin poikkileikkauskuvien luomiseen esimerkiksi sisäelimestä tai sikiötutkimuksesta. Vaiheistetun ultraäänen sovellutukset eivät kuitenkaan rajoitu pelkästään lääketieteelliseen käyttöön. Ensimmäiset teollisuuteen tarkoitetut vaiheistetut ultraäänilaitteet esiteltiin 1980-luvulla. Laitteet olivat erittäin suuria ja vaativat tietojen siirtämisen tietokoneelle, jotta tulokset voitiin käsitellä ja kuvantaa. Kannettavat akkukäyttöiset laitteet ilmestyivät 2000-luvun alussa. Komponenttien nopea kehitys mahdollisti seuraavan sukupolven vaiheistetun ultraäänilaitteiston kehittämisen siihen pisteeseen, jossa tiedot saatiin kuvannettua suoraan digitaalisesti näytölle, jolloin tiedot voitiin suoraan käsitellä ja analysoida samalla laitteella. (20.)

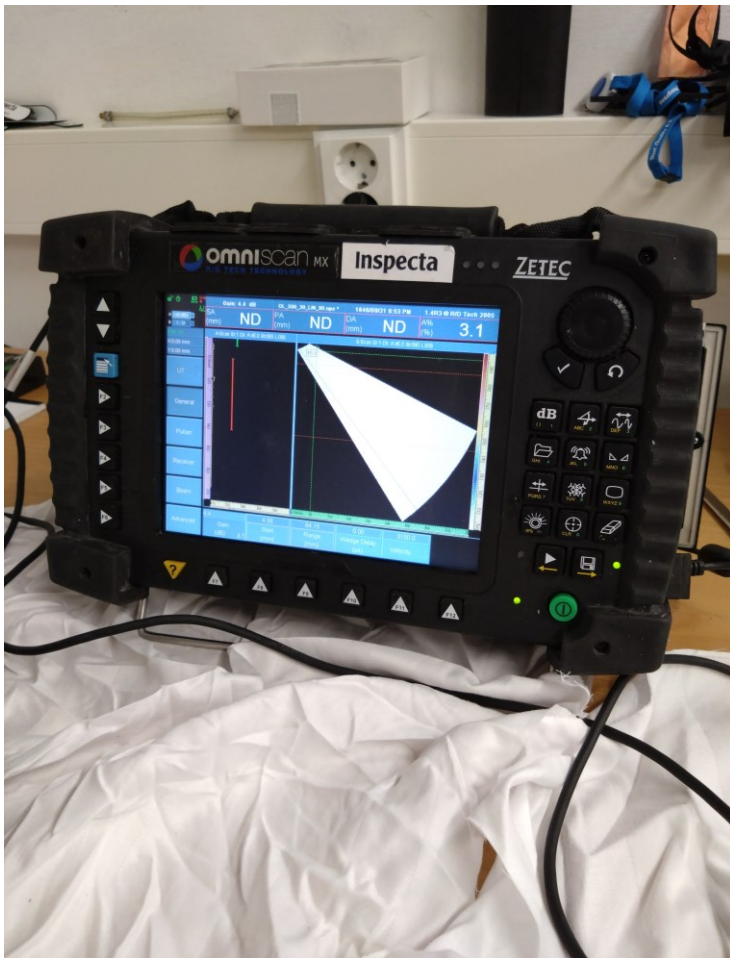
5.1 Vaiheistettu ultraäänilaitte

Vaiheistettu ultraäänilaitte sisältää hienostuneen tietokonepohjaisen käyttöjärjestelmän, joka pystyy ohjaamaan monielementtiluotaimia, vastaanottamaan ja digitoimaan palaavan kaiun signaalitietoa ja piirtämään ne erilaisissa standardimuodoissa. Vaiheistetulla ultraäänilaitteella on mahdollista pyyhkäistä äänikeila hajautetuilla kulmilla, toisin kuin tavanomaisella ultraäänilaitteella. Äänikeilan voi myös fokusoida useisiin eri syvyyksiin joko lineaarisesti tai dynaamisesti. (Kuva 12.) (20.)

Vaiheistetussa ultraäänilaitteistossa on ohjelmisto, joka on nimeltään "focal law calculator". Kyseinen ohjelmisto määrittää yksityiskohtaiset viiveajat kunkin elementtiryhmän laukaisulle halutun kaikukeilan muodon luomiseksi aaltovuorovaikutuksen avulla ottaen huomioon luotaimen ja kiilan ominaisuudet, sekä tutkittavan kappaleen akustiset ja geometriset ominaisuudet. (20.)

Elementtejä pulssitetaan yleensä 4–32 ryhmissä, mikä parantaa tarkkuutta ja vähentää epätoivottua kaiun siroamista ja mahdollistaa terävämpää fokuointia. Eri elementit tai elementtiryhmit vastaanottavat palaavan kaiun. Vaiheistettu ultraäänilaite voi lajitella spatiaalisesti palaavat aaltorintamat kunkin elementin amplitudin ja saapumisajan mukaan. (20.)

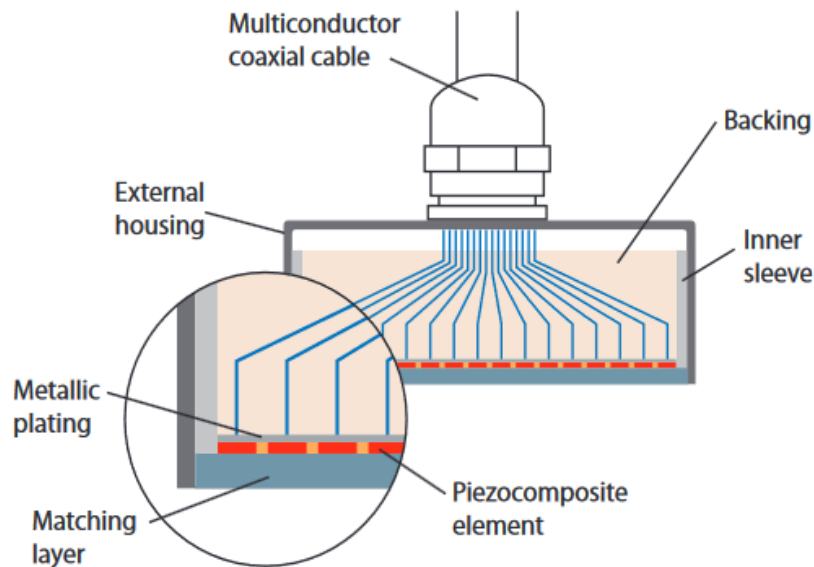
Käyttöjärjestelmällä asetetaan ohjelmoitu pulssisekvenssi, joka laukaisee useita yksittäisiä ääniaaltorintamia tutkittavaan kappaleeseen. Nämä ääniaaltorintamat yhdistyvät kumoten ja rakentuen toisiinsa yhdeksi primääriaaltorintamaksi. Kuten myös tavanomainen ultraääniaalto, primääriaalto kulkee tutkittavan kappaleen läpi ja heijastuu epäjatkuvuuksista, eri materiaalien rajapinnoista, sekä takaseinästä. Keilaa voidaan ohjata dynaamisesti eri astekulmiin, fokusoida tiettyihin syvyyksiin ja alueen kokoon, jolloin yhdellä monielementtisellä luotainkokoontamalla voidaan tutkia kappale useasta eri perspektiivistä. Keilan ohjaaminen tapahtuu erittäin nopeasti: luotaimen skannauksen useat astekulmat tai fokusoidun syvyyden muutos tapahtuu sekunnin murto-osassa. (20.)



KUVA 12. Zetec Omniscan MX vaiheistettu ultraäänilaite

5.2 Vaiheistetun ultraäänen luotaimet

Vaiheistetulle ultraäänitarkastukselle on saatavilla luotaimia eri käyttötarkoituksiin, jolloin kriteereinä ovat värähtelijöiden lukumäärä, taajuus ja luotaimen tyyppi, mutta silti kaikki sisältävät pietsosähköisen elementin, joka on jaettu useisiin segmentteihin (kuva 13). Näillä kriteereillä valitaan käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuva luotain. Nykyaikaiset vaiheistetun ultraäänen luotaimet on tyypillisesti rakennettu pietsokomposiittimateriaalin ympärille, joka koostuu monista pienistä ohuista pietsosähköisistä keraamisista tangoista, jotka on upotettu polymeerimatriisiin. Komposiittianturit ovat haastavampia valmistaa, mutta ne tarjoavat tyypillisesti 10–30 dB:n herkkyySEDUN verrattuna muutoin samankaltaisiin pietsokeraamisiin antureihin. Segmentoitua metallipinnoitusta käytetään jakamaan komposiittinauha useiksi sähköisesti erillisiksi elementeiksi, jotka voidaan pulssittaa yksittäin. Luotaimia on myös kiinteällä tai irrotettavalla kiilalla. Irrotettavissa kiiloissa hyvänä etuna on se, että kohdekohtaisesti kiila voidaan valmistaa itse. (20.)



KUVA 13. Vaiheistetun ultraääniluotaimen poikkileikkaus (20)

Vaiheistetut ultraääniluotainkokoontimet sisältävät yleensä muovikiilan (kuva 14). Kiiloja käytetään pitkittäis- ja poikittaisaalto-sovelluksissa sekä normaaliluotauksen lineaariskenauksessa. Kiilat toimivat periaatteessa samalla tavalla vaiheistetussa ultraäänessä kuin tavanomaisessa normaaliluotauksessa, eli ne kytkevät äänienergian luotaimesta testattavaan kappaleeseen siten, että se taittuu ja/tai muuttuu haluttuun kulmaan Snellin lain mukaisesti. Vaikka vaiheistetussa

ultraäänimenetelmässä käytetäänkin useiden äänikeilojen ohjausta kiilan avulla, tämä taitevaikutus on myös osa äänikeilan generointiprosessia. (20.)

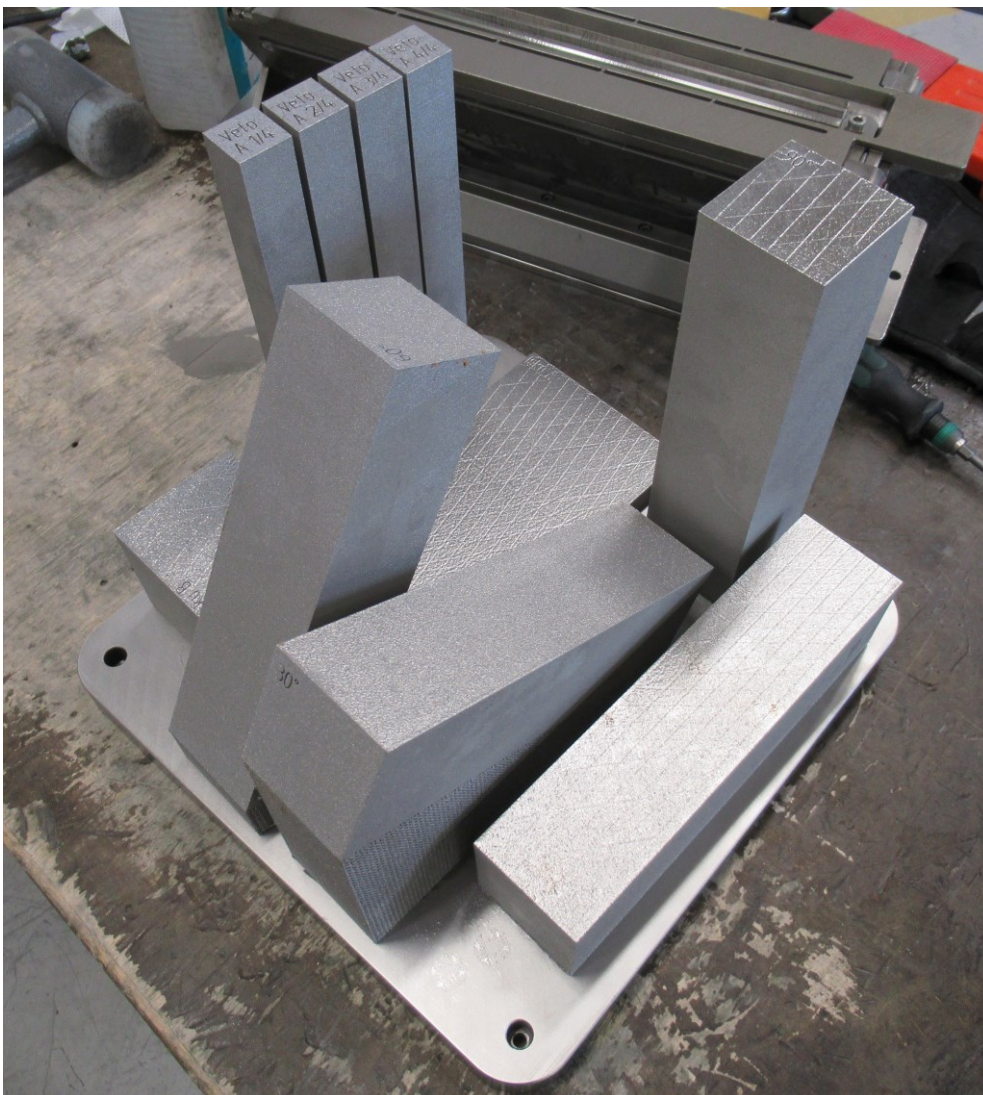


KUVA 14. Tyypillisiä vaiheistetun ultraäänen luotaimiin kiinnitettäviä kiiloja (20)

6 TUTKIMUSTYÖN TOTEUTUS

6.1 Koekappaleen valmistus

Koekappaleet valmistettiin ulkoinen kolmas osapuoli (kuva 15). Tulostuslaitteena käytettiin SLM 280HL Twin 2x400W 3D-tulostinta ja menetelmänä käytettiin Laser Powder Bed Fusion (LPBF) -tulostusmenetelmää. Tulostuskerroksen paksuus oli 50 µm.



KUVA 15. Tulostetut koekappaleet tulostusalustalla

Jälkikäsittely suoritettiin alipaineuunissa hehkuttamalla kappaleita 1095 celsiusasteessa kahden tunnin ajan. Jälkikäsittely suoritettiin, jotta kappaleen materiaaliominaisuudet vastaisivat

mahdollisimman lähelle vastaavalla menetelmällä valmistettuja käyttöön tulevia kappaleita, esimerkiksi venttiilirunkoja. Kappaleet irrotettiin alustasta sahaamalla ja tukiranteet poistettiin käsityövälineillä, minkä jälkeen suoritettiin kuulapuhallus ja koneistettiin pinnat, joista on tarkoitus suorittaa ultraäänitutkimus.

6.2 Tutkimuksen esivalmistelu

Tämän työn ultraäänitutkimukseen suunniteltiin jigi ultraääniluotaimelle ja pulssianturille (kuva 16). Jigi tulostettiin 3D-tulostimella muovista. Tällä jigillä saatiin vähennettyä riskiä mittausvirheille siten, että jigi ohjaa ultraääniluotainta jokaisessa testikappaleessa samaan mitattavaan linjaan. Pulssianturi liimattiin tarrateipillä jigiiin kiinni, jotta se pysyy paikallaan mitatessa luotaimella kuljettua matkaa. Pulssianturin on tärkeää pysyä kiinni, jotta ultraäänilaite osaa kuvantaa näyttämät oikeisiin kohtiin.



KUVA 16. 3D-tulostettu muovijigi, johon pulssianturi liimattu kiinni

Ultraäänilaitteena käytettiin Zetec Omniscan MX:ää ja luotaimena Olympus 2.25L16-9.6X10-A10-P-5-OM:ää (kuva 17). Kaikki kalibroinnit suoritti laitteen käyttöön koulutukset saanut työn ohjaaja. Ultraäänilaite kalibroitiin käyttämällä standardoitua vertailukappaletta V2, ISO 7963. Vertailukappaleen avulla kalibroitiin luotaimen kiilan viive sekä luotaimen kiteiden välinen vahvistusero (kuva 18). Lisäksi varmistettiin, että halutut kulma-alueet tulevat oikein. Kalibrointi suoritettiin vertailukappaleella, koska se on riittävän tasalaatuinen verrattavaan kappaleeseen nähden. Vertailukappaleen materiaali oli 304-terästä. Tulostetun kappaleen ja vertailukappaleen materiaalin rakenne ei eroa niin paljoa, että se vaikuttaisi tutkimuksen tuloksiin radikaalisti, koska molemmat ovat austeniittista terästä.

Luotain kalibroitiin lähettämään kaikuja 40 asteen ja 70 asteen väliltä yhden asteen eroin, eli luotain lähettää 30 eri kaikua viuhkamaisesti. Luotaimessa käytettiin irtokiilaa. Liitteessä nähtävissä

skannausdatoissa on havaittavissa kiilasta aiheutuvaa kiilakaikua. Lopullinen luotausvahvistus säädettiin 0 asteeseen tulostettuun kappaleeseen 45 asteen luotauskulmalla siten, että vertailuviasta (3 millimetrin sivuttaisporaus) saatava kaiku säädettiin 80 %:iin näytönkorkeudesta (amplitudi). Pulssianturin offset kalibroitiin kappaleeseen, että saadaan todellinen skannauksen 0-piste vastaamaan kappaleen mittoja. KytKentäaineena käytettiin Magnafluxin ultraäänigeeliä.

OLYMPUS Olympus SSA
60 Decibel Road, Suite 102
State College, PA 16801
USA
Tel: (1) (814) 689-1390
Fax: (1) (814) 689-1395

PROBE TEST DATA SHEET
Part Number: XAAB-10102
Description: ARRAY, 2.25L16-9.6X10-A10-P-5-OM
Serial Number: P3567

Probe Information Summary

Frequency :	2.25 MHz	Housing :	Angle Beam
Probe Type :	Linear Array	Cable Jacket :	PVC
Element Count :	16	Cable Length :	5.0 m (16.4 ft)
		Connector Type :	Omniscan

Active Area Dimensions

Length :	9.6 mm (0.38 in)	Matching Medium :	Rexolite
Elevation :	10.0 mm (0.39 in)	Pitch :	0.60 mm (0.024 in)

Probe Conformance Summary

Parameter	Measurement	Specification	Conformance
Average Center Frequency (MHz)	2.38 MHz	+/- 10.0% (band)	Pass
Average -6dB Bandwidth (%)	71 %	>= 60% (typical)	Pass
Overall Vp-p Sensitivity (dB)	1.1 dB	+/- 2.0dB (band)	Pass

Probe Cable Order Checked and Verified

Probe Uncoupled Response Checked and Verified

Probe Programmable Parameters Checked and Verified

Tester Signature Shawn Kehring October 16, 2015

KUVA 17. Tutkimustyössä käytetyn luotaimen tiedot



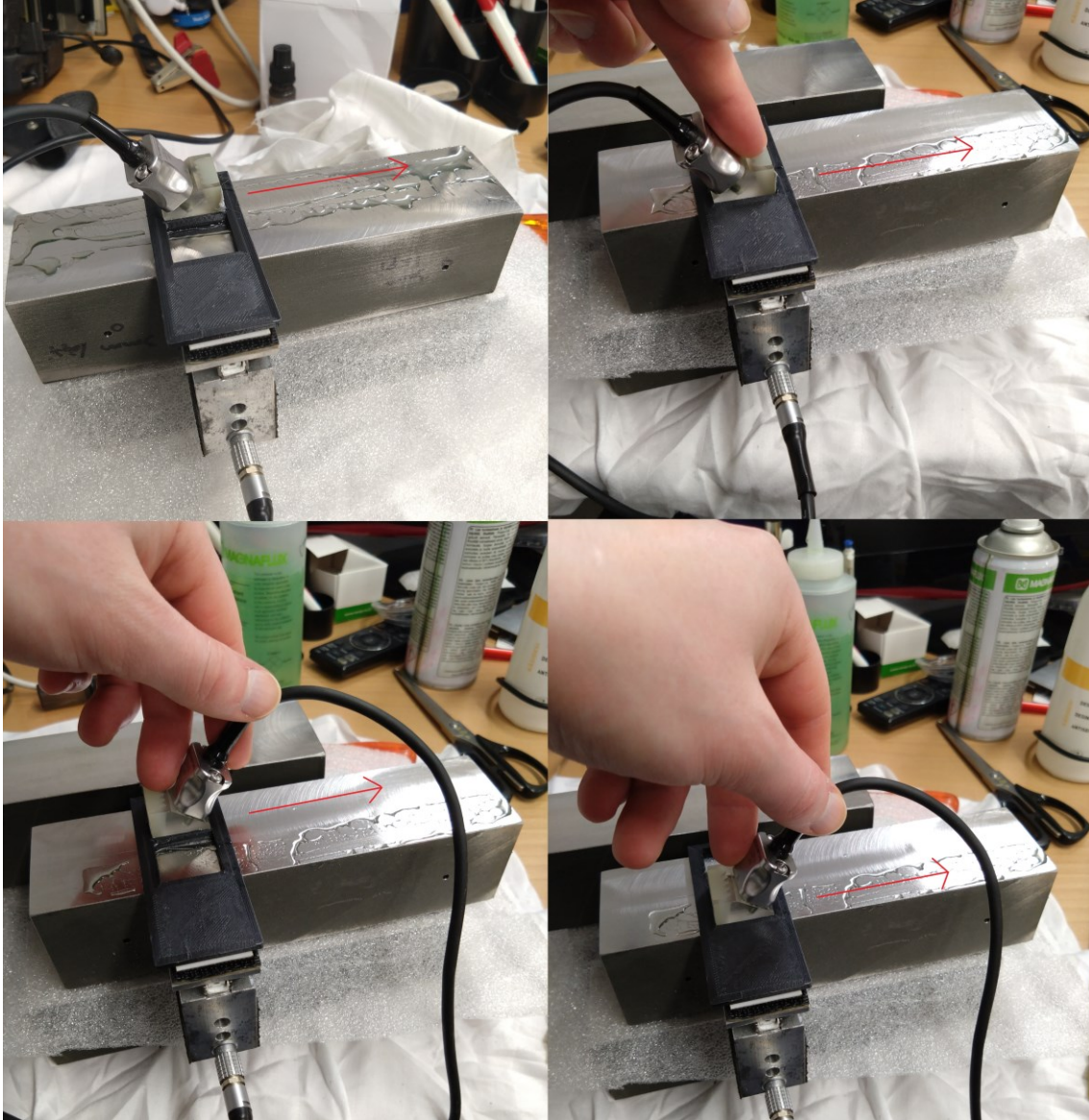
KUVA 18. Kalibrointiin käytetty vertailukappale V2

6.3 Luotaussuunnitelma ja toteutus

Työnohjaajan kanssa suunnittelimme aluksi, kuinka ultraääniluotaus toteutetaan. Suunnitelmamme mukaan luotaus alkaa jokaisessa testikappaleessa samasta päästä. Aloituspää oli aina se, josta löytyy merkintä kappaleen tulostuskulmasta, ja skannauksissa se mainitaan A-suuntana.

Kappaleen luotauspinta jaettiin pitkittäissuunnassa kahteen sektoriin, vasen ja oikea. Tästä syystä jigiin luotiin kaksi luotaimelle sopivaa slottia. Luotaus suoritettiin molemmilla sektoreilla kaksi kertaa, joista toisessa luotauksessa luotain käännettiin 180 astetta osoittamaan A-suuntaan. Luotaimen keula kohti B-suuntaa nimettiin 0-skannaukseksi ja luotaimen keula kohti A-suuntaa

nimettiin 180-skannaukseksi (kuva 19). Tutkimustyössä luotaus suoritettiin suunnitelman mukaisesti. Skannausten tulokset tallennettiin tietokoneelle ja data analysoitiin UltraVision 3.8R13 -sovelluksella.



KUVA 19. Havainnollistava kuva luotauksesta. Ylemmässä rivissä 0-luotaus ja alemmassa rivissä 180-luotaus. Nuoli osoittaa luotaimen siirtosuuntaa.

7 TULOKSET

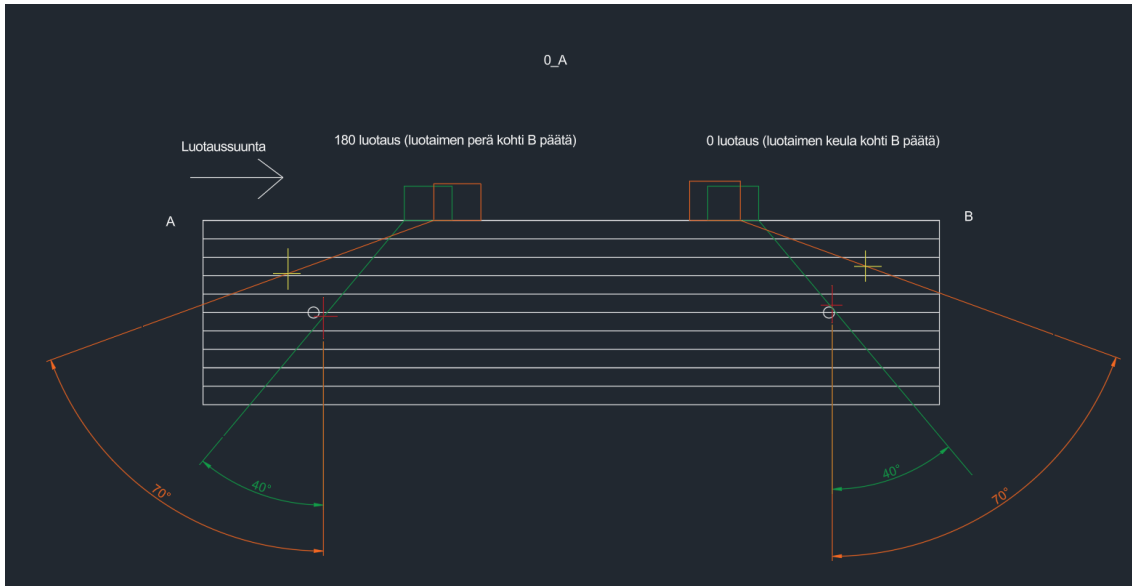
Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia, vaikuttaako 3D-tulostetun ruostumattoman teräksen mikrorakenne, ultraäänen luotauskulmat ja kerroksien tulostuskulma ultraäänen kaikuun. Tässä työssä tehtyjen tutkimusten mukaan vaikuttavat. Saaduista skannausdatoista oli mielenkiintoista tutkia, miten jokaisessa eri kulmaan tulostetussa kappaleessa ultraääni käyttäytyi hieman eri tavalla. Ensiksi tuli huomattua, että mitä jyrkempi kohtauskulma ultraäänellä on kappaleen tulostuskerroksen pinnan normaaliin nähden, sitä helpommin materiaali lähtee kääntämään ääntä pinnasta pois päin. Vaikuttaisi siltä, että jokainen tulostuskerros kasvattaisi tätä äänen kääntymistä. Tämä näkyi siten, että vika paikantui korkeammalle kuin se kappaleessa oikeasti on.

Tein AutoCAD-sovelluksella jokaisesta kappaleesta mallin ja sijoitin siihen datan perusteella luotaimen sijainnin 40 ja 70 asteen luotauskulmilla, jossa havaittiin viasta saatu korkein amplitudi, eli vahvin kaiku vertailuviasta. Sain lisäksi sijoitettua kohdat, jossa luotain oli havainnut vian. Päätimme ohjaajan kanssa, että valitsimme juuri nämä 40 ja 70 asteen luotauskulmat sekä käytämme vain oikean puolen luotauslinjan tuloksia, koska ne olivat identtiset vasemman luotauslinjan kanssa. Vaikka valitsimme tarkasteltavaksi luotauskulmista vain 40 ja 70 asteen luotauskulmat, niin joka tapauksessa muut luotauskulmat havaitsivat vian sijainnin tarkasteltavien luotauskulmien väliin. Alkuperäisesti suurin osa korkeimmista amplitudeista tulivat noin 40-asteen luotauskulmalla. Ainut poikkeama oli 60 ja 90 asteen tulostuksen kanssa, jossa 180-luotaukset oikean ja vasemman puolen mittalinjoista havaitsi 70 asteen luotauskulmalla korkeimmalla amplitudilla.

Mallikuvissa 20–23 oranssit ja vihreät neliöt viittaavat 70 ja 40 asteen luotauskulman luotaimen sijaintia havaitulla korkeimmalla amplitudilla. Oranssit ja vihreät viivat kuvaavat ääniaaltoja ja keltainen ja punainen raksi osoittavat ultraäänilaitteen havaitsemaa vian sijaintia. Kappaleiden sisällä olevat viivat kuvastavat tulostuskulmaa. Nämä viivat eivät ole mittasuhteessa oikean tulostuskerroksen paksuuteen, vaan helpottavat tulostuskulman havainnointia mallikuvista. Kappaleen oikea tulostuskerrosvahvuus on 50 µm.

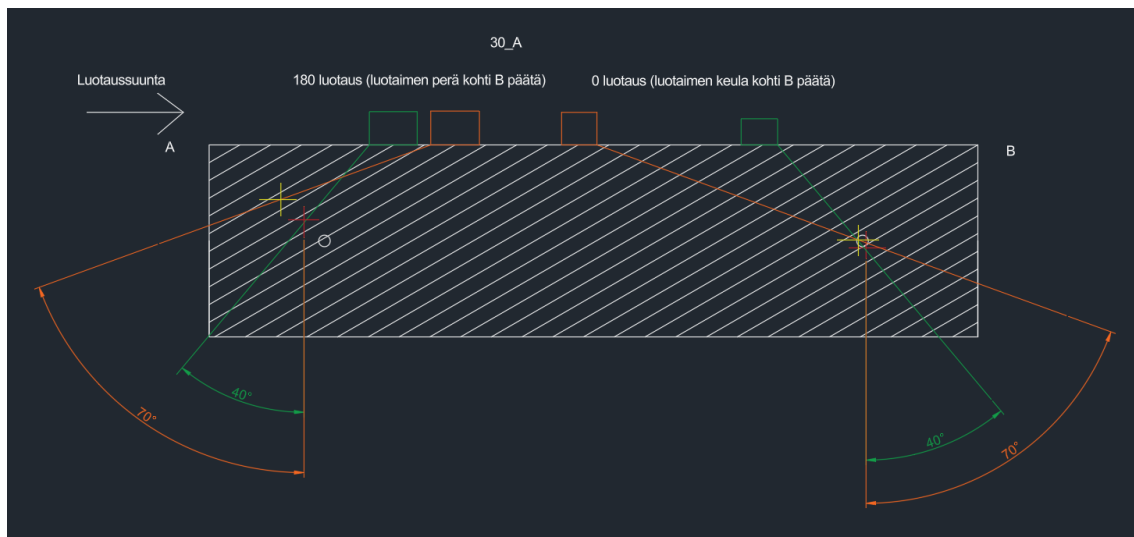
Kuvassa 20 on havaittavissa, että 0 kulmaan tulostettuun testikappaleeseen 0-luotauksen 40 asteen ääniaalto paikantaa vian oikeaan paikkaan, sillä ääniaalto osuu vian reunaan. 0-luotauksen 70 asteen ääniaalto taittuu melko paljon alaspäin kappaleessa paikantaen vian liian korkealle, noin

12 millimetriä yläviistoon vian oikeasta sijainnista. 180-luotauksessa tulokset ovat lähes identtiset. 40 asteen ääniaalto osuu lähelle vian reunaa ja 70 asteen ääniaalto taittuu pintaa kohti. Tästä kappaleesta saatu vahvin kaiku havaitusta viasta 0-luotauksella tuli 40 asteen luotauskulmalla, jonka vahvuus oli 77.6 %:ia näytön korkeudesta ja 180-luotauksella tuli 55 asteen luotauskulmalla, jonka vahvuus oli 74.1 %:ia näytön korkeudesta.



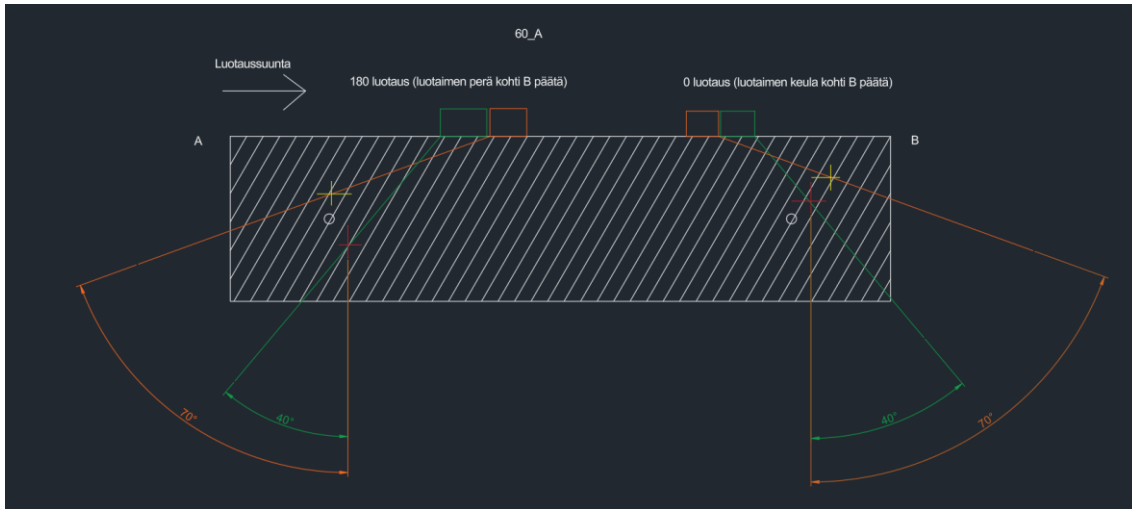
KUVA 20. AutoCAD malli 0 asteen kulmaan tulostetusta kappaleesta ja datasta otetusta tiedosta 40 ja 70 asteen luotauskulmilla.

Kuvassa 21 on mallikuva 30 asteeseen tulostetusta testikappaleesta. Tässä heti huomaa 0-luotauksen tuloksista, että molempien luotauskulmien ääniaallot saavuttivat vian tarkasti. Ääniaallot kohtasivat tällöin tulostuskerroksen jyrkässä kulmassa. 180-luotauksessa molemmat luotauskulmat paikantaa vian liian korkealle. Tässä huomaa, että ääniaallot kohtaavat tulostuskerrokset loivassa kulmassa. Tästä voi päätellä tämän tutkimuksen perusteella, että jokainen tulostuskerros alkaa hieman taittamaan ultraääntä luotauspinnasta alaspäin. 70 asteen luotauskulma havaitsi vian noin 10 millimetriä yläviistoon vian oikeasta sijainnista ja 40 asteen luotauskulma havaitsi vian noin 5 millimetriä yläviistoon vian oikeasta sijainnista. Tässä on myös hyvä huomata, että luotaimen sijainti 0-luotauksessa havaittaessa vika 70 asteen luotauskulmalla on huomattavasti keskempänä kappaletta kuin aiemmassa mallikuvassa. Tästä kappaleesta saatu vahvin kaiku havaitusta viasta 0-luotauksella tuli 41 asteen luotauskulmalla vahvuudella 37,6 %:ia näytön korkeudesta. 180-luotauksella vahvin kaiku havaitusta viasta tuli 44 asteen luotauskulmalla, jonka vahvuus oli 61,1 %:ia näytön korkeudesta.



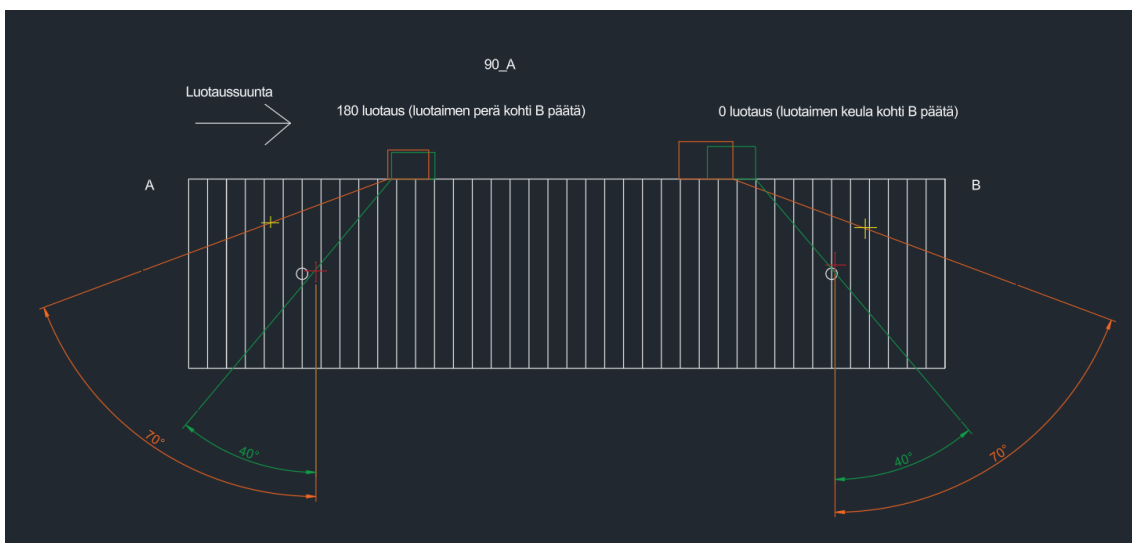
KUVA 21. AutoCAD malli 30 asteen kulmaan tulostetusta kappaleesta ja datasta otetusta tiedosta 40 ja 70 asteen luotauskulmilla.

Kuvassa 22 on mallikuva 60 asteeseen tulostetusta testikappaleesta. Kuvasta voi havaita heti, että molempien luotaussuuntien luotainten sijainnit ovat lähempänä B-päätystä kappaleen keskipisteestä. 0-luotauksessa 40 asteen luotauskulmalla vian havaittu sijainti on todella korkealla, noin 12 millimetriä pinnan alapuolella ja oikea vian sijainnin syvyys on 25 millimetriä. Tästä huomaa kuinka paljon äänikeila taittuu alaspäin mahdollisesti tulostuskerroksen kulman takia. 0-luotauksen 70 asteen luotauskulmalla ultraääni havaitsee vian sijainnin huomattavasti lähemmäs oikeaan vian sijaintiin nähden. 70 asteen luotauskulma kuitenkin osuu lähes kohtisuoraan tulostuskerrokseen, mutta kuitenkin paikoittaa vian väärin, kun taas kuvassa 21 40 asteen luotauskulma osuu kohtisuoraan tulostuskerrokseen ja paikantaa vian oikeaan sijaintiin. 180-luotauksessa 40 asteen luotauskulma havaitsee vian liian syväälle ja 70 asteen luotauskulmalla liian korkealle. Tässä kappaleessa korkein kaiku havaitusta viasta 0-luotauksella tuli 42 asteen luotauskulmalla vahvuudella 79,2 %:ia näytön korkeudesta ja 180-luotauksella korkein kaiku havaitusta viasta tuli 70 asteen luotauskulmalla vahvuudella 20 %:ia näytön korkeudesta. Tässä kappaleessa jotkin luotauskulmat eivät havainneet vikaa ollenkaan.



KUVA 22. AutoCAD malli 60 asteen kulmaan tulostetusta kappaleesta ja datasta otetusta tiedosta 40 ja 70 asteen luotauskulmilla.

Kuvassa 23 mallikuva 90 asteeseen tulostetusta kappaleesta. Molempien skannausten tulokset ovat lähes identtisiä pois lukien luotainten sijainteja korkeimman amplitudin havaitsemishetkellä. 40 asteen luotauskulmalla vika havaitaan oikealle sijainnille. Tässä skannauksessa on outoa se, että 70 asteen luotauskulmalla molempiin suuntiin vika havaitaan liian korkealle, noin 12 millimetriä skannauspinnasta alaspäin. Verraten 0 asteeseen tulostettuun testikappaleeseen tulokset ovat lähellä toisiaan. 40 asteen luotaus havaitsee molemmissa vian sijainnin, vaikka ultraäänen kohtauskulma tulostuskulmaan on jyrkempi 90 asteen tulostuksessa, ja 70 asteen luotauskulman havainnot jäävät liian ylös. Tässä kappaleessa korkein havaittu kaiku viasta 0-luotauksella tuli 43 asteen luotauskulmalla vahvuudella 82 %:ia näytön korkeudesta ja 180-luotauksella tuli 69 asteen luotauskulmalla vahvuudella 53,3 %:ia näytön korkeudesta.



KUVA 23. AutoCAD malli 90 asteen kulmaan tulostetusta kappaleesta ja datasta otetusta tiedosta 40 ja 70 asteen ääniaalloilla.

Tein lisäksi havainnollistavan taulukon Excelillä, jossa on ilmoitettu millimetreinä normaalin koordinaatiston mukaisesti havaittu vian sijainti oikeaan vian sijaintiin nähden. Taulukossa X-merkki viittaa, että vika on havaittu todelliseen sijaintiin. Koordinaatiston nollapisteenä on vian oikea sijainti. (Kuva 24.)

	0-luotaus							
Tulostuskulma	0		30		60		90	
Luotauskulma	40	70	40	70	40	70	40	70
x +/- (mm)	X	+9,9	X	X	+5,9	+11,9	X	+8,9
y +/- (mm)	X	+12,5	X	X	+5,3	+12,5	+2,3	+12,2
	180-luotaus							
Tulostuskulma	0		30		60		90	
Luotauskulma	40	70	40	70	40	70	40	70
x +/- (mm)	+2,6	-7,0	-5,3	-11,3	+5,7	+0,6	+3,7	-8,3
y +/- (mm)	-1,0	+10,6	+5,5	+10,7	-7,9	+7,5	+0,7	+13,4

KUVA 24. Excel-taulukko vian sijainneista.

8 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia ultraäänen käyttöä kolmannelta osapuolelta saatuihin 3D-tulostettuihin testikappaleisiin, joiden materiaali on ruostumaton teräs. Opinnäytetyön aihe rajattiin ultraäänitutkimuksiin 3D-tulostetulle materiaalille, jotta aihe pysyisi sopivan laajuisena opinnäytetyötä varten. Työn aihe syntyi Inspecta Oy:n pyynnöstä, kun olin kesätöissä Inspectalla ja minulle ehdotettiin tätä työtä opinnäytetyön aiheeksi.

Opinnäytetyön tarkoituksena selvitettiin, vaikuttaako 3D-tulostettujen testikappaleiden tulostuskulma ultraäänen taittumiseen ja ylipäättänsä muihin häiriöihin, jotta tulevaisuudessa voitaisiin NDT-tarkastaa ultraäänen avulla. Tämä mahdollistaisi esimerkiksi sen, että teollisuudessa voitaisiin NDT-tarkastaa 3D-tulostettuja teollisuuden osia luotettavasti. Työn tuloksena havaittiin se muun muassa, että tulostuskulma vaikuttaa 3D-tulostettujen testikappaleiden ultraäänen taittumiseen. Näin ollen työn tuloksena voitaisiin tulkita, että 3D-tulostetun materiaalin ultraäänellä tehtävässä NDT-tarkastuksessa on erityisen tärkeää huomioida tulostussuunta. Mikäli tulostussuuntaa ei oteta huomioon 3D-tulostetun materiaalin ultraäänitutkimuksessa, on riskinä se, että havaitaan viat väriin sijainteihin.

Työ oli aiheena haastava, koska minulla ei ollut juurikaan kokemusta ultraäänitarkastuksesta tai ylipäättänsä ultraäänen toiminnasta tai teoriasta, eikä metallien 3D-tulostamisesta. Opinnäytetyön tekemisen myötä oli kuitenkin mahdollista oppia melko laajasti aiheesta ammattilaisilta.

Kyseistä tutkimusaihetta on mahdollista jatkaa ja laajentaa korkeamman tason työhön. Kyseistä aihetta on mahdollista jatkaa muun muassa syvempään metallurgian tutkimiseen tai erilaisiin ainetta rikkomattomiin menetelmiin. Tämän tutkimuksen tekeminen myös nosti kysymyksiä esiin esimerkiksi siitä, mikä aiheuttaa ultraäänen taittumisen materiaalin mikrorakenteessa. Näin ollen tästä aiheesta voisi tehdä huomattavasti laajemman tutkimustyön.

LÄHTEET

1. Kiwa Inspecta 2024. Toimialat. Hakupäivä 15.10.2024 <https://www.kiwa.com/fi/fi/toimialat/>
2. Bruun, Markus & Hokkanen, Mikko 2016. Materiaalia lisäävä valmistus. D: Vapaamuotoisia julkaisuja 84. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Hakupäivä 7.12.2023 <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/121718/URNISBN9789515885784.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
3. Jones, Jason B. 2023. AM Basics. An introduction to Additive Manufacturing (Also known as 3D printing). The American Society of Mechanical Engineers. Hakupäivä 7.7.2023 <https://additivemanufacturing.com/basics/>
4. Shah, J, Snider, B, Clarke, T, Kozutsky, Lacki, M & Hosseini, A. 2023. Kuvakaappaus. Effect of layer thickness on the resolution of curved surfaces. Hakupäivä 11.12.2023. https://www.researchgate.net/figure/Effect-of-layer-thickness-on-the-resolution-of-curved-surfaces_fig16_334546324
5. Savonia. Jauhepetimenetelmät. Hakupäivä 12.2.2024 <https://3dtulostus.savonia.fi/fi/tietopankki/menetelmat/jauhepetimenetelmat>
6. Materflow 2021. Kuvakaappaus. SLM – Selective Laser Melting. Hakupäivä 18.12.2023. <https://www.materflow.com/slm-selective-laser-melting/>
7. Loughborough University 2023. Kuvakaappaus. About additive manufacturing. Hakupäivä 18.12.2023. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
8. Custompart.net 2023. Kuvakaappaus. Inkjet printing. Hakupäivä 19.12.2023. <https://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>

9. Loughborough University 2023. About additive manufacturing. Sheet lamination. Hakupäivä 20.12.2023.
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
10. Custompart.net 2023. Kuvakaappaus. Laminated object manufacturing. Hakupäivä 20.12.2023. <https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
11. Gao, Wei, Zhang, Yunbo, Ramanujan, Devarajan, Ramani, Karthik, Chen, Yong, William, Christopher B., Wang, Charlie C.L., Shin, Yung C., Zhang, Song & Zavattieri, Pablo D. 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design 2015 (69), 65–89. Hakupäivä: 20.12.2023.
<https://engineering.purdue.edu/ZhangLab/publications/papers/2015-cad-review.pdf>
12. Custompart.net 2023. Fused deposition modeling. Hakupäivä: 20.12.2023.
<https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
13. Gibson, Ian & Rosen, David & Stucker, Brent 2015. Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Second edition. New York, USA: Springer Science + Business Media 2015. ISBN 978-1-4939-2113-3. Hakupäivä: 22.12.2023
<https://kgut.ac.ir/useruploads/1523430527968ggi.pdf>
14. Customparts.net 2023. Kuvakaappaus. Stereolithography. Hakupäivä 22.12.2023
<https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
15. Kiwa Inspecta 2024. NDT-tarkastus eli rikkomaton aineenkoetus (NDT, Non-Destructive Testing). Hakupäivä 22.2.2024 <https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme2/ndt-tarkastus-ja-teknologiapalvelut/ndt-tarkastus-eli-rikkomaton-aineenkoetus-ndt-non-destructive-testing/>
16. CEN ISO/ASTM TR 52905:2023:en. Additive manufacturing of metals. Non-destructive testing and evaluation. Defect detection in parts (ISO/ASTM TR 52905:2023). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vaatii lisenssin. Hakupäivä 13.4.2024
<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID5/5/1282326.html.stx#>

17. Olympus 2024. Kuvakaappaus. An Introduction to Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing By Tom Nelligan. Hakupäivä 24.4.2024 <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/>
18. Ruha, Matti. Kiwa Inspecta. Ultraäänitarkastus 1. Koulutusmateriaali.
19. NDTKITS 2024. Kuvakaappaus. What is Angle Beam Testing? Hakupäivä 24.4.2024 <https://ndt-kits.com/what-is-angle-beam-testing/>
20. Olympus 2014. Phased array testing: Basic Theory for Industrial Applications. Hakupäivä 2.6.2024 <https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-testing/>
21. Ruha, Matti. Kiwa Inspecta. Ultraäänitarkastus 3. Koulutusmateriaali.
22. Ruha, Matti 2021. Kiwa Inspecta. Ydinvoimala ultraäänitarkastajien koulutus Phased Array Ultrasonic Testing. Koulutusmateriaali.

