

Tuotantokäyttöön soveltuva edullinen menetelmä hitsin juuren puolen väsymiseliniän arvioimiseksi

Ilkka Valkonen¹ ja Antti Valkonen

Tiivistelmä. Juuren puolen väsyminen on käytännössä erityisen ongelmallinen syystä, että vauriota ei voi havaita ennenkuin särö on edennyt hitsin läpi. Analyysimenetelmistä esimerkiksi ns. Hot-Spot menetelmä ei sovellu juuren puolen väsymisen arviointiin.

Eurocode kolmessa on joitain aksiaalista kuormitusta edustavia tapauksia, jotka käytännössä ovat juuren puolen säröön liittyviä, mutta yleisesti käyttökelpoista menetelmää ei ole aikaisemmin esiintynyt. Viime vuosina on kyseisen ongelman ratkaisuun esitetty tehollisen loven menetelmää (ENS, ”Effective Notch Stress”), jossa juurivirhe mallinnetaan ja virheen päissä käytetään 1 mm säteistä kaarta, tai perinteisiä murtumismekaanisia menetelmiä.

Elementtimenetelmään on uutena yleisempään tietoisuuteen tullut alkujaan Belytschkon ja hänen ryhmänsä kehittämä XFEM, jolla pystyy mallintamaan särön elementtiverkosta riippumatta. Tämä antaa teoriassa hyvän mahdollisuuden tuotantokäyttöön soveltuvan analyysimenetelmän pohjaksi.

Tämän esityksen tarkoituksena on verrata nimellisen jännityksen menetelmää, ENS-menetelmää sekä XFEM-murtumismekaniikan käyttöä juuren puolen väsymisen arviointiin.

Avainsanat: juuren puolen väsyminen, XFEM, ENS

Vastaanotettu 15.6.2017. Hyväksytty 11.8.2017. Julkaistu verkossa 21.8.2017.

ENS

ENS-menetelmässä (”Effective notch stress”), mallinnetaan hitsin rajaviivalle tai juuren puolta tarkasteltaessa kuvan 2 tyyppisesti 1 mm säteinen kaari kohtaan, johon väsytyssärö voi muodostua. Tästä saatua jännitystä käsitellään hitsatun liitoksen väsymisikäaavoilla (6) käyttäen väsymisluokkana 225:ttä ja eksponenttina $m=3$ IIW:n ohjeen mukaan [1, 2]. ENS-menetelmä vaatii suhteellisen tarkkaa verkkoa, suositellun elementtikoon ollessa 0.25 mm [2].

XFEM

Elementtimenetelmässä potentiaalienergian minimoivaa siirtymäkenttää etsitään elementteittäin määriteltujen polynomien virittämästä avaruudesta. Elementtimenetelmän mu-

¹Vastuullinen kirjoittaja. ilkka.valkonen@bhm.fi

kainen aproksimaatio siirtymäkentälle voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\mathbf{u}_h = \sum N_i \mathbf{a}_i \quad (1)$$

Kaavassa (1) N_i on kantafunktio ja a_i on vastaava vapausaste. Perinteisesti elementtimenetelmässä kantafunktiot ovat polynomeja, jotka saavat nollasta eroavia arvoja ainoastaan yhden elementin sisällä. Vapausasteet vastaavat elementtisolmujen siirtymiä ja kiertymiä. Kantafunktiot sekä niiden derivaatat ovat jatkuvia elementtien sisällä. Tämän seurauksena siirtymäkentän approksimaatio on jatkuva, mutta jännityskentän epäjatkuva.

Rakenteessa esiintyvä särö aiheuttaa siirtymäkenttään epäjatkuvuuden. Perinteisessä elementtimenetelmässä siirtymäkenttä on jatkuva elementtien sisällä, joten särö on sisällytettävä laskentageometriaan ja verkotettava huolellisesti.

Belytschko ja muut kehittivät XFEM-menetelmän särön mallintamisen helpottamiseksi [4]. Menetelmässä perinteisen elementtimenetelmän kantaan lisätään paikallisesti funktioita, joilla saadaan otettua huomioon särön aiheuttama epäjatkuvuus sekä särönkärjen singulariteetti. Näin saatu rikastettu siirtymäkenttä voidaan lähteen [4] mukaan kirjoittaa kaavan (2) muodossa:

$$\mathbf{u}^h = \sum_{\forall i} N_i \mathbf{a}_i + \sum_{j \in J} N_j \mathbf{b}_j H(\phi(\mathbf{x})) + \sum_{k \in K} N_k \left(\sum_{l=1}^4 \mathbf{c}_k^l F_l(\mathbf{x}) \right) \quad (2)$$

Edellisessä ensimmäinen termi on perinteisen elementtimenetelmän mukainen.

Toisen termin tarkoitus on lisätä epäjatkuvuus särön läpäisemien elementtien kantaan, J on särön läpäisemien elementtien solmujen joukko. Epäjatkuvuus lisätään askelfunktion avulla:

$$\begin{cases} H(\phi(\mathbf{x})) = 1 & \text{kun } \phi(\mathbf{x}) > 0 \\ H(\phi(\mathbf{x})) = -1 & \text{kun } \phi(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Missä särön sijainti on ilmaistu tasa-arvopinnan $\phi(\mathbf{x}) = 0$ avulla.

Kolmas termi huomioi särönkärjen vaikutuksen siirtymäkenttään. Särönkärjen vaikutus otetaan huomioon lineaariselastisen murtumismekaniikan kaavoilla (sylinterikoordinaateissa):

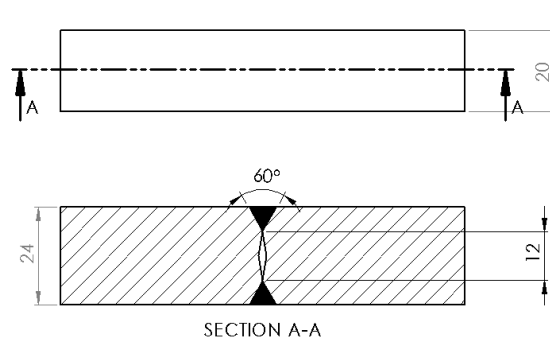
$$F_l(r, \theta) = \left\{ \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\theta), \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\theta) \right\} \quad (4)$$

Särönkärjen vaikutus otetaan huomioon tietyllä etäisyydellä r_{max} särönkärjestä. Tämän säteen sisällä olevien solmujen joukkoa merkitään kirjaimella K . Mikäli materiaalin sitkeyden takia lineaariselastisen murtumismekaniikan oletukset eivät päde, on mahdollista käyttää muunlaisia asymptoottisia ratkaisuja särönkärjelle.

Analyytit

Code_Aster-ohjelmistolla analysoitiin membraanijännityksellä oleva päittäisliitos, levyn paksuudella 24 mm, ja jossa oli keskellä symmetrisesti 12 mm levynpaksuudesta hitsaamatta, kuva 1. Tähän löytyy myös nimellisten jännitysten menetelmällä väsytyluokka (FAT) IIW:n ohjeesta [2].

Analyyssimenetelmät olivat ENS, XFEM yhdistettynä Parisin lakiin. Lisäksi analysoitiin 8-solmuisella, särön kärjessä 6-solmuisella ja 20-solmuisella, särön kärjessä 14-solmuisella välisolmut $\frac{1}{4}$ -asemissa, elementillä lasketut murtumissitkeysarvot (K_I) XFEM:n



Kuva 1. Analysoitu päittäisliitos. Juuriosuuden muoto liioteltu havainnollistamiseksi.

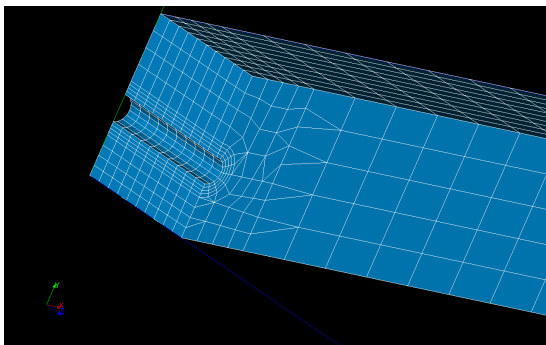
tulosten verifioimiseksi. XFEM:in yhteydessä Parisin lain (5) vaatimina parametreinä käytettiin Ikosen ja Kantolan kirjoittaman ja Otakustantamon kustantaman kirjan arvoja [3].

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_I)^n \quad (5)$$

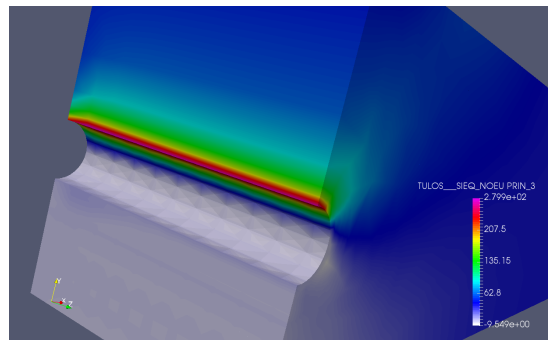
Kuormitus oli tasainen 35 MPa:n jännitys sauvan päässä. Kyseisellä kuormituksella laskettiin elinikä nimellisellä jännityksellä ja ENS-menetelmällä IIW:n ohjeiden mukaisesti (6), missä $m=3$.

$$N = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma} \right)^m \quad (6)$$

Väsytyluokka IIW:n ohjeessa [2] on 36 nimellisten jännitysten menetelmällä, joka johtaa noin 272 000 syklin elinikään. IIW tarjoaa samassa ohjeessa ENS-menetelmälle väsymisluokkaa 225. Tämä johtaa kuvan 3 arvoilla noin yhden miljoonan (1 000 000) elinikään.



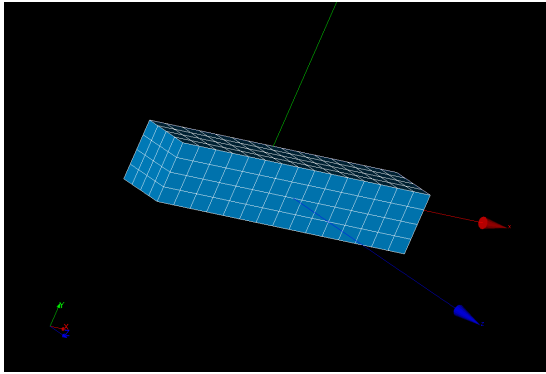
Kuva 2. ENS-menetelmän elementtimalli



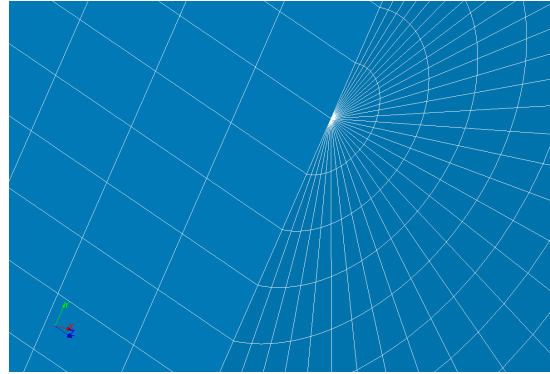
Kuva 3. ENS-menetelmän maksimi pääjännitys [MPa]

XFEM mallilla laskettiin särörintaman keskimääräiset jännitysintensiteetit kasvattaen säröä tasaisesti läpi poikkipinnan 1 mm kerrallaan 10 mm särökokoon asti, jonka perusteella laskettiin elinikä 11 mm särölle, jonka arvioitiin edustavan loppuvauriota liitoksessa. Jännitysintensiteettilukemat olivat 5.57, 5.95, 7.94, 9.8 ja 11.38 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Parisin lain vakiot olivat $C= 6.9\text{E}-12$ ja $n=3$. Näillä arvoilla eliniäksi saatiin noin 327 000 kuormanvaihtoa.

XFEM:in jännitysintensiteetti varmistettiin mallintamalla särörintama ja laskemalla jännitysintensiteetti kahdella eri elementtityypillä. Tuloksena oli 8-solmuisella elementillä



Kuva 4. XFEM-malli



Kuva 5. Traditionaalinen särömalli XFEM tulosten verifiointia varten

4.78 MPa $\sqrt{\text{m}}$ ja 20-solmuisella 5.09 MPa $\sqrt{\text{m}}$. Arvot olivat särörintaman keskiarvot särön mitan ollessa 6 mm, eli hitsaamatonta aluetta kuvan 1 mukaisesti 12 mm.

Johtopäätökset

Olettamalla nimellisen jännityksen menetelmän edustavan todellista väsymisikää, oli XFEM:n tulos lähellä sitä. ENS-menetelmä sen sijaan antoi selkeästi liian pitkän eliniän. Tästä on viitteitä myös kirjallisuudessa [1]. On myös otettava huomioon, että ENS-menetelmä on hyvin työläs, eli kallis mallintamisen kannalta, kun taas XFEM on hyvin nopeakäyttöinen ja helpompi mallintaa. Heli Mettänen ja muut ovat kirjoittaneet asiasta IIW-dokumentin [5], jossa on myös huomioitu XFEM-menetelmän tehokkuus.

Saatujen tulosten perusteella XFEM edustaa lupaavaa, tuotantokäyttöön soveltuvaa menetelmää juuren puolen särön analysointiin, kun taas ENS-menetelmä on haastava kehittää muotoon, jossa sillä olisi laajalti teollista käyttöä.

Viitteet

- [1] W. Fricke, IIW guideline for the assessment of weld root fatigue. *Welding in the World*, 57(6):753–791, 2013, <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0066-y>
- [2] A. F. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components. *IIW Document*, IIW-xxxx-13/XIII-2460-13/XV-1440-13.
- [3] K. Ikonen and K. Kantola, *Murtumismekaniikka* Otakustantamo, 1986.
- [4] N. Moës, J. Dolbow and T. Belytschko, A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46:131–150, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990910\)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J)
- [5] H. Mettänen, T. Björk and T. Nykänen, Comparison of different methods for fatigue assessment of vibrating welded structures. *IIW Document*, IIW-XIII-2474-13.

Ilkka Valkonen,
 BMH Technology Oy, PL 32, 26101 Rauma
 s-posti: ilkka.valkonen@bmh.fi

Antti Valkonen
 Aalto Yliopisto, Rakennustekniikan laitos
 s-posti: antti.3.valkonen@aalto.fi