



Tarttujan lujuustarkastelu

Mikko Heinänen

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021

Konetekniikka
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Tuotekehitys

HEINÄNEN, MIKKO:
Tarttujan lujuustarkastelu

Opinnäytetyö 30 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Huhtikuu 2021

Opinnäytetyön aiheena oli tarttujan lujuustarkastelu. Opinnäytetyö tehtiin ulvilaisen Paprotec Oy:n toimeksiannosta. Paprotec on erikoistunut teollisuusrobotisovelluksiin.

Työtä rajattiin niin, että lujuustarkastelu tehtiin vain tietyille aiemman tiedon perusteella kriittisiksi tiedetyille osille. Lisäksi selvitettiin koko tarttujan muodonmuutokset. Työssä käytettiin apuna nosturistandardia SFS-EN 13001-1 ja päätyökätluna oli Ansys Workbench -ohjelma, mutta myös SolidWorks oli työssä käytössä.

Tarkastelussa tuli ottaa huomioon useat eri kuormitustapaukset, koska tarkasteltavaa tarttujaa voidaan käyttää eri kokoisten paperirullien siirtelyyn. Tarttujasta ei ollut vielä tehty prototyyppiä, joten tuli myös tarkastella, mistä materiaaleista se voitaisiin valmistaa. Tarkasteltaviksi materiaaleiksi valikoituivat teräs S355 ja 2024-T4 alumiini. Tutkittiin myös teräksen S690QT soveltuvuutta tiettyjen osien materiaaliksi.

Tarttujan kaikkien tarkasteltavien osien jännityshuiput alittivat materiaalien myötörajat. Kuormituksessa syntyvät muodonmuutokset eivät osoittautuneet niin suuriksi, että ne haittaisivat tarttujan käytettävyyttä. Väsymiskestävyys muodostui ratkaisevaksi tekijäksi tarkastelussa. Teräkset olivat väsymisominaisuuksiltaan sellaisia, että kaikki tarkasteltavat osat saavuttivat tarttujalta vaaditun käyttöiän. Alumiinista 2024-T4 valmistettuna tarttuja ei saavuttanut vaadittua käyttöikää.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Mechanical Engineering
Product Development

HEINÄNEN, MIKKO:
Structural analysis of a gripper

Bachelor's thesis 30 pages, appendices 3 pages
April 2021

The thesis was made for Paprotec Oy. Paprotec's headquarters are located in Ulvila. They specialise in robotics applications.

The purpose of this bachelor's thesis was to do a structural analysis of gripper that is used for handling paper rolls in automated storages. Only certain critical parts of the gripper were analysed in this thesis. Those critical parts were selected based on Paprotec's evaluation. The main program used in the structural analysis was Ansys Workbench. However, also SolidWorks was used.

The analysed gripper was a new product and not even prototype was made of it before this analysis was started. Therefore, it was not yet certain from what material the parts of the gripper were going to be manufactured. Further, the analysis was made using two different materials to see if they could handle stresses which the gripper needed to handle. S355 steel, S690QT steel and 2024-T4 aluminium were used as the materials.

Conclusions were that steel would be able to handle the required stresses. Aluminium 2024-T4 did not have good enough fatigue qualities to pass the analysis.

Key words: structural analysis, ansys, ansys workbench, gripper

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	OPINNÄYTETYÖN ESITTELY	6
	2.1 Työn lähtökohta.....	6
	2.2 Tavoite ja tarkoitus	6
	2.3 Paperirullavarastoissa käytettävät tarttumat.....	7
	2.4 Paprogrip	9
3	LUJUUSTARKASTELUN TEORIA	10
	3.1 Tarttumien lujuustarkastelussa huomioitavia tekijöitä	10
	3.2 Elementtimenetelmä	10
	3.2.1 Elementtiverkko	11
	3.2.2 Elementtityypit	11
	3.3 Väsyminen	12
4	ANSYSIN KÄYTTÖ LUJUUSTARKASTELUSSA	15
	4.1 Ansys Workbench	15
	4.2 Ansys-lisenssin rajoitukset	15
	4.3 Tarkasteltavat kuormitustapaukset.....	15
	4.4 3d-mallin siivous.....	17
	4.5 Pintojen jakaminen.....	18
	4.6 Materiaaliominaisuuksien asettaminen	19
	4.7 Kontaktit	19
	4.8 Verkotus	20
	4.9 Voimien ja reunaehtojen asettaminen	21
	4.10 Tuloksien tarkastelu.....	23
5	POHDINTA	25
	LÄHTEET	27
	LIITTEET	28
	Liite 1. Väsymislukujen laskenta	28
	Liite 2. Yläosan kuormitusten laskenta.....	29

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on tarttujan lujuustarkastelu. Opinnäytetyö tehtiin Ulvilalaisen Paprotec Oy:n toimeksiannosta. Tämä on opinnäytetyön julkinen versio. Työstä on tehty myös toinen versio, joka on vain Paprotec Oy:n käytettävissä. Versiot eroavat toisistaan siltä osin, että tässä raportissa ei esitellä selkeitä piirustuksia työssä tutkittavasta tarttujasta. Ansys-laskennan tuloksia esitetään tässä raportissa vain osittain. Nämä asiat ovat esitelty tarkemmin vain Paprotecin käyttöön tehdyssä raportissa.

Opinnäytetyön aloituspalaveri pidettiin Ulvilassa Paprotec Oy:n tiloissa keskiviikkona 25.11. Itse lujuustarkastelu ja tämän raportin kirjoittaminen on tehty etätyönä Tampereella. Lujuustarkastelussa päätyökaluna käytettiin Ansys Workbench -ohjelmaa, mutta myös SolidWorks oli työssä käytössä.

2 OPINNÄYTETYÖN ESITTELY

2.1 Työn lähtökohta

Opinnäytetyö tehtiin Paprotec Oy:n toimeksiannosta. Paprotec on ulvilalainen vuonna 2003 perustettu perheyritys, joka on erikoistunut teollisuusrobottisoveluksiin. Paprotec on valmistanut yli 40 Mastergrip-tarttujaa, joista suurin osa on käytössä Konecranesin toimittamissa automaattivarastoissa. Tässä opinnäytetyössä tehdään lujuustarkastelu uudelle Paprogrip-tarttujalle.

Opinnäytetyön aloituspalaveri pidettiin Ulvilassa 25. marraskuuta 2020. Opinnäytetyö tehtiin etätöinä Tampereella. Päätyökaluna työssä oli Ansys Workbench -lujuuslaskentaohjelma ja siihen Tampereen ammattikorkeakoulun lisenssi.

Tarttuja olisi tarkoitus valmistaa sellaiseksi, että se kestää 2 000 000 työjaksoa, jolloin nosturistandardin SFS-EN 13001-1 mukainen *U*-luokka on *U7*. Nosturistandardin mukainen kuormaspektri *KQ* tarttujalla on 0,548, jolloin *Q*-luokka on *Q5*.

2.2 Tavoite ja tarkoitus

Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä lujuustarkastelu tarttujalle, jota käytetään paperirullavarastossa. Lujuustarkastelun pohjalta valmistetaan kaksi raporttia. Julkisessa raportissa ei esitellä tarkkoja kuvia tarttujasta tai laskennan tuloksista. Nämä asiat esitetään vain Paprotec Oy:n käyttöön tulevassa raportissa.

Työn tavoitteena on saada lujuustarkastelu tehtyä nosturistandardin SFS-EN 13001-1 mukaisesti. Sen mukaan olennaisia vaaratilanteita, jotka voivat johtaa henkilövahinkoon tavallisessa käytössä ja ennakoitavissa väärinkäyttötilanteissa ovat seuraavat: nosturin tai sen osien epätasapaino (kaatuminen), lujuiden rajojen ylittäminen (myötääminen, murtuminen, väsyminen), nosturin tai

sen osien elastinen epätasapaino (nurjahdus, lommahdus), materiaalin tai komponenttien lämpötilarajojen ylittäminen, muodonmuutoksen rajojen ylittäminen (SFS-EN 13001-1, 5). Työn tarkoituksena on siis tutkia kestääkö tarttujan nykyinen rakenne siihen käytössä kohdistuvat kuormat niin, ettei edellä mainittuja vaaratilanteita pääse syntymään. Tarkastelu tehdään käyttäen materiaalina terästä ja alumiinia. Alumiiniksi valikoitui 2024-T4. Terästyypeiksi valikoituivat S355 ja S690QT. Terästä S690QT tosin tutkitaan vain mahdollisena ala-, ja yläkorvakkeen materiaalina.

Työtä on rajattu niin, että tutkitaan tarttujan rakenteesta vain seuraavat osat: alakorvake, yläkorvake, ulompi ja sisempi käsivarsi ja laakeripesät. Nämä osat ovat kokemuksen perusteella voitu arvioida tarttujan kriittisiksi osiksi. Eli osiksi, jotka todennäköisesti tulevat kuormittumaan eniten. Lisäksi tutkitaan koko tarttujan tartuntavarren ja ylärungon käsivarsien taipumat.

2.3 Paperirullavarastoissa käytettävät tarttujat

Suurin osa paperirullavarastoista on varustettu imukuppitarttujilla. Nämä eivät kuitenkaan pysty käsittelemään pakattuja rullia eivätkä rullanippuja. Siksi lisäainetyvästi käytetään mekaanisia tarttujia, joilla ei ole tällaisia rajoituksia. Mekaanisia tarttujia on kolmenlaisia, ja ne erottuvat toisistaan erityisesti käytön, voimansiirron sekä tartuntavarsien liike- ja kannatinmekanismien suhteen (Lammi 2020).

Demagin hydraulinen tarttuja (Kuva 1) on ensimmäiseksi kehitetty konstruktio. Siinä tartuntavarret kääntyvät pystytasossa vaakasuorien akselien ympäri. D-tarttuja painaa kaksi kertaa enemmän kuin muut vaihtoehdot, ja voi järkevästi käsitellä rullia vain suhteellisen kapealla halkaisija-alueella (Lammi 2020). Hydraulii-kan käyttäminen paperivarastossa ei ole myöskään erityisen toivottavaa öljyvuo- tojen vuoksi.



KUVA 1. Demagin hydraulinen tarttuja (Expo21xx)

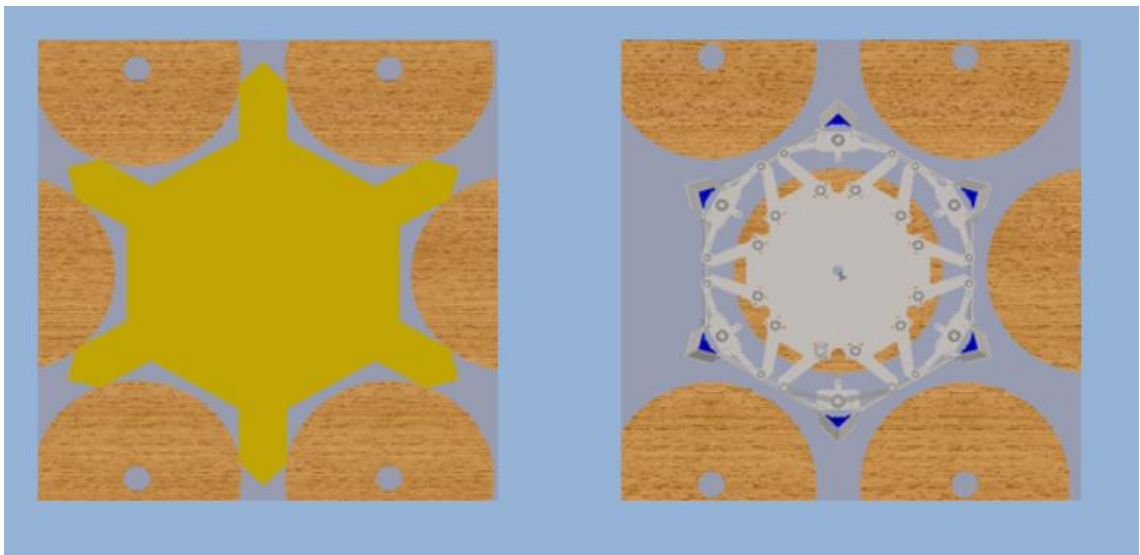
Raumaster Paper Oy:n tarttuja Mastergrip (kuva 2) on lanseerattu markkinoille noin 12 vuotta sitten. Mastergripin tartuntavarret liikkuvat säteittäisesti lineaarisissa ohjauksissa. Käyttö on sähköinen.



KUVA 2. Mastergrip (Lammi M., 2014, 91)

2.4 Paprogrip

Paprotecin ”Paprogrip” on tässä työssä tehtävän tarkastelun kohde. Se kehitettiin koronan hiljentämille markkinoille. Myös se on sähkötoiminen. Tartuntavarsien kannatinmekanismi koostuu vaakatasossa kääntyvistä vivuista, jotka kääntyvät vaakasuorien akselien ympäri. Tarttujan matalan ylärungon ansiosta varasto voidaan rakentaa 1 – 2 m matalampana kilpailijoihin verrattuna. Varsinkin tapauksissa, joissa rullien halkaisija-alue on laaja, saadaan varastoon mahtumaan paljon enemmän rullia kuin kilpailijoiden tarttuvia käyttäen (Lammi 2020). Kuvassa 3 on esitetty Mastergripin ja Paprogripin eroa ylhäältä päin kuvattuna. Kuvasta nähdään Paprogripin (kuvassa 3 oikealla) mahtuvan pienempään tilaan varastossa. Paprogripistä ei ole vielä valmistettu prototyyppiä, eikä sen piirustuksia saa tässä raportissa esittää.



KUVA 3. Mastergripin ja Paprogripin vertailu

Paprogripin tässä työssä tarkasteltavista kriittisistä osista alakorvake ja yläkorvake sijaitsevat tartuntavarressa hitsattuna tartuntalevyyn. Nivelvarret, jotka muodostavat puristusvoiman tartuntavarsien välille kiinnittyvät ylä- ja alakorvakkeisiin. Tartuntavarsi kiinnittyy akselilla kahteen ulompaan käsivarteen. Sisemmän käsivarren molemmissa päissä on akselit. Toisesta akselista sisempi käsivarsi kiinnittyy ulompaan käsivarteen ja toisesta ylärunkoon. Välissä ovat tietenkin laakerit ja laakeripesät.

3 LUJUUSTARKASTELUN TEORIA

3.1 Tarttujan lujuustarkastelussa huomioitavia tekijöitä

Rakenteita mitoittaessa on tiedettävä, missä olosuhteissa rakenne vaurioituu. Tilaa, jossa rakenteen vaurio tapahtuu, kutsutaan rajatilaksi. Rajatilat voidaan jakaa murtumisrajatiloihin ja käytettävyyssrajatiloihin. (Salmi & Pajunen, 2018, 329)

Nosturistandardin mukaan murtumisrajatiloja ovat plastinen muodonmuutos tai kitkaliitosten liukuminen, komponenttien tai liitosten pettäminen, nosturin tai sen osien elastinen epätasapaino, sekä nosturin tai sen osien jäykän kappaleen epätasapaino (SFS 13001-1, 11).

Käytettävyyssrajatilan esimerkkejä nosturistandardin mukaan taas ovat muodonmuutokset, jotka haittaavat nosturin tarkoitettua käyttöä, värinat, jotka vahingoittavat nosturinkuljettajaa tai aiheuttavat vahinkoa nosturin rakenteille tai rajoittavat nosturin käyttöä, sekä lämpötilarajojen ylittäminen (SFS 13001-1, 11).

3.2 Elementtimenetelmä

Lujuuslaskennan tarkoituksena on saada selville, miten eri kappaleet kestävät muodonmuutoksia, siirtymiä ja rasituksia. Niiden ratkaisemiseen tarvittavat yhtälöt saadaan lujuusopin teoriasta. Yleisillä lujuusopin yhtälöillä pystytään kuitenkin ratkaisemaan vain yksinkertaisia tapauksia. Mutkikkaammassa tilanteissa ratkaisua ei löydetä suljetussa muodossa tavanomaisten matemaattisten funktioiden avulla, vaan joudutaan tyytymään likimääräiseen ratkaisuun. Elementtimenetelmä on käytetyin näistä numeerisista laskentamenetelmistä. (Lähteenmäki 2006, 1.1)

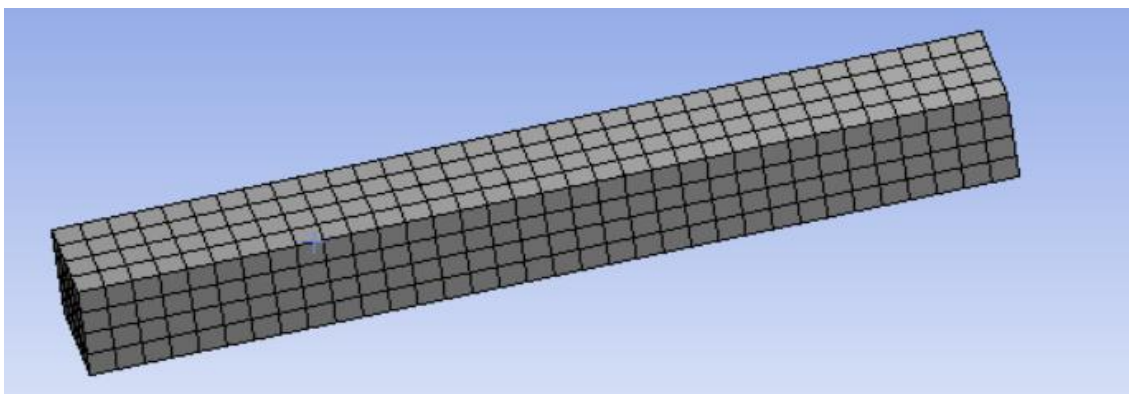
FEM-laskentaohjelmistot perustuvat elementtimenetelmän käyttöön. Ansys Workbench, jota tässä työssä käytetään, perustuu siis myös elementtimenetelmään.

3.2.1 Elementtiverkko

Kun lujuustarkasteltava kappale on geometrisesti niin monimutkainen, ettei sitä voida laskea lujuusopin perusyhtälöillä, käytetään elementtimenetelmää. Elementtimenetelmässä kappale pilkotaan pienempiin geometrialtaan yksinkertaisiin osiin. Näitä kappaleen jako-osia sanotaan elementeiksi. Vierekkäisten elementtien kohtaamispisteitä kutsutaan solmuiksi. Elementtiverkko on joukko elementtejä, jotka yhdistyvät toisiinsa solmuilla. Elementtiverkko kuvaa todellista kappaletta useimmiten vain likimääräisesti, mikä aiheuttaa laskennan tuloksiin virhettä. (Lähteenmäki 2006, 1.2)

3.2.2 Elementtityypit

Elementtityyppejä on valtavasti erilaisia, mutta peruslaskennassa käytetään vakiintuneita noin kahtakymmentä elementtityyppiä. Näitä ovat esimerkiksi sauva-, palkki-, laatta, 2d-solidi- ja 3d-solidielementit. (Lähteenmäki 2006, 1.9) Tarttujan lujuustarkastelua tehtäessä käytettiin 3d-solidielementtejä. 3d-solidielementtejä käytetään nimensä mukaisesti kolmiulotteisia kappaleita mallinnettaessa. 3d-elementit ovat neli-, viisi- tai kuusitahokkaita, joita kutsutaan tetraedri-, kiila- ja tiilikivielementeiksi. Elementin reunapinnat voivat olla tasoja. Tällöin elementti on lineaarinen. Ne voivat olla myös toisen asteen pintoja. Tällöin elementti on kvadraattinen. (Lähteenmäki 2006, 1.10) Kuvassa 4 on yksinkertainen sauva, jolle on muodostettu tiilikivielementeistä 3d-solidielementtiverkko käyttämällä Ansys Mechanical -ohjelmaa.



KUVA 4. Elementtiverkko

3.3 Väsyminen

Väsymisellä tarkoitetaan vaihtuvasta jännityksestä aiheutuvaa rakenneosassa tapahtuvaa säröjen ydintymistä ja kasvua (SFS-EN 1993-1-9, 7). Käytännössä siis väsymisen aiheuttama vaurio syntyy, kun kuormitus on dynaamista ja syklistä. Väsymisvaurion synty alkaa mikroskooppisen materiaalivian ympäriltä (Salmi & Pajunen, 2018, 355). Yli 50 prosenttia koneiden ja laitteiden rikkoutumisista aiheutuu väsymisestä (Salmi & Pajunen, 2018, 353). Tämän vuoksi väsymistarkastelun tekeminen on erittäin olennainen asia myös tarttujan lujuustarkastelua tehtäessä.

Tässä työssä käytettiin tarkasteltavina materiaaleina terästä ja alumiinia. Teräksen kimmokertoimeksi asetettiin 210 GPa ja poissonin luvuksi 0,3. Alumiinin kimmokertoimeksi tuli 70 GPa ja poissonin luvuksi 0,3.

Väsymislujuuden arvot teräkselle eri kuormitusmäärillä laskettiin kaavoilla 1, 2 ja 3 (Salmi & Pajunen, 2018, 360, 367).

$$\delta_{1000} = 0,9 \cdot R_m \quad (1)$$

$$\delta_w = 0,5 \cdot R_m \quad (2)$$

$$\delta_{w,red} = c_1 c_2 c_3 \dots \cdot \delta_w \quad (3)$$

Kaavoissa δ_{1000} tarkoittaa väsymislujuutta 1000 kuormitusyökin kohdalla. R_m tarkoittaa teräksen murtolujuutta. δ_w tarkoittaa teräksen vaihtolujuutta. Eli lujuutta miljoonan kuormitusyökin kohdalla. Vaihtolujuutta redusoidaan tarvittaessa pienemmäksi ($\delta_{w,red}$). Tässä työssä vaihtolujuutta redusoidtiin kertoimella 0,9. Näillä kaavoilla laskemalla saatiin teräksen S355 väsymislujuudeksi eri kuormitusmäärillä taulukon 1 mukaiset arvot. Teräksen S355 S/N -käyrästä muodostui kuvion 1 mukainen. Teräkselle S690QT taas saatiin väsymislujuudeksi taulukon 2 mukaiset arvot ja S/N -käyrästä muodostui kuvion 2 mukainen.

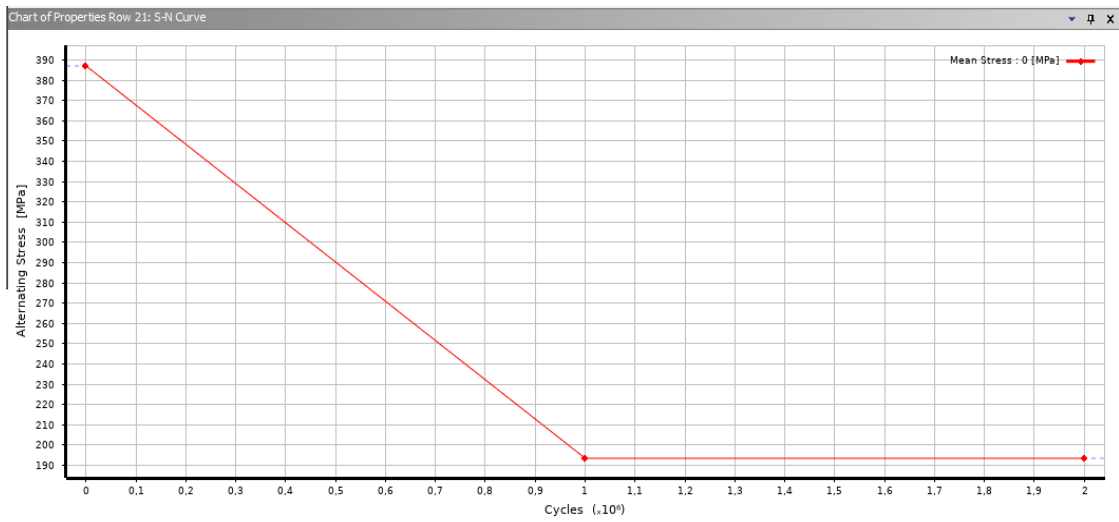
Väsymislujuus alumiinille 2024-T4 voidaan laskea kaavalla 4 (Faisal, Abbas, Hammadi 2016).

$$\delta = 855 \cdot N^{-0,109} \quad (4)$$

Kaavalla 4 laskemalla saatiin alumiinille taulukon 3 mukaiset arvot. Ne laitettiin Ansysiin alumiinin väsymislajuuden arvoiksi väsymistarkastelua varten. Alumiinin S/N –käyrästä tuli kuvion 3 mukainen. Tarkempi laskenta väsymislajuuksiin liittyen löytyy liitteestä 1.

TAULUKKO 1. Teräksen S355 väsymislajuuksien arvot

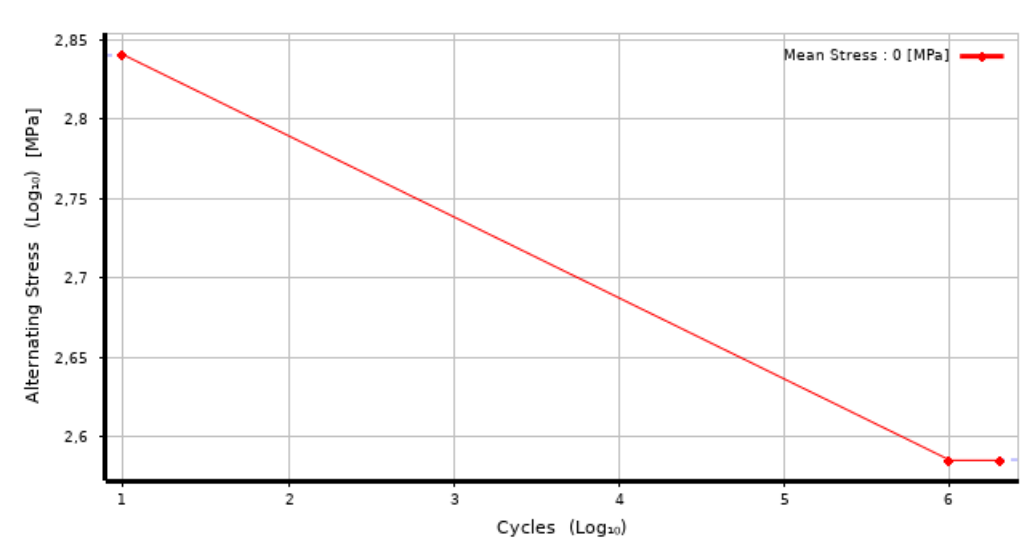
Teräs S355	
N	Jännitys
10	387
1000000	193,5
2000000	193,5



KUVIO 1. Teräksen s355 S/N -käyrä

TAULUKKO 2. Teräksen S690QT väsymislajuuksien arvot

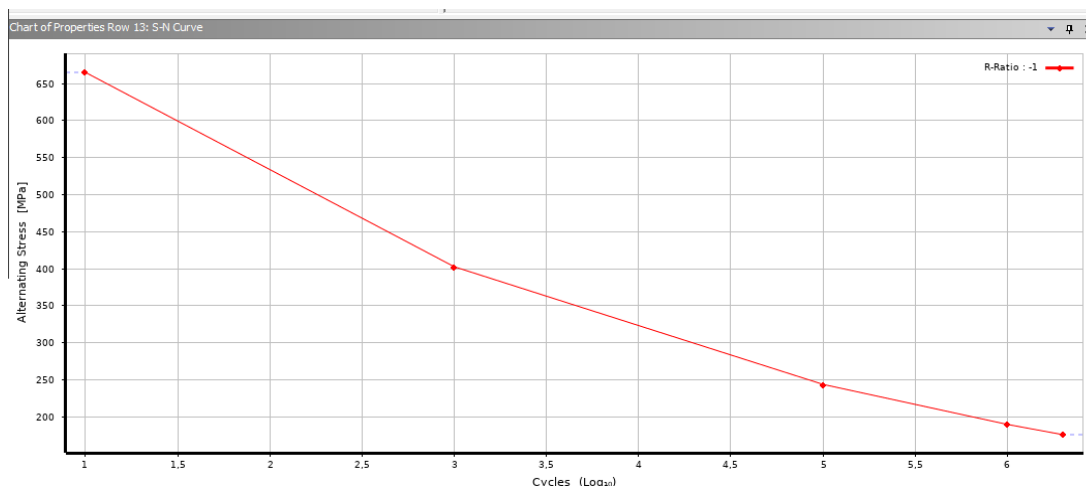
Teräs S690QT	
N	Jännitys [MPa]
10	693
1000000	385
2000000	385



KUVIO 2. Teräksen S690QT S/N -käyrä

TAULUKKO 3. Alumiini 2024-T4 väsymislujuus eri kuormitusyhteisissä

Alumiini 2024-T4	
N	Jännitys
10	665,22
1000	402,69
100000	243,76
1000000	189,66
2000000	175,85



KUVIO 3. Alumiinin 2024-T4 S/N -käyrä

Tarttujan käyttöäksi on siis tarkoitus saada 2 miljoonaa sykliä, joten S/N -käyrien maksimi jätettiin kahteen miljoonaan sykliin.

4 ANSYSIN KÄYTTÖ LUJUUSTARKASTELUSSA

4.1 Ansys Workbench

Päätyökaluna työssä oli Ansys Workbench -ohjelma. Ansys Inc. on perustettu vuonna 1970 ja he työllistävät yli 4400 ammattilaista. Ansys kehittää erilaisia ohjelmia insinöörikäyttöön. (Ansys 2021) Ansys Workbench on ohjelmakokonaisuus, jonka sisään on rakennettu erilaisia laskentaohjelmia. Tässä työssä käytetään pääasiassa Ansys Mechanical -ohjelmaa, joka on lujuuslaskentaohjelma.

4.2 Ansys-lisenssin rajoitukset

Työssä käytetty Ansys-lisenssi oli Tampereen ammattikorkeakoulun opetuskäyttöön tarkoitettu ja sen käytettävyydessä oli rajoitteita, jotka vaikuttivat laskentaan. Lisenssin tarkat rajat eivät tulleet työtä tehdessä selväksi. Elementtien ja solmujen sallitulla määrällä oli lisenssissä jonkinlainen rajoitus, joka ylittyi melko helposti. Näin ollen elementtien koko oli pakko pitää haluttua suurempana, varsinkin kolmen metrin mittaista tartuntavartta tarkasteltaessa.

4.3 Tarkasteltavat kuormitustapaukset

Tarttujan 3d-malli voitiin jakaa kuuteen osaan, niin että vain tarttujan tartuntavarsi ja käsivarret, sekä käsivarsien laakeripesät tulevat tarkasteltavaksi. Tämä voitiin tehdä, koska tarttujassa on kuusi tartuntavartta ja jokaiseen tartuntavarten liittyy akselilla käsivarsipari. Kaikkiin tartuntavarsiin ja käsivarsiin kohdistuu samat rasitukset. Kuudesosamalli taas voitiin jakaa kahteen osaan. Tartuntavarten ja yläosaan. Yläosa voitiin myös jakaa tarkasteltavaksi kahdessa osassa, koska käsivarret ovat peilikuvia toisistaan.

Käytännössä siis tehtiin Ansysissä tarkastelut seuraaville kuudelletoista tapaukselle:

1. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty terästä.
2. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty terästä ja paperirullat ovat nostettu niin, että vain tartuntavarren alempi tartuntalevy on käytössä
3. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty alumiinia.
4. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty alumiinia ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty terästä ja paperirullat ovat nostettu niin, että vain tartuntavarren alempi tartuntalevy on käytössä
5. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty terästä.
6. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty terästä ja paperirullat ovat nostettu niin, että vain tartuntavarren alempi tartuntalevy on käytössä
7. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty alumiinia.
8. Tartuntavarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarren osien materiaalina on käytetty alumiinia ja paperirullat ovat nostettu niin, että vain tartuntavarren alempi tartuntalevy on käytössä
9. Toisen käsivarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarren, sekä käsivarsien materiaalina on käytetty terästä.

10. Tapaus, joka on peilikuva edellisestä.
11. Toisen käsivarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarren, sekä käsivarsien materiaalina on käytetty alumiinia.
12. Tapaus, joka on peilikuva edellisestä
13. Toisen käsivarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarren, sekä käsivarsien materiaalina on käytetty terästä.
14. Tapaus, joka on peilikuva edellisestä
15. Toisen käsivarren kokoonpanon tarkastelu, kun paperirullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarren, sekä käsivarsien materiaalina on käytetty alumiinia.
16. Tapaus, joka on peilikuva edellisestä.

4.4 3d-mallin siivous

Ensimmäinen asia, mitä tulee tehdä, kun tehdään lujuustarkastelu Ansys Workbenchillä on 3d-mallin siivous lujuuslaskennan kannalta merkityksellistä ominaisuuksista. Mallin siivous helpottaa elementtiverkotuksena tekemistä, vähentää rakenteen tarkastelussa tarvittavien elementtien määrää ja näin nopeuttaa laskentaa huomattavasti. Ansysiin on sisäänrakennettuna kaksi mallinnusohjelmaa, joita voidaan käyttää mallin siivoukseen. Niillä voidaan toki myös valmistaa tarkasteltava malli. Ohjelmien nimet ovat SpaceClaim ja DesignModeler. Siivoukseen voidaan käyttää myös muita Ansysin ulkopuolisia mallinnusohjelmia.

Tässä työssä Ansys ei syystä tai toisesta suostunut toimimaan alkuperäisen mallin kanssa. Tämän vuoksi malli tehtiin kokonaan uudestaan SolidWorksilla.

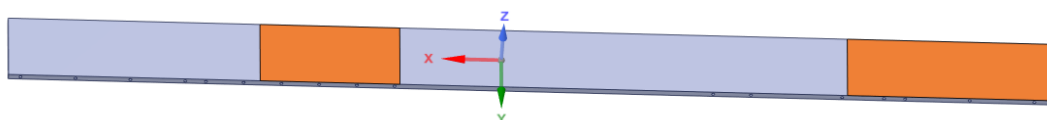
Kaikki osat mitattiin tarkasti alkuperäisestä mallista ja piirrettiin ne uudestaan. Samalla tuli tehtyä mallin siivous. Tartuntavarren, sekä yläosan malleihin päädyttiin myös lisäämään niistä puuttuneet pultit. Kaiken uudelleen tekeminen oli tietysti äärimmäisen aikaa vievä tapa tehdä mallin siivous, mutta muuta vaihtoehtoa ei tässä tapauksessa löytynyt.

4.5 Pintojen jakaminen

Mallissa olevien osien pintoja on hyvä jakaa osiin, jotta kontakteja tehdessä voidaan helpommin osoittaa kontaktipintoja. Pintojen jakaminen myös helpottaa elementtiverkon tekemistä ja mahdollisten verkotuksen tihennyksien tekemistä. Pintojen jakaminen on hyvä tehdä samalla, kun tehdään mallin siivousta. Ansysiin sisäänrakennetuilla mallinnusohjelmilla voidaan tehdä pintojen jakaminen erityisen helposti.

Tarttujan lujuustarkastelua tehtäessä käytettiin pintojen jakamiseen Ansysin sisäänrakennettua ohjelmaa SpaceClaim. Pintojen jakaminen tehtiin tässä työssä esimerkiksi tartuntalevyyn, jotta saatiin asetettua tartuntalevyyn kohdistuvat voimat oikeaan kohtaan. Pintoja jaettiin myös, jotta kontaktipinnat saatiin osoitettua oikein.

Kuvassa 4 on tarttujan tartuntavarren tartuntalevy, missä oranssilla maalatut pinnat ovat kohdat, joihin tarttujalla nostettavien paperirullien voimat tulevat kohdistumaan.



KUVA 4. Tartuntavarren tartuntalevy

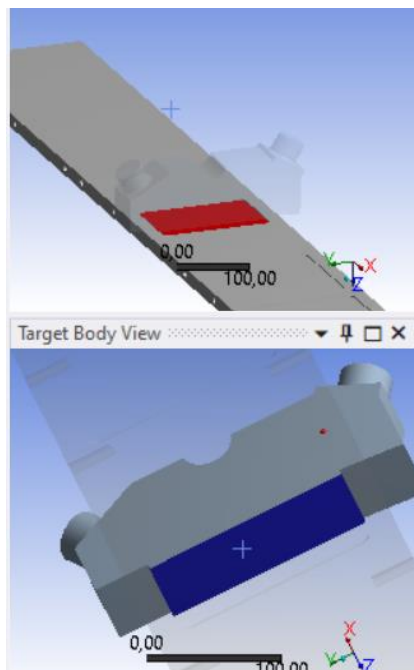
4.6 Materiaaliominaisuuksien asettaminen

Materiaaliominaisuudet asetetaan Ansysissä engineering data -välilehdeltä. Työssä käytettiin materiaaleina terästä ja alumiinia. Teräksen kimmokertoimeksi asetettiin 210 GPa ja poissonin luvuksi 0,3. Alumiinin kimmokertoimeksi 70 GPa ja poissonin luvuksi 0,3. Väsymislajuuden taulukoihin muutettiin materiaalien osalta arvot, jotka löytyvät taulukoista 1, 2 ja 3.

4.7 Kontaktit

Kontakteilla tarkoitetaan sitä, millä tavalla eri osien pinnat kokoonpanossa ovat kiinni toisissaan. Kontaktityyppinä on Ansysissä 5 kappaletta. Bonded, no separation, frictionless, frictional ja rough. Näistä kaksi ensimmäistä ovat lineaarisia ja kolme jälkimmäistä siis epälineaarisia. Ansys luo kontaktit kokoonpanolle automaattisesti. Kaikki tyypit ovat aluksi automaattisesti muotoa bonded. Bonded -kontakti tarkoittaa, että osat ovat kuin liimatut toisiinsa, ne eivät pääse liikkumaan toistensa suhteen mihinkään suuntaan.

Vaikka Ansys luo kontaktit automaattisesti, ne täytyy kuitenkin käydä läpi. Osa niistä on usein muutettava. Osa saatetaan joutua poistamaan kokonaan. Niin oli tässäkin työssä. Esimerkiksi kuvassa 5 ovat alakorvakkeen ja tartuntalevyn kontaktipinta oikein asetettuna. Alkuperäinen Ansysin luoma kontaktipinta oli sellainen, että koko alakorvakkeen pohja on kiinnitetty koko tartuntalevyyn. Tällä tavalla laskettuna alakorvakkeen jännityshuipuksi saatiin noin 20 prosenttia suurempi tulos, kuin oikein asetetulla kontaktilla laskettuna.



KUVA 5. Kontaktipintaesimerkki

Lisenssin rajoitusten vuoksi ei voitu tehdä pulttiliitosten simulointia täysin oikein. Jos tutkittaisiin pulttiliitoksen pulttien kestävyyttä, tulisi kontaktipintojen tyyppiä muokata epälineaariseksi, lisätä jokaiseen pulttiin esikiristysvoima, sekä hienontaa pulttien kontaktipintojen verkotusta. Tämä kaikki ei ole mahdollista käytettävissä olevalla Ansys-lisenssillä näin suureen kokoonpanoon. Liitokset simuloitiin nyt Ansykseen oletuksella, että pulttiliitos kestää, eikä osien välillä tapahdu merkittävää liukumista.

4.8 Verkotus

Mesh-kohdassa tehdään tarkasteltavalle rakenteelle elementtiverkko. Elementtiverkon voi tehdä niin, että ohjelma päättää kaikista asetuksista. Mutta tehtäessä laadukasta elementtiverkkoa on tehtävä asetuksiin muutoksia.

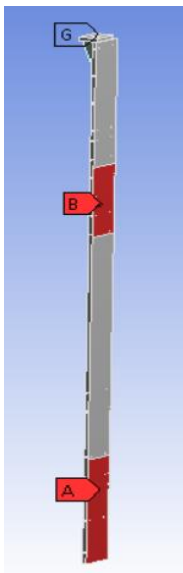
Tässä työssä verkon muodostamisessa jouduttiin tekemään kompromisseja lisenssin rajoitusten vuoksi. Verkotuksesta tehtiin vain niin laadukas kuin lisenssillä oli mahdollista tehdä käytännössä kokeilemalla erilaisia asetuksia ja laskeamalla tuloksia verkon eri asetuksilla. Jännityshuippu eri rakenteissa pysyi noin 50 MPa:n sisällä, kun elementtiverkon tyyppiä koitettiin vaihdella. Nimellisjännitykset pysyivät suunnilleen samalla tasolla elementtityypistä riippumatta.

Ensimmäisten laskentakertojen jälkeen tehtiin tarkasteltavissa osissa verkon hienonnus niihin kohtiin, mihin vaikutti muodostuvan jännityshuippu. Verkon hienonnuksen avulla saatiin selville suuremmalla todennäköisyydellä todelliset jännityshuiput osissa.

4.9 Voimien ja reunaehtojen asettaminen

Seuraavaksi asetettiin rakenteen kiinnitykset ja rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset voimat.

Tässä työssä tartuntavarteen kohdistui 37,5 kN voima kahteen eri kohtaan, kun tarkasteltiin tapausta, missä paperirullien halkaisija on 2000 mm. Kuvassa 6 on tartuntavarsi, josta on poistettu kaikki muut osat paitsi tartuntalevy ja tukilevyt, joista tartuntavarsi kiinnittyy aksiaalisesti yläosan käsivarsiin. Kuvassa punaisella maalattuihin alueisiin kohdistuu voima, joka on 2000 mm paperirullia nostettaessa 37,5 kN ja 900 mm paperirullia nostettaessa noin 20 prosenttia siitä.



KUVA 6. Tartuntavarteen kohdistuvat voimat ja yläosan kiinnitys

Käsivarsia tarkasteltaessa tehtiin oletus, että tartuntavarrelta tuleva kuorma jakautuu tasaisesti molempien käsivarsiparien kesken. Tämän vuoksi molempien

käsivarsiparien tarkastelu voitiin tehdä erikseen ja elementtiverkkoa pystyttiin hienontamaan enemmän kuin, jos käsivarsiparit olisi tarkasteltu yhdessä.

Tartuntavarren paino teräksisenä ja alumiinisena selvitettiin SolidWorksin avulla ja molempien tapauksen SolidWorksin ilmoittamaan painoon lisättiin 20 kilogrammaa lisää varmuuden vuoksi. Tartuntavarrelta käsivarsille siirtyvien kuormien laskennassa käytettiin apuna nosturistandardin osaa SFS-EN 13001-2. Standardin kautta pyrittiin selvittämään tartuntavarren omasta massasta ja paperirullien massasta syntyvät dynaamiset vaikutukset yläosan kokoonpanoon, kun paperirullia lähdetään nostamaan lattialta. Kuormaan vaikuttava dynaaminen kerroin lasketaan nosturistandardin (SFS-EN 13001-2, 11) mukaan kaavalla 5.

$$\phi_2 = \phi_{2,min} + \beta_2 v_h \quad (5)$$

ϕ_2 tarkoittaa dynaamista kerrointa. β_2 on nosturin jäykkyyssluokasta riippuva kerroin. v_h on kuorman tapauskohtainen nostonopeuden viitearvo ja sen yksikkö metriä sekunnissa. $\phi_{2,min}$ on dynaamisen kertoimen minimiarvo, joka saadaan taulukosta. Dynaamiseksi kertoimeksi nostettavalle kuormalle laskettiin kaavan 5 mukaan 1,4. Eli rullien paino kerrottiin kertoimella 1,4. Tartuntavarren oman painon dynaamiseksi kertoimeksi valittiin 1,1. Nosturistandardin (SFS-EN 13001-2, 11) mukaan, oman massan aiheuttaman kuormitusvaikutuksen ollessa epäsuotuisa, dynaaminen kerroin on välillä 1 ja 1,1. Kertoimeksi valittiin mahdollisimman epäsuotuisa parempien tietojen puutteessa.

Käsivarsille tulevaksi kuormaksi tapauksessa, missä rullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarsi valmistettu teräksestä laskettiin 27640 N. Tapauksessa, missä rullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarsi valmistettu teräksestä kuormaksi laskettiin 7039 N. Tapauksessa, missä rullien halkaisija on 2000 mm ja tartuntavarsi valmistettu alumiinista, kuormaksi laskettiin 26561 N. Tapauksessa, missä rullien halkaisija on 900 mm ja tartuntavarsi valmistettu alumiinista, kuormaksi laskettiin 5960 N. Kuormien laskenta on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

Tehtiin oletus, että jos tartuntavarsi on valmistettu teräksestä, myös käsivarret valmistetaan teräksestä. Samoin oletettiin, että jos tartuntavarsi on valmistettu alumiinista, myös käsivarret valmistetaan alumiinista. Eli ei laskettu tapausta,

missä käsivarret ovat alumiinisia ja niille tuleva kuorma sellainen, että tartuntavarsi on teräksestä valmistettu.

4.10 Tuloksien tarkastelu

Kaikissa kuudessatoista tarkasteltavassa kuormitustapauksessa valittiin laskettavaksi taipuma ja ekvivalentti von mises -jännitys. Lisäksi tehtiin väsymistarkastelu, jokaisen kriittiseksi arvioidun osan kohdalla kuormitustapauksessa, missä osaan kohdistui suurin jännityshuippu. Paprotecille tehtyyn raporttiin sisällytettiin kuvat Ansysin laskennan tuloksista kaikissa tarkasteltavissa kuormitustapauksissa kaikilla materiaaleilla tutkittuna.

Tartuntavarren taipuma oli materiaalin ollessa terästä suurimmillaan 1,61 mm. Suurin taipuma syntyi tapauksessa, missä nostettiin 2000 mm halkaisijan paperirullia, mutta vain alempi tartuntapinta oli käytössä. Alumiinisena suurin taipuma laskettiin samasta kuormitustapauksesta. Tartuntavarren taipuma oli tällöin 4,82 mm.

Alakorvakkeen suurin jännityshuippu saatiin molemmilla tarkastelluilla materiaaleilla tapauksessa, missä nostetaan 2000 mm halkaisijaisia paperirullia ja molemmat tartuntapinnat ovat käytössä. Tällöin jännityshuippu oli teräksisenä 253 MPa. Alumiinisena 246 MPa.

Yläkorvakkeen suurin jännityshuippu saatiin molemmilla tarkastelluilla materiaaleilla samassa tapauksessa kuin alakorvakkeellakin. Tällöin yläkorvakkeen jännityshuippu oli molemmilla tarkastelluilla materiaaleilla 212 MPa.

Käsivarsien kokoonpanon suurimmaksi taipumaksi saatiin materiaalin ollessa terästä 1,31 mm ja materiaalin ollessa alumiinia 3,22 mm. Suurin taipuma syntyi nostettaessa 2000 mm kokoisia paperirullia.

Ulompien käsivarsien maksimijännitykseksi saatiin 243 MPa (teräs) ja 224 MPa (alumiini). Molemmat kuormitustapauksessa, missä nostetaan 2000 mm kokoisia paperirullia.

Sisempien käsivarsien maksimijännitykseksi saatiin 211 MPa (teräs) ja 175 MPa (alumiini). Molemmat kuormitustapauksessa, missä nostetaan 2000 mm kokoisia paperirullia.

Ulompien laakeripesien jännitys oli suurimmillaan 130 MPa käsivarsien ollessa teräksisiä. 156 MPa käsivarsien ollessa alumiinisia. Sisempien laakeripesien jännitys oli suurimmillaan 119 MPa käsivarsien ollessa teräksisiä. 113 MPa käsivarsien ollessa alumiinisia.

Tarttujaan kohdistuva kuormitus oli tykyttävää, joten Ansysissä valittiin väsymistarkastelun tyyppiä zero-based. Teoriatyyppiä valittiin Goodmanin teoria. Tuloksiksi saatiin, että teräksestä valmistettuna kaikki osat kestävät halutun 2 miljoonaa kuormituskertaa molemmilla tarkastelluilla terästyypeillä. 2024-T4 alumiinista valmistettuna kaikki muut osat paitsi alakorvake kestävät halutun 2 miljoonaa kuormituskertaa. Teräksien S355 ja S690Qt varmuuskertoimet väsymisen suhteen olivat pienimmillään alakorvakeessa. Teräksellä S355 varmuuskerroin oli pienimmillään 1,07. Teräksellä S690QT varmuuskerroin taas oli pienimmillään 2,01.

Tuloksista saatiin siis selville, että materiaalin ollessa terästä, saavutetaan haluttu väsymiskestävyys molemmilla tarkastelluilla terästyypeillä. Myöskään myötöraja ei ylity missään kuormitustapauksessa. Sallituille muodonmuutoksille ei ollut määritelty tarkkaa rajaa. Käytetyn laskentamallin mukaan muodonmuutokset jäävät niin pieniksi, että voidaan sanoa, ettei niistä muodostu ongelmia tarttujan käytettävyydelle. 2024-T4 alumiinista valmistettuna tarttuja ei saavuta haluttua väsymiskestävyyttä käytetyn laskentamallin mukaan.

5 POHDINTA

Työssä piti tehdä lujuustarkastelu tarttujalle, jota käytetään paperirullien siirte-lyyn varastossa. Työtä oli rajattu niin, että tarkastelu tehdään vain tietyille kriittisille osille. Työssä onnistuttiin selvittämään asiat, jotka oli tarkoituksena selvittää, mutta Ansys -lisenssin rajoitusten vuoksi jouduttiin tekemään yksinkertaisuuksia kokoonpanon kontaktien ja elementtiverkon laadun kanssa.

Jouduttiin myös tekemään oletuksia esimerkiksi tartuntavarren oman massan suhteen, koska tarttujaa ei ole vielä koskaan valmistettu eikä kaikkea tietoa ollut saatavilla. Näiden syiden vuoksi tuloksien tarkkuus ei välttämättä vastaa täysin todellista tilannetta. Elementtien tyyppiä ja kokoa muuttamalla eri osien jännityshuiput saattoivat vaihdella noin 50 MPa:n sisällä. Nimellisjännitykset kuitenkin pysyivät osissa melko samalla tasolla elementeistä riippumatta.

Ansysillä lasketut tulokset olivat suuruusluokaltaan järkeviä. Taipuma oli aina noin kolminkertainen, kun osat olivat valmistettu alumiinista verrattuna teräksestä valmistettuihin. Näin tulisikin olla, koska teräksen kimmokerroin on kolminkertainen alumiinin kimmokertoimeen verrattuna.

Tehdyn simuloinnin perusteella saatiin selville, että tarkastellut osat kestävät niiltä vaaditut kuormitukset ja väsymiskestävyudessa saavutetaan nosturistandardin mukainen U-luokka U7, kun osat valmistetaan teräksestä. Alumiinista 2024-T4 valmistettuna tarttuja ei simuloinnin perusteella saavuta haluttua U-luokkaa, koska alakorvakkeen väsymiskestävyys ei ollut kahta miljoonaa kuormituskertaa. Jos halutaan valmistaa osat alumiinista, tulisi valita alumiinityyppi, jonka väsymislujuus on parempi kuin 2024-T4 alumiinilla.

Saatujen tuloksien perusteella tehtiin jatkotarkastelua ja tutkittiin, kuinka rakenteita voisi muuttaa, jotta ne kestäisivät niiltä vaadittavat kuormitukset paremmin. Itse asiassa jo tarkastelun teon aikana muokattiin kertaalleen alakorvakkeen ja yläkorvakkeen rakennetta, jotta niihin kohdistuvan jännityksen huippu saataisiin pienemmäksi.

Laskettiin, että jos alakorvakkeen pituutta kasvatettaisiin symmetrisesti 3 millimetriä molempiin suuntiin tartuntavarren pituuden suunnassa, niin alakorvakkeeseen kohdistuva maksimijännitys putoaisi noin 40 MPa. Jos näin tehtäisiin, niin yläkorvakkeen jännityshuippu olisi käytännössä sama kuin alakorvakkeella. Rakenne kestäisi tämän muutoksen jälkeen laskentamallin mukaan myös 2024-T4 alumiinisena halutun kuormitusmäärän 2 miljoonaa sykliä.

Samoin kokeiltiin kasvattaa käsivarsien seinämien ainevahvuutta neljästä millimetristä viiteen millimetriin. Tällöin jännityshuippu pieneni 23 MPa, mutta samalla tosin ulompaan laakeripesään kohdistuva jännityshuippu kasvoi. Ei kuitenkaan niin paljon, että siitä tulisi ongelmia.

Tässä työssä laskettujen tulosten perusteella pitäisi pystyä muokkaamaan osien rakenteita niin, että ne kestävät niille kohdistuvat kuormitukset paremmin. Prototyypin valmistuksen jälkeen tulisi kuitenkin tehdä lujuustarkastelu uudestaan.

LÄHTEET

ANSYS 2020. Luettu 1.2.2021. <https://www.ansys.com/about-ansys>

Expo21xx. Luettu 2.3.2021. <https://www.expo21xx.com/news/demag-crane-technology-largest-paper-roll-shipping-store-world/>

Faisal B.M, Abass A.T., Hammadi A.F. 2016. Fatigue Life Estimation of Aluminum Alloy 2024-T4 and Fiber Glass-Polyester Composite Material. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 03/2016. <https://www.irjet.net/archives/V3/i6/IRJET-V3I6327.pdf>

Lammi A., Lammi M. Haastattelu. Haastateltu 25.11.2020

Lammi M. 2014. Three successful decades in materials handling. World Pulp & Paper 2014. s. 91-94.

Lähteenmäki M. 2006. Elementtimenetelmän perusteet. Luettu 18.2.2021. https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

Paprotec Oy. 2016. Luettu 18.1.2021. <https://www.paprotec.fi/>

Salmi T., Pajunen S. 2018. Lujuusoppi. Tampere. Pressus Oy.

SFS-EN 13001-1 Nosturit. Yleissuunnittelu. Osa 1: Yleiset periaatteet ja vaatimukset. 18.5.2015.

SFS-EN 13001-2 Nosturit. Yleissuunnittelu. Osa 2: Kuormitukset. 1.9.2014.

SFS-EN 1993-1-9 Eurocode 3: Teräsrakenteiden Suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen 15.8.2005

LIITTEET

Liite 1. Väsymislujuuksien laskenta

Teräksen s355 murtolujuus $R_m := 430 \text{ MPa}$

Teräksen väsymislujuus 1000 syklin kohdalla

$$\sigma_{1000} := 0.9 \cdot R_m = 387 \text{ MPa}$$

Teräksen väsymislujuus miljoonan syklin kohdalla, eli vaihtolujuus

$$\sigma_w := 0.5 \cdot R_m = 215 \text{ MPa}$$

Redusoitu vaihtolujuus

$$\sigma_{wred} := 0.9 \cdot \sigma_w = 193.5 \text{ MPa}$$

Alumiinin 2024-T4 väsymislujuus eri kuormitusykykleissä voidaan laskea kirjallisuuden mukaan seuraavalla kaavalla:

$$\sigma := 855 \cdot N^{-0.109} \text{ MPa}$$

$$N := 10$$

$$\sigma = 665.2213 \text{ MPa}$$

$$N := 1000$$

$$\sigma = 402.6856 \text{ MPa}$$

$$N := 100000$$

$$\sigma = 243.7621 \text{ MPa}$$

$$N := 1000000$$

$$\sigma = 189.6558 \text{ MPa}$$

$$N := 2000000$$

$$\sigma = 175.8546 \text{ MPa}$$

Liite 2. Yläosan kuormitusten laskenta

18 helmi 2021 16.50.42 - kuormat.sm

Halkaisija 2000 mm Materiaali teräs

Tartuntavarren arvioitu paino $T_b := 350 \text{ kg}$ Dynaaminen kerroin omalle painolle $\phi_1 := 1.1$ Paperirullien paino $P := 22500 \text{ kg}$ Dynaaminen kerroin kuormalle $\phi_2 := 1.4$

$$\text{Kuorma} \quad F := \frac{\phi_1 \cdot T_b \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} + \frac{P \cdot \phi_2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{12} = 27.6397 \text{ kN}$$

Ensimmäinen tekijä jaetaan kahdella, koska käsivarret jaettu tarkastelussa kahteen osaan
 Toinen tekijä jaetaan 12, koska yhdelle tartuntavarrelle tulee kuudesosa rullien painosta
 Tästä kuudesosasta taas puolet jakautuu yhdelle käsivarrelle, koska käsivarret tarkastellaan
 kahdessa osassa

TAPAUS 2: Halkaisija 2000 mm Materiaali alumiini

Tartuntavarren arvioitu paino $T_b := 150 \text{ kg}$ Dynaaminen kerroin omalle painolle $\phi_1 := 1.1$ Paperirullien paino $P := 22500 \text{ kg}$ Dynaaminen kerroin kuormalle $\phi_2 := 1.4$

$$\text{Kuorma} \quad F := \frac{\phi_1 \cdot T_b \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} + \frac{P \cdot \phi_2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{12} = 26.5606 \text{ kN}$$

TAPAUS 3: Halkaisija 900 mm Materiaali teräs

Tartuntavarren arvioitu paino $T_b := 350 \text{ kg}$

Dynaaminen kerroin omalle painolle $\phi_1 := 1.1$

Paperirullien paino $P := 4500 \text{ kg}$

Dynaaminen kerroin kuormalle

1/2

18 helmi 2021 16.50.42 - kuormatsm

$\phi_2 := 1.4$

Kuorma

$$F := \frac{\phi_1 \cdot T_b \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} + \frac{P \cdot \phi_2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{12} = 7.0387 \text{ kN}$$

TAPAUS 4: Halkaisija 900 mm Materiaali alumiini

Tartuntavarren arvioitu paino $T_b := 150 \text{ kg}$

Dynaaminen kerroin omalle painolle $\phi_1 := 1.1$

Paperirullien paino $P := 4500 \text{ kg}$

Dynaaminen kerroin kuormalle

$\phi_2 := 1.4$

Kuorma

$$F := \frac{\phi_1 \cdot T_b \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2} + \frac{P \cdot \phi_2 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{12} = 5.9596 \text{ kN}$$