



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TUULIVOIMALOIDEN TERÄSOSISSA KÄYTETTÄVÄT TERÄSLAADUT

Anttu Hoikkaniemi

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Tuulivoimaloiden teräsosissa käytettävät teräslaadut

Anttu Hoikkaniemi

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatin tutkielma 2022, 27 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Olli Nousiainen

Tässä kandidaatin tutkielmassa tutustutaan kirjallisuuskatsauksen muodossa tuulivoimaloiden rakenteissa käytettyihin materiaaleihin. Huomio keskittyy erityisesti teräsosiin, niiden valmistamiseen sekä ominaisuuksiin. Työssä pyritään selvittämään, miksi tietyt materiaalit ovat vakiintuneet käytettäviksi tuulivoimalan eri osissa. Tärkeimpiä materiaalilta vaadittavia ominaisuuksia kantavissa rakenteissa ovat mekaaniset ominaisuudet sekä hitsattavuus. Kulutuskestävyyttä vaativissa teräsosissa, kuten vaihteiston hammaspyörissä, suuri pinnankovuus on puolestaan merkittävin ominaisuus. Työssä perehdytään myös terästen korroosioilmiöihin erityisesti offshore- eli meriolosuhteissa ja dynaamisiin voimiin eli tuuleen sekä aaltoihin liittyvään väsymiskestävyyteen.

Koska tuulivoima on vihreä, uusiutuva energianmuoto, otetaan tässä tutkielmassa myös huomioon ympäristönäkökulma käytettyjen materiaalien osalta. Tämän takia myös tuulivoimalan lapojen epämetalliset materiaalit esitellään työssä lyhyesti. Lapoihin nimittäin liittyy suurimmat voimalan aiheuttamat jäteongelmat siinä vaiheessa, kun se tulee käyttöikänsä loppuun ja puretaan.

Tässä tutkielmassa tullaan siihen johtopäätökseen, että nykyään käytössä olevissa tuulivoimaloissa käytetään pääosin kantavissa rakenteissa S355-luokan termomekaanisesti valssattua HSLA hienoraeterästä, jonka myötöraja on 355 MPa. Se on vakiintunut tuulivoimaloissa käytettäväksi teräsmateriaaliksi hyvän lujuutensa ja hitsattavuutensa takia. Kulutusta kestävässä osissa puolestaan käytetään yleensä kromilla, nikkelillä ja molybdeenillä seostettuja takomalla valmistettuja lämpökäsiteltyjä teräksiä.

Hiiletyskarkaisu on lämpökäsittelymenetelmä, jolla saadaan tuulivoimalan vaihdelaatikon hammaspyöriin hyvät kulutuskestävyysominaisuudet.

Käytetyt teräslaadut ovat kuitenkin jatkuvan kehityksen kohteena, jotta tulevaisuuden tuulivoimaloista saadaan isompia, tehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä. Kantavien rakenteiden lujuusluokkia tullaan hyvin todennäköisesti nostamaan tulevaisuudessa. Tällä tavalla saadaan vähemmällä määrällä teräsmateriaalia luotua yhtä kestävä rakenne. Samanaikaisesti saavutettaisiin hiilidioksidipäästöjen vähenemistä sekä tuulivoimalakomponenttien ollessa kevyempiä niiden kuljetus helpottuisi tehtaalta asennuspaikalle.

Asiasanat: tuulivoima, teräs, materiaalitekniikka

ABSTRACT

Steels used in wind turbine steel parts

Anttu Hoikkaniemi

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2022, 27 pp.

Supervisor at the university: Olli Nousiainen

This bachelor's thesis is a literature review that studies the materials used in wind turbine parts and structures. The attention is focused on the parts made of steel and their production and properties. The main goal is to determine why certain materials are used in certain wind turbine parts. The most important material properties in the supporting structures are the mechanical properties and weldability. In the parts that must tolerate big amounts of surface wearing, hardness is considered the most valuable property. This thesis also studies forms of corrosion in offshore-plants and ways to prevent them. Fatigue and fracture damage tolerance caused by wind and waves is additionally discussed.

Since wind power is seen as a green energy source, environmental aspect is considered regarding to the materials used. For this reason, the non-metallic materials used in the wind turbine blades are briefly introduced. The blades are the main reason for the waste production at the end of the life of a wind turbine.

This thesis concludes that in the currently working wind turbine towers the mainly used steel in the supporting structures is the S355 grade HSLA (High-Strength-Low-Alloy) steel. It is a structural steel and has a yield strength of 355 MPa. In the parts that need to tolerate surface wearing, the mainly used steel is alloyed with chromium, nickel, and molybdenum and forged into shape and heat treated. The heat treating process that gives the gear wheels their excellent properties is called carburizing.

The currently used steel grades are under constant development. The future wind turbines need to be larger, more efficient, and more environmentally friendly. The strength grades of the supporting structural steels will most likely be higher in the future. This way, a strong structure can be built with fewer materials than before. This would reduce carbon dioxide emissions and the transportation of wind turbine parts from the factory to the plant would be more convenient.

Keywords: wind power, steel, materials engineering

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	7
2 TUULIVOIMALAN PÄÄKOMONENTIT JA NIISSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	9
2.1 Teräslevyistä valmistettavat osat.....	9
2.2 Miksi käytetään HSLA-teräksiä?	10
2.3 Teräksestä takomalla valmistettavat osat	11
2.4 Lavoissa käytettävät materiaalit	12
2.5 Materiaalien kierrätettävyys	12
3 KÄYTETTÄVÄT TERÄSMATERIAALIT	15
3.1 HSLA-teräkset.....	15
3.2 CrNiMo-teräkset	16
3.3 Hitsattavuus ja pulttiliitokset.....	18
3.4 Offshore-voimalat ja korroosionesto.....	19
3.5 Väsymiskestävyys	22
4 YHTEENVETO	24
LÄHDELUETTELO	

1 JOHDANTO

Tuulivoima on yksi ensimmäisistä energianlähteistä, jonka ihminen valjasti käyttöönsä mekaanisten koneiden korvatesa eläimet, kuten hevoset, työvoimana. Historialliset dokumentaatiot kertovat ihmisen käyttäneen tuulivoimaa jo yli tuhannen vuoden ajan eri puolilla maapalloa. Alkeelliset tuulivoimalat tuottivat voimaa koneisiin, jotka oli suunniteltu erilaisten arjen askareiden helpottamiseksi. Koneita käytettiin esimerkiksi veden pumppaamiseen, puiden sahaamiseen sekä jauhojen jauhamiseen. 1900-luvun taitteessa tuulivoimaloita alettiin käyttää sähköntuotantoon. Ensimmäiset sähköntuotantoon suunnitellut tuulivoimalat tuottivat tasavirtaa, joka sopi hyvin taajamien ulkopuolella sijaitsevien maatilojen käyttämien akkujen lataukseen, mutta 1930-luvun loppupuolella Yhdysvaltojen vaihtovirtasähköverkostojen kehittyessä alettiin keskittyä vaihtovirtaa tuottavien tuulivoimaloiden kehitykseen. 1970-luvun puoleen väliin mennessä teknologia oli kehittynyt huimasti ja eri puolilla Eurooppaa ja Yhdysvaltoja alettiin pystyttämään tuulivoimaloita, jotka olivat kytköksissä vaihtovirtaverkkoon ja tuottivat sähköä tuhansien kotien tarpeisiin. (Carlin et al. 2003, s. 129–130)

Ensimmäiset historian saatossa rakennetut tuulivoimalat, tai oikeastaan paremmin sanottuna tuulimyllyt, olivat lähinnä puusta, tiilistä tai kivistä rakennettuja virityksiä, joissa ei materiaaliteknisesti ollut kovin innovatiivisia ratkaisuja nykystandardien kannalta katsottuna. Materiaalina käytettiin yksinkertaisesti sitä, mitä oli saatavilla. Tuulessa pyörivät lavat rakennettiin usein puukehikoista, jonka päälle pingotettiin kireä kangas. 1900-luvun loppupuolella lapojen materiaaliksi vakiintuivat erilaiset komposiitit, suurimmilta osin lasikuidut. Myös lapojen aerodynaaminen muoto on kehittynyt hyvin runsaasti tuulivoimaloiden historian saatossa. (De Decker 2019)

Tuulienergia on uusiutuvaa energiaa ja se onkin suurin syy, miksi tuulivoimalateknologian kehittämistä pidetään tärkeänä. Ilmastonmuutos ja ilmaston lämpeneminen ovat ongelmia, joiden kanssa ihmiskunta on kamppailut jo vuosia, ja niiden merkitys kasvaa yhä enemmän tulevaisuudessa. Ilmastonmuutosta aiheuttavat ennen kaikkea kasvihuonekaasupäästöt, ja sähkön tuottaminen onkin yksi merkittävin päästöjen, erityisesti hiilidioksidipäästöjen, aiheuttajista. Vuonna 2014 sähkön tuottaminen aiheutti 26 % kaikista maailmanlaajuisista kasvihuonekaasupäästöistä. Sähkön tuottamiseen käytettiin suurimmaksi osaksi (65 %) fossiilisia polttoaineita, eniten

hiiltä ja maakaasua. Tuulienergian käyttö sähkön valmistuksessa oli 4 % luokkaa maailmanlaajuisesti. (Letcher 2017, s. 4–5). Ilmastopöimusten mukaisesti asennettujen tuulivoimaloiden sähköntuottokyky tulisi olla vuoteen 2030 mennessä 1400 GW ja 2050 mennessä 2300 GW. Joidenkin optimistisempien arvioiden mukaan vastaavat luvut voisivat olla jopa 1600 GW vuonna 2030 ja 2700 GW vuonna 2050. (Ghenai 2012, s. 3). Jos ajatellaan, että yhden voimalan kapasiteetti on tulevaisuudessa keskimäärin viiden megawatin luokkaa, niin sehän tarkoittaa, että voimaloita olisi vuoteen 2050 mennessä yli puoli miljoonaa. Kun otetaan huomioon, että jokainen voimala sisältää satoja tonneja erilaisia materiaaleja, on erityisen tärkeää suunnitella tarkkaan, miten ja mistä materiaaleista voimala rakennetaan, jotta saavutetaan kestävän kehityksen tavoitteet.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään erityisesti nykyään tuulivoimaloissa käytettäviin teräsmateriaaleihin, niihin liittyviin ilmiöihin, sekä mahdollisiin kehityskohteisiin. Ympäristönäkökulma on pyritty myös ottamaan huomioon, sillä kyseessä on uusiutuva energianlähde.

2 TUULIVOIMALAN PÄÄKOMONENTIT JA NIISSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT

Tuulivoimaloita on eri kokoisia ja eri tehoisia ja tällä on luonnollisesti suuri vaikutus niissä käytettäviin materiaaleihin. Myös sillä, onko tuulivoimala kuivalla maalla vai offshore-olosuhteissa, eli merialueilla, on merkitystä materiaaleihin. Tässä kandidaatin tutkielmassa käydään läpi tyypillisen 2 MW sähkötehon tuottavan kuivalla maalla sijaitsevan tuulivoimalan tärkeimmät osat ja niissä käytettävät materiaalit. Huomio keskittyy ennen kaikkea teräsosiin. Lähteenä on käytetty suurilta osin IMO:n (The International Molybdenum Association) vuonna 2011 julkaisemaa Hardy Mohrbacherin kirjoittamaa artikkelia, joka kantaa nimeä Molybdenum in Irons and Steels for Clean and Green Power Generation.

2.1 Teräslevyistä valmistettavat osat

Suurin teräsrakenne on tuulivoimalan tornimainen runko, jonka tehtävänä on nostaa generaattoria pyörittävät lavat tarpeeksi korkealle maan pinnasta. Se on 2 MW voimalan tapauksessa tyypillisesti noin 100 metrin korkuinen, mutta pyrkimys on päästä uusissa tuulivoimaloissa vielä suurempiin korkeuksiin, koska tuuli on kauempana maanpinnasta voimakkaampaa ja täten saadaan aikaiseksi parempi hyötysuhde. Korkeutta rajoittavat rakenteelliset ja tekniset vaikeudet, kuten tornin komponenttien valmistus, kuljetus ja käyttökohteeseen asentaminen. Tornit valmistetaan pääosin HSLA-teräslevyistä, eli termomekaanisesti valssatuista hienoraeteräksistä, joissa on pieni määrä erinäisiä seosaineita, joiden avulla saavutetaan optimaaliset ominaisuudet käyttökohteeseen. Käytettävä lujuusluokka on yleisimmin S355, jossa S tarkoittaa kyseessä olevan rakenneteräs ja numero 355 viittaa myötörajan megapascaleina. Merkittävimmät seosaineet ovat niobium ja vanadiini. Tornin valmistamiseen kuluu jopa satoja tonneja terästä, ja valmistamisen kustannukset ovat noin neljäsosa koko tuulivoimalan valmistuskustannuksista. (Mohrbacher 2011, s. 10)

Toinen massiivinen teräsrakenne on tornin huipulla oleva konehuone, jonka sisällä sijaitsevat kriittiset laitteet, kuten generaattori ja vaihteisto, joiden avulla tuulivoimalan lapojen pyörimisenergia muutetaan sähköksi. Konehuoneen teräsrakenteet ovat varsin järeää tekoa, jotta se kestää painavien laitteiden kuormat. Liian raskaita rakenteita tulee kuitenkin välttää, jotta tuulivoimalasta saadaan lujuuslaskennallisesti riittävän stabiili ja

turvallinen. Konehuoneenkin rakenteet valmistetaan niobiumilla ja vanadiinilla seostetusta hienoraeteräksistä, mutta se voi sisältää myös joissain tapauksissa valurautaisia osia. (Mohrbacher 2011, s. 10)

2.2 Miksi käytetään HSLA-teräksiä?

Lujuusluokka S355 voi kuulostaa hieman vaatimattomalta, kun nykyään käytössä olisi pitkälti yli tuhannen megapascalin UHSS-teräksiä (Ultra-High-Strength-Steel). Niiden avulla saataisiin yhtä kestäviä rakenteita aikaan pienemmällä ainemäärällä, mikä olisi ympäristöystävällisyyden ja valmistuskustannuksien kannalta positiivinen asia. Miksi sitten näitä teräksiä ei ainakaan vielä käytetä suurissa määrin tuulivoimalan tornin rakenteissa?

HSLA-teräkset ovat vakiintuneet käytettäväksi tuulivoimalan rakenteissa metallurgisten ja fysikaalisten ominaisuuksiensa ansiosta. Tuulivoimalan torni muodostetaan yhteen hitsattavista sylinterimäisistä teräslevyistä, ja hitsisaumaa on tornin koosta riippuen useita kymmeniä metrejä. HSLA-teräkset ovat perinteisillä menetelmillä ylivoimaisesti paremmin hitsattavia kuin UHSS-teräkset alhaisen hiiliäsvivalenttinsa ansiosta. (Mohrbacher 2011, s. 6) Niihin saadaan muodostettua hyvin laadukkaita hitsisaumoja, jotka kestävät koko tornin eliniän suuria rasituksia, jotka aiheutuvat tuulivoimalan omasta painosta ja tuulen yhteisvaikutuksesta. Muita HSLA-terästen etuja ovat väsymiskestävyys ja kovuus sekä lujuus myös alhaisissa lämpötiloissa, jota arktisen alueiden tuulivoimalat joutuvat luonnollisesti sietämään. (Jansto et al. 2018, s. 2)

HSLA-terästen lujuusluokat eivät kuitenkaan pääty S355-luokkaan, vaan niitä voidaan valmistaa huomattavasti lujemmaksikin. Tulevaisuudessa tullaankin hyvin todennäköisesti nostamaan tuulivoimaloissa käytettyjä lujuusluokkia S460-luokkaan ja jopa siitä ylöspäin. (Jansto et al. 2018, s. 2) Näin saadaan kymmenien tuhansien kilojen vähennyksiä käytettävien materiaalien kokonaisuudessaan, mikä voi olla merkittävä muutos valmistuksen kustannuksiin ja hiilidioksidipäästöihin sekä esimerkiksi tornin komponenttien kuljettamisen helpottamiseksi tehtaalta asennuspaikalle. Lujuuden lisääntyessä voidaan luonnollisesti lujuuslaskennan periaatteiden mukaisesti pienentää kantavien rakenteiden aineenpaksuuksia. Tämä pienentää hitsisaumojen halkaisijaa ja hitsipalkojen määrää. Samanaikaisesti hitsauslisäaineiden käyttö ja hitsaustuntien määrä

putoaa merkittävästi, mikä on tietysti taloudellisuuden ja ekologisuuden kannalta hyvä asia.

2.3 Teräksestä takomalla valmistettavat osat

Tuulivoimalan valmistuskustannuksista merkittävän osan, noin 13 prosenttia, muodostaa vaihdelaatikon valmistus. Sen tehtävänä on muuttaa tuulienergiasta lapojen kautta saatava sangen hidas pyörimisnopeus sopivaksi sähkögeneraattorille. Tämä edellyttää kierrosnopeuden kasvattamista moninkertaiseksi, ja toisaalta myös vaihteiston tehtävä on säätää nopeus sopivaksi esimerkiksi myrskyisten tuulenpuuskien aikana. Vaihteistossa teräsosien pinnat ovat kosketuksissa jatkuvasti ja kokevat suuriakin voimia ja pintapaineita. Tämän takia niiltä vaaditaan hyvää kulumiskestävyyttä ja kovuutta lujuuden lisäksi. Tuulivoimalan vaihteiston materiaaliksi onkin yleistynyt hyvin kulutusta kestävä 18CrNiMo7-6 hiiletysteräs, jossa on massaprosentteina 1,5–1,8 % kromia; 1,4–1,7 % nikkeliä sekä 0,25–0,35 % molybdeeniä. (Mohrbacher 2011, s. 10–12)

Myös tuulivoimalan generaattorin kantavat rakenteet valmistetaan teräksestä takomalla. Generaattorin tehtävä on muuttaa tuulivoimasta saatava mekaaninen pyörimisenergia sähköksi. Yleisesti käytössä oleva teräslaatu generaattoreiden valmistuksessa on lämpökäsiteltävä CrNiMo (V)-teräs. (Mohrbacher 2011, s. 10)

Tuulivoimalan taottujen teräsosien valmistukseen käytetään myös lämpökäsiteltyjä CrMo-teräksiä. Yksi näistä osista on kaltevuuskulman säädin, joka säätää lapojen kulman suhteessa tuulen suuntaan sellaiseksi, että mahdollisimman suuri osa tuulen kineettisestä energiasta saadaan muutettua pyörimisenergiaksi. Toinen CrMo-teräksestä takomalla valmistettu osa on konehuoneen ja tornin välissä oleva säätösystemi, joka pyörittää koko konehuonetta oikeaan suuntaan tuulensuunnan vaihdellessa. Myös pääakseli, joka välittää pyörimisliikkeen lavoilta generaattorille, valmistetaan CrMo-teräksestä takomalla. Myös tuulivoimalan kokoonpanemiseen vaadittavat sadat mutterit ja pultit ovat yleensä CrMo-teräksiä. (Mohrbacher 2011, s. 10)

2.4 Lavoissa käytettävät materiaalit

Vaikka tuulivoimalan lavat eivät ole teräksestä valmistettuja osia, on tarpeellista ymmärtää niissä käytettävien materiaalien vaikutus erityisesti ympäristövaikutusten näkökulmasta, ja siksi nekin käydään lyhyesti tässä kandidaatin tutkielmassa läpi.

Tuulivoimalan lavat, joiden avulla tuulen liike-energia muutetaan akselin ja lopulta generaattorin pyörimisenergiaksi, on valmistettu perinteisesti pääosin komposiittimateriaaleista, yleisimmin lasikuiduista ja hiilikuidusta. Komposiitti tarkoittaa terminä sitä, että kaksi tai useampi eri materiaaleja yhdistetään toisiinsa ilman, että ne liukenevat toisiinsa atomien tai molekyylien tasolla. Näin saadaan eri materiaalien erityisominaisuuksia yhdistettyä yhteen samaan materiaaliin, ja toisaalta myös minimoitua niiden mahdollisia heikkouksia. Tuulivoimaloiden lavoissa käytettävät komposiitit ovat kuitumaisia, yleensä varsin kevyitä materiaaleja, jotka ovat kuitenkin tarpeeksi lujia kestäämään koko voimalan eliniän mittaisen käyttöajan, eli noin 30 vuotta. (Mishnaevsky et al. 2017, s. 1–3)

2.5 Materiaalien kierrätettävyys

Koska tuulivoiman on tarkoitus olla hyvin vihreää energiaa, tulevat ympäristöasiat aina esille, kun mietitään, onko tuulivoimaloiden pystytys järkevää ja ilmastonmuutoksen hillitsemisen kannalta edullista toimintaa. Tuulivoimalan valmistamiseen kuuluu satoja tonneja materiaalia, ja niiden valmistus sekä jalostus valmiiksi voimalaksi aiheuttaa luonnollisesti päästöjä. Merkittävän osan mahdollisista ympäristölle haitallisista vaikutuksista tuulivoimala aiheuttaa myös siinä vaiheessa, kun se tulee käyttöikänsä loppuun ja se täytyy purkaa turvallisuussyistä.

Teräsosat ovat todella hyvin kierrätettävissä. Ne voidaan sulattaa terästehtaassa ja seosaineita lisäämällä ja valssaamalla niistä saadaan uusia tuotteita yhteiskunnan tarpeisiin. Tämänhetkisessä 2 MW tuulivoimalassa on keskimäärin 150–200 tonnia teräksistä valmistettuja osia ja niiden kierrätysaste on vähintäänkin 95 % luokkaa. (Andersen et al. 2014, s. 95) Teräksen sulattaminen uudelleenkäytettäväksi nykyisillä keinoilla tuottaa kyllä paljon hiilidioksidipäästöjä, mutta siihenkin on tulossa muutos, mikäli fossiilivapaat terästehtaat, jotka käyttävät energianlähteenään sähköä ja vetyä, alkavat yleistymään maailmanlaajuisesti.

Varsinaisen jäteongelman tuulivoimaloiden purkuvaiheessa aiheuttavat lasi- ja hiilikuiduista valmistettavat lavat. Lavat ovat kymmeniä metriä pitkiä ja painavat jopa kymmeniä tonneja. Eri tuulivoimalavalmistajien lavat poikkeavat luonnollisesti toisistaan rakenteellisesti ja materiaalien puolesta, joten yleispätevää kierrätysuunnitelmaa kaikille lavoille on mahdotonta laatia. Lavat ovat rakenteellisesti hyvinkin monimutkaisia, vaikeivat ulospäin siltä välttämättä näytäkään. Tämän takia lapojen rakenne tulee tuntea hyvin, ennen kuin niitä aletaan purkamaan pienemmiksi, helpommin käsiteltäviksi osiksi. Koska käytetyt komposiittimateriaalit ovat erittäin kovia ja lujia, vaaditaan purkutoimenpiteisiin työkaluksi timanttileikkuri. Oikeat leikkauskohdat täytyy valita huolellisesti, jotta päästään parhaaseen lopputulokseen. Timanttileikkuria käytettäessä myös vesijähdytys on pakollinen, mikä hankaloittaa purkutoimenpidettä. (Mishnaevsky et al. 2017, s. 16)

Lapojen kierrättämistä hankaloittaa myös erityisesti se, ettei niissä käytettäviä komposiittiosia voi ainakaan nykytekniikalla sulattaa ja muokata uudelleen uusiksi tuotteiksi, kuten esimerkiksi kestopuoveja voidaan ensimmäisen käyttökerran jälkeen uudelleen jalostaa tällä tavalla. Komposiittien kierrättäminen on kuitenkin periaatteessa mahdollista erilaisten lämpökäsittelyjen avulla. Niiden avulla komposiitin molekyyli rakenne voidaan hajottaa kemiallisesti yksinkertaisempaan muotoon, ja sitä voidaan käyttää raaka-aineena uusiin materiaaleihin. Tällaiset prosessit vaativat kuitenkin satojen (280–450 °C) asteiden lämpötilaa, riippuen materiaalista. Kun kyseessä on useita kymmeniä tonneja komposiittia yhtä tuulivoimalaa kohden, voidaan päätellä, että vaadittava lämpöenergia on valtavan suuri. Tämä on ehdottoman huono asia tuulivoimaloiden vihreyden eli ympäristöystävällisyyden kannalta, mikä tulee ottaa huomioon tuulivoimalan elinkaaren jokaisessa vaiheessa. Tällaisissa verrattain korkean lämpötilan prosesseissa komposiitit myös menettävät tärkeitä ominaisuuksiaan ja haurastuvat huomattavasti. (Mishnaevsky et al. 2017, s. 16–17)

Komposiittien kierrätykseen on kehitetty myös yksinkertaisempi metodi, jossa komposiittirakenne ”revitään” kuitumaiseksi massaksi, ja sille keksitään jokin aivan uusi käyttökohde. Tällä tavalla tuotettua komposiittikuitumassaa on onnistuneesti käytetty ainakin sementtimassan täyteaineena sekä äänieristepaneelien materiaalina. Mielikuvituksellisempiakin tapoja on keksitty lapojen kierrättämiseksi voimalan käyttöään tullessa loppuun; eräs hollantilainen arkkitehtuurifirma, Superuse Studios, on

suunnitellut lasten leikkipuiston, jossa on käytöstä poistettujen tuulivoimaloiden lavoista tehtyjä kiipeilytorneja ja liukumäkiä. (Mishnaevsky et al. 2017, s. 17)

Tällaiset kierrätykseen liittyvät innovaatiot ovat merkittäviä tuulivoiman tulevaisuuden kannalta. Tuulivoiman vastustajien kenties yleisin argumentti liittyy juuri tähän lavoista aiheutuvaan ongelmajätteeseen. Tämä ongelma poistuu vasta siinä vaiheessa, kun jokainen tuulivoimalavalmistaja pystyy toteamaan, että heidän lapansa ovat 100 % kierrätettävissä.

3 KÄYTETTÄVÄT TERÄSMATERIAALIT

Tämän kandidaatin tutkielman on tarkoitus paneutua erityisesti tuulivoimalan niihin osiin, jotka on valmistettu teräksestä. Tässä kappaleessa perehdytäänkin teräsosien valmistukseen, mekaanisiin ominaisuuksiin, hitsattavuuteen, pulttiliitoksiin, sekä korroosionkestoon ja keinoihin sen estämiseksi sekä väsymiskestävyyden huomioimiseen tuulivoimaloissa.

3.1 HSLA-teräkset

Kuten toisessa kappaleessa todettiin, käytetään nykyään toiminnassa olevien tuulivoimaloiden tornirakenteissa pääosin S355-luokan HSLA-teräksiä eli hienoraeteräksiä, joiden lujuusluokka on 355 megapascalina. Tämän tyyppisille teräksille annettu nimitys, ”hienoraeteräs”, englanniksi ”High Strength Low Alloy”, viittaa pieneen raekokoon ja alhaiseen seostusasteeseen. Aiemmassa kappaleessahan myös todettiin, että tuulivoimaloissa käytetyille HSLA-teräksille tyypillisimmät mikroseostuksessa käytetyt alkuaineet ovat niobi ja vanadium.

HSLA-teräksiä alettiin kehittää ahkerasti 60-luvulla, ja syitä tämän uudentyyppisen teräksen kehittämiseen oli useita. Tavoitteena oli luoda teräs, jolle saataisiin verrattain edullisilla mikroseostusaineilla ja pienillä seostusmäärillä uudentyyppisiä mekaanisia ominaisuuksia maksamatta liian korkeita valmistuskustannuksia. Mikroseostuksella saatiin aikaan parempi massa-lujuussuhde, eli yhtä vahva rakenne saatiin aikaisempiä pienemmällä teräsmäärällä kuin ennen. Toinen tavoite oli luoda helposti hitsattava teräs, jonka mikrorakenne ei kärsi herkästi hitsauksen tuottamasta lämmöstä. Myös verrattain hyvä korroosionkesto on yksi HSLA-teräksien eduista. (Konstrukcijska 2011, s. 295–296)

HSLA-teräksiä valmistetaan termomekaanista eli TMCP-valssausta hyväksi käyttäen. Lyhenne tulee englannin kielen sanoista Thermo-Mechanical Control Process. Siinä käytetään korkeita muokkauslämpötiloja ja metallurgista tietotaitoa teräksen käyttäytymisestä hyödyksi, jotta saavutetaan halutut mekaaniset ominaisuudet. S355-lujuusluokan teräksen valmistusprosessissa terässulatolta valmistunut usean tonnin painoinen teräsaihio hehkutetaan uunissa austeniitin rekristallisaatiolämpötilan yläpuolelle, yleensä noin 1200 °C, ja pidetään siinä tarpeeksi kauan, jotta mikrorakenne

ja seosaineiden pitoisuus aihion eri kohdissa homogenisoituvat samanlaiseksi kauttaaltaan. Tämän jälkeen suoritetaan muutamia esivalssauspistoja rekristallisaatiolämpötilan yläpuolella, eli pistojen välissä tapahtuu aina rekristallisaatio. Lämpötila laskee hieman esivalssauspistojen välissä ja rakeenkasvun nopeus pienenee. Seosaineiden yksi tärkeimmistä tehtävistä on tässä vaiheessa rajoittaa rakeenkasvua. Esivalssauspistojen jälkeen tapahtuu varsinainen termomekaaninen valssaus, joka on muodostuvan raekoon kannalta merkittävin prosessi. Se tapahtuu rekristallisaatiolämpötilan ja austenititumislämpötilan välissä, eli silloin ei tapahdu enää rekristallisaatiota pistojen välissä. Austeniittirakeet eivät siis kasva, mutta litistyvät ja venyvät varastoiden itseensä muokkausenergiaa. Tämä ilmiö luo termomekaanisesti valssatuille HSLA-teräksille pienen raekoon ja hyvän lujuuden. Kontrolloidun valssauksen jälkeen viimeinen vaihe teräksen valmistuksessa on sen jäädyttäminen ja mahdolliset lämpökäsittelyt. S355-luokan teräksellä jäädytys tapahtuu normaalisti varsin hitaalla jäähtymisnopeudella, jotta saavutetaan ferriittis-perliittinen mikrorakenne, eikä synny esimerkiksi haurasta ja huonosti hitsattavaa martensiittia. (Schröter 2004, s. 3–5)

3.2 CrNiMo-teräkset

Tuulivoimalan monissa eri osissa käytetään myös runsaastikin seostettuja teräksiä. Näitä osia ovat erityisesti ne, jotka joutuvat kestämaan suuria pintoja hankaavia ja kuluttavia voimia, esimerkiksi vaihdelaatikon hammasratat. Aiemminhan myös todettiin, että on useita muitakin takomalla valmistettavia suurikokoisia merkittäviä osia, joiden materiaalina käytetään kromia, nikkeliä ja molybdeeniä sisältäviä teräksiä. Tuulivoimalan toiminnan kannalta tärkeimmät näistä osista ovat lapojen pyörimisenergiasta sähköä tuottava generaattori, pyörimisliikkeen lavoilta generaattoriin siirtävä pääakseli sekä erinäiset tuulen suuntaan reagoivat säätölaitteet konehuoneen ja tornin välissä sekä myös lapojen ja konehuoneen välillä.

Taonta on metallien muokkausmenetelmä, jossa yleensä suuria voimia tuottava hydraulinen prssi pakottaa pehmeäksi hehkutetun muokattavan metallin haluttuun muotoon iskemällä siihen toistuvasti. Käytössä voi olla joko suljettu muotti, joka on valmiin halutun kappaleen muotoinen ontelo, tai sitten voidaan takoa vapaataontaa, missä taottavaa kappaletta työstetään tasaisella pinnalla. Taonnan etuja koneistamalla osien valmistamiseen verrattuna on ehdottomasti se, ettei materiaalia mene hukkaan lastujen

muodossa (lukuun ottamatta viimeistelykoneistuksia) ja metallimateriaalin virtausmuotin muotojen mukaisesti sen sisällä iskujen vaikutuksesta antaa erinomaisia mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta monessa eri suunnassa, valmistettavaan tuotteeseen. Taonnan heikkouksia ovat puolestaan aihion esilämmitykseen vaadittava lämpöenergia ja kalliit, massiiviset hydrauliset laitteet. (Altan et al. 2004, s. 7–8)

Takomalla valmistettavat tuulivoimalan teräsosat vaativat myös lämpökäsittelyn takomisprosessin jälkeen, jotta mekaaniset ominaisuudet saadaan optimoitua. Tärkein lämpökäsittely lienee vaihteiston 18CrNiMo7-6-teräksestä valmistettujen hammaspyörrien hiiletyskarkaisu. Tämän prosessin merkittävyys johtuu siitä, että hammaspyörät ovat todella kriittinen osa koko tuulivoimalan toiminnan kannalta ja ne myös joutuvat kestäämään hyvin suuria pintapaineita ja tuulen nopeuden vaihdellessa myös kuormitusten suuruus vaihtuu jatkuvasti. Vaihteistossa tapahtuvat rikkoutumiset sekä toimintahäiriöt pysäyttävät koko voimalan toiminnan ja tämä onkin viime vuosikymmenten saatossa ollut yleisin modernien tuulivoimaloiden toimintahäiriöitä aiheuttava tekijä. (Mohrbacher 2011, s. 12)

Hiiletyskarkaisu suoritetaan siten, että taottu kappale hehkutetaan noin 950–1050 °C lämpötilaan eli austeniittialueelle hiiltä sisältävässä kaasuympäristössä ja pidetään siellä haluttu aika, yleensä joitain kymmeniä minutteja tai jopa tunteja. Ajan myötä tapahtuu hiilen diffuusio kaasuympäristöstä käsiteltävään kappaleeseen. Mitä kauemmin kappale on hiiltä sisältävässä kaasussa, sitä enemmän hiiltä liukenee kiinteään austeniittiseen kappaleeseen. Tarkoitus on kuitenkin saada hiiltä vain teräksen pintakerrokseen, joihin halutaan kovuutta ja kulumisenkestävyyttä. Kovuus saadaan aikaan jäädyttämällä eli sammuttamalla austeniittialueella oleva teräs nopeasti huoneenlämpöön esimerkiksi öljyssä, jolloin hiilen diffuusioalueelle syntyy kova martensiittinen mikrorakenne. Kappaleen sisemmät kerrokset jäähtyvät hitaammin ja niihin syntyy sitkeä ja luja ferriittis-perliittinen mikrorakenne. Sammutuksen jälkeen suoritetaan yleensä vielä hehkutus huomattavasti matalammissa lämpötiloissa, jotta haitalliset kappaleen sisäiset jännitykset saadaan eliminoitua. (Mohrbacher 2016, s. 106–107)

Tällä tavalla valmistetut ja käsitellyt teräkset ovat siis pintakerroksiensa osalta erittäin kovia ja kestävät hyvin hankaavaa kulutusta ja korroosiota, mutta ne ovat myös sisältä hyvin sitkeitä ja lujia. Tämän takia ne sopivat erityisen hyvin tuulivoimalan massiivisiin

hammaspyöriin. Hiiletyskarkaisulla aikaansaavat kovat pinnat myös vähentävät vaihteiston toiminnasta aiheutuvaa melua. (Mohrbacher 2011, s. 12)

Vaihteistoissa käytetyt teräkset ovat jatkuvan kehityksen kohteena, sillä niiden toimintavarmuus liittyy vahvasti tuulivoimalan kokonaiskäyttökustannuksiin. Mikäli vaihdelaatikko hajoaa, joudutaan se usein vaihtamaan kokonaan uuteen. Tämä on luonnollisesti hyvin kallis toimenpide johtuen erittäin haastavista asennusolosuhteista ja suurista materiaalmääristä. Tutkimusten mukaan molybdeenin pitoisuuden nostamisella sekä niobin ja titaanin lisäämisellä seosaineina saataisiin vielä parempia kestävyysominaisuuksia hammaspyöriille sekä pienennettyä hiiletyskarkaisuun vaadittavaa hehkutusaikaa. Tämä luonnollisesti parantaisi tuulivoimalan käyttövarmuusastetta ja vähentäisi valmistuksessa syntyviä hiilidioksidipäästöjä. (Mohrbacher 2011, s. 14)

3.3 Hitsattavuus ja pulttiliitokset

Tuulivoimalan merkittävimmät hitsisaumat ovat tornissa, jonka tehtävä on nostaa konehuone ja siinä pyörivät lavat ylös suuriin ilmankorkeuksiin, jossa tuulen nopeus on riittävä sähkön tuottamiseen. Torni valmistetaan hitsaamalla valtavia sylinterimäisiä HSLA-teräslevyjä yhtenäisiksi kymmenien metrien pituisiksi ontoiksi runkoputkiksi. Koska valmis torni voi olla jopa yli sata metriä korkea ja sen pystytys yhtenä kappaleena olisi kokoonpanoteknisesti lähes mahdoton suoritus, jaetaan se valmistusvaiheessa yleensä tornin korkeudesta riippuen muutamaan parinkymmenen metrin mittaiseen osaan. Näiden runkoputkiosien päihin hitsataan laipparenkaat, joissa on reiät pulteille. Tornin osat siis kiinnitetään pulttikiinnityksellä toisiinsa päällekkäin ja maahan upotettuihin perustuksiin. (Jansto et al. 2018, s. 7)

Kuten aiemmin todettiin, yksi tärkeimmistä HSLA-terästen kehitystä ajavista tekijöistä oli tarve kehittää hyvin hitsattava luja teräs. Tässä onnistuttiinkin oikein hyvin ja siksi myös tuulivoimaloiden tornin materiaaliksi on vakiintunut S355-lujuusluokan termomekaanisesti valssattu teräs. Sen ferriittis-perliittinen mikrorakenne ja suhteellisen matala hiilielkvivalentti antaa sille loistavat lähtökohdat hitsattavaksi teräkseksi, eikä hitsin lämpömuutosvyöhykkeelle (HAZ) synny suuria määriä haitallista, kovaa ja haurasta martensiittia. Tuulivoimaloiden hitsisaumoille on erittäin tarkat laatuvaatimukset johtuen suurista kuormituksista ja korroosiota aiheuttavista

aggressiivisista olosuhteista erityisesti merialueilla. Tornien hitsausmenetelmäksi on vakiintunut mekanisoitu jauhekaarihitsaus, jossa hitsauskone syöttää hitsausjauhetta jatkuvasti muodostuvan hitsisauman päälle. Hitsausjauhe suojaa muodostuvaa saumaa ympäröivältä ilmalta ja muodostaa sulaessaan myös suojaavan kuonakerroksen sauman päälle. Tuloksena on laadukas hitsisauma, joka kestää vaihtelevia kuormituksia koko voimalan eliniän eli noin 30 vuotta. Toisaalta on myös valitettavasti ollut tapauksia, joissa hitsisaumojen alueelta on löydetty kohtalokkaita halkeamia jo viiden vuoden käyttöön jälkeen. Erään tutkimuksen mukaan syyksi tällaiseen tapahtumaan arveltiin liian teräväprofiilista hitsisaumaa ja liian suurta aineenpaksuuden vaihtelua hitsattavien osien eli tornin ja sen kiinnitysrengaslaipan välillä. (Lacalle et al. 2011, s. 1710)

Tuulivoimalan lopulliseen kokoonpanoon vaaditaan satoja kappaleita järeitä pultteja ja muttereita. Yleensä niiden materiaalina käytetään korroosiota ja kulumista kestäviä lämpökäsiteltyjä CrMo-teräksiä. Merkittävimmät pulttikiinnitykset ovat tornin juuren ja maahan upotetun perustuksen välissä, tornin eri osien välissä, sekä lapojen ja generaattoria pyörittävän akselin kärkiosan välillä. Pultit ovat luonnollisesti hyvin suuria; jopa M72-kokoisia 10.9 lujuusluokan pultteja (eli halkaisija 72 mm ja myötöraja 900 MPa sekä murtoraja 1000 MPa) käytetään niissä liitoksissa, jotka vaativat erityisen valtavaa kestävyyttä. (Lochan et al. 2019, s. 276–277)

3.4 Offshore-voimalat ja korroosionesto

Tuulivoimalateollisuuden nykyinen trendi ja tulevaisuuden näkymät ovat sellaiset, että tuulivoimaloita päädytään rakentamaan merialueille yhä enemmissä määrin. Tärkein syy tähän on ehdottomasti se, että merellä tuulee keskimäärin kovempaa ja ilmavirrat ovat tasaisempia kuin kuivalla maalla. Tämä johtuu siitä, ettei merellä juuri ole kitkaa aiheuttavia objekteja, jotka haittaisivat tuulen eli ilman molekyylien kulkemista korkeamman ilmanpaineen alueelta matalapainealueelle. Merelle voidaan siis rakentaa isompia, tehokkaampia voimaloita, joilla on parempi kokonaishyötysuhde kuin kuivalla maalla olevilla voimaloilla. Jopa 11 MW:n sähkötehon tuottavat ja 125 m korkeat offshore-voimalat, joiden lapojen kärkien välinen halkaisija on jopa 190 m, tulevat realististen suunnitelmien mukaan yleistymään 2030-luvulla. (Wiser et al. 2016, s. 2) Muita tärkeimpiä syitä offshore-rakentamiseen lienevät voimaloista aiheutuvat inhimilliset aistihaitat. Merellä olevat voimalat eivät herätä ihmisissä niin negatiivisia ajatuksia kuin kuivan maan voimalat, jotka pystytetään usein näkyville paikoille harjujen

ja kukkuloiden päälle. Yli satametriset vitivalkeiset teräs-komposiittirakennelmat eivät miellytä kaikkien silmää, ja voimaloiden tiedetään myös aiheuttavan jonkin verran häiritsevää melua.

Pystytettäessä voimaloita merialueille kohdataan sellaisia ongelmia mitä kuivalla maalla ei ole. Ensinnäkin voimala pitää saada tukevasti pystytettyä, jotta se kestää tuulen lisäksi aaltojen aiheuttaman rasituksen. Tähän on kehitetty useita eri tekniikoita. Toiset tekniikat hyödyntävät kiinteästi merenpohjaan upotettavia rakenteita ja toiset taas osittain kelluvia rakenteita. Euroopassa kuitenkin ehdottomasti käytetyin menetelmä on ns. monopile-perustus, jota voidaan käyttää matalahkoilla merensyvyysalueilla, kymmenestä viiteenkymmeneen metriin. Sitä käytettiin esimerkiksi 87 %:ssa Saksassa vuoteen 2017 mennessä rakennetuissa offshore-voimaloissa. Monopile on meren syvyydestä riippuen muutaman kymmenen metrin pituinen ja muutaman metrin halkaisijalla oleva ontto teräsputki, joka upotetaan meren pohjaan riittävän syväälle, jotta se on kyllin stabiili kantamaan koko tuulivoimalan painon riittävän tukevasti. Materiaalina käytetään yleensä EN 10225-standardin mukaisia hitsattavia offshore-olosuhteisiin tarkoitettuja teräksiä. (Kirchgeorg et al. 2018, s. 259)

Offshore-voimalat joutuvat sietämään huomattavasti aggressiivisempia korroosio-olosuhteita kuin kuivalla maalla sijaitsevat voimalat. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että suolainen merivesi ja kostea meri-ilma ympäröivät voimalaa. Merivedessä olevat ionit, lähinnä natrium- ja kloridi-ionit, aiheuttavat sen, että merivesi johtaa sähköä sangen hyvin. Nämä varauksia kuljettavat ionit edistävät erityisesti teräsrakenteiden galvaanista korroosiota, jonka mekanismi on sähkökemiallinen. Muita offshore-tuulivoimalassa esiintyviä korroosionmuotoja ovat yleinen korroosio, pistekorroosio, rakokorroosio sekä tuulen ja aaltoilun sekä edellä mainittujen korroosionmuotojen yhteisvaikutuksesta mahdollisesti syntyvä jännityskorroosiomurtuma tai korroosioväsyminen. Meren pohjamutiin upotetussa monopilen osassa esiintyy myös mikro-organismien aiheuttamaa mikrobiologista korroosiota. Kaikki nämä korroosion esiintymismuodot voivat aiheuttaa rappeutumista ja jopa kohtalokkaita seurauksia tuulivoimalan rakenteille, sekä johtaa pahimmassa tapauksessa koko voimalan romahtamiseen. (Kirchgeorg et al. 2018, s. 259–260)

Perinteinen tapa galvaanisen korroosion estämiseen tuulivoimalan teräsosissa on katodiset suojausmenetelmät. Niitä käyttämällä pyritään tilanteeseen, jossa suojattava

metalli eli teräs asettuu katodiksi eli positiiviseksi navaksi ympäristönsä ja itsensä muodostamassa sähkökemiallisessa kennossa. Tämä toteutetaan joko uhrautuvan anodin menetelmällä tai sähkövirtaa ja -jännitettä hyödyntävällä ICCP-menetelmällä. Uhrautuva anodi on helpompi asentaa, mutta ICCP-menetelmä puolestaan on selvästi ympäristöystävällisempi menetelmä. (Kirchgeorg et al. 2018, s. 260)

Uhrautuvan anodin menetelmä tarkoittaa sitä, että suojattavaan metalliin, eli tässä tapauksessa teräksiseen monopile-perustukseen, kiinnitetään epäjalompaa metallia satojen kilojen painoisina harkkoina. Yleisesti käytetty metalli on alumiini. Tämä epäjalompi metalli asettuu meriveden ja näiden metallien muodostaman sähkökemiallisen kennon anodiksi eli negatiiviseksi navaksi, jolloin se luovuttaa elektroneja eli hapettuu ja syöpyy, suojaten katodiksi asettuvaa suojattavaa terästä. Nämä alumiiniset uhri-anodit joudutaan kuitenkin uusimaan monta kertaa offshore-voimalan käyttöänsä aikana, eli alumiinia siis liukenee meriveteen jopa kymmeniä tuhansia kiloja yhdestä voimalasta kolmenkymmenen vuoden eliniän aikana. Tämä on ympäristönäkökulman kannalta hyvin negatiivinen asia, sillä liuenneella alumiinilla on haittavaikutuksia meren biodiversiteettiin eli siellä eläviin eläin- ja kasvilajeihin. (Kirchgeorg et al. 2018, s. 260)

ICCP-menetelmä (Impressed Current Cathodic Protection) on ympäristöystävällisempi galvaanisen korroosion estomenetelmä, koska siinä käytettävä inertti, usein titaanista valmistettu anodi, ei lähes ollenkaan syövy luovuttaen partikkeleita ympäristöönsä eli meriveteen. ICCP-menetelmä perustuu siihen, että ulkoisen jännitelähteen avulla pakotetaan suojattava metalli eli teräs sähkökennon katodiksi eli se vastaanottaa elektroneja ja pelkistyy eikä syövy. Menetelmä on oivallinen erityisesti tuulivoimalan korroosionestoon, sillä tarvittava sähköjännite saadaan konehuoneessa sijaitsevasta turbiinista. ICCP-menetelmän etu perinteiseen uhri-anodiin on myös se, että jännitettä ja täten korroosioneston toimimista voidaan mitata ja seurata reaaliaikaisesti myös etäällä voimalasta. (Kirchgeorg et al. 2018, s. 260)

Korroosion estämiseksi käytetään myös erinäisiä pinnoitekerroksia. Niiden toimintaperiaate perustuu siihen, että ne eristävät suojattavan teräsrakenteen ympäristöstänsä fyysisesti, eikä näin ollen korroosiota pääse periaatteessa tapahtumaan lainkaan. Erilaisia yleisesti käytettyjä pinnoitteita ovat ruiskutettavat sinkki- ja alumiinijauhepinnoitteet, epoksipohjaiset pinnoitteet sekä polyuretaanipohjaiset pinnoitteet. (Eom et al. 2020, s. 2) Yleensä käytetään päällekkäin monia eri

pinnoitekerroksia usean sadan mikrometrin paksuudella. Tällä tavalla saadaan yhdistettyä kunkin pinnoitteen parhaat ominaisuudet ja korroosionesto onnistuu hyvin. (Eom et al. 2020, s. 13)

Valitettava totuus on kuitenkin se, ettei korroosiota pystytä koskaan estämään täysin. Materiaali pyrkii aina termodynamiikan lakien mukaisesti luonnonmukaiseen tilaansa, mikä tarkoittaa teräsosien kohdalla raudan muuttumista ruosteeksi eli rautaoksideiksi ja hydroksideiksi. Tämän takia tuulivoimaloiden kantaviin teräsrakenteisiin otetaan poikkeuksetta lujuuslaskennassa huomioon korroosiovara. Kantavat rakenteet suunnitellaan siis vähintään muutaman millin paksummaksi mitä olisi lujuuslaskennallisesti tarve, jotta pinnoilla tapahtuva korrosio eli materiaalin syöpyminen ja heikkeneminen ei heti ilmestyessään aiheuta katastrofia, vaan syntyvä ruoste oikeastaan suojaa muodostuessaan teräksen sisempiä kerroksia. (Kirchgeorg et al. 2018, s. 261)

3.5 Väsymiskestävyys

Tuulivoimalat joutuvat kestävään käyttöikänsä aikana lukemattomien tuulenpuuskien ja merialueilla myös aaltojen dynaamisen syklisen voiman aiheuttavan rasituksen. Tuulen suunta ja nopeus vaihtuvat jatkuvasti, mutta myös lapojen asennolla on vaikutus aiheutuvaan voimaan. Kun yksi lavoista osoittaa suoraan pystysuunnassa kohti taivasta, on tuulivoimalan kokonaiskorkeus ja pinta-ala suhteessa tuuleen suurimmillaan, jolloin siihen törmää eniten ilmamolekyylejä yhtäaikaisesti. Puolestaan silloin, kun yksi lavoista osoittaa suoraan alaspäin tornin myötäisesti, on pinta-ala ja täten myös rasitus pienimmillään. Tällainen syklinen rasituksen vaihtelu aiheuttaa teräsrakenteissa väsymistä, eli mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä, vaikkei myötölujuutta ylitettäisikään yksittäisen syklin maksimivoiman kohdalla. Myös ympäröivän ilman lämpötilan vaihtelulla on vaikutusta teräksen ominaisuuksiin, erityisesti kestävyuteen. Kylmässä teräs haurastuu ja sen iskutkeys heikkenee, jolloin murtuminen voi tapahtua pienemmästä voimasta. (Igwemezie et al. 2018, s. 383)

Suurimman riskitekijän väsymiskestävyuden kannalta aiheuttavat hitsisaumat, sekä pienille alueille keskittyneet korroosioilmiöt. Vaikka hitsisaumojen tekemiseen käytetään mekanisoituja laitteita, jotka ovat huomattavasti ihmiskäyttä vakaampia ja hitsisaumat tarkastetaan huolellisesti, voi silti hitsivirheitä syntyä. Hitsit voivat olla geometriallisesti

virheellisiä eli väärän muotoisia, tai hitsiaineessa voi olla epäpuhtauksia, jotka muuttavat sen kemiallisia sekä fysikaalisia ominaisuuksia. Virheelliset saumat ovat potentiaalisia väsymismurtuman ydintymisen kohtia. Myös tornin suojaavissa pinnoitekerroksissa olevat virheet ja näihin kohtiin syntyneet paikalliset korroosioilmiöt, kuten syväälle tunkeutuva piste- tai rakokorroosio, voivat toimia väsymismurtuman ydintymiskohtana. (Lacalle et al. 2011, s. 1699)

4 YHTEENVETO

Tuulivoimalatekniikassa on paljon teräsmateriaaleihin liittyviä haasteita, mutta toisaalta myös mahdollisuuksia. Tuulivoimalarakentamiseen liittyvät riskit ja ongelmat täytyy hallita hyvin, jotta saadaan tuotettua puhdasta energiaa turvallisesti ja järkevästi kuluttamatta liikaa luonnonvaroja. Suurimmat haasteet liittyvät teräksessä esiintyviin ilmiöihin, kuten korroosioon ja väsymismurtumiin, mutta myös voimalan lavoista aiheutuva jäteongelma sen käyttöiän tullessa loppuun on tärkeässä roolissa, kun mietitään voimalan koko elinkaarta.

Suurin teräksestä valmistettu osa on tuulivoimalan jopa yli sata metriä korkea torni, joka koostuu nykyvoimaloissa yhteen hitsatuista S355-luokan HSLA-teräslevyistä. Painoa sillä on jopa satoja tonneja, joten sen valmistaminenkin aiheuttaa valtavasti hiilidioksidipäästöjä. Tulevaisuudessa tätä ongelmaa voidaan ratkoa esimerkiksi nostamalla tornissa käytetyn teräksen lujuusluokkaa S460-luokkaan ja siitä ylöspäin. Ultralujien terästen käyttöä rajoittaa kuitenkin hitsattavuus ja hitsisaumojen korkeat laatuvaatimukset. Teräksen lujuusluokkaa nostamalla maltillisestikin saadaan huomattavasti pienemmällä teräsmäärällä aikaiseksi yhtä luja rakenne kuin ennen. Mikäli fossiilivapaat terästehtaat alkavat yleistymään maailmalla, pienenevät tehtaiden ja siten myös tuulivoimaloiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt entisestään.

Kulutuskkestävyyttä vaativissa tuulivoimalan osissa käytetään kromilla, molybdeenillä ja nikkelillä seostettuja lämpökäsiteltyjä ja takomalla muokattuja teräksiä. Tuulivoimalan toiminnan kannalta kriittisin näistä osista on vaihteiston hammaspyörät. Niissä pinnat hankautuvat jatkuvasti toisiinsa ja voimat ovat suuria. On erittäin tärkeää, että ne kestävät koko voimalan eliniän eli noin 30 vuotta rikkoutumatta. Hyvä kulumiskestävyys saavutetaan hiiletyskarkaisulla. Tutkimusten mukaan molybdeenin pitoisuuden kasvattamisella sekä niobin ja titaanin lisäämisellä saavutettaisiin vielä parempia ominaisuuksia.

Varsinkin offshore-voimalat kokevat rajua korroosiota merivesiympäristössä. Sähköä hyvin johtava merivesi saa aikaan erityisesti galvaanista korroosiota, mikä heikentää rakenteita. Tämän ongelman ratkaisemiseksi ulkoista jännitettä hyödyntävä ICCP-korroosionestomenetelmä on paras ja ympäristöystävällisin yhteistoiminnassa metallijauhepinnoitteiden sekä epoksi- ja polyuretaanipohjaisten suojapinnoitteiden

kanssa. Mikäli pinnoitekerroksessa on aukkoja, voi näihin kohtiin syntyä syvälle tunkeutuvia piste- ja rakokorroosioesiintymiä. Niillä voi olla tuhoisa yhteisvaikutus tuulen ja meren aaltojen aiheuttaman huojuttavan kuormituksen kanssa. Korroosio aiheuttaa teräkseen heikkoja kohtia, joihin voi ydintyä väsymismurtumia, mikä johtaa pahimmassa tapauksessa koko voimalan ennenaikaiseen romahtamiseen tai purkamiseen turvallisuussyistä. Korroosionestolla saadaan siis pidennettyä voimalan käyttöikää, millä on valtava merkitys voimalan koko elinkaaren päästöihin.

Tuulivoiman suurin etu on se, että se on uusiutuvaa energiaa. Globaalien trendien ja ilmastositomusten mukaisesti ihmiskunta on siirtymässä yhä vihreämpään sähköntuotantoon. Optimistisimpien skenaarioiden tullessa toteen, olisi maailmanlaajuinen tuulivoimalla tuotettavan sähkötehon kapasiteetti vuonna 2050 jopa 2700 GW. Tämä tarkoittaa sitä, että pystytettyjä tuulivoimaloita olisi jopa yli puoli miljoonaa. Jokaisessa voimalassa on satoja tuhansia kiloja eri materiaaleja, joista suurin osa on terästä. Voidaankin varmasti sanoa, että materiaalitekniikan ja metallurgian merkitys tulee olemaan tuulivoimalatekniikan saralla valtava myös tulevaisuudessa.

LÄHDELUETTELO

Altan, T., Ngaile, G., & Shen, G. (Eds.). (2004). Cold and hot forging: fundamentals and applications (Vol. 1). ASM international.

Andersen, P. D., Bonou, A., Beauson, J., & Brøndsted, P. (2014). Recycling of wind turbines. DTU International Energy Report, 2014, s. 92-97.

Carlin, P. W., Laxson, A. S., & Muljadi, E. B. (2003). The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology. *Wind Energy*, 6(2), s. 129–159.

De Decker, K. (2019). How to Make Wind Power Sustainable Again. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.resilience.org/stories/2019-06-27/how-to-make-wind-power-sustainable-again/> [Viitattu 19.3.2022]

Eom, S.-H., Kim, S.-S., & Lee, J.-B. (2020). Assessment of Anti-Corrosion Performances of Coating Systems for Corrosion Prevention of Offshore Wind Power Steel Structures. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/10/970> [Viitattu 20.4.2022]

Ghenai, C. (2012). Life cycle analysis of wind turbine. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/102458629/DTU_INTL_ENERGY_REP_2014_WIND_91_97.pdf [Viitattu 21.3.2022]

Igwemezie, V., Mehmanparast, A., & Kolios, A. (2018). Materials selection for XL wind turbine support structures: A corrosion-fatigue perspective. *Marine Structures*, 61, s. 381-397.

Jansto, S. G., & America, M. C. N. (2018). Steelmakers Meet Demand for Taller Wind Towers with Low Carbon Structural Steel Containing Niobium. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://niobium.tech/-/media/NiobiumTech/Documentos/Resource-Center/NT_Taller-wind-towers-with-low-coast-steel-containing-niobium.pdf [Viitattu 21.3.2022]

Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M. J., & Brockmeyer, B. (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation

of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 136, s. 257–268.

Konstruktivska, V. M. H. (2011). High-strength low-alloy (HSLA) steels. *Materiali in tehnologije*, 45(4), s. 295-301.

Lacalle, R., Cicero, S., Álvarez, J. A., Cicero, R., & Madrazo, V. (2011). On the analysis of the causes of cracking in a wind tower. *Engineering Failure Analysis*, 18(7), s. 1698–1710.

Letcher, T. M. (2017). Why Wind Energy? *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. s. 3-14

Lochan, S., Mehmanparast, A., & Wintle, J. (2019). A review of fatigue performance of bolted connections in offshore wind turbines. *Procedia Structural Integrity*, 17, s. 276–283.

Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: an overview. *Materials*, 10(11), 1285.

Mohrbacher, H. (2011). Molybdenum in Irons and Steels for Clean and Green Power Generation. The International Molybdenum Association. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.imoa.info/download_files/alloy-steel/Clean_and_Green_Energy.pdf [Viitattu 22.3.2022]

Mohrbacher, H. (2016). Metallurgical concepts for optimized processing and properties of carburizing steel. *Advances in Manufacturing*, 4(2), s. 105–114.

Wiser, R., Hand, M., Seel, J., & Paulos, B. (2016). Reducing wind energy costs through increased turbine size: Is the sky the limit. *Rev. Berkeley National Laboratory Electricity Markets and Policy Group*, 121.