

Janek Ploompuu

Teräsprofiilien FEM-laskennan todentaminen

Syväkuormausvarasto

Opinnäytetyö

Kevät 2012

Tekniikan yksikkö

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kone- ja tuotantotekniikan Suuntautumisvaihtoehto



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Janek Plooppuu

Työn nimi: Teräsprofiilien FEM-laskennan todentaminen

Ohjaaja: Matti Tervonen

Vuosi: 2012

Sivumäärä: 43

Liitteiden lukumäärä: 3

Tämä opinnäyte tehtiin Pesmel Oy:lle, joka toimii maailmanlaajuisesti ja on erikoistunut materiaalinkäsittelyyn. Alkusysäys työn tekemiselle oli Pesmel Oy:n mekaniikkasuunnittelu, joka perustuu FEM-analyysiin. Suunnitteluosasto halusi saada kokeellista tietoa omista laskelmistaan.

Aiheena opinnäytteessä oli FEM-analyysin varmentaminen käyttäen hyväksi venymäliuskamittausta. Tulosten saaminen oli äärimmäisen tärkeää Pesmel Oy:lle sillä varastoissa käytetyistä profiileista oli hyvin vähän tutkimustietoa Pesmel Oy:n sovelluksista. Työ koostuu FEM-analyysistä ja venymäliuskamittauksesta sekä näiden kahden vertailusta toisiinsa.

Tärkeänä osana työtä oli myös teoreettinen tieto venymistä, jännityksistä ja niiden yhteyksistä toisiinsa. Työssä käytiin myös läpi mittauskaluston toimintaperiaate ja käyttö.

Avainsanat: FEM, Tuotekehitys, Mittausmenetelmät, Lujuusoppi, Mekaniikka

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical and Production Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author: Janek Ploompuu

Title of thesis: Verifying the FEM-calculation of the steel profiles

Supervisor: Matti Tervonen

Year: 2012

Number of pages: 43

Number of appendices: 3

This thesis was done for Pesmel Oy that is specialized in material handling and is known worldwide. The reason for making this thesis was the mechanical engineering department of Pesmel Oy whose designing is based on the FEM-analysis. They wanted to get experimental data of their designs.

The subject of this thesis was to verify the FEM-calculation by means of using the strain gage measurements. Getting the results was extremely important for Pesmel Oy because there is a very small amount of experimental data of the profiles that could be exploited by Pesmel Oy. The content of this thesis consists of the FEM-analysis, strain gage measurements and comparing the both results.

An Important part of this thesis was also the gathering of the theoretical information about the strain, tension and the relation between them. Furthermore this thesis tells you the working principle of the measuring equipment and how to use them.

Keywords: FEM, Product development, measurement methods, strength of materials, mechanics

SISÄLTÖ

OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ	1
THESIS ABSTRACT	2
SISÄLTÖ	3
KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET	5
KUVIOLUETTELO	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Tausta	8
1.2 Tavoite	8
1.3 Pesimal Oy	8
1.4 Lähtötilanne	10
1.5 Työn rajaus	10
2 TESTISOLUN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN	11
3 TEORIA	13
3.1 Venymä	13
3.2 Venymän ja jännityksen yhteys	13
3.2.1 Hooken-laki	14
3.2.2 Tasojännitystila	15
3.3 Venymäliuska	17
3.3.1 Kehitys ja historia	17
3.3.2 Toimintaperiaate	18
3.3.3 Wheatstonen silta	19
3.3.4 Venymäliuskojen valinta	19
3.3.5 Käyttö	20
3.3.6 Jännite ja venymä	20
3.3.7 Mittaustulokset jännityksiksi	21
4 FEM-ANALYYSI	23
4.1 FEM	23

4.2 ANSYS.....	23
4.3 Mallinnus ja laskennan valmistelu	24
5 FEM-LASKENNAN VARMENTAMINEN	
VENYMÄLIUSKAMITTAUKSELLA.....	26
5.1 Mittalaitteisto (FE-MM16)	26
5.1.1 Asennus.....	27
5.1.2 Kalibrointi	28
5.2 Venymäliuskakoe	29
5.2.1 Mittauspisteiden valinta.....	29
5.2.2 Kokeen valmistelu.....	31
5.2.3 Tulokset	32
5.2.4 Virhearviointi	34
6 ANALYSOINTI	36
6.1 Ajoprofiili	36
6.2 Sigmaprofiili	36
6.3 Päätelmät.....	38
7 YHTEENVETO.....	40
LÄHTEET.....	41
LIITTEET.....	43

Käytetyt termit ja lyhenteet

FEM	Finite Element Method, Elementtimenetelmä, käytetään pääasiallisesti lujuuslaskennoissa. Tunnetaan myös termillä FEA.
KF	Liuskan suhteellisen vastuksen muutoksen ja venymän välinen verrannollisuuskerroin.
FE-MM16	Fylden valmistama vahvistinkorttien kotelo
FE-366-TA	Fylden valmistama kaksikanavainen vahvistinmoduuli, jossa mahdollista täysi-, puoli- ja neljäsosasiltakytkentä.
Keskipintamalli	Kappaleen ylä- ja alapinnan keskellä kulkeva pinta.
Tilavuusmalli	3D-mallinnuksessa yleisimmin käytetty malli josta voidaan laskea esimerkiksi painopiste ja hitausmomentti.
Homogeeninen	Yhtenäinen, aineksiltaan tasakoosteinen. Materiaaliominaisuudet vakiota, eli paikoista riippumattomia.

Kuvioluettelo

KUVIO 1. Syväkuormausvarasto	9
KUVIO 2. Hyllystön testisolu	10
KUVIO 3. Testisolu rakenteilla	12
KUVIO 4. Venymäpiirros teräs	14
KUVIO 5. Lord Kelvinin metallilankakoe	18
KUVIO 6 Universaalien venymäliuskan rakenne.....	18
KUVIO 7. Wheatstonen silta	19
KUVIO 8. Venymäliuskarusetit.....	20
KUVIO 9. Venymäliuskojen teoreettinen ja kokeen asettelu	21
KUVIO 10. Laskentamallin pyörästön geometria.	24
KUVIO 11. FE-MM16 Mittalaitteisto	26
KUVIO 13. KytKentäohje neljännessiltakytkentään	28
KUVIO 14. Mittauspiste 1 (1400 mm)	30
KUVIO 15. Mittauspiste 2 (Ajoprofiili).....	30

KUVIO 16. Mittauspiste 3 (1000 mm) vasen ja piste 4 (1200 mm) oikea.....	30
KUVIO 17. Venymäliuskan liimaus ja kolmiliuskainen venymäliuskarusetti.....	31
KUVIO 18. Venymäliuskan suojaus ja vedon poisto.....	32
KUVIO 19. Sigmaprofiilin tulokset.....	33
KUVIO 20. Ajoprofiilin tulokset.....	33
KUVIO 21. Virhearvioita.....	35
KUVIO 22. Ajoprofiilin tulokset ja FEM-laskenta.....	36
KUVIO 23. Sigmaprofiili 1000 mm jako.....	37
KUVIO 24. Sigmaprofiili 1400 mm jako.....	37
KUVIO 25. Sigmaprofiili 1200 mm jako.....	38

1 Johdanto

1.1 Tausta

Työn lähtökohtana oli Pesmel Oy:n mekaniikkasuunnittelu, joka perustuu FEM-laskentaan. Suunnittelijat halusivat käytännön tietoa tuotteidensa materiaalien kestävydestä ja täten tuottaa materiaalisäästöjä suurissa, miljoonia kiloja sisältävissä projekteissa. Mikäli laskennassa ja mittauksissa on suuria eroja, syiden selvittäminen on tärkeää.

1.2 Tavoite

Tavoitteena oli selvittää Pesmel Oy:n käyttämien teräsrakenteiden FEM-laskennan yhdenpitävyys verrattuna todelliseen tilanteeseen. Materiaalitutkimuksen tarkoituksena oli laskentamallin paikkansapitävyyden selvittäminen. Mikäli eroavaisuutta on havaittavissa laskennan ja mittausten välillä, mallin uusiminen on aiheellista. Tämän selvityksen tarkoituksena on myös auttaa kestoikälaskennoissa, sillä varsinaista kokeellista tietoa käytettävistä teräsprofileista ei ole Pesmel Oy:n sovelluksista.

1.3 Pesmel Oy

Pesmel Oy on Kauhajoelle perustettu varastoautomaatioon erikoistunut automaatio-osaaja. Yritys perustettiin 1978 kahden veljeksien aloitteesta ja sittemmin yritys on paisunut maailmanlaajuiseksi automaatio-osaajaksi. Suurimmalla osalla yrityksen työntekijöistä on korkeakoulutason tutkinto, jolloin osaaminen ja tasaiseen laatuun pyrkiminen on etusijalla kaikessa, mitä Pesmel Oy tuottaa. Laatujärjestelmä, joka on Pesmel Oy:ssä käytössä, on ISO 9001:2000 sertifikaatin mukainen.

Yrityksen maailmanlaajuutta voidaan tällä hetkellä kuvata sillä, että Pesmel Oy:llä on tytäryhtiö tai toimipisteitä seitsemässä eri maassa, mukaan lukien Yhdysvallat ja Intia. (Pesmel Oy, [Viitattu 19.7.2011].)

Pesmelin toiminta perustuu asiakaslähtöisyyteen, jolla pyritään täyttämään asiakkaan vaatimukset. Tämän johdosta asiakas pääsee olemaan mukana tuotteensa suunnittelussa ja vaikuttamaan sen lopputulokseen. Muutoin itse laitteiden osien valmistus tehdään pitkälti alihankintatyönä. (Pesmel Oy, [Viitattu 19.7.2011].)

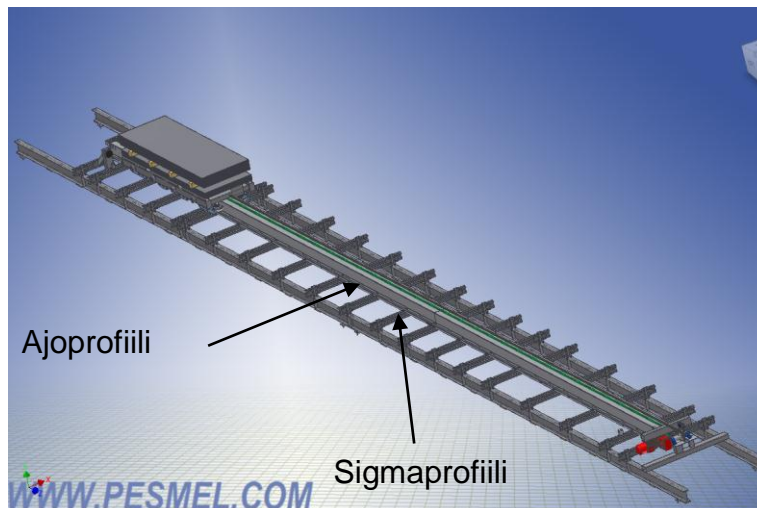
Yksi monista varastotyypeistä, joita Pesmel Oy valmistaa, on syväkuormausvarasto (KUVIO 1). Tämä perustuu syväkuormausteknologiaan, joka soveltuu varastointiin, jossa volyyymi on suuri. Käytännössä syväkuormauksella tarkoitetaan esimerkiksi paperirullien varastointia peräkkäin samaan kanavaan, josta tarpeen vaatiessa siirtovaunu käy poimimassa rullan ja vie sen ulostulokanavaan. Toinen etu, mikä saavutetaan syväkuormausvarastoilla, on rakennemateriaalin pienempi määrä verrattuna perinteisiin korkeavarastoihin. Näin ollen rakenne on myös stabiilimpi, mikä on tärkeä seikka etenkin maanjäristysalueilla. (Pesmel Oy, [Viitattu 19.7.2011].)



KUVIO 1. Syväkuormausvarasto. (Pesmel Oy, [viitattu19.7.2011].).

1.4 Lähtötilanne

Työ on aloitettu opinnäytetyöntekijän ollessa työharjoittelussa, jolloin hänen tehtäväkseen tuli suunnitella testisolun teräsprofiilien testaamista varten (KUVIO 2). Testisolun tarkoitus oli simuloida syväkuormausvaraston teräsprofiileihin kohdistuvia kuormia. Testillä haettiin myös vaihtoehtoisia ratkaisuja teräsprofiilien käyttöön. Projektin laajuudesta johtuen ei tässä työssä käydä itse solun suunnittelua kuin pintaa raapaisten.



KUVIO 2. Hyllystön testisolu (Pesmel Oy, [viitattu19.7.2011].)

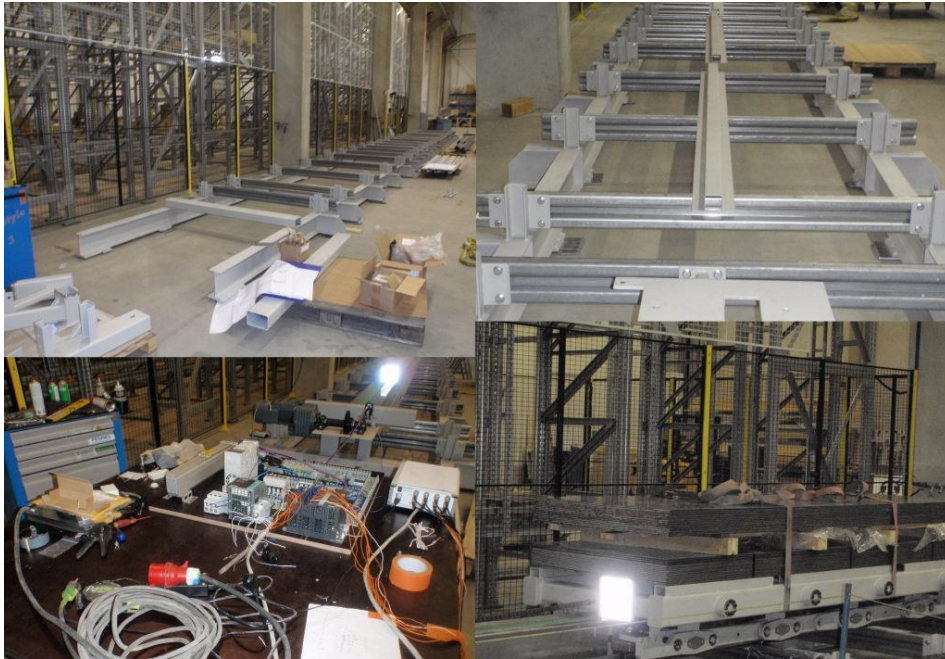
1.5 Työn rajaus

Tarkoituksena on selvittää, kuinka FEM-laskenta on mahdollista varmentaa käytämällä venymäliuskamittausta ja todentaa teräsprofiilien laskenta. Tämän ohessa selvitetään, mikä on venymän ja jännityksen yhteys, ja käydään pintapuolisesti läpi venymäliuskan ja kokeessa käytettyjen laitteiden rakenne ja toiminta.

Tärkeimpään rooliin työssä tulee kuitenkin lopussa tehtävä tulosten analysointi, joka on työn vaativin osa-alue. Tämän lisäksi käydään läpi mahdolliset virheiden aiheuttajat syy-seuraus-periaatteella.

2 Testisolun suunnittelu ja rakentaminen

Testisolun suunnittelu lähti käyntiin tarpeesta selvittää FEM-analyysin tulosten luotettavuus varsinkin laskennoissa, jotka koskevat syväkuormausvarastojen ajokanavien sigmaprofiileja. Tämän tarpeen aiheuttamana opinnäytteen kirjoittaja aloitti solun suunnittelun työharjoittelunsa aikana. Ensimmäisenä tehtävänä oli tietysti tutustua syväkuormausvarastoihin ja sitten aloittaa testisolun piirtäminen. Testisolun tarkoituksena oli siis simuloida mahdollisimman hyvin alkuperäistä varastoa, mutta kustannussyistä koko varastoa ei tulisi rakentamaan. Pitkän suunnittelun tuloksena rakennettiin yhtä varaston kanavaa simuloiva solu, johon sitten tehtiin eri jakoväleillä tukiprofiileja, joita tulisi tutkimaan venymäliuskamittauksella solun valmistuttua. Toinen tärkeä kriteeri solua suunniteltaessa oli siirtovaunun todenmukaisuus. Tällä tarkoitetaan sitä, että siirtovaunusta ajoprofiiliin siirtyvän voiman pitäisi olla mahdollisimman lähellä todellisen vaunun massasta aiheutuvaa voimaa. Suunnittelun ehtona oli myös tehdä niin sanottu tyhmä vaunu, jossa ei olisi sähköjä ja päällä kuorma, joka simuloisi todellista vaunua. Tämän lisäksi vaunusta tehtiin lyhyempi kuin todellisesta, mutta pyörästä tämän alla pidettiin alkuperäisenä. Myös siirtovaunun todellinen kuorma, joka oli paperirullia, korvattiin testisolussa levynipuilla. Suunnittelun päätyttyä opinnäytteen tekijä kokoonpani solun Kauhajoella (KUVIO 3) Pesimal Oy:n tuotantohallissa.



KUVIO 3. Testisolu rakenteilla

3 Teoria

3.1 Venymä

Venymällä tarkoitetaan kappaleessa tapahtuvaa muodonmuutosta, jonka määritelmä on pituuden muutoksen suhde saman osan tai viivan alkuperäiseen pituuteen, ja näin ollen saatava luku on paljas, ilman mitään yksikköä. Venymä lasketaan seuraavasti, (Kaava 1). (Karhunen 2006, 15)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

jossa ε on venymä

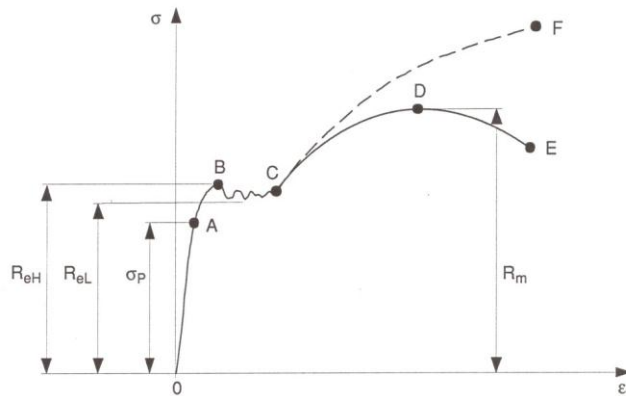
ΔL on pituuden muutos

L on alkuperäinen pituus

Kappaleen keskimääräinen venymä lasketaan kaavan 1 mukaisesti, joka pitää paikkansa vain silloin, kun kappaleen jännitys on yksiakselinen ja vakio sekä materiaali on homogeeninen. Muissa tapauksissa venymä on erilainen eri pisteissä. Lisäksi todellisen rakenteen muodonmuutostila on moniakselinen. (Karhunen 2006, 15.)

3.2 Venymän ja jännityksen yhteys

Venymän ja jännityksen suhdetta materiaalissa tutkitaan yleensä vetokokeen avulla tuotettavalla venymäpiirroksella, jossa on havaittavissa jännityksen vaikutus kappaleen venymään.



KUVIO 4. Venymäpiirros teräs. (Karhunen 2006, 19.)

Yleisimmin materiaalien venymäpiirroksen alkuosa on lineaarinen aina suhteellisuusrajaan σ_p asti, jonka jälkeen venymän määrä jännitykseen nähden kasvaa nopeammin. Jännityksen saavuttaessa myötörajan venymä alkaa kasvaa moninkertaisella nopeudella aina murtorajaan asti, jolloin kappale murtuu. Tavallisten rakenneterästen venymäpiirroksista (KUVIO 4.) voidaan tulkita myös pisteiden B ja C välinen alue täysin plastiseksi alueeksi, jolloin jännityksen pysyessä paikallaan venymä kasvaa. Jos mennään yli tuon plastisen alueen, muodonmuutokset kappaleessa ovat lopullisia. (Karhunen 2006, 18–19.)

3.2.1 Hooken-laki

Hooken laki on ehkä lujuusopin käytetyimpiä kaavoja. Lain esitti englantilainen fyysikko Robert Hooke vuonna 1676 ja laki on yleisesti tunnettu yksiakselisessa muodossa (kaava 2).

$$\sigma = E\epsilon \quad (2)$$

σ on jännitys

E on materiaalin kimmomoduuli

ϵ on venymä

Hooken laki on voimassa vain materiaalin venymäpiirroksen lineaarisella alkuosalla. Tällä tarkoitetaan yleisimmin materiaalin myötörajaan saakka olevaa aluetta, sillä suhteellisuusraja on vaikea määrittää. (Karhunen 2006, 22–23.)

3.2.2 Tasojännitystila

Tasojännitystila esiintyy pääsääntöisesti kaikkien kappaleiden pinnoissa, taivutuksen ja väännön alaisissa akseleissa sekä ohuissa kuori- ja levyrakenteissa, jotka ovat kaukana taite- ja liitoskohdista. Tasojännitystilalla tarkoitetaan kaksiulotteista jännitystilaa. Akselin z-suuntaiset jännitykset ovat nollia, kun tasojännitystila on xy-tasossa. Vain jännitykset σ_x , σ_y ja τ_{xy} ovat nollasta eroavia. Vaikka z-suuntaista jännitystä ei tasojännitystilassa ole, siellä on havaittavissa z-akselin suuntainen venymä kohtisuoraan xy-tasoa vasten. Venymät, jotka ovat voimassa tasojännitystilassa, lasketaan seuraavista kaavoista (kaavat 3,4 ja 5). (Karhunen 2006, 282.)

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu\sigma_y}{E} \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu\sigma_x}{E} \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\nu(\sigma_x - \sigma_y)}{E} \quad (5)$$

joissa ε on venymä

ν on Poissonin luku

σ on jännitys

E on kimmomoduuli

Venymistä päästään jännityksiin, jotka ovat laskettavissa seuraavien yhtälöiden avulla (kaavat 6,7 ja 8). (Karhunen 2006, 278.)

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (8)$$

G on liukukerroin

γ_{xy} on liukukulma

E on kimmomoduuli

ν on Poisonin luku

x- ja y-suuntaisista normaalijännityksistä ja leikkausjännityksestä voidaan laskea tasojännitystilän pääjännitykset ja vertailujännitys, mitä yleisimmin verrataan materiaalin lujuuksiin. Pääjännitykset lasketaan yhtälöistä (kaava 9). (Karhunen 2006, 282.)

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_1 = |\sigma_{1,2}| \text{ Suurin}$$

$$\sigma_2 = |\sigma_{1,2}| \text{ Pienin}$$

Jännitysten laskennan lisäksi monesti halutaan tietää, mihin suuntaan pääjännitykset ovat testattavassa kappaleessa (kaava 10).

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\tau_{xy}}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}} \right) \quad (10)$$

θ on σ_1 :n suunta, jos $\sigma_x - \sigma_y > 0$

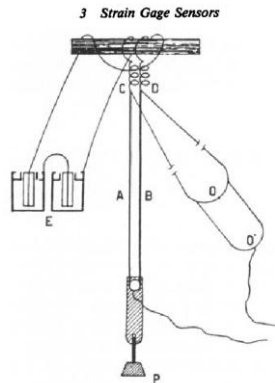
θ on σ_2 :n suunta, jos $\sigma_x - \sigma_y < 0$

3.3 Venymäliuska

3.3.1 Kehitys ja historia

Venymäliuskan kehitys on saanut alkunsa jo 1800-luvulla, kun Lord Kelvin (1856) keksi vahingossa, että kupari- ja rautalangat muuttavat resistanssiaan venytettäessä tai puristettaessa (KUVIO 5.). Kelvinille kuitenkin selvisi myös, että samantyyppisiä havaintoja oli tehnyt jo Sir Charles Wheatstone (1843), joka nykyään on tunnettu kehittämästään Wheatstonen sillasta, jota käytetään signaalien vahvistamiseen. Seuraavaan vuosisataan ei kuitenkaan tapahtunut juuri mitään venymäliuskarintamalla. (Göpel, Hesse, & Zemel 1994, 69.)

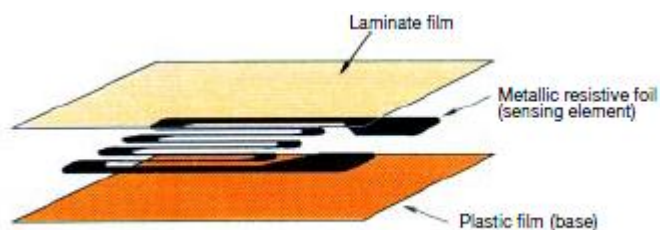
Yleiseen käyttöön venymäliuskat tulivat 1936 vuodesta eteenpäin, jolloin C. M. Kearns teki hiiliresistorin, joka oli kiinnitetty alumiiniäytteeseen. Tämä sai ensimmäisenä venymäliuskatekniikkana käytännön sovelluksia ilmailualalla. Samoihin aikoihin kuparilankoihin perustuva venymäliuska saatiin käytännön sovelluksiin E.E. Simmonsin, D.S. Clarkin ja G. Datwylerin toimesta ja samaan aikaan venymäliuskat tulivat kaupallisiksi Euroopassa. (Göpel ym. 1994, 69.)



KUVIO 5. Lord Kelvinin metallilankakoe. (Göpel ym. 1994, 70.)

3.3.2 Toimintaperiaate

Venymäliuskoja on paljon erityyppisiä, mutta yleisimmin käytetty liuska koostuu kolmesta kerroksesta. Tästä huolimatta liuskat jäävät hyvin ohuiksi, selvästi alle millin paksuisiksi (KUVIO 6.).

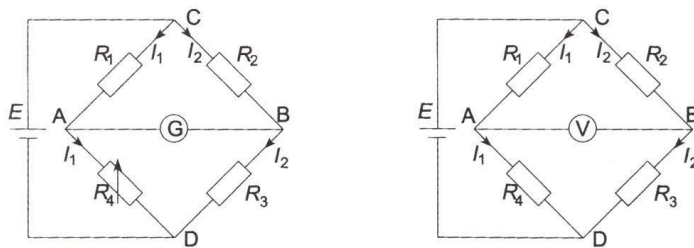


KUVIO 6. Universaalinen venymäliuskan rakenne. (Kyowa, [Viitattu: 30.9.2011].)

Liuskojen toiminta perustuu muovi- ja laminaattikerrosten välissä olevan, yleensä kuparin ja nikkelin sekoituksesta tehtyjen metallilankojen venymisestä, tai kutistumisesta johtuvaan liuskan vastuksen muutokseen. Tätä resistanssin muutosta lukemalla voidaan laskea kappaleessa tapahtuvat venymät. Jännitteen muutokset liuskan sisällä ovat kuitenkin niin pieniä, että niiden lukemiseen tarvitaan Wheatstonen sillalla tehtävää vahvistusta. (Kyowa, [Viitattu: 30.9.2011].)

3.3.3 Wheatstonen silta

Wheatstonen silta on saanut nimensä Charles Wheatstonen mukaan. Hän teki parannuksia Samuel Hunter Christien suunnittelemaan vastussiltakytkentään 1843 (Magnet Lab, [Viitattu: 9.2.2012].). Wheatstonen siltaa käytetään usein vastusmittauksissa eli tilanteissa, joissa itse vastuksen muutos mittaa jotain muuta fysikaalista suuretta, kuten painetta, voimaa tai venymää. Käyttötapoja Wheatstonen siltalle on kaksi perustyyppiä: tasapainotettu ja tasapainottamaton silta (KUVIO 7.). (Hautala & Peltonen 2009, 287.)



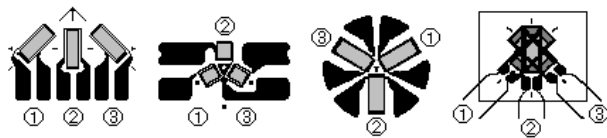
KUVIO 7. Wheatstonen silta. (Hautala & Peltonen 2009, 287.)

Yleisimmin Wheatstonen siltaa käytetään venymäliuskamittauksissa, sillä itse venymäliuska toimii yhtenä vastuksista sillassa (Hautala & Peltonen, 2009, 287).

3.3.4 Venymäliuskojen valinta

Venymäliuskamittauksia varten on valittava oikeanlaiset venymäliuskat, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä mittaustarkkuus. Valintaan vaikuttavia asioita ovat esimerkiksi mittauslämpötila, materiaali, mitataanko mahdollinen veden alla mittaaminen ja tärkeimpänä mitä halutaan mitata (liite 3). Venymäliuskojen valintaan vaikuttaa myös hinta, vaikkakin sillä ei suurta merkitystä saisi olla tarkkoja mittauksia tehtäessä. Saatavilla on erillisiä liuskoja ja erilaisia liuskarusetteja.

(KUVIO 8). Kolmen liuskan rusetteja on useita erityyppisiä. Näillä kaikilla on omat hyvät ja huonot puolensa. (Kyowa, [Viitattu 12.10.2011].)



KUVIO 8. Venymäliuskarusetit, (Measurements Group [Viitattu 12.10.2011].)

Yllä olevien kuvien mukaiset rusetit voidaan myös koota yksittäisistä liuskoista, mutta tämä on kuitenkin paljon hitaampi ja epävarmempi toimenpide, sillä jo liuskojen linjaus oikein saattaa aiheuttaa virhettä haluttaessa selvittää kappaleeseen kohdistuvia jännityksiä. Itse venymät tulevat oikein, mutta asteluvut liuskojen välissä vaikuttavat suoraan jännitysten laskentaan.

3.3.5 Käyttö

Yleisin käyttökohte venymäliuskoille on venymän mittaus joko staattisessa tai dynaamisessa tilanteessa. Näissä mittauksissa päätavoitteena on määrittää kappaleen jännityksiä venymän mittauksen avulla, sillä kyseiset asiat ovat yhteydessä toisiinsa yleistetyn Hooken lain kautta. Venymäliuskoja voidaan käyttää myös voiman, paineen, väännön ja leikkausjännityksen mittaamiseen. (Ehow, [Viitattu 7.10.2011].)

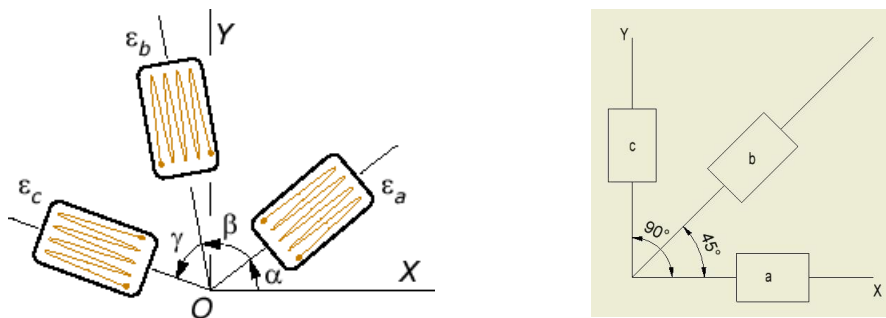
3.3.6 Jännite ja venymä

Venymäliuskoja käytettäessä hyödynnetään jännitteen muutoksen ja venymän välistä yhteyttä. Liuskan kuparilankojen pituuden muuttuessa muuttuu myös kuparilangan poikkipinta-ala, mikä aiheuttaa resistanssin muutoksen venymäliuskan sisällä. Resistanssin muutoksen ja venymän välillä vallitsevan yhteyden perusteel-

la jännite voidaan muuttaa suoraan koekappaleen venymäksi. (Teknokaas, [Viitattu 13.10.2011].)

3.3.7 Mittaustulokset jännityksiksi

Mittaustulokset ovat venymäliuskamittausten jälkeen vielä venymiä, joten niiden vertaileminen FEM-laskentaan on mahdotonta. Jotta vertailu olisi mahdollista, venymät täytyy muuttaa jännityksiksi. Seuraavat kaaviot osoittavat, kuinka toimenpite suoritettiin tässä työssä jokaisen mittauspisteen kohdalla. Laskenta on suoritettu Excel-taulukkolaskentaohjelmalla (liite 1). Mittaustapahtumasta tietoa on kohdassa 5. ”FEM-laskennan varmentaminen venymäliuskamittauksella”.



KUVIO 9. Venymäliuskojen teoreettinen ja kokeen asettelu. (DEU 2007.)

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x \cos^2 \alpha_a + \varepsilon_y \sin^2 \alpha_a + \tau_{xy} \sin^2 \alpha_a &= \varepsilon_a \\ \varepsilon_x \cos^2 \beta_b + \varepsilon_y \sin^2 \beta_b + \tau_{xy} \sin^2 \beta_b &= \varepsilon_b \\ \varepsilon_x \cos^2 \gamma_c + \varepsilon_y \sin^2 \gamma_c + \tau_{xy} \sin^2 \gamma_c &= \varepsilon_c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Riippuen mittaustilanteesta, yllä olevasta yhtälöryhmästä (kaava 11) saadaan tuntemattomat tekijät eli ε_x , ε_y ja τ_{xy} . Mittauskoordinaatisto luotiin tätä mittausta varten niin, että a- ja c-liuska ovat x- ja y-akselien suuntaisia (KUVIO 9.) jolloin tuntemat-

tomiksi jää γ_{xy} , joka ratkeaa keskimmaisella yhtälöllä alla olevaan muotoon (kaava 12). (DEU 2007.)

$$\gamma_{xy} = \frac{\varepsilon_b - 0,5 \times \varepsilon_a - 0,5 \times \varepsilon_c}{0,5} \quad (12)$$

Edellä mainittujen tuntemattomien selvityksen jälkeen lasketaan jännitykset sivun 16 kaavojen 6,7,8 ja 9 avulla (3.2.2), sekä jännitysten suunta sivun 17 kaavan 10 avulla (3.2.2). Näiden operaatioiden jälkeen mittausarvot on muutettu jännityksiksi, minkä jälkeen analysointi on mahdollista. Edellä mainitulla tavalla on käsitelty kaikkien mittauspisteiden venymät. Mittauspisteistä lisätietoa kohdassa "Mittauspisteiden valinta" (5.2.1).

4 FEM-analyysi

4.1 FEM

Finite element method eli elementtimenetelmän kehittivät 1940-luvulla Hrenikoff ja McHenry. Vuonna 1943 aiheesta julkaistiin ensimmäiset tiedot paperille, mutta tuossa vaiheessa itse menetelmä oli vielä kömpelö johtuen käsinlaskennasta ja monista yhtälöistä, joita menetelmä tuottaa. Varsinaisen läpilyönnin tuotteiden suunnitteluun FEM teki tietokoneen tullessa mukaan kuvioihin 1950-luvulla. Tietokoneiden ansiosta oli vihdoinkin mahdollisuus laskea satoja yhtälöitä minuuteissa. Silti tässä vaiheessa FEM laskentaa hyödynnettiin vain lineaarisessa, eli pienten jännitysten ja siirtymien laskennassa. 1960-luvusta eteenpäin kehitys on ollut nopeampaa ja silloin otettiin mukaan myös epälineaarisuuksia, eli suuret siirtymät, jolloin yhtälöiden monimutkaisuuskin kasvoi. Kehitys jatkuu kuitenkin yhä, ja FEM-ohjelmistot muuttuvat monimutkaisemmiksi ja mahdollistavat tarkkojen laskelmien teon. (Logan 2007. 2–4)

4.2 ANSYS

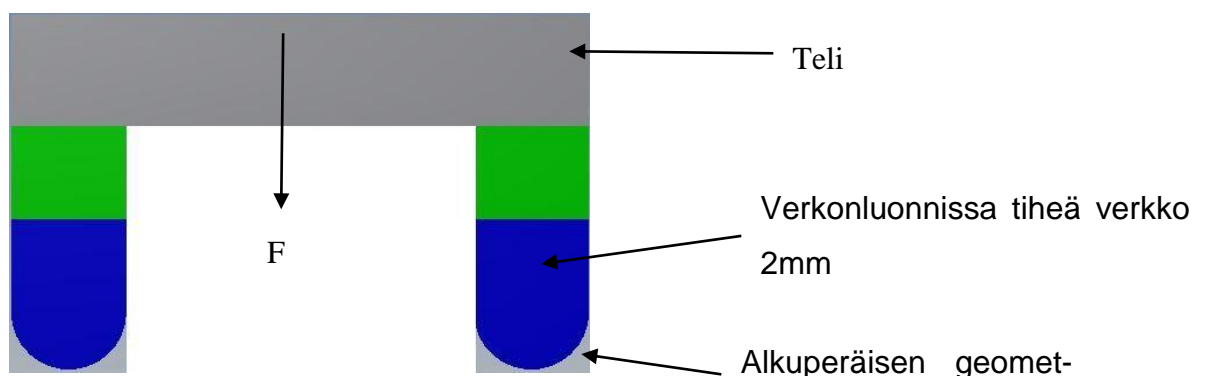
ANSYS kehittää ja markkinoi simulointiohjelmistoja teollisuuden tämän päivän tarpeita varten. Yrityksen kehittämiä ohjelmistoja käytetään tuotemallien käyttäytymisen simulointiin ja valmistusprosessin havainnointiin todellisessa tuotannossa. Tämän ansiosta suunnittelijoilla menee vähemmän aikaa tiedon keruuseen ja he voivat keskittyä tuotteidensa parantamiseen täysipainotteisesti. ANSYS-yhtiöiden pääalue on teknillinen simulointi, jota he ovat kehittäneet jo 40 vuoden ajan vastaamaan teollisuuden yhä kovempia vaatimuksia. (ANSYS inc., [Viitattu 17.12.2011].)

4.3 Mallinnus ja laskennan valmistelu

Tämän analyysin tekoa varten kappaleen mallinnus on tehty Space Clame-ohjelmistolla, joka itsessään ei ole ANSYS-yhtiöiden kehittämä, vaan heidän ostamansa palvelu. Itse laskenta on suoritettu ANSYS Workbench- ja Multiphysics-ohjelmistoja käyttämällä. (Isomäki, 2011.)

Testisolussa käytetyn laskentamallin geometria luotiin suunnittelun aikana Auto-Desk Inventor -ohjelmiston avulla. Tällä tarkoitetaan käytännössä sitä, että malli tuotiin Inventorista Space Clame -nimiseen ohjelmistoon, jossa mallia siistittiin. 3D-mallista poistettiin kaikki reiät ja ruuvit sekä muu ylimääräinen materiaali, jolla ei oletettu olevan suurta merkitystä laskentatuloksiin. Muokkauksen lisäksi levyosista tehtiin keskipintamalli, joka on kappaleen ylä- ja alapinnan laskennallinen keskiarvo. Keskipintamallin käyttämisen syynä on se, että laskentaverkosta tulee kevyempi verrattuna tilavuusmallin käyttöön. FEM-laskennan kuorimallissa alkupe- räinen levyn paksuus otetaan huomioon. (Isomäki, 2011.)

Suurimpana muutoksena kuitenkin voidaan pitää sitä, kuinka laskentamallissa on mallinnettu siirtovaunun pyörät. Laskennan keventämiseksi Inventor-mallista pe- räisin oleva pyörästä korvattiin alla olevalla geometrialla (KUVIO 10.), joka simuloi pyörästä.



KUVIO 10. Laskentamallin pyörästäön geometria.

Keventämisen jälkeen luotiin verkko, joka tässä tapauksessa koostui 163210 solmusta ja 111120 elementistä. Elementteinä käytettiin neliö-elementtiä, jonka koko oli 5 mm, lukuun ottamatta pyörästön pyöräosaa. (Isomäki, 2011.)

Laskentaverkon ja keventämisen tekeminen ei vielä riitä laskennan suorittamiseen, sillä Ansys-ohjelmistolle pitää kertoa, miten eri pinnat ovat toisiaan vasten kontaktissa. Tämä operaatio pitää tehdä kaikille mallissa toisiaan mahdollisesti koskettaville pinnoille. Näin ollen sigmaprofiilin ja ajoprofiilin välille tehtiin epälineaarinen kitkakontakti, sillä se vastasi parhaiten todellisuutta. Kaikille pinnoille ei kuitenkaan voida antaa samantyyppistä kontaktia, sillä tämä ei vastaisi todellisuutta. Siirtovaunun pyörien ja ajoprofiilin välille asetettiin kitkallinen kontakti, jossa pyörän materiaalina käytettiin polyetyyleeniä. Sigmaprofiilien ja tukipilarien välinen liitos koostui liukuvasta kontaktista sekä pulttiliitoksen sijalle laitetusta kiinteästä kontaktista, jossa pinnat on tavallaan liimattu toisiinsa kiinni. Tämä vastaa riittäväällä tarkkuudella luistamatonta pulttiliitosta. (Isomäki, 2011.)

Edellä mainittujen lisäksi todellisen testisolun ollessa noin 20 metriä pitkä, laskentamallissa oli käytössä vain pieni osa rakennetta, mikä oli sitten laskentaa varten symmetriasäännöillä peilattu leveys- ja pituussuuntaan. Malli oli siis tärkein osa todellista solua ja siitäkin osasta oli mallinnettu laskentaa varten vain $\frac{1}{4}$, koska laskennan keventämisessä voidaan hyödyntää symmetriaa. Keventäminen oli tarpeen, koska epälineaarissa laskennassa huomioidaan kitkalliset kontaktit ja suuret siirtymät. (Isomäki, 2011.)

5 Fem-laskennan varmentaminen venymäliuskamittauksella

5.1 Mittalaitteisto (FE-MM16)

Mittalaitteistona käytettiin tätä projektia tehtäessä Fylden valmistamaa venymäliuskalaitteistoa. FE-MM16 on kuusitoistakanavainen vahvistinkotelo (KUVIO 11.), johon voidaan kytkeä kahdeksan kappaletta FE-366-TA-siltavahvistinmoduuleita. Vahvistinmoduulien lisäksi on mahdollista kytkeä AUTO-ZERO-kortti sekä FE-356-USB-moduuli laitteen suoraan käyttöä varten pc:ltä käsin. Vahvistinkorttien sijasta laitteistoon on myös mahdollista kytkeä thermocouple module, jolla voidaan tutkia termopareja. (Fylde, [Viitattu 12.10.2011].)

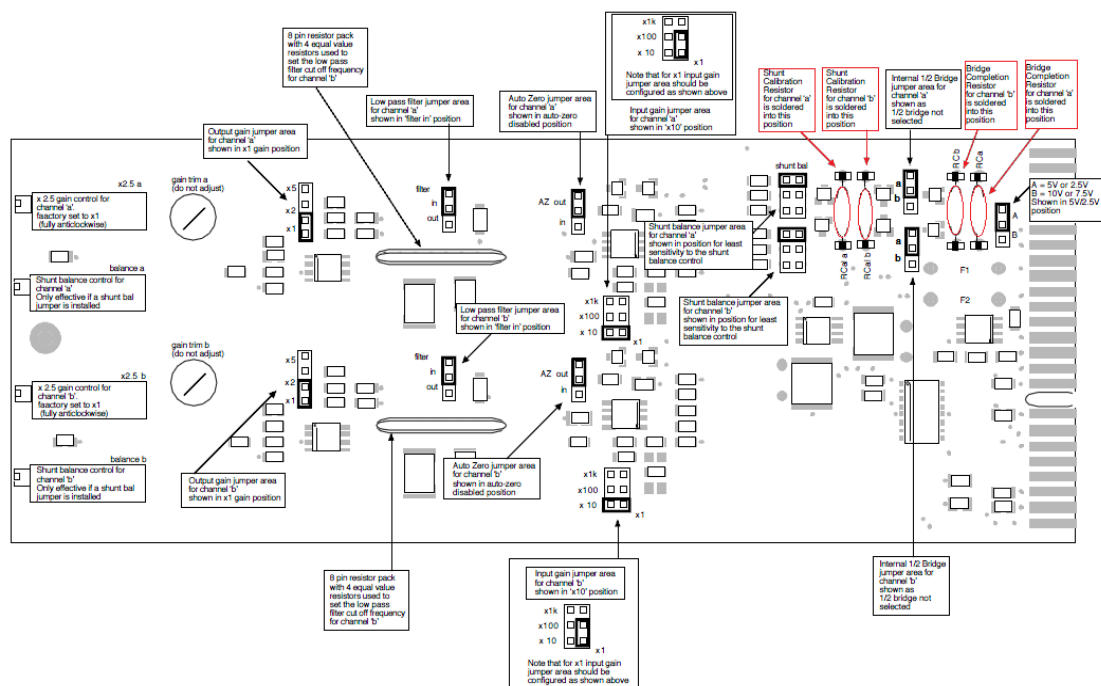


KUVIO 11. FE-MM16 Mittalaitteisto. (Fylde, [Viitattu 12.10.2011].)

Edellä mainitussa laitteistossa yksi ominaisuus on, ettei se tarvitse pc-ohjelmistoa mittausten tekemiseen, vaan esimerkiksi logiikalla on mahdollista kerätä mittaus-tieto. Keräämisen jälkeen tiedot pitää kuitenkin käsitellä esimerkiksi Excel-ohjelmistolla.

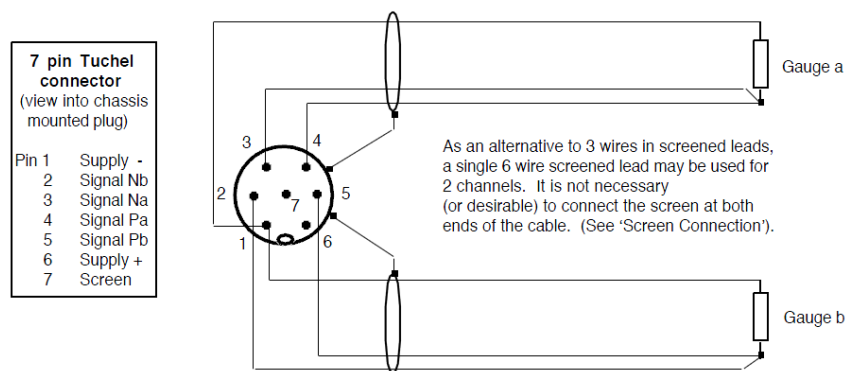
5.1.1 Asennus

FE-MM16 mittauslaitteiston asentaminen on varsin yksinkertaista. Laitteistoon kuuluu oma virtalähde, ja koteloon kytkettävät Plug-in moduulit ovat lähes valmiita käytettäväksi heti oston yhteydessä. Jos kuitenkin on kyseessä FE-366-TA-moduuli ja tarkoituksena on tehdä mittauksia neljännessiltakytkennällä, on korttiin juotettava (KUVIO 12.) sillan täydennysvastus. Vastus on kooltaan joko 120 ohmia tai 350 ohmia, täysin riippuen käyttökohteesta. Vahvistettaessa esimerkiksi venymäliuskujen signaalia vahvistinkorttiin täytyy juottaa myös kalibrointivastus (KUVIO 12.). Tämän koko on täysin riippuvainen mittauskohteesta. Esimerkiksi tämän opinnäytteen yhteydessä on juotettu 120 kilo-ohmin vastus paikalleen, millä haluttiin simuloida noin 500 microstrainin venymää shuntikalibroinnin aikana. Tästä kuitenkin lisää kalibrointiosiossa. (Käyttöohje, [Viitattu 13.10.2011].)



KUVIO 12. FE-366-TA moduuli, punaisella juotettavat vastukset. (Käyttöohje, [13.10.2011].)

Vastusten juottamisen jälkeen venymäliuskat täytyy kytkeä vahvistimeen. Antureiden kytkeminen riippuu täysin käytetystä siltakytkennästä, joten seuraavassa on vain kytkentäsuositus neljännessiltakytkentää varten (KUVIO 13.). (Käyttöohje, [13.10.2011].)



KUVIO 13. Kytkentäohje neljännessiltakytkentään. (Käyttöohje, [13.10.2011].)

5.1.2 Kalibrointi

Venymäliuskojen kalibrointi aloitetaan kytkentöjen jälkeen, kun vahvistus on tehty ja vahvistimen ulostulojännite on nollattu. Yksi tapa kalibroida venymäliuskat on shuntcalibration-toiminto, joka on yleensä rakennettu venymäliuska vahvistimiin. Tämä kuitenkin vaatii sen, että tiedetään jonkin venymän ja vastuksen yhteys (kaava 14 ja 15). Kalibrointivastusta laskettaessa on muistettava venymäliuskalta tulevan johtimen vastus, jotta kalibrointi-arvo vastaisi todellisuutta (kaava 13). (Hautala & Peltonen 2009, 272.)

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (13)$$

R on johtimen resistanssi

ρ on johtimen resistiivisyys

A on johtimen poikkipinta-ala

l on pituus

$$Rcal_1 = \frac{Rd \times 10^6}{microstrain \times GF} \quad (14)$$

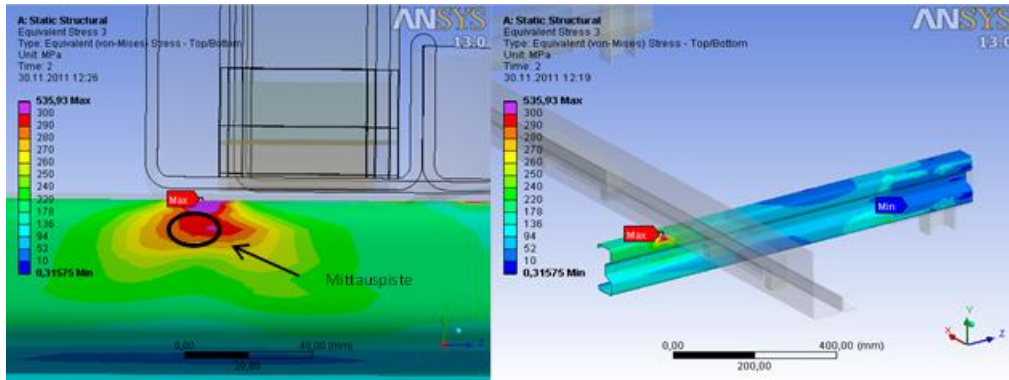
$$Rcal_2 = \left(\frac{Rd \times 10^6}{Rd} \right)^2 \times Rcal_1 \quad (15)$$

Venymäliuskojen kalibrointi on myös mahdollista tehdä kytkemällä tunnettu vastus rinnan venymäliuskan itsensä kanssa. Tässäkin tapauksessa on pitänyt laskea, mitä tuo kyseinen vastus on venymänä, jotta arvoista olisi mitään hyötyä. Eli käytännössä shunttikalibroinnilla tarkoitetaan samaa asiaa kuin vastuksen rinnan kytkennällä; Wheatstonen sillan tasapainoa siis muutetaan.

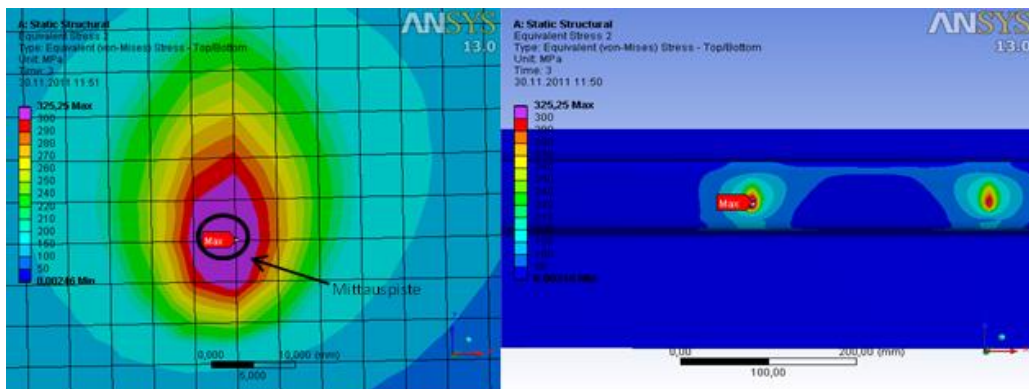
5.2 Venymäliuskokoe

5.2.1 Mittauspisteiden valinta

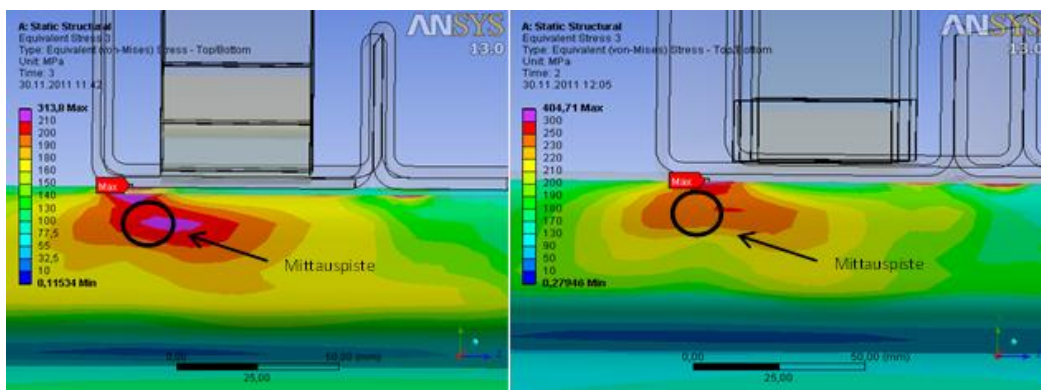
Mittauspisteet valittiin testisolussa tehdyssä testissä lujuuslaskelmien perusteella. Tarkoituksena oli saada mittausten perusteella konkreettista tietoa ANSYS-ohjelmistolla suoritettujen laskentatulosten pitävyydestä. Testisolu suunniteltiin mahdollisimman todenmukaiseksi erään projektin tiimoilta, jotta tuloksista olisi myös tulevaisuutta ajatellen enemmän hyötyä. Seuraavissa kuvissa on esitelty mittauspisteiden vertailujännitykset FEM-analyysistä saatujen kuvien avulla. Mittauspisteitä testissä oli viisi.



KUVIO 14. Mittauspiste 1 (1400 mm). (Ploompuu 2011.)



KUVIO 15. Mittauspiste 2 (Ajoprofiili). (Ploompuu 2011.)

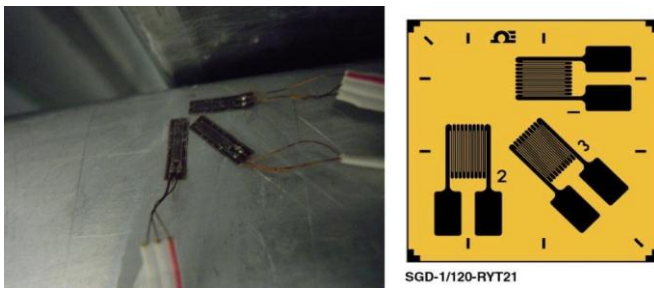


KUVIO 16. Mittauspiste 3 (1000 mm) vasen ja piste 4 (1200 mm) oikea. (Ploompuu 2011.)

Mittauspiste 5:ssa on käytetty samaa kuvaa kuin mittauspiste 3:ssa, sillä näiden kahden mittauspisteen sigmaprofilien jako on täysin sama. Muuten tilanne pisteessä 5 on erilainen, sillä kyseinen piste simuloi hissiin ajoa.

5.2.2 Kokeen valmistelu

Valmistelut alkoivat testisolun kokoamisen jälkeen venymäliuskojen kiinnityksellä. Ensimmäisenä tehtävänä oli käydä läpi, mitä mittauskalustoa oli käytettävissä, eli tässä tapauksessa tarkistettiin venymäliuskat ja niiden liimausvälineet. Lisäksi otettiin ylös liuskojen pakkauksista tarvittavat tiedot laskentaa varten. Seuraavana tehtävänä oli piirtää mittauspisteeseen koordinaatisto, jonka avulla venymäliuskat linjattiin mittauspisteeseen. Tässä mittauksessa olisi ollut helpompi käyttää venymäliuskarusetta, sillä kolmen liuskan linjaaminen oli hidasta (KUVIO 17).



KUVIO 17. Venymäliuskan liimaus ja kolmiliuskainen venymäliuskarusetti oikealla. (Omega, [Viitattu 10.2.2012].)

Kuten yllä olevasta voidaan nähdä, mittauspisteen alueella on paljon naarmuja jotka on tehty piikkikynällä. Nämä naarmut tai viivat olivat venymäliuskojen linjauksessa tärkeitä. Kuvion 17. rusetista nähdään, että ympäri liuskaa on pieniä viivoja, joiden avulla liuska liimataan tiettyyn asentoon. Huomioon on otettava myös se, että ennen liuskan vaatiman koordinaatiston piirtämistä mittauskappaleen pinta pitää hioa ja tämän jälkeen puhdistaa hiontapölystä sekä kaikesta muusta liasta. Tällä saavutetaan mahdollisimman puhdas pinta ennen liimausta ja hyvä tarkkuus

mittauksissa. Liimauksen jälkeen suojataan liuskojen pinta vielä esimerkiksi siliikonilla (KUVIO 18). Tarkempia tietoja venymäliuskojen liimauksesta on liitteessä 2.

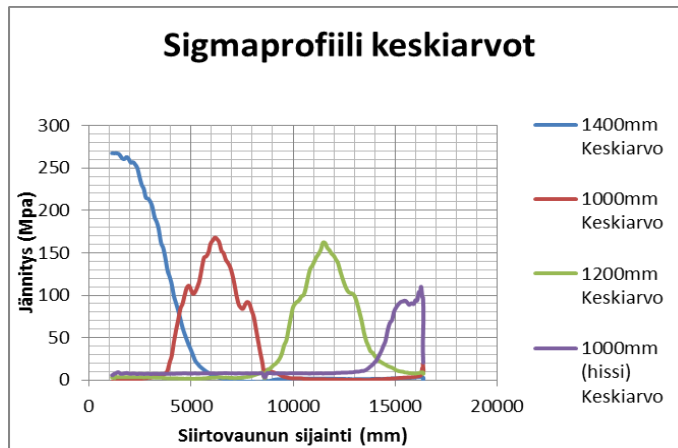


KUVIO 18. Venymäliuskan suojaus ja vedon poisto.

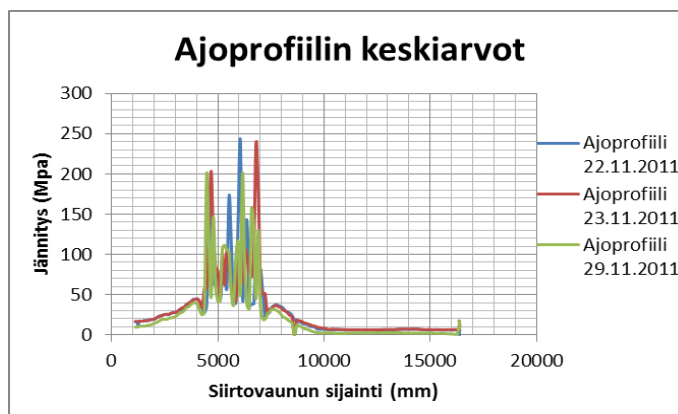
Edellä mainittujen vaiheiden jälkeen varmistetaan vielä liuskojen kytkennät ja tarkistetaan, etteivät liuskojen kuparilangat, jotka ovat vapaana, kosketa toisiaan. Tarkistuksen suorittamisen jälkeen kytketään venymäliuskat kiinni vahvistimeen. Venymäliuskat jätetään vielä kuivumaan vähintään tunniksi ennen jännitteen kytkemistä. Tarkkoja mittauksia tehtäessä on suositeltavaa antaa liuskojen kuivua vähintään vuorokauden verran.

5.2.3 Tulokset

Seuraavassa esitellään venymäliuskamittauksen avulla saatujen venymien aiheuttamia jännityksiä eri osissa testisolua. Koska venymäliuskamittauksesta saatiin suuri määrä tuloksia, näiden perusteella on laskettu keskiarvokuvaajat. Tämän vuoksi kuvissa ei näy jännityspiikkejä, joita varsinkin ajoprofiilia tutkittaessa oli havaittavissa. Tässä osiossa ei kuitenkaan vielä vertailla tuloksia FEM-laskennan tuottamiin jännityksiin.



KUVIO 19. Sigmaprofiilin tulokset. (Ploompuu 2011.)



KUVIO 20. Ajoprofiilin tulokset. (Ploompuu 2011.)

Tuloksia tarkasteltaessa (KUVIO 20.) voidaan nähdä, että ajoprofiilin jännitykset eivät missään vaiheessa nouse yli 250 MPa:n. Kuitenkin, johtuen testisolun veto-mekanismista, mikä aiheuttaa vaunun liikkeeseen nykimistä, ajoprofiilin käyrästäjä ei saa riittävän lähelle toisiaan ja tämän takia mittaushuiput eivät näy keskiarvo-laskelmissa. Haluttaessa tarkempaa mittaustietoa lukijan pitää tutkia Pesimal Oy:n hallussa olevaa mittausraporttia, jossa on havainnollistettu päiväkohtaiset mittaus-tulokset.

Sigmatprofiilien kannalta kuvaajat (KUVIO 19.) osoittavat luotettavampaa tietoa. Mittaustulokset ovat olleet koko mittauksen ajan noin 10 % alle laskenta-arvojen. Toisaalta, jos mietitään 1,2 metrin jakoa, lisätutkimus saattaisi olla paikallaan, sillä arvot ovat liian lähellä metrin jakovälin tuloksia opinnäytteen tekijän mielestä. Laskennan mukaan niiden pitäisi olla jopa 30 MPa suurempia.

5.2.4 Virhearviointi

Suurimpana virhetekijänä näissä mittauksissa voidaan pitää inhimillistä liimaukseen liittyvää virhettä, sillä venymäliuskojen liimaaminen tiettyyn kulmaan käsin on hankalaa. Tärkeää on myös muistaa, että ennen liimausta koordinaatisto pitää piirtää kappaleeseen, jotta olisi mahdollista paikoittaa venymäliuskoja oikeille paikoilleen. Näin ollen voidaan sanoa, että vähimmäisvirhe, joka liimauksesta johtuu, on vähintään +/- 3 astetta (KUVIO 21.).

Toisena suurena virheenä (KUVIO 21.) voidaan pitää venymäliuskoista lähteviä johtimia, joissa on havaittavissa noin 10 mV:n häviö matkalta venymäliuskalta vahvistimelle. Tämä virhe on korjattavissa kalibroimalla mittauskalusto venymäliuskan rinnalle kytkettävällä kalibrointivastuksella.

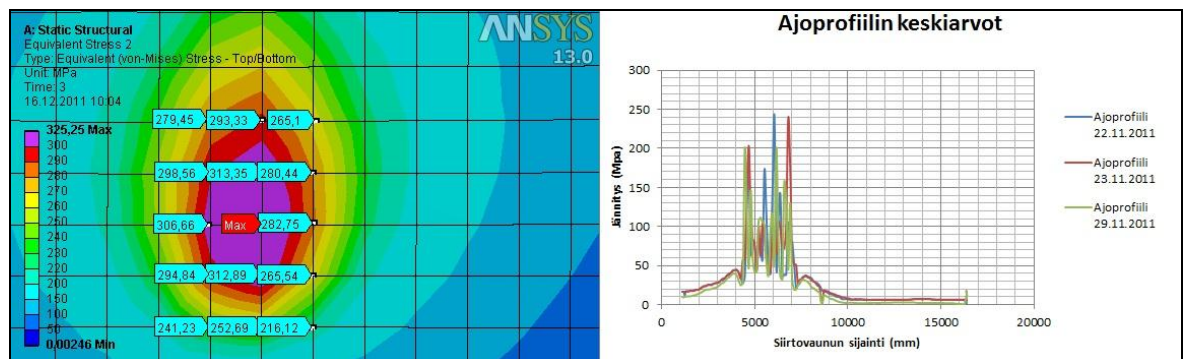
Vähäpätöisempänä virhetekijänä on testisolun siirtovaunun liikuttamiseen vaadittavan elektroniikan aiheuttamat virheet venymäliuskasignaaleihin. Nämä virheet saatiin poistettua mittausten aikana. Kuitenkin mittaustulokset olisivat voineet olla tarkemmat, jos olisi päästy mittaamaan pienemmällä vahvistuksella. Ongelmista johtuen mittaus suoritettiin noin 100-kertaisella vahvistuksella, jolloin pienet signaalivirheet eivät vaikuttaneet suuresti tuloksiin.

<p>Virhe</p> <table> <tr> <td>Alkuperäinen</td> <td>-3 astetta</td> <td>+3 astetta</td> </tr> <tr> <td>45 °</td> <td>42 °</td> <td>48 °</td> </tr> <tr> <td>267 Mpa</td> <td>266 Mpa</td> <td>270 Mpa</td> </tr> </table> <p>Virhe <u>1,1</u> %</p>	Alkuperäinen	-3 astetta	+3 astetta	45 °	42 °	48 °	267 Mpa	266 Mpa	270 Mpa	<p>Edellä mainittujen virheiden ollessa maksimit</p> <table> <tr> <td>Alkuperäinen jännitys</td> <td>Virheellinen jännitys</td> </tr> <tr> <td>267 Mpa</td> <td>281 Mpa</td> </tr> </table> <p>Virhe <u>4,98</u> %</p>	Alkuperäinen jännitys	Virheellinen jännitys	267 Mpa	281 Mpa
Alkuperäinen	-3 astetta	+3 astetta												
45 °	42 °	48 °												
267 Mpa	266 Mpa	270 Mpa												
Alkuperäinen jännitys	Virheellinen jännitys													
267 Mpa	281 Mpa													
<p>Johteista johtuva virhe</p> <table> <tr> <td>267 Alkuperäinen</td> </tr> <tr> <td>278 +10mv</td> </tr> <tr> <td>256 -10mv</td> </tr> </table> <p>Virhe <u>3,96</u> % +10mv Häviö johteessa</p>	267 Alkuperäinen	278 +10mv	256 -10mv											
267 Alkuperäinen														
278 +10mv														
256 -10mv														

KUVIO 21. Virhearvioita. (Plooppuu 2011.)

6 Analysointi

6.1 Ajoprofiili

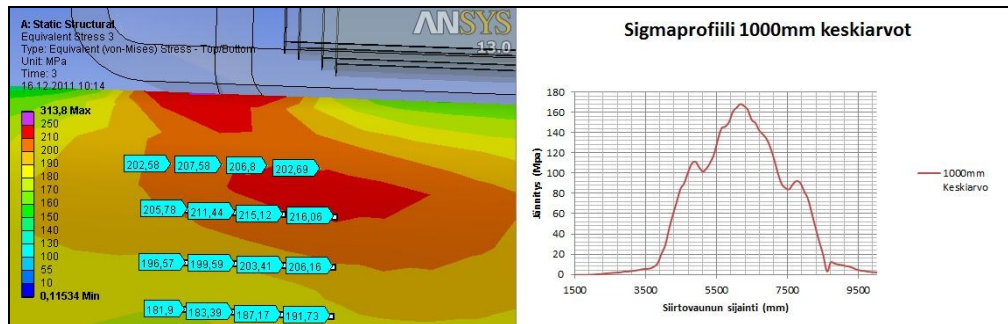


KUVIO 22. Ajoprofiilin tulokset ja FEM-laskenta. (Plooppu 2011.)

Kuten yllä olevasta (KUVIO 22.) nähdään, mittausalueen laskentatulokset ovat noin 280–315 MPa. Vastaavasti tarkasteltaessa käyrästä nähdään mittaustulosten keskiarvojen jäävän reilusti alle FEM-laskennan arvojen. Tästä johtuen täytyy mainita, että kaikkien päivien mittauksissa päästiin huippuarvojen kanssa noin 300 MPa:iin, jolloin mittaustulokset olivat varsin yhdenmukaisia laskentatulosten kanssa. Syy keskiarvoista poisjäämiseen oli vain se, että mittauksia tehtäessä ei saanut käyttäytymistä saatu toistettua, minkä seurauksena paikka ja jännityshuiput eivät olleet identtisiä aikajännityskuvaajilla.

6.2 Sigmaprofiili

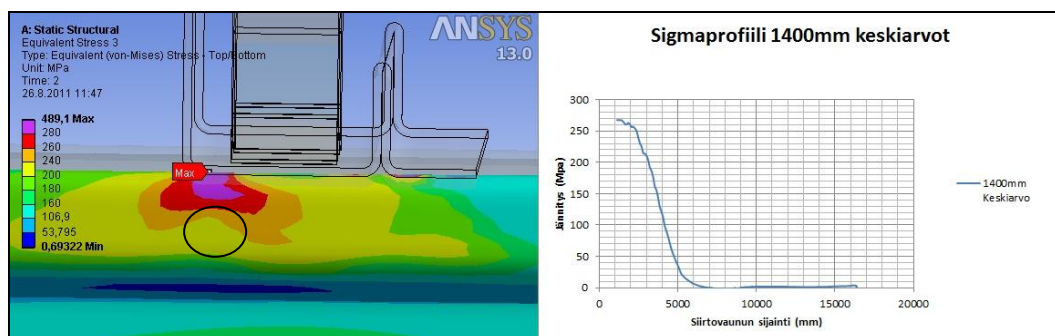
Sigmaprofiilien laskentakuvaa (KUVIO 23.) ja mittauskeskiarvoja tutkittaessa päästään parempiin tuloksiin verrattuna ajoprofiilin tuloksiin, jossa toistettavuus oli heikko. Tässä tapauksessa jännityskäyttäytyminen oli aina samantyyppinen. Ainoana poikkeuksena mittauksissa oli jännityksen suuruus.



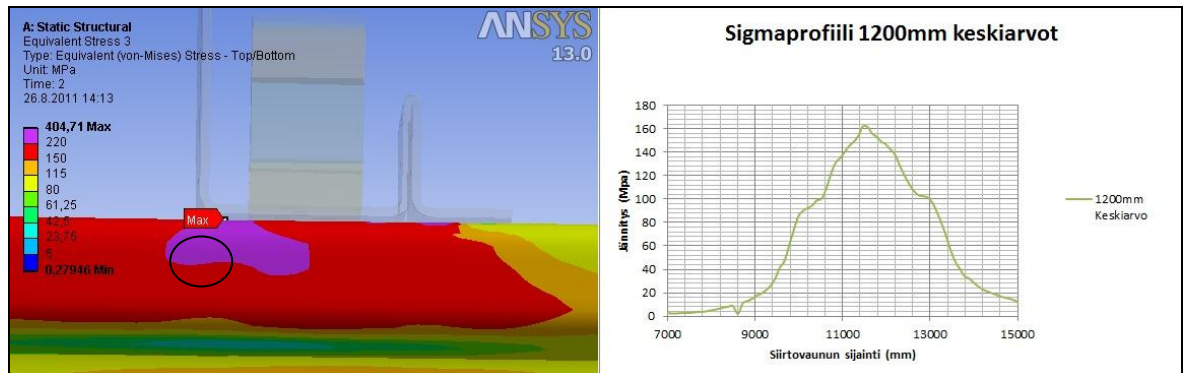
KUVIO 23. Sigmaprofiili 1000 mm jako (Ploompuu 2011.)

Tarkasteltaessa 1000mm jaolla olevaa sigmaprofiilia, (KUVIO 23.) voidaan todeta, että mittaustulokset ovat jääneet noin 20-30 MPa alle laskenta-arvojen. Näin ollen ollaan turvallisella puolella ja vaikka otettaessa kaikki virhetekijät pois noin 5 %, yhä edelleen oltaisiin alle laskennan jännitysten. Tästä johtuen voidaan sanoa, että tulevaisuudessa sigmaprofiili tulee kestävämmän tämänhetkisellä kuormituksella.

Muita testauspisteitä testisolussa oli sigmaprofiilien 1400 mm ja 1200 mm jakovälillä olevat pisteet. 1400 mm:n pisteessä mittaustulokset jäivät yhtä lailla noin 20–30 MPa alle laskentajännitysten, mutta mittausten aikana oli selvästi havaittavissa muodonmuutoksia, jolloin voidaan sanoa, että profiili tulee mahdollisesti hajoaan jossain vaiheessa. Seuraavassa (KUVIO 24.) on esitetty ensimmäisen mittauspisteiden tulokset sekä laskennan vastaavat arvot.



KUVIO 24. Sigmaprofiili 1400 mm jako. (Ploompuu 2011.)



KUVIO 25. Sigmaprofiili 1200 mm jako (J.Plooppuu, 2011)

Kolmantena sigmaprofiilien tutkimispisteenä oli 1200 mm:n jakovälillä oleva sigmaprofiili (KUVIO 25.), jonka laskenta- ja mittaustulokset ovat esitetty yllä olevassa kuvassa. Huomata saatetaan, että mittaustulosten perusteella jännitysten pitäisi olla noin 160 MPa:ia plus maksimissaan virheestä aiheutuva 5 %. Tuloksissa jäädään siis hieman alle laskennan antamien arvojen.

6.3 Päätelmät

Mittaustulosten ja laskennan vertailun perusteella voidaan sanoa, että tulevaisuudessa 1000 mm:n jaolla olevien sigmaprofiilien käyttö syväkuormausrastojen ajokanavien tukirakenteessa on turvallista. Mutta tämä pitää paikkaansa vain silloin, kun siirtovaunun kuorma ei ylitä nykyisiä arvoja. Toisaalta näyttäisi myös siltä, että kanavat, joissa ajetaan todellisuudessa hyvin vähän, saattaisivat kestää myös 1200 mm:n jaolla olevien profiilien tukiessa ajoprofiilia. Tässä tapauksessa suositeltavaa olisi myös pysyä tämänhetkisen siirtovaunun kuormissa. Jatkotutkimus olisi kuitenkin vielä paikallaan, sillä ajoprofiilin käyttäytymistä ei tässä tapauksessa ole selvitetty. Jo nykyisellä tuennalla ja siirtovaunun kuormalla ajoprofiiliin kohdistuvat piikkikuormat ovat paikoittain jopa 300 MPa:n luokkaa, jolloin voidaan epäillä, että nykyisellä paksuudella oleva ajoprofiili ei välttämättä tulisi kestävään yhtä

pitkään 1200 mm:n jaolla olevien sigmaprofiilien alla verrattaessa 1000 mm:n jakoon.

Tuloksia tarkasteltaessa voidaan myös todeta, että 1400 mm:n jaolla olevilla sigmaprofiileilla ei tässä kyseisessä sovelluksessa ole tulevaisuutta, ainakaan nykyisillä paksuuksilla. Laskennan ja visuaalisen havainnoinnin perusteella muodonmuutoksia tapahtuu jo pienilläkin toistomäärillä. Kokeen edestakaisten ajojen lukumäärä oli noin 500 koko kokeen aikana. Tässä vaiheessa on kuitenkin turvallista sanoa, että nykyinen rakenne on kestävä, ja sitä on hiukan jopa mahdollista keventää tietyiltä osilta.

7 Yhteenveto

Kokonaisuudessa opinnäytetyö meni mainiosti pienistä vastoinkäymisistä huolimatta, ja Pesmel Oy sai tärkeää testitietoa lujuuslaskentansa tarkkuudesta. Itse opinnäytetyön tekijä sai korvaamatonta kokemusta työelämän sovelluksista ja todellisuudesta, sekä kuinka mittauksia suoritetaan muissa kuin laboratorioolosuhteissa. Vaikka kaikki ei aina mennyt niin kuin piti, päästiin suurimmista vastoinkäymisistä aina jaloilleen ja lopputuloksena mittaukset onnistuivat. Parasta työssä oli se, että sai tehdä tutkimusta itselleen aivan uudesta asiasta ja jatkuvasti havaita oppivansa uutta. Haastavan siitä teki kuitenkin se, ettei itse Pesmel Oy:llä ollut kokemusta tämäntyyppisestä kokeesta, joten opinnäytetekijä joutui hankkimaan suurimman osan tiedoista ja tutkimaan aihetta perusteellisesti. Kokonaisuutena opinnäytteessä sai kuitenkin tehdä pitkälistä yhteistyötä Pesmel Oy:n henkilökunnan kanssa, sillä opinnäyte koostui monista osa-alueista, mukaan lukien työharjoittelusta, joka suunniteltiin täysin opinnäytettä silmällä pitäen. Näin ollen tekijän ryhmätyötaidot kehittyivät. Mukavaa oli myös oivaltaa se, että on äärimmäisen tärkeää tehdä tämäntyyppistä työtä vuorovaikutuksessa muiden ihmisten kanssa, sillä helposti jää joitakin tärkeitä asioita havaitsematta ja toisilta saa aina terveen ja erilaisen perspektiivin aiheista.

Tulevaisuutta ajatellen on tärkeää huomata, että kaikki opinnäytteen ja työharjoittelun aikana tehty työ ja saatu kokemus tulevat taatusti olemaan tärkeässä osassa opinnäytteen tekijän tulevaisuudessa. Työelämään katsottaessa voidaan sanoa opinnäytteen olleen tärkeässä roolissa ja antavan vielä tuleville työtehtäville hyvän pohjan.

Lähteet

ANSYS inc. 2011. Yritys. [Verkkosivu]. [Viitattu 17.12.2011]. Saatavissa: <http://www.ansys.com/>

DEU. 2007. Automatic Control Lab of Mechanical Engineering Departmen Yritys [Verkkosivu]. [Viitattu 23.1.2012]. Saatavissa: http://web.deu.edu.tr/mechatronics/TUR/strain_gauge.htm

Ehow. Ei päiväystä. Yritys. [WWW-sivu]. [Viitattu: 7.10.2011]. Saatavissa: http://www.ehow.com/about_5503427_uses-strain-gauge.html

Fylde. Ei päiväystä. Fylde electronic laboratories Ltd. [WWW-sivu].[Viitattu 12.10.2011]. Saatavissa: <http://www.fylde.com>

Göpel W., Hesse J., & Zemel N., 1994. Sensors Comprehensive Survey. [Verkkokirja]. VCH Verlagsgesellschaft mbH. [Viitattu: 30.9.2011]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com>: Vaatii käyttöoikeuden.

Hautala M. & Peltonen H. 2009. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa 1. Saarijärvi: Lahden Teho-opetus Oy

Isomäki, M-P. 2011. Lujuuslaskija. Pesmel Oy. Haastattelu 16.12.2011.

Karhunen J., Lassila V., Pyy S., Ranta A., Räsänen S., Saikkonen M. & Suosara E. 2006 Helsinki: Otatieto Oy

Kyowa. 2011. [WWW-sivu]. [Viitattu: 30.9.2011]. Saatavissa: <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/gages/index.htm>

Käyttöohje. 2011. FE-MM16. Fylde electronic laboratories Ltd.

Logan D.L., 2007. A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition. [Verkkokirja]. Canada: Nelson, a division of Thompson Canada Saatavana: http://www.cengagebrain.com.mx/shop/content/logan52986_0534552986_02.0_1_chapter01.pdf

Magnet lab. Ei päiväystä. Florida state university. [Verkkosivu].[Viitattu: 9.2.2012]. Saatavissa: <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/wheatstonebridge/index.html>

- Measurements Groupe. 6.10.2011. Texas A&M University Kingsville. [WWW-sivu]. [Viitattu: 12.10.2011]. Saatavissa: http://www.engineer.tamuk.edu/departments/ieen/faculty/drlpeel/courses/meen5330/strain-gage-rosette-theory_davidson.pdf
- Omega Engineering. Ei päiväystä. Yritys. [Verkkosivu]. [Viitattu: 10.2.2012]. Saatavissa: http://www.omega.nl/ppt/pptsc.asp?ref=SGD_3-ELEMENT45-90
- Pesmel Oy. Ei päiväystä. Yritys. [Verkkosivu]. [Viitattu: 19.7.2011]. Saatavissa: <http://www.pesmel.com>
- Plooppuu J. 2011. Venymäliuskamittausraportti Seinäjoki: Pesmel Oy Julkaisematon.
- Teknokas. Ei päiväystä. Oulun Yliopisto. [WWW-sivu]. [Viitattu: 13.10.2011]. Saatavissa: http://www.oulu.fi/teknokas/sahko_elektroniikka.html

Liitteet

LIITE 1 Esimerkki mittaustulosten käsittelystä

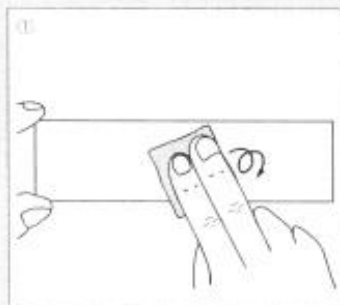
LIITE 2 Venymäliuska liimaus

LIITE 3 Kyowa venymäliuskan valinta

LIITE 2 Venymäliuska liimaus

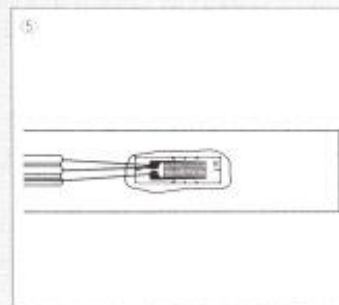
Typical Strain Gage Bonding Method and Dampproofing Treatment

The strain gage bonding method differs depending on the type of adhesive applied. The description below applies to a case where the leadwire-equipped KFG gage is bonded to a mild steel test piece with a representative cyanoacrylate adhesive, CC-33A. The dampproofing treatment is in the case of using an butyl rubber coating agent, AK-22.

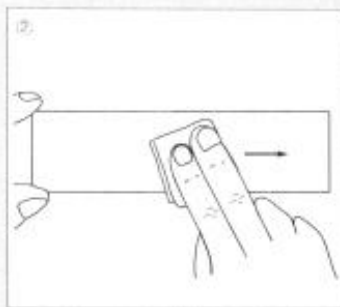


1. Like drawing a circle with sandpaper (#300 or so), polish the strain gage bonding site in a considerably wider area than the strain gage size.

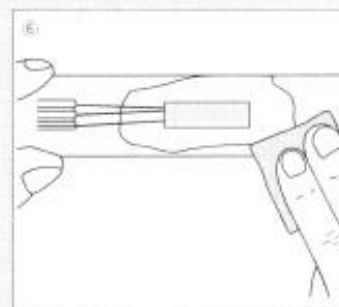
(If the measuring object is a practical structure, wipe off paint, rust and plating with a grinder or sand blast. Then, polish with sandpaper.)



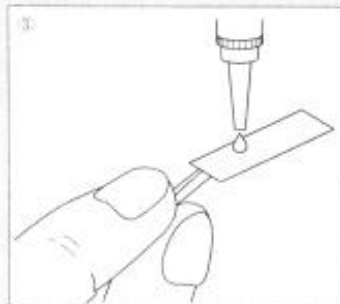
5. When the adhesive is cured, remove the polyethylene sheet and check the bonding condition. Ideally, the adhesive is slightly forced out from around the strain gage.



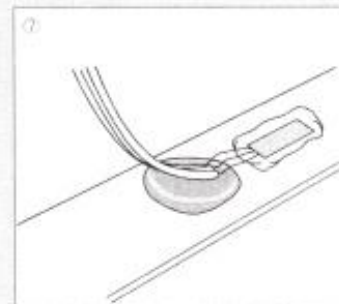
2. Using an absorbent cotton, gauze or SILBON paper dipped in a highly volatile solvent such as acetone which dissolves oils and fats, strongly wipe the bonding site in a single direction to remove oils and fats. Reciprocated wiping does not clean the surface. After cleaning, mark the strain gage bonding position.



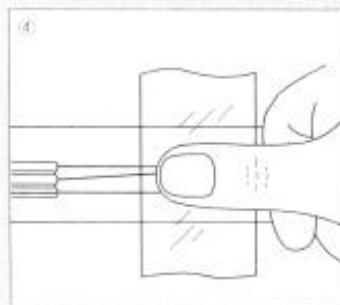
6. If the adhesive is widely forced out from around the gage base, remove the protruding adhesive with a cutter or sandpaper. Place gage leads in a slightly slackened condition.



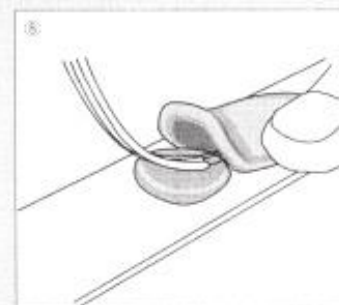
3. Make sure of the front (metal foil part) and the back of the strain gage. Apply a drop of adhesive to the back and immediately put the strain gage on the bonding site. (Do not spread the adhesive over the back. If so, curing is adversely accelerated.)



7. Put up the leadwire from before the part where the adhesive is applied. Place a block of the coating agent below the leadwire with gage leads slightly slackened.



4. Cover the strain gage with the accessory polyethylene sheet and strongly press the strain gage over the sheet with a thumb for approximately 1 minute (do not detach midway). Quickly perform steps 3 and 4. Otherwise, the adhesive is cured. Once the strain gage is put on the bonding site, do not put it up to adjust the position.

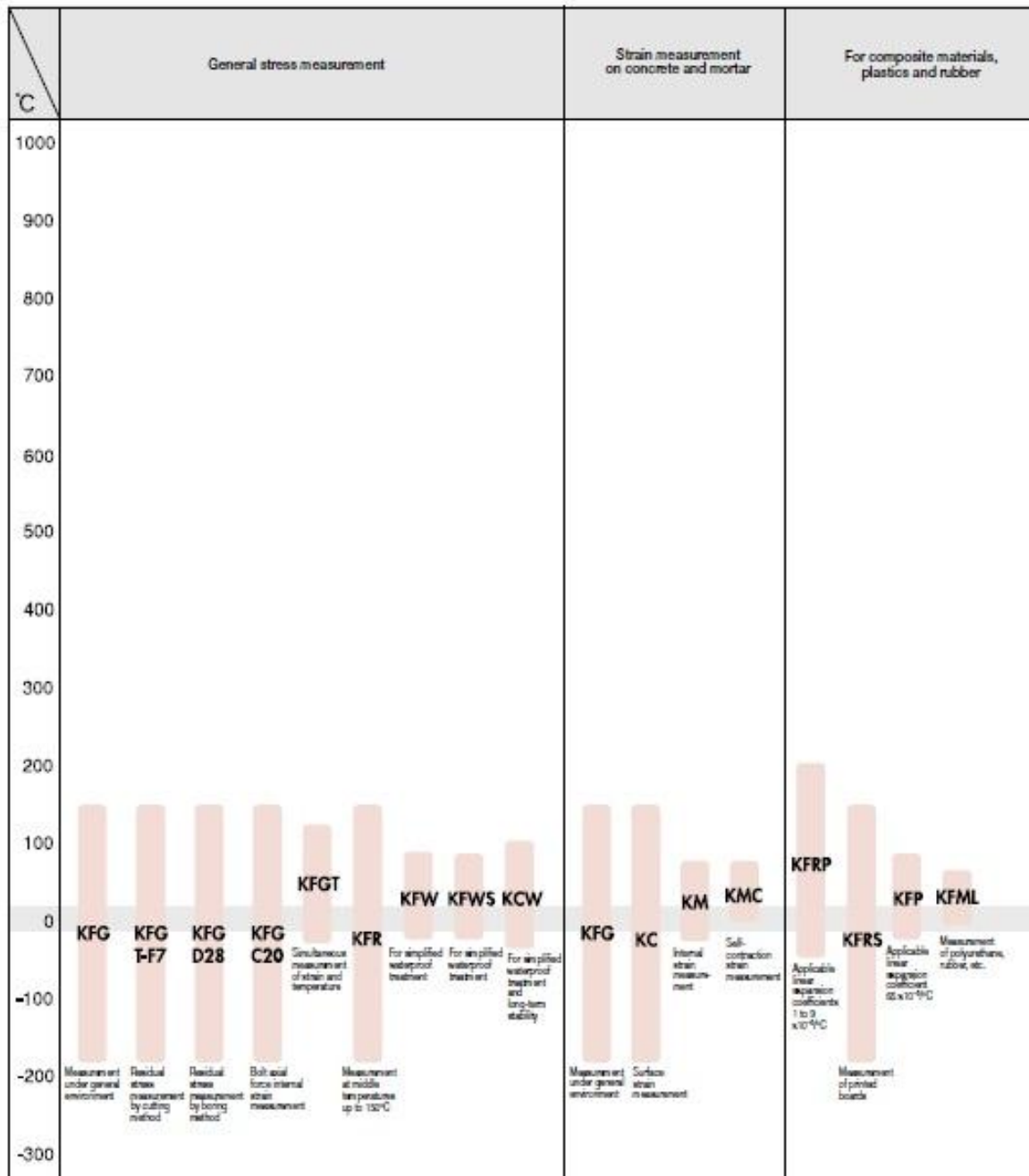


8. Completely cover the strain gage, protruding adhesive and part of the leadwire with another block of the coating agent. Do not tear the block to pieces but slightly flatten it with a finger to closely contact it with the strain gage and part of the leadwire. Completely hide protrusions including gage leads behind the coating agent.

LIITE 3 Kyowa venymäliuskan valinta

1a

Selecting a strain gage based on operating temperatures and other measuring conditions



LIITE 3 Kyowa venymäliuskan valinta

Micro-strain measurement (semiconductor gages)	Measurement at high temperatures	Measurement at low temp.	Large strain measurement	For magneto-resistance	Measurement under other conditions	°F
	Measurement in a temperature range of -196 to 350°C KHCX Measurement in a temperature range of room temperature to 350°C KHCD Measurement in a temperature range of -196 to 350°C KHCS Measurement in a temperature range of -196 to 350°C KHCM Measurement in a temperature range of -196 to 350°C KHC Measurement in a temperature range of -196 to 350°C KFU Measurement in a temperature range of -50 to 350°C KH Measurement in a temperature range of -196 to 350°C KFH					1832
						1652
						1472
						1292
						1112
						932
						752
						572
KSP KSNL KSPL						392
						212
Measurement of less than 100µm in strain under environment of less temperature change Impact-initiated strain measurement with no amplifier						32
			KLM KFEL	KFN KFS	KFF KCH KMP KTB KV	-148
			Elongation measurement up to approx. 20% Elongation measurement up to approx. 15%	Measurement under AC magnetic field Measurement under high electric field generating Inductive Noise	In the case where any gage cannot be bonded inside the structure Simplified waterproof treatment and ruggedness Internal strain measurement of resin Temperature measurement Measurement of progress and propagation velocity of crack	-328
		Measurement at stages to -269°C				-508

Note: Stated above are operating temperatures.

LIITE 3 Kyowa venymäliuskan valinta

1b Selecting a strain gage based on operating environment and purpose

	Name/series designation		Materials		Operating temperature ranges in combination with major adhesives after curing*1 (°C)	Self-temperature-compensation range (°C)	Applicable linear expansion coefficient (x10 ⁻⁶ /°C)	Strain limit at room temp. approx.*2 (%)	Fatigue life at room temp. approx.*2 (times)	Page
			Resistive element	Base						
For general stress measurement	General-purpose foil strain gages KFG	For general purpose	Cu/Ni alloy foil	Polyimide	CC-33A: -196 to 120 EP-34B: -55 to 150 PC-E: -196 to 150	10 to 100	5, 11, 16, 23, 27	5.0	1.2 x 10 ⁷	P32
		For sensing element of transducers			PC-E: -196 to 150 EP-34B: -55 to 150	10 to 100	11, 16, 23, 27	5.0	1.2 x 10 ⁷	P55
		For concrete			CC-35: -30 to 120 PC-T2: -196 to 150	10 to 100	11	5.0	1.2 x 10 ⁷	P87
		Concentrated stress measurement			CC-33A: -196 to 120 EP-34B: -55 to 150 PC-E: -196 to 150	10 to 100	11, 16, 23, 27	—	—	P51
		Residual stress measurement			CC-33A: -196 to 120 EP-34B: -55 to 150 PC-E: -196 to 150	10 to 100	11, 16, 23, 27	—	—	P66
		Bolt axial tension measurement			EP-18: Room temp. to 90 EP-34B: Room temp. to 90	10 to 100	11	—	—	P70
	Foil strain gages with temperature sensor KFOT		Cu/Ni alloy foil	Polyimide	CC-33A: -10 to 120 EP-34B: -10 to 120 PC-E: -10 to 120	10 to 100	11, 16, 23	3	1 x 10 ⁶	P71
	Foil strain gages KFR	Strain measurement at middle temperatures; for transducers	NiCr alloy foil	Polyimide	PC-E: -196 to 150 CC-33A: -196 to 120 EP-34B: -55 to 150	0 to 150	11, 16, 23	2.2	1 x 10 ⁶	P72
	Concentrated stress measurement	PC-E: -196 to 150 CC-33A: -196 to 120 EP-34B: -55 to 150			0 to 150	11, 16, 23	—	—	P77	
	Waterproof foil strain gages KFW		Cu/Ni alloy foil	Paper base + phenol-epoxy	CC-33A: -10 to 80 EP-18: -10 to 80	10 to 80	11, 16, 23	2.8	3 x 10 ⁴	P81
	Small-sized waterproof strain gages KFW5		Cu/Ni alloy foil	Polyimide	CC-33A: -10 to 80 EP-18: -10 to 80	10 to 80	11, 16, 23	5.0	3 x 10 ⁴	P85
	Weldable waterproof strain gages KCW		NiCr alloy foil	Stainless steel	(Spot welding) -20 to 100	10 to 90	11	0.5	1 x 10 ⁴ **	P86
	Wire strain gages KC		Cu/Ni alloy foil	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -196 to 150 CC-35: -30 to 120	10 to 50	11	1.8	1.5 x 10 ⁶	P90
	Embeddable strain gages KM		Cu/Ni alloy	Acrylate	(Embedment) -10 to 70	0 to 50	11	0.3	—	P92
Embeddable strain gages for concrete KMC		Cu/Ni alloy wire	Silicone	(Embedment) Room temp. to 70	—	—	0.3	—	P93	
For composite materials, plastics and rubber	Foil strain gages for composite materials KFRP		NiCr alloy foil	Polyimide	EP-34B: -55 to 200 CC-33A: -196 to 120	0 to 150	1, 3, 6, 9	2.2	1 x 10 ⁶	P94
	Strain gages for printed boards KFRS		NiCr alloy foil	Polyimide	CC-33A: -196 to 120 PC-E: -196 to 150	-30 to 120	13	1.6	2 x 10 ⁶	P99
	Foil strain gages for plastics KFP		Cu/Ni alloy foil	Paper base + phenol-epoxy	EP-34B: -20 to 80 CC-33A: -20 to 80	10 to 80	65	3.0	1 x 10 ⁶	P102
	Foil strain gages for low-elasticity materials KFML		Cu/Ni alloy foil	Phenol-epoxy	EC-30: 0 to 60 CC-33A: 0 to 60	—	—	1.0	—	P105
For individual strain measurement	Semiconductor strain gages KSP	Micro-strain measurement	P type Si	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -50 to 150 CC-33A: -50 to 120	—	—	0.3	2 x 10 ⁴ **	P106
		For sensing element of highly sensitive transducers	P type Si	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -50 to 150 CC-33A: -50 to 120	—	—	0.3	2 x 10 ⁴ **	P107
		Micro-strain meas.; 2-element, temperature-compensation type	P type Si N type Si	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -50 to 150 CC-33A: -50 to 120	20 to 70	11	0.3	2 x 10 ⁴ **	P107
	Self-temperature-compensation semiconductor strain gages KSN		N type Si	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -50 to 150 CC-33A: -50 to 120 EP-17: -50 to 120(E5)	20 to 70	11, 16	0.3	2 x 10 ⁴ **	P108
	High-output semiconductor strain gages KSPH		P type Si	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -50 to 150 CC-33A: -50 to 120	—	—	0.3	2 x 10 ⁴ **	P110
	Ultra-linear semiconductor strain gages KSPL		P type Si	Paper base + phenol-epoxy	PC-12: -50 to 150 CC-33A: -50 to 120	—	—	0.3	2 x 10 ⁴ **	P111
Notes	<p>*1. Underlined adhesives are those used for strain limit tests at room temperature and for fatigue tests at room temperature. *2. Typical values with uniaxial gages. Strain limit is the mechanical limit where a difference between the strain reading and mechanical strain initiated by applying tension load exceeds 10%. *3. Typical values with uniaxial gages. Strain level: ±1500 µε; *A: ±1000 µε; *B: ±500 µε; *C: ±100 µε.</p>									

LIITE 3 Kyowa venymäliuskan valinta

	Name/series designation	Materials		Operating temperature ranges in combination with major adhesives after curing ¹⁾ (°C)	Self-temperature-compensation range (°C)	Applicable linear expansion coefficient (α10 ⁻⁶ /°C)	Strain limit at room temp. approx. ²⁾ (%)	Fatigue life at room temp. approx. ³⁾ (times)	Page
		Resistive element	Base						
For high-temperature applications	Encapsulated strain gages KHGX	Heat-resistant special alloy wire	Heat-resistant metal	(Spot welding) -196 to 950	25 to 950	11, 13	1.0 (950°C)	1 x 10 ⁷ * (950°C)	P113
	Encapsulated strain gages KHGD	Heat-resistant special alloy wire	Heat-resistant metal	(Spot welding) Room temp. to 800	—	—	1.0 (800°C)	1 x 10 ⁷ ** (800°C)	P114
	Encapsulated strain gages KHGS	Heat-resistant special alloy wire	Heat-resistant metal	(Spot welding) -196 to 750	25 to 750	11, 13, 16	1.0 (750°C)	1 x 10 ⁶ * (750°C)	P115
	Encapsulated strain gages KHGM	Heat-resistant special alloy wire	Heat-resistant metal	(Spot welding) -196 to 650	25 to 650	11, 13, 16	1.0 (650°C)	1 x 10 ⁶ * (650°C)	P116
	Encapsulated strain gages KHC 20 type	NiCr alloy wire	Heat-resistant metal	(Spot welding) -196 to 550	Room temp. to 500	11, 16	0.8	4 x 10 ⁶ **	P117
	Encapsulated strain gages KHC 10 type						0.5	4 x 10 ⁶ **	
	Encapsulated strain gages KHC 5 type						0.5	2 x 10 ⁶ **	
	High-temperature foil strain gages KFU	NiCr alloy foil	Polyimide	PI-32: -106 to 300	10 to 300	11, 16, 23	1.0	1.5 x 10 ⁷ ** (300°C)	P121
	High-temperature foil strain gages KH-G4	NiCr alloy foil	Stainless steel	(Spot welding) -50 to 350	10 to 300	11, 16	0.5	1 x 10 ⁶ *	P126
	High-temperature foil strain gages KFH	NiCr alloy foil	Polyimide	EC-5: -106 to 250 EP-34B: -55 to 250 FI-32: -106 to 250	10 to 250	11, 16, 23	2.1	2 x 10 ⁶ *	P127
For low temp.	Low-temperature foil strain gages KFL	NiCr alloy foil	Polyimide	EC-5: -269 to 150 CC-33A: -196 to 120 UC-2E: -196 to 50	-106 to 50	5, 11, 16, 23	2.2	1 x 10 ⁶ *	P135
For break strain measurement	Ultrahigh-elongation wire strain gages KLM	CuNi alloy wire	Epoxy	EC-30: 0 to 60 CC-3E: -10 to 80	—	—	20	1 x 10 ⁶ *	P144
	High-elongation foil strain gages KFEL	CuNi alloy foil	Polyimide	CC-3E: -10 to 80	—	—	15	1 x 10 ⁶ *	P145
For anti-radiation applications	Noninductive foil strain gages KFN	NiCr alloy foil	Polyimide	EC-5: -106 to 150 CC-33A: -106 to 120	0 to 150	11, 16, 23	1	1 x 10 ⁶ *	P149
	Shielded foil strain gages KFS	CuNi alloy foil (1250Ω) NiCr alloy foil (350Ω)	Copper foil	EC-5: -106 to 150 CC-33A: -106 to 120 EP-34B: -55 to 150	10 to 100	11, 16	0.5	1 x 10 ⁶ *	P151
Internal strain	Foil strain gages for bending strain measurement KFF	CuNi alloy foil	Acrylate	CC-33A: -50 to 80 EP-1E: -50 to 80 EP-34B: -50 to 80	20 to 60	11, 16, 23	0.2	4 x 10 ⁶ **	P152
With protector	Foil strain gages with protector KCH	CuNi alloy foil	Polyimide	Protector: Stud bolt Strain gage EP-34B: CC-33A: -60 to 100	—	11	1	1.2 x 10 ⁷ **	P153
Notes	<p>*1. Underlined adhesives are those used for strain limit tests at room temperature and for fatigue tests at room temperature. *2. Typical values with uniaxial gages. Strain limit is the mechanical limit where a difference between the strain reading and mechanical strain initiated by applying tension load exceeds 10%. *3. Typical values with uniaxial gages. Strain level: ±1500 μ; *A: ±1000 μ; *B: ±500 μ; *C: ±100 μ</p>								