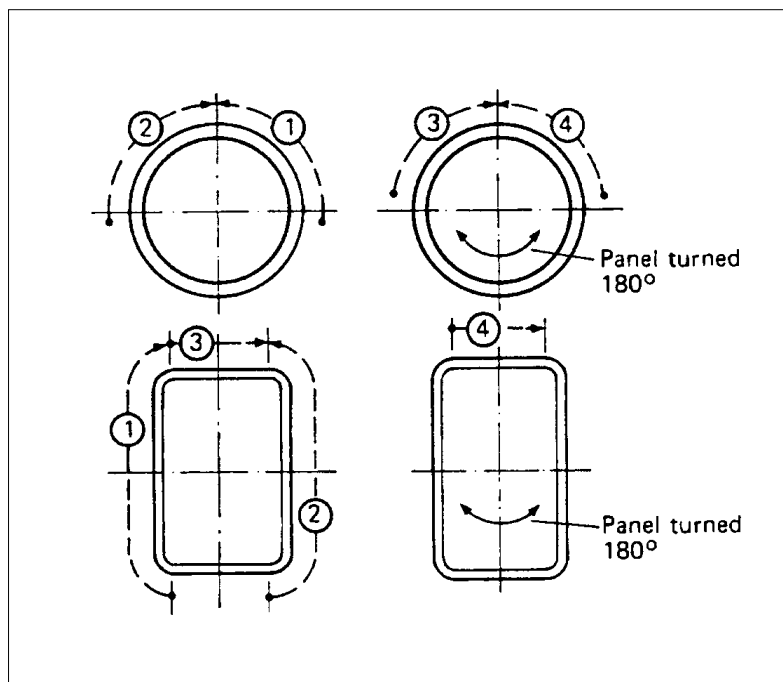


Asko Kähönen, Valteri Pärssinen, Reijo Ilvonen &
Aslak Siljander

Putkipalkkien ja korkealujuuksisten terästen käyttö ajoneuvorakenteissa



Putkipalkkien ja korkealujuuksisten terästen käyttö ajoneuvorakenteissa

Asko Kähönen & Valtteri Pärssinen

VTT Valmistustekniikka

Reijo Ilvonen

Rautaruukki Oy Metform

Aslak Siljander

VTT Valmistustekniikka



ISBN 951-38-5625-9 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5626-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Valmistustekniikka, Laiva- ja konetekniikka, Tekniikantie 12, PL 1705, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 455 0619

VTT Tillverkningssteknik, Skepps- och maskinteknik, Teknikvägen 12, PB 1705, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 455 0619

VTT Manufacturing Technology, Maritime and Mechanical Engineering, Tekniikantie 12, P.O.Box 1705,
FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 0619

Toimitus Kerttu Tirronen

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Kähönen, Asko, Pärssinen, Valtteri, Ilvonen, Reijo & Siljander, Aslak. Putkipalkkien ja korkealujuuksisten terästen käyttö ajoneuvorakenteissa [High strength steel and structural hollow sections tubes in vehicle structures]. Espoo 1999. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2008. 43 s.

Avainsanat vehicles, structural loads, constructions, hollow section tubes, high strength steel, fatigue design, fatigue loads, rectangular structures, circular structures, static strength, real duty stresses

Tiivistelmä

Ajoneuvorakenteisiin kohdistuvat kuormitukset ovat pääasiassa väsyttäviä, joten on välttämätöntä mitoittaa ne myös väsymiskestävyyden mukaan. Väsymiskestoikää voidaan parantaa huomattavasti suunnitteluvaiheessa, vaikka todellisia ajonaikaisia rasituksia ei vielä tarkasti tunnetakaan. Ajoneuvorakenteiden suunnitteluvaiheessa tarvittavia kuormituksia ja rasituksia voidaan selvittää simulointimenetelmien tai prototyyppivaiheen kenttämittausten avulla. Kuitenkin kaikkien rasituksia aiheuttavien parametrien huomioon ottaminen etukäteen on käytännössä mahdotonta. Putkipalkkiliitoksille soveltuu parhaiten hot spot -väsymismitoitustapa ja tietyissä tapauksissa myös niemellisten jännitysten menetelmä, jonka jännityskonsentraatiokertoimet (SCF) saadaan kirjallisuudesta, PC-ohjelmista tai FEM-laskelmien avulla.

Putkipalkkien lujuusteknisiä ominaisuuksia voidaan hyödyntää monipuolisesti ajoneuvorakenteissa. Hyvän taiputus- ja vääntöjäykkyyden vuoksi putkipalkit soveltuvat moniin käyttökohteisiin. Laaja mittavalikoima tukee painon optimointia ja helpottaa suunnittelua. Valmistuksen aikainen käsittely, ruostesuojaus ja kokoonpano helpottavat sekä siirto- ja käyttökustannukset pienenevät. Putkipalkkien käytöllä rungossa päästään helposti joko ajo-ominaisuuksien tai kestäväyyden kannalta riittävään vääntöjäykkyyteen. Myös korirakenteissa on mahdollista hyödyntää putkipalkkien ominaisuuksia, sillä turvarakenteilta vaadittava kuormankantokyky ja energian absorbointikyky on putkipalkeilla hyvä. Väännön mukaan joustavissa rakenteissa putkipalkin suuri vääntöjäykkyys saattaa aiheuttaa paikallisia rasituksia, jotka on otettava mitoituksessa huomioon.

Lujien terästen käytöstä on lähinnä tarkasteltu niiden soveltuvuutta väsyttävästi kuormitettuihin rakenteisiin. Tietyin rajoituksin lujien terästen parempaa staattista kestävyyttä voidaan hyödyntää myös väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa. Tällöin rakenteen tai komponentin kuormituskertymän muoto on ratkaisevaa. Mikäli suuria kuormitusvaihteluita on vähän ja staattisen keskijännityksen suhde jännitysvaihteluihin on suuri, voidaan parempaa staattista lujuutta hyödyntää. Uusimpia tuloksia lujien terästen käytöstä väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa on tarkasteltu mm. tätä tutkimusta rahoittaneen NI-projektin loppuraportin ja käynnissä olevien muiden tutkimusprojektien tulosten avulla.

Kähönen, Asko, Pärssinen, Valtteri, Ilvonen, Reijo & Siljander, Aslak. Putkipalkkien ja korkealujuuksisten terästen käyttö ajoneuvorakenteissa [High strength steel and structural hollow sections tubes in vehicle structures]. Espoo 1999. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2008. 43 p.

Keywords vehicles, structural loads, constructions, hollow section tubes, high strength steel, fatigue design, fatigue loads, rectangular structures, circular structures, static strength, real duty stresses

Abstract

The structural loads in vehicle constructions can be mainly interpreted as fatigue loads. This makes it utmost important that the fatigue design is implemented in the design. The structural fatigue life can be enhanced easier in the design phase than later in the production stage even if the actual duty loads are not known. One way of finding out the real duty loads is to make structural simulations or to conduct field measurements in actual operating conditions. However, finding out all the relevant load data is very challenging. The main fatigue design method for the structural hollow sections is the hot spot method or, in certain situations, the nominal stress method. Then the stress concentration factors are found from the relevant literature or they are calculated using finite element method (FEM).

This report describes the possibilities to use rectangular and circular hollow section tubes manufactured from high strength steel in vehicle structures. The suitability of high strength steels for the fatigue loaded structures is being reviewed. With certain limitations, higher static strength can be utilized also in predominantly dynamically (fatigue) loaded structures and components. In this case the form of the load spectrum is crucial, i.e. the number and values of large stress ranges compared to small ones. If the number of large stress variations is relatively low and the ratio of mean stress to stress range is high, higher static strength can be of benefit.

The study shows that it is possible to benefit from the properties of rectangular and circular hollow sections in vehicle structures. By appropriately combining the properties - good bending and torsional strength - it becomes possible to use rectangular and circular hollow sections in vehicle structures such as in bogie or chassis structures. Large available size collection of these tubes makes the structural design easy and the weight optimization possible. The collision safety requirements of the vehicle structures favour also the use of rectangular and circular hollow sections.

Alkusanat

Tämän raportin tutkimustyöstä pääosa tehtiin yhteispohjoismaisessa NI-projektin suomalaisessa osaprojektissa “Kuljetusvälineiden keventäminen ja rakenteiden väsymiskestävyyden parantaminen”. Projektin tavoitteena oli parantaa kuljetusvälinerakenteiden luotettavuutta ja erityisesti väsymiskestävyyttä sekä tuoda uusia suunnittelumenetelmiä alan teollisuuden käyttöön. Projektiin osallistuivat Rautaruukki Oy Metform, Närko Oy, Sisu Terminal Systems ja Patria Vehicles.

Raportti on tehty yhteistyössä Rautaruukki Oy Metformin kanssa. Rautaruukki Oy Metformin edustajana projektissa on toiminut dipl. ins. Reijo Ilvonen. Raportin julkaisua siirrettiin uusien tutkimustulosten mukaansaamisen vuoksi. VTT Valmistustekniikka kiittää kaikkia projektiin osallistuneita yrityksiä miellyttävästä yhteistyöstä.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
SISÄLLYSLUETTELO.....	6
1. JOHDANTO	7
2. PUTKIPALKKIEN SOVELTUVUUS AJONEUVORAKENTEISIIN	9
2.1 Putkipalkkien ominaisuudet	9
2.1.1 Putkipalkkien hitsattavuus.....	11
2.1.2 Korroosiosuojaus	14
2.2 Ajoneuvorakenteissa esiintyvät kuormitukset.....	15
2.2.1 Staattinen ja dynaaminen kuormitus.....	15
2.2.2 Väsyttävä kuormitus	18
2.2.3 Onnettomuuskuormat	21
2.3 Putkipalkkien nykyinen käyttö ajoneuvoissa ja työkoneissa	23
2.4 Putkipalkkien mahdolliset käyttökohteet ajoneuvorakenteissa.....	24
3. PUTKIPALKKILIITOSTEN VÄSYMISLUJUUS.....	27
3.1 Yleistä	27
3.2 Nimellisten jännitysten menetelmä putkipalkkiliitosten mitoituksessa	28
3.3 Hot spot -menetelmä	28
3.4 Väsymislujuuden parantaminen putkipalkkiliitosten suunnittelussa	31
4. KORKEALUJUUKSISTEN TERÄSTEN KÄYTTÖ AJONEUVO- RAKENTEISSA	33
4.1 Ajoneuvorakenteiden keventäminen korkealujuuksisten terästen käytöllä.....	33
4.2 Korkealujuuksisten terästen väsymislujuus	33
4.3 Hitsausliitoksen väsymislujuuden parantaminen	35
5. YHTEENVETO.....	39
6. LÄHDELUETTELO	40

1. Johdanto

Ajoneuvorakenteilta vaaditaan keveyttä ja kestävyyttä hyvinkin erilaisissa ja muuttuvissa ajo-olosuhteissa. Nykyaikaisessa suunnittelussa korostetaan rakenteen painon optimoimista ja väsymislajuuden parantamista, koska ajoneuvovalmistajien välinen kilpailu on kovaa ja asiakkaiden asiantuntemus ja vaativuus kasvavaa. Toisaalta ajo-ominaisuudet ovat tärkeä kriteeri rungon jäykkyyttä (tai joustavuutta) ajatellen. Rakenteiden keventämisen tarve on johtanut myös uusien, entistä lujempien rakennemateriaalien käyttöön. Keventäminen esim. korkealujuuksisia teräksiä käyttämällä kohottaa kuitenkin käytönaikaisia jännityksiä (Siljander 1994). Tämä lyhentää kestoikää, jos liitosten väsymiskestävyyttä ei vastaavasti paranneta.

Ajoneuvorakenteissa on useita kohteita, joissa putkipalkki täyttää rakenteen lujuusvaatimukset. Putkipalkkien paino/lujuus -suhde on varsin hyvä. Siksi putkipalkkeja käytetään myös rakenteissa, joissa pyritään painon minimointiin. Nelikulmaisen putkipalkin taivutusjäykkyys molempiin suuntiin ja vääntöjäykkyys ovat hyvät (CIDECT 1995). Putkipalkkien vääntöjäykkyyttä on mahdollista hyödyntää ajoneuvorakenteissa, mutta on myös pystyttävä tunnistamaan kohteet, joilta vaaditaan ensisijaisesti väännön joustavuutta. Jos rakenteelta edellytetään ensisijaisesti joustavuutta, joudutaan profiilin valintaan kiinnittämään erityistä huomiota. Suunnitteluvaiheessa voi olla vaikeaa arvioida rakenteissa esiintyviä jännityksiä perinteisin menetelmin, jolloin elementtimenetelmän (FEM) tai venymämittausten käytöstä on apua (Kähönen 1993). Myös rakenteen käyttäytymisen simuloinnilla voidaan arvioida suunnittelukuormia.

Ajoneuvojen turvallisuudella on enenevästi merkitystä tulevaisuuden markkinoilla. Kuormankantokyvyn säilyminen suurista muodonmuutoksista huolimatta on tärkeä ajoneuvorakenteiden turvallisuutta lisäävä ominaisuus (Kecman 1983). Putkipalkkien poikkileikkauksen ominaisuudet soveltuvat hyvin onnettomuuskuormien kanton.

Kuljetuksissa maakulkuneuvot ovat olleet johtavassa asemassa, ja myös tulevaisuudessa niiden käytön oletetaan lisääntyvän. Kuorma-autojen pakokaasupäästöihin kiinnitetään kuitenkin entistä enemmän huomiota useissa Euroopan maissa. Huoli ympäristöasioista on saanut myös Euroopan komission tukemaan nykyistä säästävempien ajoneuvojen kehittämistä (Kosonen 1997). Rahallinen tuki vaikuttaa myös kevyiden ja/tai lujien materiaalien asiantuntemuksen ja käytön lisääntymiseen. Korkealujuuksisten terästen käytöllä ajoneuvoja voidaan keventää, mutta samalla väsymislajuuden parantamiseen tähtäävät toimet korostuvat (Härkönen & Tervola 1993).

Hitsatun rakenteen liitoksissa on usein suuria jännityskeskittymiä, jotka pienentävät väsymislajuutta. Jännitysten keskittymiseen voidaan vaikuttaa muotoilemalla epäjatkuvuuskohdat järkevästi (Wingerde 1992). Suunnitteluvaiheessa myös ajoneuvorakenteiden putkipalkkien välisten liitosten väsymiskesto voidaan pidentää valmistuskustannuksia lisäämättä.

Vaikka liitosten paikkaa ja muotoa ei voi enää parantaa, niin hitsin väsymislujuutta voidaan parantaa jälkikäsitteilyllä. Usein ovat myös korkealujuuksisten terästen käytön edellytyksenä väsyttävästi kuormitetuissa ajoneuvorakenteissa juoheva hitsigeometria, edullinen jäännösännitystila tai hitsausliitoksen parantaminen jälkikäsitteilyllä.

Tämän julkaisun tavoitteena on antaa kuva sekä putkipalkkien soveltuvuudesta ajoneuvorakenteisiin että lujien terästen käytöstä väsyttävästi kuormitetussa rakenteessa. Ensin tarkastellaan putkipalkkien yleisiä ominaisuuksia, erilaisia ajoneuvoissa esiintyviä kuormituksia ja tarkastellaan tyypillisiä ja mahdollisia käyttökohteita. Erityisesti kiinnitetään huomiota putkipalkkien väsymisominaisuuksiin. Lisäksi tarkastellaan korkealujuuksisen teräksen käyttöä ajoneuvorakenteissa.

Julkaisussa esitellään keskeisiä tuloksia päättyneen NI-KONSPRO-projektin ja muutamien muiden vielä käynnissäolevien tutkimusprojektien tuloksista erityisesti korkealujuuksisen teräksen käytöstä väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa. Julkaisu täydentää Rautaruukin putkipalkki -käsikirjan tietoja.

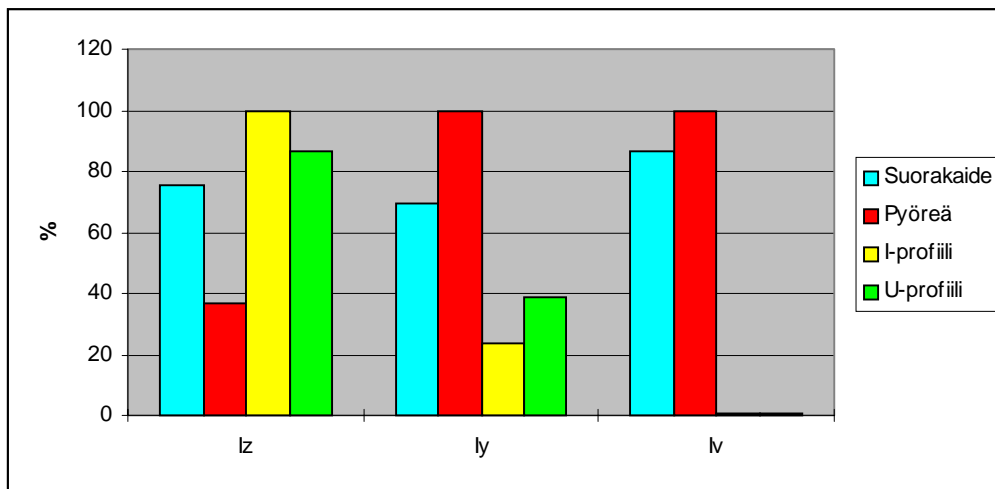
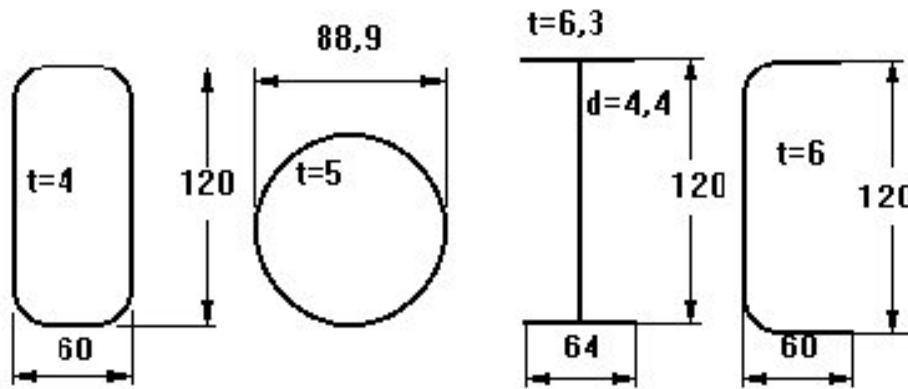
2. Putkipalkkien soveltuvuus ajoneuvorakenteisiin

2.1 Putkipalkkien ominaisuudet

Putkipalkkien monipuolisia ominaisuuksia hyödynnetään paljon hitsatuissa teräsrakenteissa. Putkipalkkeja käytetään usein erilaisissa ristikkorakenteissa, koska niillä on hyvä nurjahduskestävyys ja valmistusteknisesti edullinen muoto (Wardenier 1982). Putkipalkkirakenteet ovat usein kevyitä kantokykyynsä nähden, joten rakenteen omasta painosta johtuvat kuormitukset eivät muodostu suuriksi. Myös laaja mittavalikoima mahdollistaa hyvinkin optimaalisen rakenteen suunnittelun.

Tässä työssä keskitytään neliön- ja suorakaiteenmuotoisiin putkipalkkeihin, jotka valmistetaan kuumavalssatusta teräsnauhasta kylmämuovaamalla ja pituussaumahitsaamalla. Putkipalkkien yksinkertainen muoto ja hyvät lujuusominaisuudet tekevät sen paino/lujuus -suhteesta edullisen. Putkipalkeilla on hyvä vääntölujuus, kuten suljetuilla profiileilla yleensä. Tätä ominaisuutta on mahdollista hyödyntää mm. konsoli- ja ulokepalkkirakenteissa (Vainio et al. 1998). Vääntöjäykkyys saattaa aiheuttaa myös turhia jännityksiä rakenteeseen silloin, kun joustot olisivat sallittuja tai jopa toivottavia. Eri-suuntaisten taivutuskuormien kestävyys putkipalkeilla on hyvä, koska laipat ovat kaukana neutraaliakselilta kaikissa suunnissa.


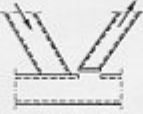





Kuvassa 1 on esitetty jäyhyysmomenttien ja vääntöjäyhyyden vertailu eräille tyypillisille profiileille. Erityisesti vertailtujen profiilien vääntölujuudessa on huomattavia eroja. Vääntölujuuden merkitystä ajoneuvoissa on käsitelty luvussa 2.4. Kylmämuovatuille putkipalkeille on standardi EN 10219, osat 1 ja 2 (1997).



Kuva 1. Poikkipintasuuroiden I_z , I_y ja I_v vertailu eräille samanpainoisille profiileille.

Putkipalkeilla on hyvät ominaisuudet valmistuksen kannalta. Materiaalien hitsattavuus on hyvä ja neliö- ja suorakaideputkien liitokset ovat yksinkertaisia ja valmistusystävällisiä. Putkipalkkien mitat on mahdollista määrittää vähillä parametreilla, joten tietokoneavusteiset suunnittelu- ja optimointimenetelmät soveltuvat rakenteille hyvin. Suunnittelua helpottaa myös laaja mittavalikoima, joka mahdollistaa mm. seinämänpaksuuden käyttämisen suunnittelumuuttujana perusgeometriaa muuttamatta (Vainio et al. 1998).

Putkipalkkiliitoksissa on usein korkeita jännitysgradientteja, koska liitosten alueella on paikallisia seinämän taivutusjännityksiä (Wingerde 1992). Staattisesti kuormitetuilla liitoksilla on erilaisia vauriomekanismeja (kuva 2). Käytännön suunnittelussa käytetään eri vauriomekanismit huomioon ottavia yksinkertaistettuja laskentakaavoja (CIDECT 1995, Wardenier 1982, RIL-167-2 1988, Vainio et al. 1998). Jos liitoksen paikallinen kestävyys ei ole riittävä, on tapauskohtaisesti harkittava, kannattaako esim. vahvistaa yksittäistä liitosta tai valita paksuseinämäisempi profiili.

Murtotapa		Rakenne, jolla murtotapa on mahdollinen
Paarteen pinnan myötö		Ohutseinäinen paarre ja pieni uumasauvan leveys verrattuna paarteen leveyteen
Paarteen pinnan leikkauslävistyminen		Ohutseinäinen ja leveä paarre, uumasauva hieman paarretta kapeampi
Uumasauvan tai hitsin murtuminen		Paksuseinäinen uumasauva ja ohutseinäinen paarre
Puristussauvan paikallinen lommahdus		Ohutseinäinen ja suuren sivumitan omaava uumasauva
Paarteen leikkausmyötö		Matala ja ohutseinäinen paarre
Paarteen uuman lommahdus		Korkea ja ohutseinäinen paarre sekä samanleveyiset paarre ja uumasauva
Paarteen pinnan paikallinen lommahdus		Ohutseinäinen ja leveä paarre

Kuva 2. Ristikkorakenteiden liitosten vaurioitumismalleja (Vainio, et al. 1998).

Useimmissa lähteissä (Wardenier 1982, Vainio et al. 1998, Wingerde 1992, CIDECT 1995) käsitellään putkipalkkiliitosten kestävyyttä lähinnä ristikkorakenteissa esiintyvissä kuormitustapauksissa. Ajoneuvorakenteissa saattaa esiintyä vastaavia kuormituksia, vaikka rakenteeseen vaikuttavat ja rakenteissa esiintyvät voimat ovat usein rakenteeseen nähden eri tasossa tai tasoissa (arinarakenne). Tärkeimmän eron näiden rakenteiden välillä muodostavat vääntökuormitukset, jotka ovat usein merkittäviä ajoneuvorakenteissa (Rusinski 1984). Toisaalta ajoneuvorakenteissa ei yleensä esiinny suuria ristikkorakenteille tyypillisiä sauvavoiman kaltaisia voimia (Beermann 1984), joten suurinta osaa kirjallisuuden kuormitustapauksista ei voi käyttää apuna ajoneuvorakenteiden suunnittelussa.

2.1.1 Putkipalkkien hitsattavuus

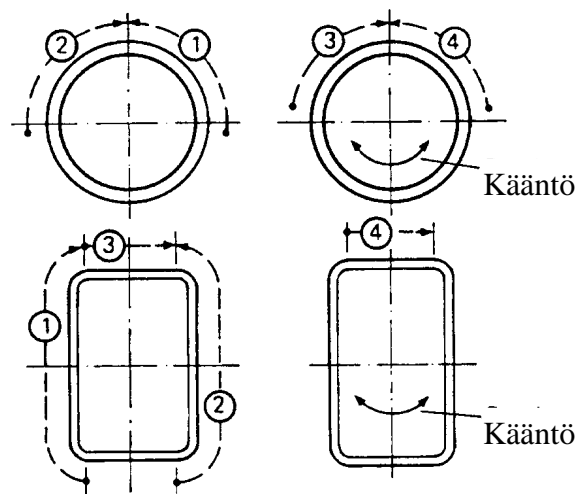
Putkipalkeissa käytetyt teräkset ovat hyvin hitsattavia. Yleisimmin käytetty ja myös ajoneuvorakenteiden hitsaukseen soveltuva menetelmä on MIG/MAG -hitsaus, jonka asentohitsausominaisuudet ja hitsin laatu ovat hyviä. Suojakaasuna käytetään yleisimmin hiilidioksidia tai argon-hiilidioksidiseosta (CIDECT 1995).

Eri teräslajien karkenevuutta ja kylmähalkeilualttiutta tutkittaessa määritetään yleensä hiilikvivalenttiarvo CEV kaavan 1 perusteella.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

Alle 16 mm:n seinämänpaksuuksilla ei esiinny kylmähalkeilua, kun hiilikvivalentti on alle 0,40. Putkipalkkeja hitsattaessa ei tarvitse käyttää korotettua työlämpötilaa, koska hiilikvivalentti ja seinämänpaksuudet ovat pieniä (CIDECT 1995).

Putkipalkkien valmistuksellinen hitsattavuus on hyvä, koska niiden yksinkertainen muoto ja nelikulmaisten putkipalkkien pyöristyssäteet helpottavat hitsausta. Hitsauksen aloitusta tai lopetusta ei kuitenkaan suositella nurkkapyörityksen kohdalta, vaan hitsaus on parempi tehdä kuvassa 3 esitetystä järjestyksestä. Hitsausvirheitä on vältettävä tällä tyypillisesti suurten jännitysten alueella. Esimerkiksi hitsin aloitus- tai lopetuskohta nurkkapyörityksen alueella saattaa huonontaa merkittävästi liitoksen väsymiskestävyyttä.



Kuva 3. Esimerkki oikeasta hitsausjärjestyksestä putkipalkkien päittäisliitoksessa (CIDECT 1995).

Hyvään hitsaustulokseen päästään, kun käytetään kuivia emäksisiä lisäaineita, kun hitsattavat pinnat ovat puhtaat ja railon muoto oikea ja kun laadunvarmistustoimet suoritetaan (Vainio et al. 1998). Kuvassa 4 on esitetty suorakaiteen- ja neliönmuotoisille putkipalkeille suositeltuja railon muotoja ja ilmarakoja.

Hitsausliitosten suunnittelussa on nurkan pyöristyssäde otettava huomioon. Suuri pyöristyssäde voi johtaa liian suureen ilmarakoon, pieni pyöristyssäde puolestaan edellyttää sauvan reunan viistämistä (kuva 4). Hitsauksen laatu taas vaikuttaa ratkaisevasti väsymiskestävyyteen, joten hyvä detaljisuunnittelu (epäjatkuvuuksien

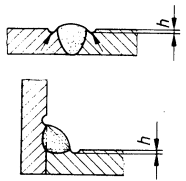
välttämisen, juoheva hitsigeometria ja helppo hitsattavuus) on tärkeää erityisesti väsymiskestävyyden kannalta.

Lisäksi on tarkistettava standardien eri hitsiluokille sallimat sovitus- ym. virheet käytetyn standardin mukaan (SFS-EN 25817). Putkipalkkien muovausaste ja laatuluokat eivät rajoita hitsausta, kun käytetään standardin SFS-EN 10219 mukaisia tuotteita. Vastaavat ohjeet löytyvät myös Rautaruukin putkipalkkikäsi kirjasta (Vainio et al. 1998).

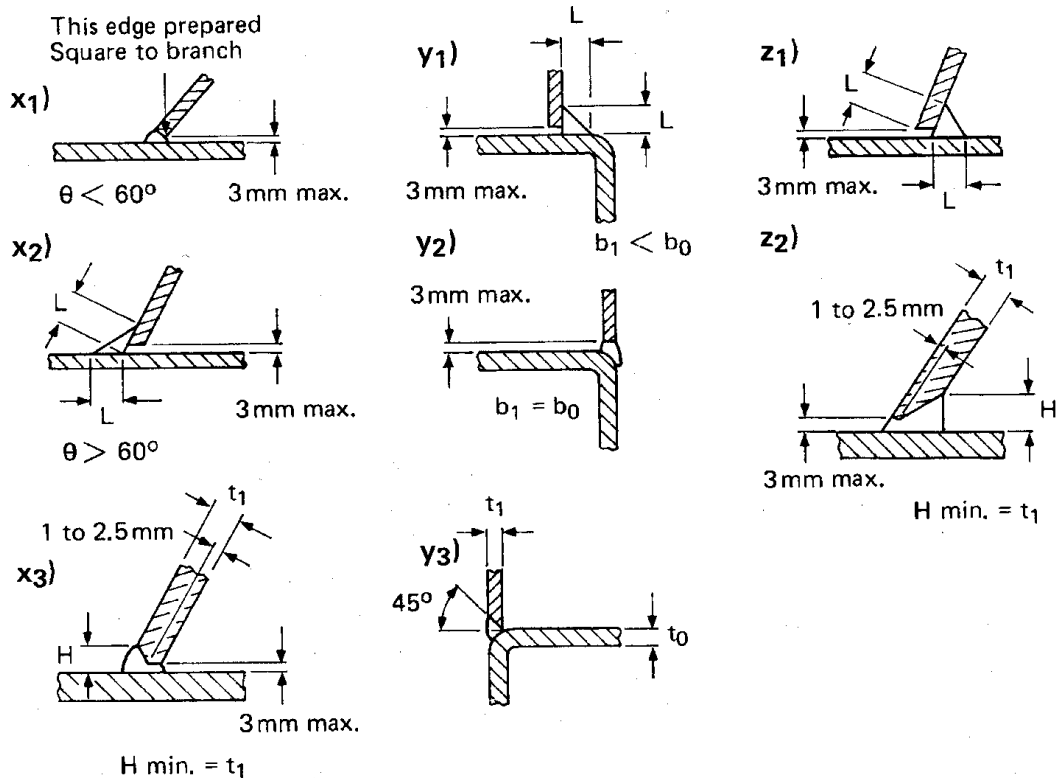
Hitsausvirheisiin perustuvat hitsiluokat on määritelty standardissa SFS-EN 25817 (1993). Hitsiluokat ovat tyydyttävä D, hyvä C ja vaativa B. Hitsausvirheille on määritetty raja-arvot eri hitsiluokkien mukaan. Standardin mukaan on toivottavaa käyttää yhtä hitsiluokkaa kaikkien standardissa määritettyjen 26 hitsausvirheen osalta, mutta se sallii myös eri hitsiluokkien käytön eri hitsausvirheille samassa liitoksessa. Tällaisiin poikkeuksiin on syytä turvautua mm. silloin, kun jokin tietty hitsausvirhe on väsymisen tai tiiviyyden kannalta merkittävä. Taulukossa 1 on esitetty hitsiluokkien hitsausvirheille asettamat vaatimukset reunahaavan osalta. Reunahaavan merkitys liitoksen väsymislujuuteen on huomattava, koska se voi toimia alkusärönä (ks. esim. Berge 1985, Niemi & Kemppi 1994). Reunahaavalta voidaan vaatia poikkeuksellisesti korkeampaa hitsiluokkaa kuin muilta hitsausvirheiltä. Reunahaavalle on mahdollista myös asettaa lisävaatimus, kuten reunahaavan hionta tai uudelleensulatus TIG-menetelmällä. Hitsin väsymislujuuden parantamista on käsitelty tarkemmin luvussa 4.3. Putkipalkkien päittäisliitosten hitsin juuren puolen laadunvarmistukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Taulukko 1. Hitsiluokkien reunahaavalle asettamat vaatimukset (SFS-EN 25817 1993).

Virhetyyppi	Hitsiluokan hitsausvirheelle asettamat raja-arvot		
	Tyydyttävä D	Hyvä C	Vaativa B
Reunahaava	$h \leq 1,5 \text{ mm}$	$h \leq 1,0 \text{ mm}$	$h \leq 0,5 \text{ mm}$



Juoheva liittyminen vaaditaan



Kuva 4. Suositeltuja railon muotoja ja ilmarakoja suorakaiteen ja neliönmuotoisten putkipalkkien liitoksissa (CIDECT 1995).

2.1.2 Korroosiosuojaus

Rakenneteräkset ruostuvat suojaamattomina ilmassa olevan hapen ja kosteuden vaikutuksesta. Korroosion etenemistä kuvaava syöymisnopeus on Suomessa yleensä 5 - 40 $\mu\text{m}/\text{v}$ ympäristön mukaan. Korroosion eteneminen hidastuu ajan myötä, koska jo syntynyt ruostekerros suojaa teräksen pintaa ruustumisen etenemiseltä. Ajoneuvorakenteet joutuvat yleensä myös korroosiolle altistaviin olosuhteisiin, kuten meri-, kaupunki- ja teollisuusympäristöihin. Näissä olosuhteissa ilman suuremmat rikki- ja kloridipitoisuudet lisäävät syöymisnopeutta. Teräs syöpyy neljässä vuodessa Suomessa maaseudulla 35 - 42 μm ja kaupungissa 59 - 97 μm (Kaunisto 1994). Suomen oloissa talvipakkaset hidastavat jonkin verran korroosion etenemistä, koska rakenteiden alapinnoille ei pääse kerääntymään haitallista kondenssivettä (Vainio et al. 1998).

Korroosiosuojaukseen soveltuvat parhaiten korroosionestomaalaus ja kuumasinkitys. Korroosiosuojattavan pinnan esikäsittelyllä (puhdistus, rasvanpoisto ja hiekkapuhallus) on ratkaiseva merkitys molempien menetelmien onnistumiselle. Tällä hetkellä ajoneuvorakenteiden käytetyin suojaustapa on maalaus. Esikäsittelyn lisäksi maalauksessa on tärkeää valita oikea maaliyhdistelmä ja kerrospaksuus.

Kuumasinkityn teräspinnan korroosiokestävyys perustuu ns. sinkkipatinnan muodostumiseen. Patinan syntymisen edellytyksenä on vastasinkityn kappaleen varastoiminen hyvin ilmastoituun tilaan, sillä kosteus saattaa estää patinan muodostumisen (Vainio et al. 1998). Ulkoilmassa käytettävien kuumasinkkipinnoitteiden paksuudet ovat yleensä 50 - 150 μm . Myös sinkki syöpyy huomattavasti nopeammin kaupunkiympäristössä, koska ilman happamoittavat epäpuhtaudet kiihdyttävät sinkin korroosiota merkittävästi. Maaseudulla sinkki syöpyy neljässä vuodessa 1,6 - 2,0 μm , kaupungissa 4,4 - 8,2 μm (Kaunisto 1994).

Sinkin suojavaikutus perustuu terästä pienempään syöpymisnopeuteen ja sinkin katodiseen suojavaikutukseen. Katodisesta suojasta on hyötyä erityisesti silloin kun sinkkipinnassa on paikallinen vaurio, sillä tällöin teräksen ruostuminen estyy katodisesti (Ilvonen et al. 1987).

Sinkitys soveltuu hyvin myös putkipalkin sisäpuoliseen korroosiosuojaukseen. Sinkitettävä rakenne tulee suunnitella siten, että sinkki pääsee virtaamaan vapaasti putkipalkin sisälle ja sisältä pois. Kuumasinkityksessä ruosteesta ja epäpuhtauksista puhdistettu rakenne upotetaan sulaan sinkkiin, jolloin teräksen pintaan syntyy rautasinkkiyhdisteistä ja puhtaasta sinkistä muodostuva kerros. Jos rakenteeseen jää umpinaisia osia, tulee umpinaisten osien liitoskohtiin tehdä reiät tuuletusta ja sinkin valumista varten. Reikien sijoituksessa tulee ottaa huomioon rakenteen kestävyysvaatimukset, sillä mm. väsymiskestävyys saattaa heikentyä huomattavasti, jos tuuletusreiکیä sijoitetaan rasitettuihin kohtiin. Toisaalta suljetut umpinaiset putket saattavat aiheuttaa räjähdysvaaran kuumasinkityksessä (RIL-167-3 1988). Vaativien kohteiden korroosiosuojaukselta on mahdollista tehostaa maalaamalla sinkitty rakenne.

Korroosio vaikuttaa myös väsymiskestävyyteen, sillä paikallinen korroosio voi toimia särön ydintäjänä ja särön kasvunopeus (da/dN) on korroosio-olosuhteissa suurempi. Huolimaton korroosiosuojaus voi johtaa ruostumisen alkamiseen kriittisessä kohdassa, jolloin liitoksen väsytyoluokan ja materiaalin väsymisrajan voidaan olettaa laskevan (Hobbacher 1996). Yksi mahdollinen menettely on korroosion olettaminen valmistusvirheen tai alkusärön kaltaiseksi rakenteen luotettavuutta heikentäväksi tekijäksi. Tällöin sen vaikutus on mahdollista ottaa huomioon osavarmuuskertoimella (SFS 2378 1992). Luvussa 3 on käsitelty väsymislujuutta tarkemmin.

2.2 Ajoneuvorakenteissa esiintyvät kuormitukset

2.2.1 Staattinen ja dynaaminen kuormitus

Ajoneuvorakenteita kuormittavat ulkoiset kuormitukset voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään, staattisiin ja dynaamisiin kuormituksiin. Staattisella kuormituksella tarkoitetaan kuormitusta, jonka vaikutussuunta ja suuruus pysyvät vakiona. Tällainen kuormitus esiintyy pelkästään ajoneuvon ollessa paikallaan, jolloin kuormitus muodostuu ajoneuvon ja kuorman painovoimasta.

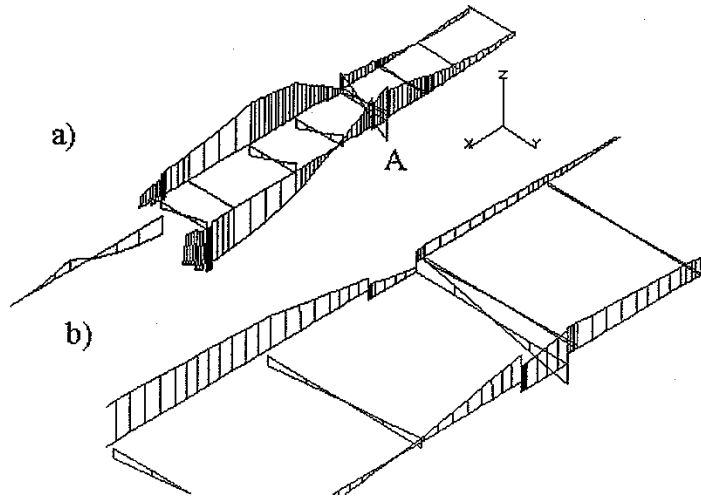
Staattisella kuormituksella ei sellaisenaan ole suurtakaan merkitystä rakenteen ja komponenttien väsymiselle, varsinkaan jos tarkastellaan hitsattuja rakenteita. Suunnittelussa staattisen kuormituksen (rakenneosien oma, lastin ja mahdollisten liittyvien rakenteiden paino, nosturit tms.) avulla tehdään karkeasuunnittelu sekä valitaan rakenneosat ja komponentit alustavasti.

Staattiset kuormitukset tunnetaan yleensä hyvin jo suunnitteluvaiheessa, sillä ne muodostuvat ajoneuvon ja kuorman painoista. Näistä kuormituksista syntyviä rasituksia on mahdollista määrittää mm. elementtimenetelmällä. Eri profiilivaihtoehtojen toimivuutta esimerkiksi perävaunuissa tyyppillisessä 'tikapuurunkorakenteessa' voidaan vertailla alustavasti palkkielementtimalleilla, jolloin rakenteen mallinnus ja profiilien varioiminen on tällöin nopeaa.

Kuvassa 5 on esitetty esimerkinomaisesti palkkielementtimallin tuloksia perävaunun runkorakenteelle. Ajouradan epätasaisuuksista syntyviä vääntörasituksia on myös mahdollista arvioida palkkielementtimallilla. Vääntörasitusten perustapaukset on mahdollista mallintaa asettamalla runkoon pyöräkiinnityksien kohdalle pakkosiirtymä, joka vastaa ajoradan epätasaisuudesta johtuvaa siirtymää.

Palkkitason mallilla ei ole yleensä mahdollista selvittää liitoksissa esiintyviä paikallisia jännityksiä, mutta koko rakenteen jäykkyyttä ja rasitusten suuruusluokkia liitosten läheisyydessä voidaan alustavasti arvioida. Riittävän yksinkertaisissa liitoksissa päästään myös jännitysten arviointiin.

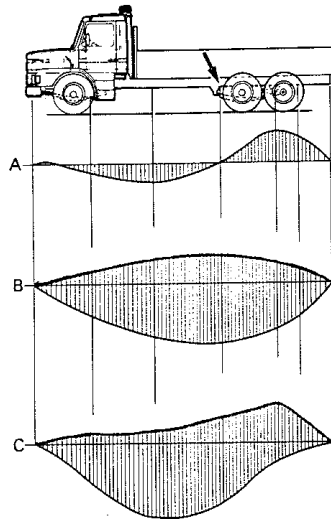
Dynaamiset kuormitukset syntyvät ajonaikaisista ajoneuvon ja kuorman massojen kiihtyvyyksistä. Nämä hitausvoimat aiheutuvat ajoradan epätasaisuuksista, jarrutuksista, kiihdytyksistä ja kallistumisista. Ajoneuvorakenteiden dynaamisiin kuormiin vaikuttavat myös mm. massat, ajorata, ajonopeus, akseliväli ja jousitus. Dynaamisten kuormitusten arviointi suunnitteluvaiheessa on usein vaikeaa, mutta kiihtyvyyksiä voidaan arvioida karkeasti käytännön kokemuksen perusteella. Dynaamisten väsyttävien kuormitusten on mittauksissa todettu olevan n. 1,5 - 3,5 kertaa staattisten kuormitusten suuruisia ajoneuvorakenteen tyyppin ja käyttöolojen mukaan, mutta kuormitusten huippukohdat eivät yleensä esiinny samassa kohdassa eri kuormituksilla (kuva 6).



Kuva 5. Z-akselin suuntaisesta kuormituksesta aiheutunut momenttikuvio perävaunun rungon palkkielementtimallista (Bäckström et al. 1997a).

Nykyisin väsyttävän kuormituksen ja dynaamisten ilmiöiden vaikutusta rakenteen rasittumiseen voidaan arvioida erilaisten simulointiohjelmistojen avulla. Yksi käytetyimpiä ohjelmistoja on ADAMS, jota käytetään Suomessa korkeakouluissa, tutkimuslaitoksissa ja teollisuudessa rakennesuunnittelun tukena. Rakenteen käyttäytymisen simulointi on autoteollisuudessa arkipäivää ja ehdoton edellytys esimerkiksi tuotteen nopeampaan markkinoille saamiseen ja suunnittelukustannusten alentamiseen (SAE 1997). Varsinainen rakennelaskenta tapahtuu FEM-ohjelmistoilla, joista mainittakoon NASTRAN, ANSYS ja ABAQUS. Tiedonsiirto varsinaisessa suunnittelussa käytetyistä CAD-ohjelmista FEM-ohjelmiin sujuu nykyisin jo kohtalaisesti.

Ajoneuvorakenteiden ja -komponenttien suunnittelun problematiikkaa erityisesti väsymismitoituksen ja siihen liittyvien menetelmien kannalta on käsitelty laajasti esimerkiksi lähteessä (SAE 1997). Suomenkielisistä lähteistä mainittakoon Boschin Autoteknillinen käsikirja (Adler & Haapaniemi 1993), joka kattaa laajasti koko ajoneuvosuunnittelun, mutta ei taas juurikaan käsittele ajoneuvojen rungon mitoitusta väsymisen kannalta.



Kuva 6. Runkopalkeissa esiintyvät staattisten (A) ja dynaamisten (B) kuormien aiheuttamat momentit sekä niiden yhteisvaikutus (C) (Timmerbacka 1983).

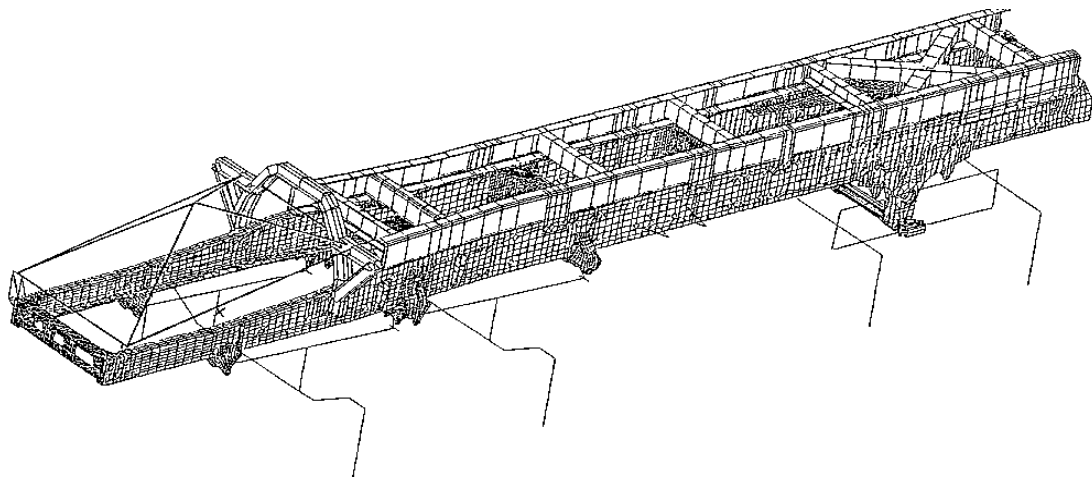
Ajoneuvorakenteita mitoitettaessa törmäys-, ympäriajo- tai muissa erikoistilanteissa syntyvien kuormitusten arvioiminen on vaikeaa, koska kuormitustilanteita on mahdotonta ennustaa tarkasti. Epälineaarisen ja dynaamisen luonteensa vuoksi näitä tilanteita ei voi käsitellä edes tavallisilla FEM-ohjelmistoilla, vaan niitä varten on kehitetty omat elementtilaskentaohjelmistot (Adler & Haapaniemi 1993). Ajoneuvojen korirakenteiden on täytettävä tietyt turvallisuusmääräykset, jotka on laadittu mm. törmäys- ja ympäriajotestien perusteella. Luvussa 2.2.3 on esitetty tarkemmin onnettomuuskuormia.

2.2.2 Väsyttävä kuormitus

Väsyttävien kuormitusten arviointi on vaikeaa, koska kuormituksiin vaikuttavia parametreja on hyvin paljon. Esimerkiksi ajoradan muoto ja pinta johtavat dynaamisten kuormitusten suuruuden ja vaikutussuunnan vaihteluun. Metsätien epätasaisuus voi aiheuttaa voimakkaita vääntökuormitusten vaihteluita, kun taas tasaisilla ja nopeilla teillä tärkein väsyttävä kuormitus muodostuu kantavien rakenteiden taivutuskuormista. Lisäksi kuormitustasot poikkeavat merkittävästi eri kuormitustilanteissa. Erisuuntaisista ja -suuruista kiihtyvyyksistä muodostuu vaihtuva-amplitudinen kuormitus, joka väsyttää rakennetta. Samoin mahdollisessa resonanssi- ja muussakin värähtelytilassa saattaa syntyä väsymiskestävyydelle merkittäviä paikallisia jännitysvaihteluita.

Luotettava keino kuormitusten ja niistä syntyvien jännitysten arviointiin on prototyypivaiheen mittaukset (Kähönen 1993, Siljander 1994). Ajoneuvorakenteiden todelliset rasitukset saadaan selville kenttämittauksissa venymäliuskojen avulla. Mitattujen venymien avulla on mahdollista määrittää rakenteessa esiintyviä jännityksiä tai jopa kuormittavia voimia. Kuvassa 8a on esitetty kuorma-autossa esiintyvää väsyttävää kuormitusta eri kuormitustilanteissa ajan funktiona.

Numeerisen simuloinnin käyttö on lisääntynyt väsyttävästi kuormitettujen ajoneuvojen suunnittelussa (Unger et al. 1996). Tietokoneavusteinen simulointi on erityisen tehokasta suunnittelun alkuvaiheissa, sillä sen avulla voidaan vähentää huomattavasti prototyyppitestausta sekä löytää lopullinen optimaalinen rakenne nopeasti ja Ungerin (et al. 1996) mukaan 25 % edullisemmin. Kuvassa 7 esitetty malli hitsatusta kuorma-auton rungosta osoittaa väsymiskestävyyden analysointiin tehdyn mallin vaativan suuren elementtien määrän. Simulointi on suuresta mallinnustyöstä huolimatta tehokas keino verrattuna useiden prototyyppien valmistamiseen ja analysointiin. Käytännössä simulointimallin yhdistäminen väsymisanalyysiin edellyttää sellaisen jälkikäsitelyohjelman käyttämistä, joka selvittää mallissa esiintyvät kriittiset jännitysvaihtelut ja tekee myös väsymisanalyysin saatujen tulosten perusteella. Nykyään rakenteen käyttäytymisen simulointiin tarkoitettuja kaupallisia ohjelmistoja onkin jo saatavissa.



Kuva 7. Tietokoneavusteista simulointia varten tehty FEM-malli hitsatusta kuorma-auton rungosta (Unger et al. 1996).

Tietokoneavusteisen simuloinnin avulla voidaan vähentää huomattavasti prototyyppivaiheen kustannuksia, sillä jo ensimmäinen prototyyppi on lähempänä optimaalista tuotetta. Prototyyppivaiheen kenttämittaukset ovat kuitenkin tärkeä osa tuotekehitystä, sillä niillä saadaan luotettavaa tietoa rakenteiden todellisista rasituksista. Tässä vaiheessa saadaan usein myös ensimmäistä kertaa tietoa todellisista kuormituksista (Siljander 1994), joiden arvioiminen ainoastaan tietokoneavusteisella simuloinnilla saattaa olla epäluotettavaa tai vaatii ainakin verifiointia mittauksin.

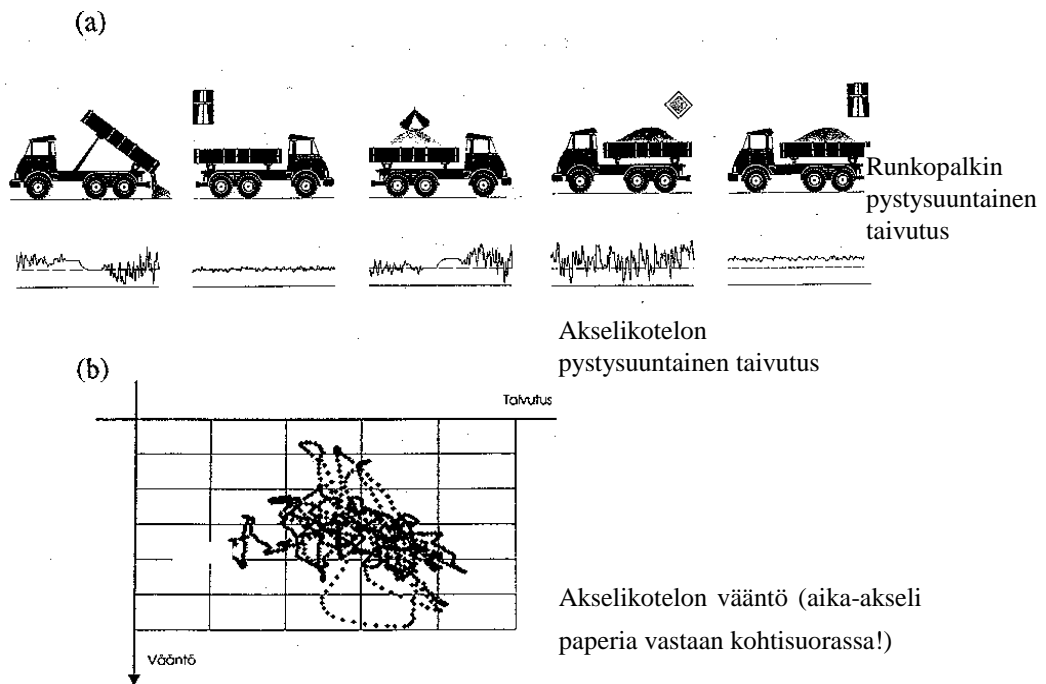
Kenttämittauksissa vaihtuva-amplitudinen kuormitus tallennetaan yleensä jonkin luokittelualgoritmin mukaisesti. Käytetyimpiä luokittelumenetelmiä on rainflow-menetelmä. Rainflow-algoritmi hakee venymä- tai jännityssignaalista materiaalia väsyttävät jännitysvaihtelut, luokittelee ne diskreetteihin luokkiin, laskee niiden lukumäärän kussakin luokassa ja muodostaa ns. kuormituskertymän, jota sitten käytetään väsymiskestoikäennusteiden tekemiseen (Kähönen 1993).

Ajoneuvorakenteissa esiintyy usein moniakselisia jännitysvaihteluita (kuva 8b), jolloin vääntö- ja taivutusjännitykset ovat myös erivaiheisia ja pääjännitysten suunta vaihtelee. Suunnittelunormien väsymisen käsittelytavat vaihtelevat normin mukaan eikä

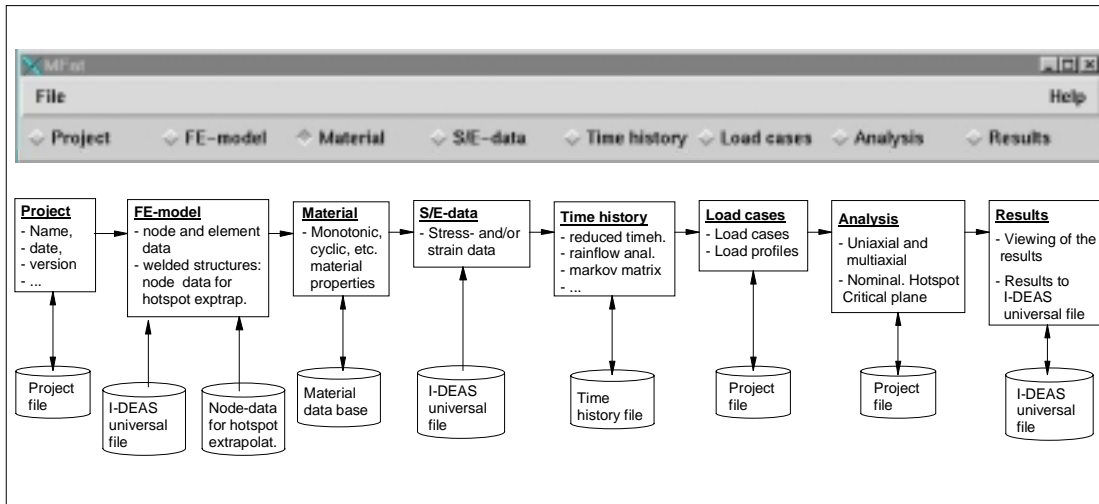
väsytytapauksia moniakseliselle väsymiselle yleensä esiinny sellaisinaan. Hitsattujen rakenteiden moniakselisen väsymisen huomioonottaminen suunnittelussa edellyttää prototyypivaiheen kenttämittauksia ja / tai komponenttitestausta (Siljander 1994) tai numeerista simulointia.

Myös hitsattujen rakenteiden moniakselisen väsymisen tuntemus lisääntyy jatkuvasti. Aiheesta on tehty Suomessakin (VTT:ssa) tutkimusta. Tulokset osoittavat, että aihe vaatii lisää käytännön kokeita ja teorianmallien kehittelyä, jotta päivittäisen suunnittelun vaatima normipohjainen lähestymistapa saadaan käyttökelpoisemmaksi (Bäckström 1996, Bäckström et al. 1997b).

Moniakselisen väsymisen asiantuntemusta on hyödynnetty jo nyt tietokoneavusteisessa simuloinnissa yhdistettynä tulosten jälkikäsittelijään ja siten myös väsymisanalyysiin (Unger et al. 1996, Lehtonen & Kähönen 1996, Lehtonen, 1997). Tietokoneavusteiset menetelmät soveltuvat moniakselisen väsymisen ennustamiseen ajoneuvorakenteissa, koska pääjännitysten todelliset suunnanvaihtelut on mahdollista huomioida. Esimerkki tällaisen ohjelmiston (MFat) rakenteesta on kuvassa 9 (Lehtonen 1997).



Kuva 8. Kuorma-autossa esiintyviä rasiuksia tyypillisissä työkiertotilanteissa (a), maastoajoneuvon akselistosta mitattu moniakselinen kuormitustilanne (b) (Siljander 1994).



Kuva 9. Esimerkki myös moniakselisen väsymisen huomioon ottavasta väsymismitoitushjelmiston sisällöstä. (Lehtonen 1997)

2.2.3 Onnettomuuskuormat

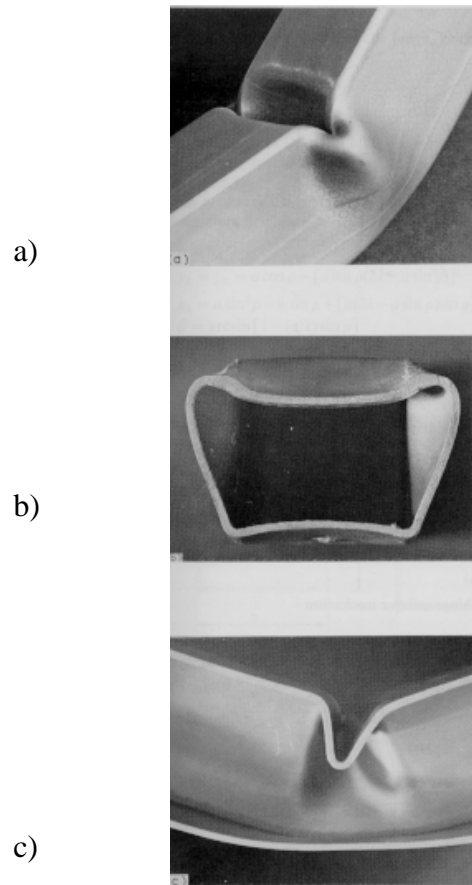
Tavallisia ajoneuvo-onnettomuuksia ovat kolarit ja ympäriajot. Onnettomuudessa ajoneuvon turvakorilla on tärkeä merkitys henkilöturvallisuudelle. Turvakoreilta vaaditaan erityisesti sitkeyttä, jotta onnettomuudessa purkautuva kineettinen energia pystyisi varastoitumaan turvarakenteisiin plastisina muodonmuutoksina.

Erilaisissa törmäys- ja ympäriajotesteissä pyritään selvittämään prototyypin todellista käyttäytymistä onnettomuustilanteessa. Testit ovat saaneet alkunsa todellisista onnettomuuksista, joita niissä pyritään simuloimaan mahdollisimman tarkasti. Bussien ympäriajotilanteissa on ilmennyt, että korille vaarallisimmat voimat ovat poikittaisia, pystypilareita taivuttavia voimia. Nämä saattavat aiheuttaa ympäriajossa suuriakin muodonmuutoksia (kuva 10) (Kecman 1983).

Plastiset muodonmuutokset taivutuskuormituksessa alkavat putkipalkissa laippojen taipumisena kohti neutraaliakselia, jolloin myös uumat taipuvat sivulle. Stabiiliutensa menetettyään putkipalkin kuormankantokyky ei välttämättä pienene suuresti, koska muodonmuutoksia ei pääse tapahtumaan vapaasti (kuva 11).

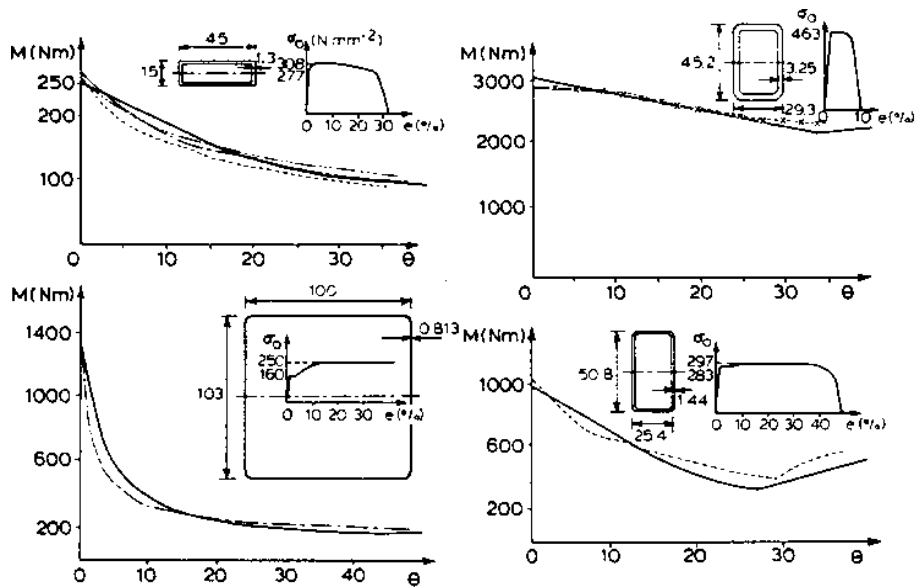


Kuva 10. Korin vaurioituminen bussin ympäriajo-onnettomuudessa (Kecman 1983).



Kuva 11. Esimerkki suorakaiteenmuotoisen putkipalkin vauriomekanismista (plastinen lommahdus taivutuskuormituksen seurauksena) (a) ja leikkaukset vauriokohdasta poikittais- (b) ja pitkittäis- (c) suunnissa (Kecman 1983).

Putkipalkit soveltuvat ajoneuvojen turvarakenteisiin, koska muodonmuutoksen tapahtuessa niiden kuormankantokyky laskee hitaasti maksimikuormituksen saavuttamisen jälkeen. Kuvassa 12 on esitetty erilaisten putkimaisten profiilien vastaanottaman momentin M -suhdetta taipumiskulmaan θ , kun lommahdus on tapahtunut. Kuvaajista nähdään, että kompaktin putkipalkin kuormankantokyky laskee vain noin 15 % suurissakin muodonmuutoksissa. Ohutseinäisillä profiileilla jo pieni plastinen muodonmuutos aiheuttaa kuormankantokyvyn menetyksen. Mikäli tarvitaan suurta muodonmuutos (kiertymis)kykyä, on käytettävä mahdollisimman kompaktia poikkileikkausta.



Kuva 12. Teoreettiset (ehyt) ja kokeelliset (katkonainen) M - θ -käyrät eräille profiileille (Kecman 1983).

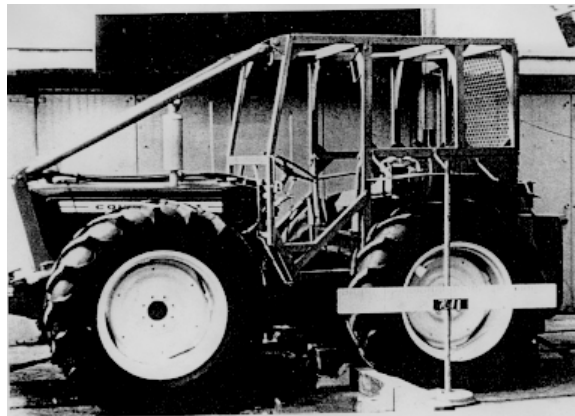
2.3 Putkipalkkien nykyinen käyttö ajoneuvoissa ja työkoneissa

Ajoneuvorakenteissa putkipalkkeja käytetään linja-autojen runko- ja korirakenteissa. Näissä kohteissa teräksestä valmistettujen putkipalkkien kilpailuetuina ovat mm. valmistusystävällisyys ja turvallisuusnäkökohdat. Raskaissa perävaunuissa putkipalkkeja on mm. alleajosuojissa, akseleissa, akselipukeissa, vetoaisoissa ja telien tuennassa. Perävaunujen kantavissa rakenteissa putkipalkkeja käytetään mm. runkopalkkien tukipalkkeina, mutta välipalkeiksi putkipalkit ovat usein liian vääntöjäykkiä. Lavaperävaunuissa putkipalkkeja käytetään lattiarakennetta kantavina poikkipalkkeina (kuva 13). Kevyemmissä perävaunuissa, kuten venetrailereissa, putkipalkkeja käytetään paljon.



Kuva 13. Lavaperävaunun runkorakenne (Närko).

Putkipalkkeja käytetään usein turvakoreissa, koska niiden lujuusominaisuudet ovat hyvät erilaisissa onnettomuustilanteissa. Kuvassa 14 on esitetty putkipalkeista valmistettu turvakori.



Kuva 14. Traktorin turvakori (CIDECT 1995).

2.4 Putkipalkkien mahdolliset käyttökohteet ajoneuvorakenteissa

Ajoneuvorakenteiden taivutus- ja vääntöjäykkyyksivaatimukset ratkaisevat pitkälle kantaviin rakenteisiin parhaiten soveltuvat profiilit (Adler & Haapaniemi 1993). Taivutusjäykkyys pienentää mahdollisia joustoista ja rakenteen dynamiikasta aiheutuvia matalataajuisia värähtelyjä, joita voidaan pitää haitallisina erityisesti ajovakavuuden häiriintymisen ja väsymisvaurioriskin vuoksi. Taivutusjäykkyyden merkitys korostuu ajoneuvon pituuden kasvaessa, sillä samalla momenttivarret ja usein myös kuormitukset kasvavat.

Linja-autoissa on todettu järkeväksi yhdistää kori runkoon kantavana rakenteena, jolloin yhtenäinen kotelomuoto takaa erinomaisen vääntöjäykkyyden. Itsekantavan korirakenteen kantavana kehikkona toimii suorakaideputkista ja prässätyistä levyosista koostuva ristikkorakenne. Runkorakenteellistenkin linja-autojen korikehikko kantaa suurimman osan kuormituksista (Adler & Haapaniemi 1993). Integroituja runko- tai säiliöratkaisuja käytetään yleensä myös säiliöautoissa. Koko rakenteen vääntöjäykkyyteen vaikuttaa merkittävästi valittujen runkoprofiilien tyyppi. Vääntöjäykkyyteen pyrittäessä on rakenteen kaikkiin palkkeihin syytä valita suljetut profiilit. Rungon vääntyminen aiheuttaa siihen jäykästi liitettyihin rakenteisiin suuria paikallisia jännityksiä.

Putkipalkkien potentiaaliset käyttökohteet ajoneuvorakenteissa voidaan jakaa karkeasti kahteen pääryhmään:

- Vääntöjäykät runko- ja korirakenteet
- Iskumaisesti kuormitetut turvarakenteet

Tavallisia tällä hetkellä käytössä olevia vääntöjäykkiä ajoneuvorakenteita ovat linja-autot. Perävaunuissa suosituin runko muodostuu kehikkorakenteesta, jonka pääpalkkeina ovat I-palkit ja välipalkkeina avoimet profiilit (Z- tai U-profiili). Joustavaa rakennetta voidaan pitää hyvänä vaihtoehtona varsinkin ajettaessa huonoilla teillä, mutta tavanomaisessa käytössä maanteilla perävaunuilta ei vaadita välttämättä erityistä joustavuutta. Siksi suljettuja profiileita voitaisiin käyttää myös perävaunujen kantavissa rakenteissa. Vääntöjäykkyyttä lisättäessä on mahdollista yhdistää perävaunun runko kokonaan tai osittain kiinteästi koriin.

Kotelomaisen runko-koriyhdistelmän vääntöjäykkä rakenne on osoittautunut linja-autoissa hyväksi putkipalkkien käyttökohteeksi. Perävaunussa vastaava rakenne rajoittaisi lastausominaisuuksia, sillä kantavina rakenteina toimivat laidat estäisivät käytännössä kokonaan sivulta lastaamisen. Tässä raportissa ei puututa tarkemmin mahdollisten käyttökohteiden yksityiskohtaisiin ratkaisuihin, koska ongelmat ovat tapauskohtaisia ja oikeita, yleispäteviä ratkaisuja ei voi esittää.

Lainsäätäjän ohjeet eivät sinänsä anna paljontaan eväitä esimerkiksi linja-autorakenteen suunnitteluun. Ohjeissa sanotaan mm: "Laskemalla, käytännön kokeella tai muulla tavalla on osoitettava, että korirakenne on riittävän luja kestääkseen katolle asetetun tasaisesti jaetun, jäykän ja auton suurinta sallittua kokonaispainoa vastaavan kuorman, kuitenkin enintään 10 tonnia." (Ajoneuvohallintokeskus, 1999)

Perävaunujen vetoaisoihin putkipalkit voisivat soveltua hyvin, sillä jarrutustilanteissa esiintyvät puristusvoimat edellyttävät vetoaisoilta hyvää nurjahduskestävyyttä. Itse vetoaisan ei välttämättä tarvitse olla joustava väännöltään, joten koko vetoaisa välipalkkeineen olisi hyvä putkipalkkien käyttökohde. EU-direktiivin 94/20/EC mukaiset testit käsittävät vetoaisojen dynaamisen väsytykokeen, staattisen sivuvetokokeen ja staattisen nurjahduskokeen. Pääasiassa putkipalkeista valmistettu vetoaisa olisi mahdollista mitoittaa alustavasti näiden testivaatimusten perusteella, jolloin uudentyypiselle vetoaisalle saataisiin EU-direktiivien mukainen hyväksyntä.

Testienmukaiset vaatimukset ovat melko tiukat, joten avointen profiilien korvaaminen vetoaisoissa putkipalkeilla olisi järkevää mm. nurjahduskestävyyden takia. Myös valmistustekniset näkökohdat välipalkkien ja pääpalkkien liitoksissa puoltavat putkipalkkien käyttöä kyseisissä rakenteissa, sillä avoimissa profiileissa on jouduttu usein hitsaamaan ylimääräisiä jäykistelevyjä välipalkkien liitoskohtiin lähinnä valmistuksen takia. Vetoaisoissa liitosten sijoittaminen vähän rasitettuihin kohtiin on mahdotonta, sillä koko vetoaisan runkopalkit ovat vaihteleva-amplitudisten veto- tai puristusjännitysten alaisina. U-profiilien korvaaminen putkipalkeilla voisi johtaa käytännössä myös poikkipinta-alan kasvamiseen ja siten jännitystasojen pienenemiseen ja samalla hitsausliitosten väsymiskestävyyden paranemiseen. Liitosten oikea muotoilu putkipalkkeja käytettäessä mahdollistaa kuitenkin jopa rakenteen kevenemisen väsymislujuuden silti huonontumatta.

Turvarakenteissa on paljon putkipalkkien potentiaalisia käyttökohteita. Perävaunujen alleajosuojissa olisi mahdollista käyttää nykyistä enemmän putkipalkkeja. Näiltä rakenteilta vaadittavat ominaisuudet ovat tiukentuneet. Myös alleajosuojien testauksesta on laadittu direktiivi, jossa määritetään mm. testissä käytettyjen pistekuormien suuruudet (EU-direktiivi 79/490/EEC).

3. Putkipalkkiliitosten väsymislujuus

3.1 Yleistä

Hitsausliitoksen väsymiskestävyydellä tarkoitetaan liitoksen kykyä kantaa siihen kohdistuvat - useimmiten ajan mukana vaihtelevansuuruiset - rasitukset ilman käytön aikaista vauriota. Väsyminen tarkoittaa suhteellisen hidasta hitsausliitoksen rajaviivan tai juuren puolella tapahtuvaa särönkasvua, joka jatkuessaan johtaa liitoksen lopulliseen murtumiseen.

Putkipalkkiliitosten väsymiskestävyuden laskennassa voidaan soveltuvin osin käyttää nimellisten jännitysten menetelmää valitsemalla sopiva liitoksen väsytyluokka (SFS 2378, 1992 ja SFS-ENV (Eurocode 3), 1992). Eurocode 3 -normiehdotus sallii myös hot spot -menetelmän käyttämisen. Hot spot -menetelmä ottaa nimellisten jännitysten menetelmää paremmin huomioon rakenteellisen epäjatkuvuuden (Niemi 1993). Epäjatkuvuuskohtat aiheuttavat lähiympäristöönsä rakenteellisten jännitysten (hot spot -jännitykset) uudelleenjakautumisen. Rakenteellinen jännitys muodostuu kuoriteorian mukaisista kalvo- ja taivutusjännityksistä. Rakenteelliseen jännitykseen ei lasketa hitsin lähellä esiintyvää epälineaarista huippujännitystä.

Yhdysvallojen autoteollisuudessa käytetty ns. paikallisen venymän menetelmä ei myöskään sovellu hitsattuihin rakenteisiin. Se on tarkoitettu enemmänkin hitsaamattomien ajoneuvokomponenttien väsymismitoitukseen. Menetelmästä on tarkempaa tietoa esimerkiksi SAE-julkaisussa (SAE, 1997)

Nimellisten jännitysten menetelmässä ja hot spot -menetelmässä väsymisvaurioon johtavien jännitysvaihteluiden lukumäärä N tietyllä jännitystasolla $\Delta\sigma$ saadaan Wöhler-käyrän (S-N -käyrä) yhtälöstä (2). Parametrit m ja C määritetään eri materiaaleille ja liitostyypeille yleensä yksiaksiaalisilla väsytyksokkeilla ja käyttäen kuormituksena vakioamplitudista jännitysvaihtelua.

$$C = N \cdot \Delta\sigma^m \quad (2)$$

Koska jännitysvaihtelut eivät varsinkaan kulkuneuvojen rakenteissa käytännössä koskaan ole vakioamplitudisia, on Minerin vauriosummaan perustuen johdettu kaava ekvivalentille jännitysvaihtelulle $\Delta\sigma_{eq}$. Ekvivalentti jännitysvaihtelu on laskennallinen vakioamplitudinen kuormitus, joka vastaa tietyn käyttöjakson aikana esiintyvää vaihtuva-amplitudista kuormitusta. Kaavassa 3 on esitetty yksi $\Delta\sigma_{eq}$ -kaavoista, joka ottaa huomioon myös väsymisrajan alapuolella olevien jännitysvaihteluiden vaikutuksen kestoikään. Menetelmästä enemmän esimerkiksi lähteissä (Niemi & Kemppi 1993, SFS 2378 1992).

$$\Delta\sigma_{eq} = \sqrt[m]{\frac{\sum_{i=j}^k n_i \cdot \Delta\sigma^m + \Delta\sigma_{th}^{-2} \sum_{i=i_0}^{j-1} n_i \cdot \Delta\sigma^{m+2}}{N_{ref}}} \quad (3)$$

missä	N_f	vaurioon johtavien jännitysvaihteluiden lukumäärä
	N_{ref}	referenssijakson kuormanvaihtojen lukumäärä
	m	wöhlerkäyrän kulmakerroin
	n_i	jännitysvaihteluiden lukumäärä luokassa i
	$\Delta\sigma_{th}$	ominaisväsymisraja.

3.2 Nimellisten jännitysten menetelmä putkipalkkiliitosten mitoituksessa

Nimellisten jännitysten menetelmässä valitaan taulukoiduista väsytytapauksista sopivin ja arvioidaan saadun väsytyluokan perusteella kestoikää tai sallittuja jännityksiä. Vertailujännityksenä käytetään nimellistä jännitystä, johon ei ole laskettu geometrisista epäjatkuvuuksista aiheutuvia jännityksiä. Tyypillisiä putkipalkkien väsytyluokkia on löydettävissä esimerkiksi lähteistä (Vainio, et al. 1998, liite 9.5, SFS-ENV(Eurocode 3) 1992).

Ajoneuvorakenteissa todellisten käytönaikaisten rasitusten arvioiminen on usein vaikeaa, joten nimellisten jännitysten menetelmän luotettava käyttö edellyttää prototyyppivaiheen kenttämittauksia (Kähönen 1993). Nykyisin voidaan myös simulointiohjelmilla tuottaa laskennallinen kuormituskertymä. Nimellisten jännitysten mittaaminen rakenteesta saattaa olla helpompaa kuin hot spot -jännityksen mittaaminen. Nimellisten jännitysten menetelmälläkin on mahdollista saada suhteellisen luotettavia kestoikäennusteita mutta hot spot -menetelmä oikein käytettynä antaa tarkempia tuloksia. Nimellisten jännitysten menetelmä ei sovellu putkipalkkiliitosten mitoitukseen, kun liitoksen kuormitukset aiheuttavat paikallisia putkipalkin seinämän taivutusjännityksiä.

3.3 Hot spot -menetelmä

Putkipalkkiliitosten väsymiseen vaikuttavat jännitykset ovat usein paikallisia kuoren taivutusjännityksiä, joten hot spot -menetelmän käyttöä yleensä suositellaan putkipalkkiliitosten väsymismitoitukseen.

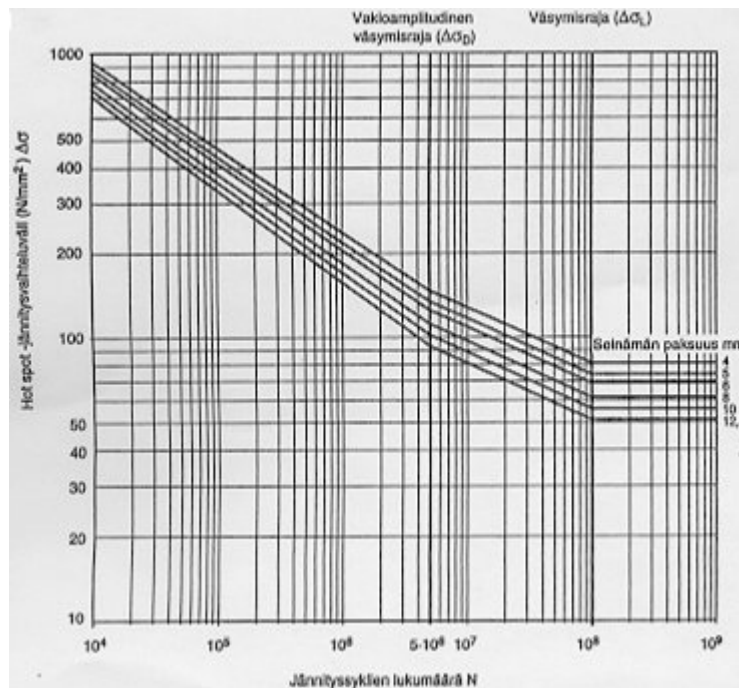
Hot spot -jännitys on rakenteellisen jännityksen arvo kriittisessä kohdassa - siis hitsausliitoksen rajaviivalla - ja se määritetään yleensä lineaarisesti ekstrapoloimalla jännitykset 0,4t ja 1,0t etäisyydeltä hitsin rajaviivalta kohtisuoraan hitsiä vastaan. Mikäli jännitysgradientin voidaan olettaa sisältävän kuoren taivutusjännityksiä, käytetään ns. 3 pisteen ekstrapolointia. Jännitykset määritetään joko venymäliuskoilla tai elementtimenetelmällä (FEM). Erilaisille liitoksille on määritetty jännityskonsentraatiokertoimia K_s joidenkin tunnettujen muuttujien funktiona. Kertoimet perustuvat koetuloksiin ja FEM -laskelmiin, ja ne on esitetty yleensä liitoksen parametrit huomioon ottavina kaavoina (Partanen 1993). Näistä kaavoista on hyötyä käytännön laskentatyössä, koska K_s -kertoimen määrittäminen elementtimenetelmällä tai venymäliuskamittauksin on työlästä eikä välttämättä tarkoituksenmukaista.

Rakenteellinen jännityskonsentraatiokerroin K_s määritetään nimellisen jännityksen σ_{nom} ja hot spot -jännityksen σ_{hs} avulla kaavasta 4.

$$K_s = \frac{\sigma_{hs}}{\sigma_{nom}} \quad (4)$$

Eri liitostyypeille ja kuormitustapauksille laadituista K_s -kerrointen laskentakaavoista on hyötyä erityisesti suunnitteluvaiheessa väsymiskestoikää arvioitaessa. Kestoiäkennusteita laadittaessa on usein käytännössä tehtävä kenttämittauksia, jolloin myös hot spot -venymien (joista saadaan laskennalliset jännityksen arvot) mittaaminen suoraan rakenteesta on mahdollista ja järkevää.

Kuvassa 15 on esitetty hot spot -jännityksen Wöhler-käyrät ($\Delta\sigma_{hs}$ - N_f -käyrät) putkipalkeille.



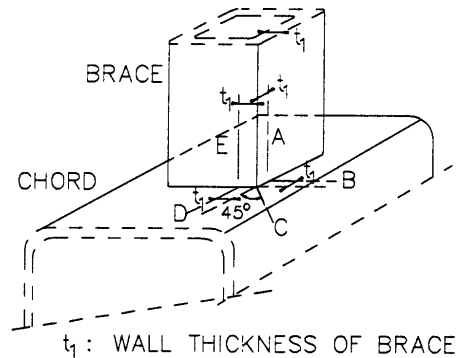
Kuva 15. Putkipalkkiliitosten $\Delta\sigma_{hs}$ - N_f -käyrät. (Vainio, et al. 1998, ks. myös CIDECT 1995).

Putkipalkkiliitoksilla hot spot -väsymiskäyrät riippuvat seinämäpaksuudesta (kuva 15). Mentäessä alle 4 mm:n seinämäpaksuuksiin, saattaa hitsin vaikutus rakenteelliseen jännitykseen olla huomattava. Tällöin voidaan soveltaa 4 mm:n $\Delta\sigma_{hs}$ - N_f -käyrää, (CIDECT 1995).

Putkipalkkien liitoksissa esiintyy usein jyrkkiä jännitysgradientteja. Tästä syystä putkipalkkiliitosten hot spot -jännitystä laskettaessa on suositeltavaa käyttää parabolista ekstrapolointia. Tällöin ekstrapolointipisteet valitaan usein 0,4t, 0,9t ja 1,4t etäisyydeltä hitsin rajaviivalta. Putkipalkkiliitoksille on tyypillistä myös kuormituksen ja geometriaparametrien voimakas vaikutus K_s -kertoimeen.

Liitosten väsymislujuus muodostuu yleensä tuotteen kestoikää määrääväksi tekijäksi, joten K_s -kertoimen parantaminen suunnitteluvaiheessa lisää kestoikää huomattavasti.

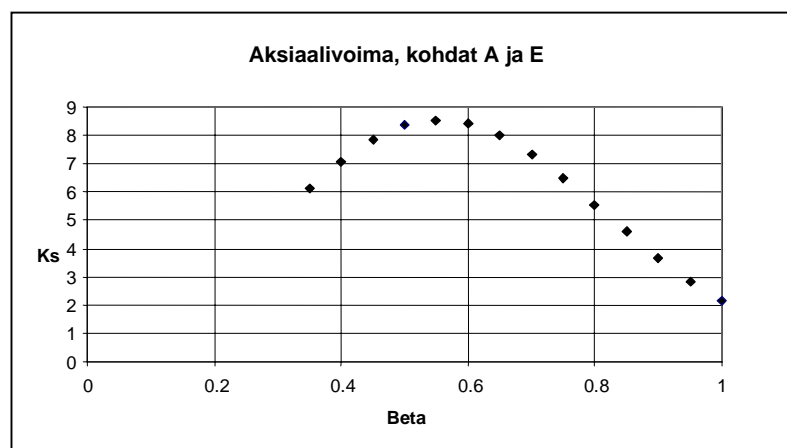
Nelikulmaisten putkipalkkien liitoksissa on kuormituksen ja parametrien mukaan useita mahdollisia hot spot -kohtia. Kuvassa 16 on esitetty T- ja X-liitosten mahdollisia hot spot -kohtia (A...E).



Kuva 16. T-liitoksen mahdolliset hot spot -kohdat A-E (Wingerde 1992).

Jännityskonsentraatiokertoimelle K_s on johdettu koe- ja FEM -tuloksiin perustuvia kaavoja (Wingerde 1992). Kaavat perustuvat tiettyihin tutkittuihin kuormitustapauksiin, mutta niitä on mahdollista soveltaa myös yhdistettyihin kuormituksiin.

Merkittävin K_s -kertoimeen vaikuttava parametri on liitettävien palkkien leveyksien suhde β (b_1/b_0). Kuvassa 17 on esitetty tyypillinen esimerkki β :n vaikutuksesta K_s kertoimeen. Kerroin on pienimmillään, kun suhdeluku on 1 eli liitettävät palkit ovat saman levyisiä. Tällöin ei pääse syntymään kuoriteorian mukaisia taivutusjännityksiä, kuten silloin kun β on pienempi. Parametrit 2γ (b_0/t_0) ja τ (t_1/t_0) vaikuttavat K_s kertoimen kasvuun lineaarisesti.





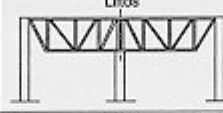
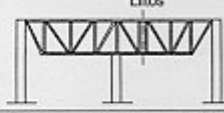
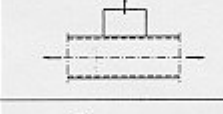
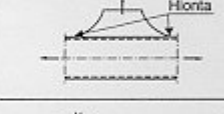
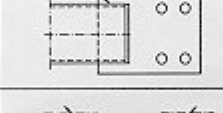

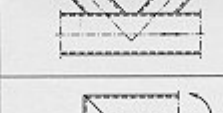
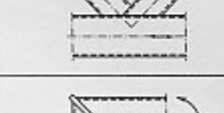
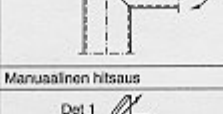
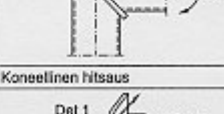




Kuva 17. Parametrin β vaikutus T-liitoksen K_s kertoimeen kohdissa A ja E (kuva 16), kun $2\gamma=16$.

Myös putkipalkkien pyöristyssäteellä on merkitystä K_s -kertoimeen. Vaikutusta ei ole otettu huomioon laskentakaavoissa, koska se on niin pieni. Myöskään hitsin muoto ja koko eivät vaikuta mainittavasti K_s -kertoimeen.

3.4 Väsymislujuuden parantaminen putkipalkkiliitosten suunnittelussa

Väsymislujutta voidaan parantaa useilla tavoilla. Usein paras keino on liitosten sijoittaminen kohtiin, joissa rasitukset ovat pieniä. Tällä menettelyllä pyritään pienentämään hitsin kohdalla vaikuttavia nimellisiä jännitysvaihteluita. Kun rasitetuimmilla alueilla ei ole epäjatkuvuuskohtia, voidaan teräksen lujuus käyttää rakenteessa paremmin hyödyksi. Hitsin kohdan nimellisjännityksen pienentämiseen on useita tapoja, joista eräitä on esitetty kuvassa 18. Kun rasitetuimpien kohtien löytäminen on vaikeaa, voidaan elementtimenetelmää (FEM) tai venymäliuskamittauksia käyttää apuna (Kähönen 1993, Härkönen & Tervola 1993).

Toimenpide	Alkuperäinen rakenna	Väsymiskestävyiden kannalta parempi ratkaisu
Jännityksen pienentäminen		
Liitoslevyjen momentin pienentäminen laippaliitoksessa		
Jalkoskohdan valinta rakenteen vähemmän kuormitettuun kohtaan		
Liitoslevyn muotoilu jouheammaksi		
Liitoslevyn muotoilu jouheammaksi jatkosliitoksessa		
Ristikoliitoksen limittäminen		
L-liitoksen vahvistaminen väleilyllä		
Hitsausmenetelmän valinta	Manuaalinen hitsaus	Koneellinen hitsaus
Hitsin reunan pyöristys hiomalla		

Kuva 18. Nimellisen jännitysvaihtelun pienentäminen hitsin kohdalla (Vainio, et al. 1998).

Ajoneuvorakenteissa liitosten paikkaa ei voi usein muuttaa, joten on turvauduttava itse liitosten väsymislajuuden parantamiseen. Putkipalkkiliitoksen väsymislajuutta voidaan parantaa valitsemalla liitoksen parametrit järkevästi. Rakenteellisen jännityksen jännityskonsentraatiokerrointa K_s pienentämällä voidaan lisätä liitoksen väsymiskestoikää tai keventää rakennetta. Rakenteellisten jännitysten pienentäminen on joskus mahdotonta, jolloin luvussa 4.3 tarkemmin käsitellyt hitsin jälkikäsitelymenetelmät tulevat kyseeseen. Taulukossa 2 on vertailtu väsymislajuutta parantavia menetelmiä.

Taulukko 2. Väsymislajuutta parantavien menetelmien vertailu.

MENETELMÄ	VAIKUTUS	EDUT	HAITAT
Liitosten sijoitus vähemmän rasiitettuihin kohtiin	Jännitysvaihtelujen pienentäminen kriittisissä kohdissa.	Väsymiskestävyys paranee.	Usein rakenteen toimivuuden kannalta mahdotonta toteuttaa tai vaatii suuria muutoksia rakenteeseen.
Liitosten muotoilu	K_s kertoimen pienentäminen muuttamalla liitosta juohevammaksi.	Pienet muutokset suunnittelu- vaiheessa. Edullinen toteutus.	Kriittisten kohtien löytäminen joskus vaikeaa, vaatii usein FEM-laskentaa. Voi jälkikäteen olla vaikeaa ja kallista.
Hitsin geometrian muuttaminen	Lovivaikutus hitsin rajaviivalla pienemmäksi, mahdollinen juurivirhe pois.	Suunnittelutyö vähäistä Saattaa riittää joissain tapauksissa.	Toteutus voi olla kallista määrästä riippuen.
Hitsausliitoksen jälkikäsitely	Jäännösjännityksen ja/tai alkusärön poisto.	Väsymislajuus saattaa kasvaa huomattavasti.	Toteutus voi olla kallista määrästä riippuen. Soveltuu parhaiten paikallisten kriittisten kohtien käsittelyyn.

4. Korkealujuuksisten terästen käyttö ajoneuvorakenteissa

4.1 Ajoneuvorakenteiden keventäminen korkealujuuksisten terästen käytöllä

Ajoneuvorakenteita on mahdollista keventää käyttämällä korkealujuuksisia teräksiä. Korkealujuuksisina teräksinä voidaan pitää yli 355 MPa myötörajan omaavia teräksiä. Kylmämuovattuja putkipalkkeja voidaan valmistaa termomekaanisesti valssatuista (TM) teräksistä, jotka korkeasta lujuudestaan huolimatta (jopa yli 700 MPa) ovat hyvin hitsattavia ($CEV < 0,40$).

Ajoneuvoteollisuudessa korkealujuuksisten terästen käyttö lisääntyy. Korkealujuuksisten terästen käytöllä saavutettu painon aleneminen vähentää mm. maakulkuneuvojen polttoainekulutusta ja metsätyökoneiden maastoon jättämiä vaurioita (Kuva 19). Lisäksi maantiekuljetuksissa kuljetuskapasiteetti lisääntyy oman painon pienentyessä.



Kuva 19. Kevyempi metsätyökone, kuten kuormatraktori kuvassa, vaurioittaa vähemmän maapohjaa (Timberjack).

Korkealujuuksisten terästen käytöllä voidaan parantaa myös ajoneuvojen turvallisuutta. Kevyiden ja lujien turvarakenteiden käyttö on lisääntymässä, koska entistä tiukemmat turvallisuusmääräykset on täytettävä painon säästöstä huolimatta.

4.2 Korkealujuuksisten terästen väsymisluku

Korkealujuuksisilla teräksillä on parempi staattisten kuormien kestävyys kuin perinteisillä matalalujuuksisilla teräksillä, mutta käsittelemättömien hitsausliitosten väsymisluku ei juurikaan parane perusaineen lujuutta kasvatettaessa. Rakenteiden keventämisen tarve on kuitenkin johtanut korkealujuuksisten terästen käytön lisääntymiseen myös ajoneuvorakenteissa.

Väsyttävästi kuormitetut osat valmistetaan yhä useammin korkealujuuksisista teräksistä. Näissä kohteissa väsymiskestävyyden parantamisella voidaan lisätä huomattavasti tuotteen kilpailukykyä ja asiakastyytyväisyyttä. Tällöin on kiinnitettävä erityistä huomiota liitosten väsymismitoitukseen.

Korkealujuuksisten terästen käytöllä päästään parhaisiin tuloksiin silloin, kun:

- maksimijännityksen ja jännitysheilahduksen suhde on suuri
- kuormituskertymä sopivan muotoinen, vrt. edellinen
- jännitysheilahdelluista on kaiken kaikkiaan vähän
- hitsausliitoksen jälkikäsitteilyllä voidaan nostaa väsytyluokkaa (ks. luku 4.3)
- liitoksen muotoilulla voidaan nostaa sovellettavaa väsytyluokkaa
- kriittisimmissä kohdissa / detaljeissa voidaan käyttää esim. valukomponenttia (esim. Siljander et al. 1997).

Hitsattujen rakenteiden väsymiselle ei ole juurikaan merkitystä staattisesta peruskuormasta aiheutuvasta jännitustasosta, sillä väsymissärön kasvuun vaikuttavat lähinnä jännitysheilahdukset, niiden suuruus ja jakauma (ks. esim. Maddox 1991, Berge 1985). Korkealujuuksisilla teräksillä voidaan hyödyntää tätä ilmiötä silloin, kun staattinen jännitustaso on korkea ja jännitysvaihtelut riittävän pieniä. Keski-jännityksen ollessa puristusta voidaan hitsausliitoksissakin jännitysheilahduksen tehollista osuutta pienentää tietyin edellytyksin, ks. esim. SFS 2378.

Päättäneen yhteispohjoismaisen KONSPRO-projektin tuloksena syntynyt julkaisu (Blom 1997) antaa kattavan kuvan erityisesti lujien terästen hyödyntämisestä hitsatuissa rakenteissa. Kirja on yhteenveto projektissa toteutetuista erillisistä tutkimushankkeista ja niiden tuloksista.

Hitsausmenetelmien nopeuttaminen siirryttäessä samanaikaisesti lujempiin teräksiin on aktiivisen tutkimuksen kohteena. Uudet hitsausprosessit, kuten esim. Rapid Processing™, antavat mahdollisuuden jopa kaksinkertaistaa hitsausnopeuden. Tällä on suuri merkitys raskaissa hitsatuissa rakenteissa, joissa hitsaussaumojen pituus saattaa olla jopa satoja metrejä. Nopeita hitsausmenetelmiä käytettäessä on väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa huolehdittava erityisesti hitsin reunaviivan laadusta ja hitsattavien pintojen laadusta. Valssihilse ja hitsauksesta aiheutuvat roiskeet huonontavat koetulosten mukaan väsymiskestävyyttä (Lundin et al. 1997a). Hitsausliitosten jälkikäsitteily on yksi mahdollisuus parantaa väsymiskestävyyttä. Näitä menetelmiä tarkastellaan seuraavassa luvussa.

Lujien terästen käytössä vääntörasituksella kuormitetussa hitsausliitoksessa kannattaa hitsauksessa kiinnittää huomiota hitsin tunkeumaan kustannustehokkuuden lisäämiseksi. Kustannusten laskentaperusteena kannattaa käyttää suhdetta *hitsauskustannus - väsymislujuus*, eikä ainoastaan pelkkiä hitsauskustannuksia (Olsson 1997).

Hitsausliitoksen juuren puolen väsymiseen on pienahitsiliitoksissa kiinnitettävä erityistä huomiota. Liitos on mahdollista muotoilla usein siten, että väsymissärö kasvaa hitsin rajaviivan puolelta eikä juuren puolelta, jolloin liitoksen väsymiskestävyys on paremmin hallinnassa. Tutkimuksissa on todettu, että kuormaa kantavissa ristiliitoksissa hitsin kyljen leveyden ja levynpaksuuden suhde pienenee levyn paksuuden pienentyessä, mikä tuo etua korkealujuuksisille teräksille. Liitettävien levyjen reunan esikoneistus näyttää pienentävän kokonaistuotantokustannuksia sekä automatisoidussa että manuaalisessa hitsauksessa (Spennare et al. 1997).

Korkealujuuksisten terästen levyn reunan leikkausmenetelmien vaikutusta väsymiskestävyyteen on myös vertailtu (Troger, et al. 1997). Tulosten mukaan happi-, laser- ja plasmaleikkauksen välillä ei ole havaittu merkittävää eroa. Laser- ja plasmaleikkausten on todettu olevan hieman parempia kuin happileikkauksen. Reunan hiekkapuhalluksella ei myöskään ole todettu olevan väsymiskestävyyttä parantavaa vaikutusta. Suurin vaikutus on leikkauksen keskeytyksellä ja jatkamisella kriittisessä kohdassa.

Valssihilseen on todettu vaikuttavan haitallisesti väsymiskestävyyteen. Tämä vaikutus korostuu erityisesti suurnopeushitsausmenetelmien ja lujien terästen käytön yhteydessä. Esimerkiksi Rapid Arc -hitsausmenetelmän yhteydessä on tyypillisesti havaittu kylmäjouksuja, jotka ovat aiheutuneet valssihilseestä ja hitsausparametreista (Lundin et al. 1997, Martinez et al. 1997a). Ns. kylmäjuoksu eli puutteellinen hitsimateriaalin ja perusaineen sulaminen hitsin rajaviivalla aiheuttaa eräänlaisen alkusärönä toimivan vian liitokseen. Tämä huonontaa merkittävästi liitoksen väsymiskestävyyttä. Mikäli valssihilse on poistettu esimerkiksi kuulapuhalluksella, hitsin alkuvikojen koot ja määrät ovat pienentyneet, mikä taas johtaa parempaan väsymiskestoikään.

4.3 Hitsausliitoksen väsymislajuuden parantaminen

Hitsausliitos muodostaa rakenteeseen väsymiskestävyydeltään ja sitkeydeltään muuta rakennetta heikomman kohdan. Parhaiten väsymislajuutta voidaan parantaa liitosten suunnittelulla. Hitsien sijoittaminen kohtiin, joissa jännitysvaihtelut ovat pieniä, on usein paras väsymislajuutta parantava tekijä.

Näiden kohtien etsimisessä on apua elementtimenetelmästä (FEM) sekä mahdollisesti prototyyppivaiheen kenttämittauksista. Liitosten muotoilu vaikuttaa huomattavasti varsinkin putkipalkkien väsymislajuuteen, koska putkipalkkien liitoksissa esiintyy usein korkeita jännityskeskittymiä (Wingerde 1992). Oikealla muotoilulla voidaan pienentää hitsin läheisyydessä esiintyvien, väsymistä aiheuttavien jännitysvaihteluiden suuruutta.

Usein väsymisen kannalta kriittisin kohta on jokin suhteellisen pieni detalji. Tällöin koko rakenteen väsymiskestoikää voidaan parantaa helposti keskittymällä tämän kriittisen yksityiskohdan väsymislajuuden parantamiseen. Jälkikäsittelemenetelmät ovat tehokkaita varsinkin silloin, kun käsiteltävää hitsattua aluetta on vähän.

Hitsin jälkikäsitteilyllä voidaan vaikuttaa joko hitsin jännitystilaan tai hitsin geometriaan. Yleensä särö syntyy hitsin rajaviivalle, koska siinä on sekä rakenteellinen epäjatkuvuuskohta että yleensä hitsauksesta aiheutuneita liitosvirheitä ja/tai suotaumia, jotka toimivat valmiina väsymissärön alkuna. Tähän epäjatkuvuuskohtaan ydintyvän särön ydintymisaikaa voidaan pidentää poistamalla hitsauksessa syntyneet reunahaavat ja parantamalla hitsin muotoa juohevammaksi. Hitsin lähigeometrian parantamismenetelmät jaetaan koneistusmenetelmiin, uudelleensulatusmenetelmiin ja erikoishitsausmenetelmiin.

Hitsauksessa syntyvät jäännösjännitykset ovat yleensä väsymisen kannalta vaarallisimpia vetojännityksiä. Jäännösjännityksiin perustuviissa jälkikäsitteilymenetelmissä pyritään joko poistamaan hitsauksesta jäänyt reunahaava, vetojännitys tai saamaan lisäksi aikaan kriittisen kohdan puristusjännitys. Näin estetään särön avautuminen kriittisissä kohdissa ja lisätään rakenteen kestoikää. Jäännösjännityksiin voidaan vaikuttaa vasaroimalla, ylikuormittamalla tai lämpökäsitteilyllä. Taulukossa 3 on esitetty eräs tapa jälkikäsitteilymenetelmien jaotteluun. Kuvassa 20 on esitetty esimerkinomaisesti saavutettava väsymiskestävyyden parannus käytettäessä TIG-jälkikäsitteilyä. Yhtä hyviä kestoian parannustuloksia on saatu myös uusimmissa lujilla teräksillä tehdyissä kokeissa (Blom 1997).

Säilän (1999) diplomityössä on hitsausliitosten jälkikäsitteilymenetelmiä ja erityisesti koneviilausta tutkittu osana VTT:n, LTKK:n ja teollisuuden yhteisprojektia 'Hitsattujen rakenteiden pitkän kestoian väsymiskestävyyds'. Tuloksena todetaan, että koneviilauksella saadaan hitsausliitosten väsymislujuutta lisättyä noin 113 % 20 miljoonan kuormanvaihdon kohdalla mikä on keskimääräistä paljon parempi tulos. Menetelmä - kuten kaikki jälkikäsitteilymenetelmät - on kuitenkin hyvin riippuvainen suoritustavasta eikä yksikäsitteisiä suoritushjeita ole olemassa, mikä vaikuttaa menetelmän soveltamiseen käytännössä.

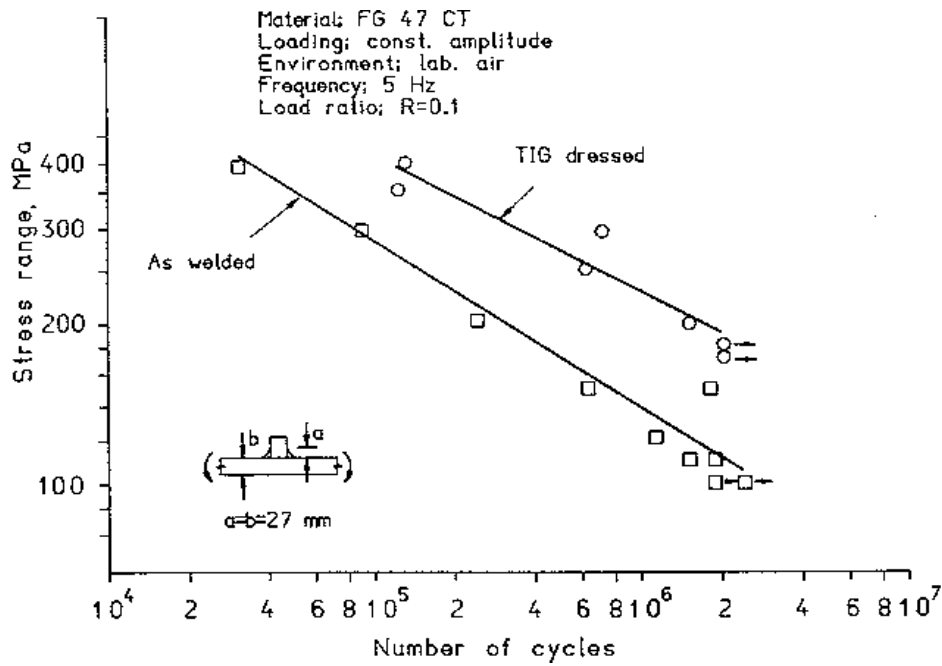
Uusimpana menetelmänä on tutkimuksen kohteeksi noussut ultraäänivasarointi (UIT), joka on kehitetty Venäjällä alunperin titaanisukellusveneiden hitsausliitosten väsymiskestävyyden parantamiseksi. Tutkimusten mukaan menetelmällä voidaan väsymiskestävyyds parantaa jopa kymmenkertaiseksi hitsattuun tilaan verrattuna. Lisäksi menetelmän etuna on pienempi melutaso, mikä huomattava etu perinteisiin - tyyppillisesti melko meluisiin - menetelmiin verrattuna. Tosin esimerkiksi Martinez (1997b) oli todennut vain noin 1,7 - 1,8 -kertaisen keskimääräisen parannuksen kestoiasssä. Menetelmää tutkitaan Suomessakin tällä hetkellä LTKK:n ja VTT:n yhteisprojektissa. (Säilä 1999). Tämäntapaisilla uusilla innovaatioilla on mahdollista saavuttaa lisäetua lujien terästen hyödyntämisessä myös väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa.

Suurin osa jälkikäsitteilymenetelmien tutkimuksista on tehty vakioamplitudikokeilla. Tämä ei kuitenkaan ole kovin normaali kuormitus esimerkiksi ajoneuvorakenteissa. Useimmat rakenteet ja komponentit kuormittuvat käytännössä vaihtuva-amplitudisella kuormituksella. Muutamat uusimmat tutkimukset osoittavat, että jälkikäsitteilymenetelmien vaikutus on sama kuin vakioamplitudikuormituksella. Vasaroinnilla, TIG-käsitteilyllä ja ultraäänivasaroinnilla saavutettiin keskimäärin 1,5 - 2,0 -kertaiset parannukset kestoikään. (Martinez, et al. 1997b).

FatHTS (Fatigue based design rules for the application of High Tensile Steels in ships) on käynnissä oleva EU-projekti, jonka tarkoituksena on nykyaikaisten korkealujuuksisten terästen väsymiseen liittyvien ominaisuuksien tutkiminen ja niistä tehtyjen laivarakenteiden suunnittelumenetelmien kehittäminen. Projektin yhtenä osana selvitettiin Laakson (1999) diplomityössä kokeellisesti hionnan, liitoksen muodon optimoinnin ja TIG-käsittelyn vaikutusta väsymiskestävyyteen. Alustavat tulokset osoittavat, että menetelmillä saavutetaan huomattava parannus tarkasteltujen liitostyyppien väsymislujuuteen. Lujien terästen käyttö lisääntynee vähitellen myös tyypillisissä laivarakenteissa. Liitoksen hitsauksen ja jälkikäsittelyn valmistusteknisellä laadulla on kuitenkin huomattava vaikutus saavutettavissa olevaan kestävyden paranemiseen.

Taulukko 3. Jälkikäsittelymenetelmien jaottelu (Haagensen 1985).

Lähigeometrian parantamismenetelmät	Koneistusmenetelmät	Koneviilaus
		Hitsiprofiilin muotoilu hiomalla
		Laikkahionta
	Uudelleensulatusmenetelmät	TIG-käsittely
		Plasma-käsittely
	Erikoishitsausmenetelmät	Hitsiprofiilin kontrollointi
Erikoiselektrodit		
Jäännösjännitys- menetelmät	Vasarointimenetelmät	Vasarointi
		Kuulapuhallus
	Lämpökäsittelymenetelmät	Myöstö
		Pistekuuminen
	Ylikuormitusmenetelmät	Esiylikuormitus
		Paikallinen puristus
		Räjätys- ja täritysmenetelmät



Kuva 20. TIG-jälkikäsitellyn vaikutus korkealujuuksisten terästen väsymislujuuuteen (Haagensen 1985).

Ajoneuvorakenteissa saattaisi olla hyvinkin saavutettavissa huomattavaa etua hitsausliitosten paikallisella jälkikäsitelyllä, koska rakenteessa on kriittisiä kohtia kohtuullisen pieni määrä. Lisäksi jälkikäsiteltävien hitsien pituuskaan ei ehkä olisi liian rajoittava tekijä.

Yhteenvetona monista tutkimustuloksista voidaan todeta, että vaikka hitsausliitosten jälkikäsitelymenetelmillä on saavutettavissa vaihtelevansuuruisia väsymiskestoian parannuksia, ovat lähes kaikki menetelmät erittäin herkkiä työn teknisen suorittamisen tekniikalle ja laadulle. Kestoikä saattaa jopa huonontua, mikäli alunperin kohtuullisen hyvälaatuinen hitsi esimerkiksi hiotaan väärin.

5. Yhteenveto

Kirjallisuusselvityksenä on tutkittu putkipalkkien ja lujien rakenneterästen käyttöä ajoneuvorakenteissa. Soveltuvuutta on tutkittu sekä lujuusopillisin että valmistusteknisin perustein. Lujuusopillisen soveltuvuuden kannalta on selvitetty ajoneuvorakenteissa esiintyviä kuormituksia ja niiden vaikutuksia putkipalkkien käyttöön. Erityisesti on selvitetty putkipalkkien väsymislujuutta, nimellisen jännityksen menetelmän ja hot spot -menetelmän käyttöä sekä väsymislujuuden parantamismenetelmiä. Valmistusteknisten ominaisuuksien kannalta on tarkasteltu putkipalkkien hitsattavuutta ja korroosionkestävyyttä.

Putkipalkkien hyviä lujuusteknisiä ominaisuuksia voidaan hyödyntää monipuolisesti ajoneuvorakenteissa. Sopivasti yhdistettyinä hyvä taivutus- ja vääntöjäykkyys tekee putkipalkin soveltuvaksi moniin kohteisiin. Rungossa putkipalkkien käytöllä päästään suureen vääntöjäykkyyteen. Myös korirakenteissa on mahdollista hyödyntää putkipalkkien ominaisuuksia, sillä turvarakenteilta vaadittava kuormankantokyky ja energian absorbointikyky on putkipalkeilla hyvä. Toisaalta yksittäisten putkipalkkien käyttö väännön suhteen joustavammissa rakenteissa saattaa johtaa suuriin paikallisiin rasituksiin ja näin ollen huonompaan väsymiskestoon juuri suuren vääntöjäykkyyden takia.

Ajoneuvorakenteissa esiintyvät kuormitukset ovat pääasiassa väsyttäviä, joten väsymisen huomioiminen näiden rakenteiden mitoituksessa on välttämätöntä. Suunnitteluvaiheessa voidaan väsymiskestoikää parantaa huomattavasti, vaikka todellisia ajonaikaisia rasituksia ei vielä tarkasti tunneta. Ajoneuvorakenteiden rasitukset saadaan luotettavasti selville vasta prototyypivaiheen kenttämittauksissa, sillä kaikkien rasituksia aiheuttavien parametrien huomioiminen etukäteen on käytännössä mahdotonta. Mitoitusmenetelmistä putkipalkkiliitoksille soveltuu parhaiten hot spot -menetelmä ja tietyissä tapauksissa myös nimellisten jännitysten menetelmä, jolloin jännityskonsentraatiokertoimet (SCF) saadaan kirjallisuudesta tai FEM-laskelmien avulla.

Lujien terästen käyttö kulkuneuvoissa tulee lisääntymään. Lujien terästen käytöstä on lähinnä tarkasteltu niiden soveltuvuutta väsyttävästi kuormitettuihin rakenteisiin. Tietyin rajoituksin lujien terästen parempaa staattista kestävyttä voidaan hyödyntää myös väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa. Tällöin rakenteen tai komponentin kuormituskertymän muoto on ratkaisevaa. Mikäli suuria kuormitusvaihteluita on vähän ja staattisen keskijännityksen suhde jännitysvaihteluihin on suuri, voidaan parempaa staattista lujuutta hyödyntää. Hitsausliitosten väsymiskestävyttä voidaan parantaa hitsauksen jälkeisellä paikallisella käsittelyllä. Tällöin käytettyjen menetelmien oikea suoritus on olennaisen tärkeää haluttuun lopputulokseen pääsemiseksi. Voidaan sanoa, että mitä enemmän hitsausliitosten, -detaljien ja materiaalin valintaan voidaan vaikuttaa, sitä enemmän voidaan lujia teräksiä hyödyntää hitsatuissa, väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa. Uusimpia tuloksia lujien terästen käytöstä väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa on tarkasteltu mm. tätä tutkimusta rahoittaneen NI-projektin loppuraportin ja käynnissä olevien muiden tutkimusprojektien tulosten avulla.

Lähdeluettelo

Adler, U. H. & Haapaniemi, H. (toim.). 1993. Autoteknillinen taskukirja. Jyväskylä: Gummerus, R. Bosch GmbH. 797 s.

Ajoneuvohallintokeskus. 1999. Liikenneministeriön päätös linja-autojen rakenteesta ja varusteista, N:o 637/199. Annettu Helsingissä 29 päivänä kesäkuuta 1990. Saatavissa: <http://www.ajoneuvohallintokeskus.fi>

ANSI/AWS D1.1-96. 1996. Structural welding code - steel. American Welding Society. 440 s.

Beermann, H.J. 1984. Joint deformations and stresses of commercial vehicle frame under torsion. Teoksessa: International conference on vehicle structures. The Institute of Mechanical Engineers. S. 171 - 180.

Berge, S. 1985. Basic fatigue properties of welded joints. Teoksessa: Almar-Neass, A. (Toim.) Fatigue handbook. Offshore steel structures. Tapir. S. 157 - 236.

Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. 541 s.

Bäckström, M. 1996. Hitsatun putkiliitoksen multiakiaaliväsytykokeet. Teoksessa: Kähönen, A., Moring, E. (toim.) Väsymismitoitus 1996. Espoo: VTT Valmistustekniikka. S. 145 - 163. (VTT Symposium 166.) ISBN 951-38-4557-5

Bäckström, M. et al. 1997a. Structural integrity assessment of a truck trailer. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing.

Bäckström, M. et al. 1997b. Multiaxial fatigue experiments of square hollow section tube-to-plate welded joints. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing.

CIDECT, 1995. Design guide for structural hollow sections in mechanical applications. Cidect. 157 s. ISBN 3-8249-0302-4

EN 10219-1, 1997. Kylmämuovatut hitsatut seostamattomat rakenne- ja hienoraeteräsputkipalkit. Osa 1; Tekniset toimitusehdot.

EN 10219-2, 1997. Kylmämuovatut hitsatut seostamattomat rakenne- ja hienoraeteräsputkipalkit. Osa 2; Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet.

Haagensen, P.J. 1985. Improving the fatigue strength of welded joints. Teoksessa: Almar-Neass, A. (Toim.) Fatigue handbook. Offshore steel structures. Tapir. S. 259 - 289.

Hobbacher, A. 1996. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW Doc. XIII-1539-96. 127 s.

Härkönen, T. & Tervola, T. 1993. Lujat hitsattavat teräkset. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto. 124 s.

Iivonen, R., Björk, T. & Sorsa, I. 1987. Kylmämuovatut profiilit. Rautaruukki. 248 s. ISBN 951-817-349-4.

Kaunisto, T. 1994. Metallien ilmastollinen korroosio. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 108 s. (VTT Tiedotteita 1582). ISBN 951-38-4676-8.

Kecman, D. 1983. Analysis of framework-type safety structures in road vehicles. Teoksessa: Jones, N. & Wierzbicki, T. (Toim.) Structural Crashworthiness. Butterworth & Co. S. 371 - 396.

Kosonen, J. 1997. Suomen kuljetusvälineiteollisuus. YTL. 45 s. ISBN 051-96709-2-0.

Kähönen, A. 1993. Mittausten hyödyntäminen väsymismitoituksessa. Teoksessa: Kähönen, A. & Sipilä, S. (Toim.) Väsymismitoitus 1993. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. (VTT Symposium 137.) S. 169 - 185. ISBN 951-38-4088-3

Laakso, R. 1999. Hitsausliitoksen väsymislujuuden parantaminen. Espoo: TKK. Konetekniikan osasto. Diplomityö. 86 s.

Lehtonen, M. & Kähönen, A. 1996. FEM-laskennan hyödyntäminen väsymismitoituksessa. Teoksessa: Kähönen, A., Moring, E. (toim.) Väsymismitoitus 1996. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. (VTT Symposium 166.) S. 165 - 179. ISBN 951-38-4557-5.

Lehtonen, M. 1997. On the fatigue life calculation procedures based on FEM and design code approaches. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 251 - 265.

Lundin, et al. 1997. High productive MAG welding - fatigue properties of weldments. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 33 - 57.

Maddox, S, J. 1991. Fatigue strength of welded structures. UK: Abington Publishing. 198 s.

Martinez, et al. 1997a. Fatigue behaviour of steels with strength levels between 350 and 900 MPa influence of post weld treatment under spectrum loading. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 361 - 376.

Martinez et al. 1997b. Weld defects before and after post weld treatment for MAG and high-productivity MAG-welding. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 391 - 408.

Niemi, E. 1993. Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components. IIW Doc. XIII-1458-92. 67 s.

Niemi, E. & Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Helsinki: Painatuskeskus Oy. 337 s. ISBN 951-37-1115-3.

Olsson, K. E. 1997. High strength welded box beams subjected to torsion and bending fatigue loads - optimum weld design considering welding cost and fatigue induced field failure cost. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing.

Partanen, T. 1993. Elementtimenetelmän (FEM) käyttö rasiusten määrittämisessä. Teoksessa: Kähönen, A. & Sipilä, S. (Toim.). Väsymismitoitus 1993. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. (VTT Symposium 137.) S. 105 - 133. ISBN 951-38-4088-3.

RIL-167-2, 1988. Teräsrakenteet II. Kemppi, J. (Toim.). Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto Ry. 471 s. ISBN 951-758-269-2.

RIL-167-3, 1988. Teräsrakenteet III. Kemppi, J. (Toim.). Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto Ry. 199 s. ISBN 951-758-222-6.

Rusinski E. 1984. Torsional stiffness of chassis frames with point-welded nodes. Teoksessa: International conference on vehicle structures. The Institute of Mechanical Engineers. S. 181 - 187.

SAE, 1997. SAE, Fatigue design handbook. AE-22. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc. 470 s. ISBN 1-56091-917-5.

SFS 2378. 1992. Hitsaus. Väsyttävästi kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 51 s.

SFS-EN 25817. 1993. Terästen kaarihitsaus. Hitsiluokat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-ENV, 1993-1-1. 1992. Eurocode 3: Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Siljander, A. 1994. Työkoneiden tuotekehitys mitattuja kuormituksia ja simulointikokeita apuna käyttäen, esimerkkejä. Teoksessa: Solin, J., Kähönen, A. & Moring, E. (Toim.) Väsymismitoitus 1994. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. (VTT Symposium 145.) S. 139 - 156. ISBN 951-38-4096-4

Siljander, A. et al. 1997. Development of a straddle carrier wheel support. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 471 - 485.

Spennare, H, et al. 1997. Guidelines for optimum design of load-carrying fillet welds under fatigue loading. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 289 - 304.

Säilä, J. 1999. Koneviilauksen vaikutus hitsausliitoksen väsymiskestävyyteen. Lappeenranta: LTKK Konetekniikan osasto. Diplomityö. 88 s.

Timmerbacka, E. & Saarialho, A. 1983. Kuljetustekniikka -autokuljetukset. Länsi-Savo Oy. 303 s. ISBN 951-99431-0-2.

Trogen, H. et al. 1997. Influence of cutting method and material static strength on the fatigue strength of test specimen. Teoksessa: Blom, A. (toim.) Welded high-strength steel structures. Proc. of the first NESCO. London: EMAS Publishing. S. 345 - 359.

Unger, B., Eichlseder, W. & Raab, G. 1996. Numerical simulation of fatigue - Is it more than prelude to tests? Teoksessa: Lutjering, G. & Nowack, H. (Toim.) Fatigue 96. Proceedings of the sixth international fatigue congress. Pergamon. S. 1135 - 1140.

Vainio, H. et al. 1998. Rautaruukin putkipalkkikäsikirja. Rautaruukki Oy Keuruu: Otava. 350 s. ISBN 952-5010-21-X.

Wardenier, J. 1982. Hollow section joints. Delft: Delft University Press 544 s. ISBN 90-6275-084-2.

Wingerde, A.M. van. 1992. The fatigue behaviour of T- and X-joints made of square hollow sections. Delft: Delft University of Technology. 182 s.