

KYLMÄMUOKKAUKSEN VAIKUTUS REIÄLLISEN ALUMIINI- RAKENTEEN VÄSYMISKESTÄVYYTEEN

Markku Karttunen

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 33
Nro 1, 2000, s. 32-44

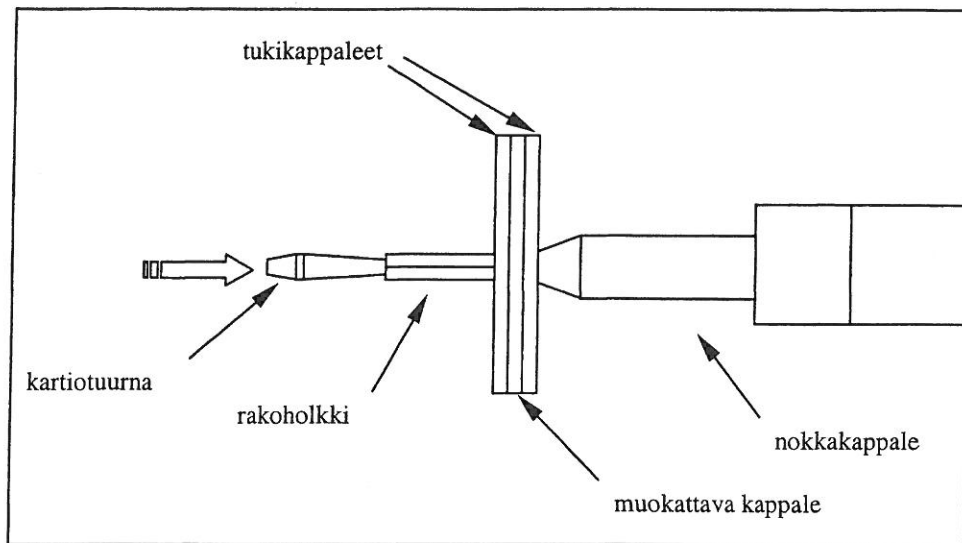
Tiivistelmä

*Artikkelissa kuvataan kylmämuokkauksen vaikutuksia reiällisen alumiinilevyn kestävyys-
teen. Johdanto-osassa selvitetään kylmämuokkauksen fysikaalista taustaa ja sovellutuk-
sia. Lisäksi esitetään yhteenveto kylmämuokkauksen parametreista. Lopuksi esitetään
koetuloksia kylmämuokkauksen vaikutuksesta väsymiskestävyyteen. Kokeita tehtiin kah-
delle alumiinille (2024-T3 ja 2014-T6). Artikkelin on yhteenveto Teknillisen korkeakou-
lun Kevytrakennetekniikan laboratoriossa tehdystä diplomityöstä [1].*

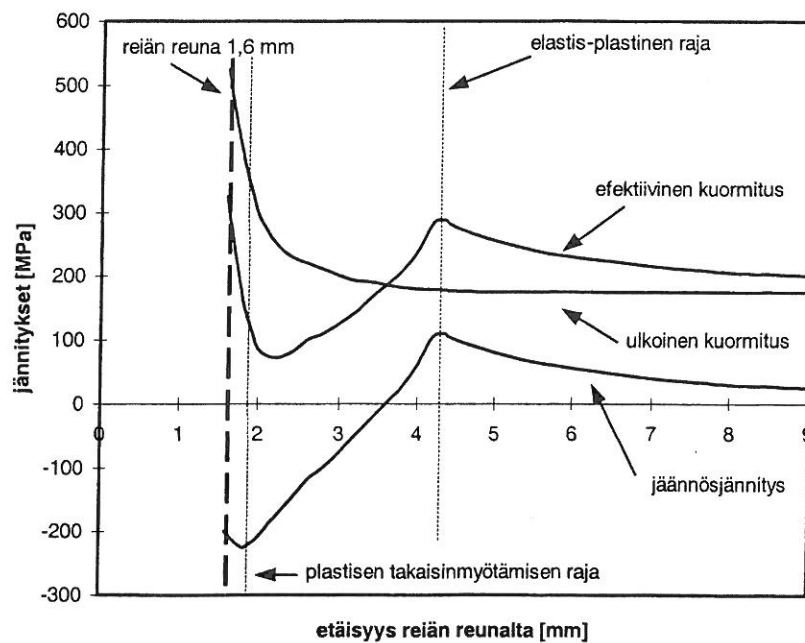
Johdanto

Lentokoneteollisuuden tavoitteena on valmistaa keveitä, taloudellisia ja luotettavia ra-
kenteita. Operaattorien tavoitteena puolestaan on usein pidentää jo liikenteessä olevien
lentokoneiden käyttöikää yli alkuperäisen suunnitellun käyttöiän. Yhtenä vaihtoehtona
rakenteiden väsymiskestävyyden parantamiseksi, ja siten niiden käyttöiän pidentämi-
seksi, on reikien ympäristön kylmämuokkaus. Kylmämuokkausprosessin tarkoituksena
on muuttaa kuormitetussa rakenteessa olevan reikää ympäröivän materiaalin efektiiv-
vinen jännitystila vedosta puristukseksi ja estää siten särön ydintyminen tai hidastaa
huomattavasti syntyvän särön kasvunopeutta. Kylmämuokkaus tehdään vetämällä
muokkauspistoolilla ylisuuri kartiotuurna rakoholkilla suojatun reiän läpi (kuva 1). Näin
saadaan aikaan elastisia ja plastisia muodonmuutoksia reiän ympärille. Jäännösjännityk-
set reiän ympärille muodostuvat pienen plastisen alueen ulkopuolella olevan elastisen
alueen pyrkimyksestä palautua takaisin alkuperäiseen venymään kartiotuurnan
poistuttua reiästä (kuva 2). Elastis-plastisen ja plastisen takaisinmyötämisen rajat on
laskettu käyttäen Richin ja Impellizzerin [5] menetelmää, joka olettaa tasovenymätilan

ja käyttää Mises-Hencky myötökriteeriä. Jännösjännityten laskennassa on käytetty Clarkin [14] mallia.



Kuva 1. Periaatekuva kylmämuokausprosessista.



Kuva 2. Radiaalisen jännösjännityksen, ulkoisen kuormituksen ja efektiivisen kuormituksen jakautuminen avoimen reiän ympäristössä.

Kylmämuokkauksen historiaa

Reikien kylmämuokkausprosessin kehitti 1960-luvun lopulla Boeing Aircraft Company, jolla oli aluksi suuria ongelmia teorian soveltamiseksi käytäntöön. Ensimmäisen kaupallisen version menetelmästä valmisti Fatigue Technology Inc. (FTI). Menetelmä kehitettiin alunperin rakenteiden uustuotantoa varten, mutta sen käyttö laajeni nopeasti käsittämään myös huoltotoiminnan. Se on osoittautunut taloudellisesti edulliseksi keinoksi ehkäistä rakenteissa olevien reikien säröytymistä ja hidastaa mahdollisesti niihin jo muodostuneiden säröjen kasvua. Nykyään kylmämuokkausta käytetään jo varsin yleisesti.

Kylmämuokkauksen sovelluskohteet lentotekniikassa

Lentokoneteollisuudessa kylmämuokkausta on aikaisemmin käytetty lähinnä paksujen levyjen (yli 5 mm) väsymiskestävyyden parantamiseen. Vasta viime aikoina on tutkittu enemmän sen vaikutuksia ohuempiin (alle 2 mm) levyrakenteisiin, kuten lentokoneen rungon tai siiven pintalevyihin. Kylmämuokkauksella voidaan parantaa erilaisten niitti- ja pulttiliitosten sekä korvakkeiden väsymiskestävyyttä. Näissä kohteissa on perinteisesti käytetty erilaisia ahdassovitteisia niittejä tai pultteja ja kutistusliitoksia holkkeja. Kylmämuokkaus voi korvata näitä menetelmiä, jolloin valmistuksessa voidaan käyttää väljempiä toleransseja ja näin säästää kustannuksissa. Kylmämuokkausta voidaan käyttää myös yhdessä näiden menetelmien kanssa, jolloin saavutetaan väsymisiän kannalta paras tulos [2, 3, 4, 5].

Kylmämuokkaus soveltuu myös valmiiksi alkusäröytyneen reiän väsymisiän pidentämiseen korvaamaan perinteisesti kalvamalla suoritettava särönpoisto materiaalista [6]. Tällöin esim. pintalevyjen reikien reunaetäisyydet eivät pienene alle sallittujen rajojen. Avainkysymyksenä on kuitenkin se, kuinka havaita särö riittävän aikaisin, sillä käytössä olevassa lentokonerakenteessa alle 0,75 mm:n särön havaitseminen on miltei mahdollonta vaikka tutkittava reikä olisi avoin. Niinpä kylmämuokkauksen käyttö säröytyvän, muokkaamattoman reiän eliniän lisäämiseksi on paljon riippuvainen rikkomattomien särönhavaitsemismenetelmien tarkkuudesta.

Kylmämuokkauksen parametrit

Tärkeimmät kylmämuokkauksen parametrit ovat:

- **Materiaali.** Tärkeimmät materiaaliparametrit, jotka vaikuttavat kylmämuokatun alueen väsymisenkestoon ovat kimmomoduli ja myötölujuus. Ne määrittelevät jäännösjännitysten määrän ja plastisesti muokkautuneen materiaalin määrän. Korkeamman myötölujuuden omaavat materiaalit hyötyvät eniten, koska jäännösjännitysten maksimimäärä on n. 2/3 materiaalin puristusmyötölujuudesta.
- **Materiaalin paksuus.** Muokattavan materiaalin paksuus vaikuttaa plastisoituvan materiaalin määrään ja sitä kautta jäännösjännitystilaan.
- **Reiän koko.** Reiän koko ei sinänsä vaikuta muokkauksen tehoon. Nykytekniikalla muokkaus on kuitenkin mahdollista vain määrättyissä rajoissa.
- **Kylmämuokkausprosentti.** Alumiineille suositellaan yleensä n. 3-4,5 %:n ja titaanille sekä korkealujuuksiselle teräkselle vähintään 4,5 %:n muokkausta. Kylmämuokkausprosentti määritellään seuraavasti:

$$\text{muokkaus-\%} = (D_{\max} + (2 \times t_{\text{holkki}}) - a) / a \times 100, \quad (1)$$

jossa $D_{\max}$ on kartiotuurnan maksimihalkaisija, t_{holkki} on rakoholkin seinämän paksuus ja a on aloitusreiän halkaisija.

- **Reiän säröytyminen.** Kylmämuokkauksen aikana reikä säröytyy leikkausjännitysten epäjatkuvuuskohtien takia holkin raon kohdalta. Tämä ei kuitenkaan vaikuta väsymisikään, koska muodostuvat säröt poistetaan kalvauksen yhteydessä.
- **Kuormitus.** Kylmämuokkauksen on todettu antavan parempia tuloksia pienillä kuormitussuhteen arvoilla kuin suurilla. Kuormitussuhde R määritellään seuraavasti:

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}, \quad (2)$$

missä $\sigma_{\min}$ ja $\sigma_{\max}$ ovat minimi- ja maksimijännitys.

- **Reiän sijainti.** Rajoittavina tekijöinä ovat reiän etäisyys osan reunasta sekä muiden reikien etäisyys muokattavasta reiästä.
- **Holkin rako.** Holkissa oleva rako saa aikaan kohdalleen suuremmat jäännösjännitykset kuin muualla reiän reunalla. Holkin raon suuntauksella ei ole todettu olevan näkyvää vaikutusta väsymisikään. Yleisenä sääntönä on sijoittaa rako pois päin

vapaasta reunasta, korvakkeessa kohti suurempaa materiaalityyppiä ja särönpysäytysreiässä kohti säröä.

- **Reiän kalvaus.** Reiän kalvauksella ei ole vaikutusta väsymiskestävyyteen, koska jäännösjännitysten maksimikohta ei sijaitse reiän reunalla, vaan pienen matkan päässä siitä. Tästä syystä ei materiaalin vähäinen poisto oleellisesti vaikuta maksimijännityksen määrään.
- **Silauus.** Silauksen on todettu vaikuttavan negatiivisesti saavutettuihin tuloksiin, mikäli verrataan toisiinsa samaa materiaalia silattuna ja ilman silausta. Tämä johtuu silauskerroksen alemmasta myötöjännityksestä, joka mahdollistaa särön nopean muodostumisen materiaalin pinnalle ja sen etenemisen siitä ydinmateriaaliin.
- **Ahdassovitteen käyttö.** Ahdassovitteen pulttien ja kutistusliitosteiden holkkien käyttö yhdessä kylmämuokkauksen kanssa antaa paremman lopputuloksen kuin kylmämuokkaus yksinään.
- **Lämpötila.** Jäännösjännitykset purkautuvat korkeissa lämpötiloissa. Näin korkeita lämpötiloja ei kuitenkaan rakenteille sallita, koska ne heikentävät jo ratkaisevasti alumiinin normaaleja lujuusarvoja.

Muita kylmämuokkauksen tehoon vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kylmämuokkauksen suoritustapa, mekaanisen liitoksen kautta välittyvien kuormien suuruus sekä kylmämuokkauksen suunta. Edellämainituista tekijöistä johtuen kylmämuokkauksella saavutettavat edut vaihtelevat suuresti. Parhaimmillaan on koekappaleen väsymisikä kasvanut jopa satakertaiseksi. Kokeellisesti on todettu, että tyypillisillä alumiinisilla lentokonarakenteilla saavutettava parannus on vähintään kolmesta noin kymmeneen, kun testejä on suoritettu kylmämuokkaamalla sekä avoimia reikiä että yksinkertaisten liitosten reikiä.

Kylmämuokkauksen vaikutusten laskennallinen arviointi

Kylmämuokkauksella aikaansaatava jännitystila on kolmiulotteinen jännitysten suuruuden vaihdellessa kehän suuntaan, säteen suuntaan sekä reiän akselin suuntaan kuljettaessa. Särön etenemisen kannalta merkityksellisimpiä ovat syntyvät puristavat tangentialiset jäännösjännitykset, joiden vaikutusalue levittäytyy reiän reunalta vähintään säteen laajuudelle ja tyypillisemmin reiän halkaisijan etäisyydelle, riippuen kylmämuokausprosentin suuruudesta ja muokattavasta materiaalista. Efektiivinen jännitystila kyl-

mämuokatun reiän ympärillä saadaan karkeasti laskemalla yhteen aikaansaadut jäännös-jännitykset ja vaikuttava ulkoinen kuormitus (kuva 2).

Reikien kylmämuokkauksella aikaansaatavien jäännös-jännitysten suuruuden ja jakautu-mien määrittämiseksi on kehitetty 1970-luvulta lähtien runsaasti analyttisiä ja FEM laskentamalleja, sekä suoritettu kokeellisia tutkimuksia [1]. Jäännös-jännitysten määrit-täminen on erityisen tärkeää, koska ne vaikuttavat särön etenemisnopeuteen ja kriit-tiseen särönpituuteen. Jotta voidaan määrittää tarpeellinen tarkastusväli, tulee tuntea sekä särönkasvunopeus että kriittinen särönpituus. Laskentamenetelmien tarkempi käsit-tely on niiden laajuuden vuoksi jätetty tämän artikkelin ulkopuolelle, mutta se löytyy lähteestä [1].

Kylmämuokkauksen kokeelliset tutkimukset

Säröytyvän rakenteen elinikä voidaan jakaa särön muodostumiseen ja särön etenemi-seen. Kylmämuokkauksen avulla voidaan vaikuttaa kumpaankin osa-alueeseen, mutta vaikutukset ovat selkeästi suuremmat särön etenemiseen. Muokkauksen määrällä ei ole vaikutusta särön syntypaikkaan eikä -mekanismiin.

Varsin hyvä liitosten väsymisikää pidentävien keinojen vertailu on esitetty lähteessä [7]. Kylmämuokkauksen eri alumiinilaaduille antamaa suojaa väsymistä vastaan on tarkas-teltu mm. lähteessä [8].

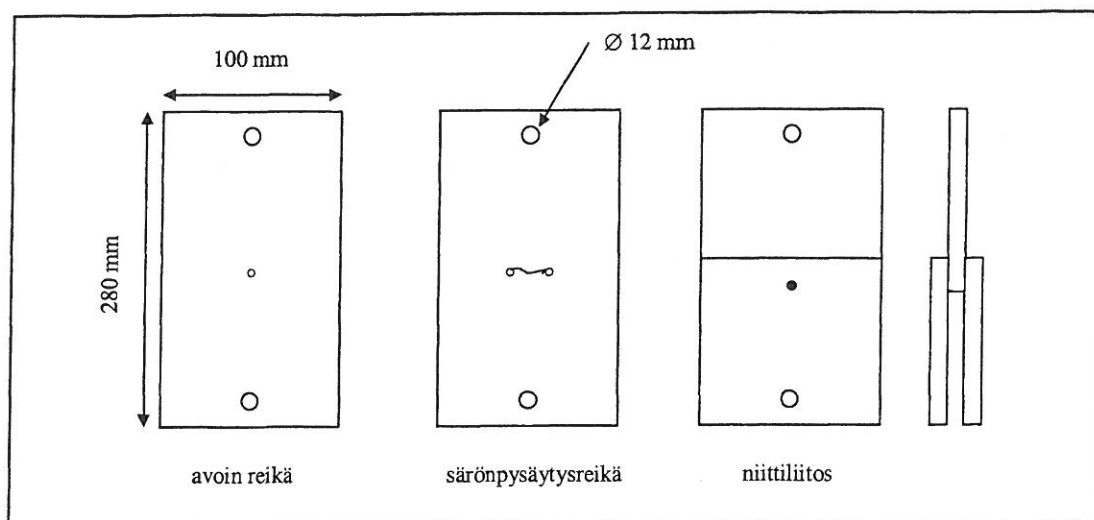
Särönkasvunopeuden arviointiin on kehitetty runsaasti erilaisia laskentamalleja, joista suurin osa perustuu jollain tavoin modifioituun Paris'n kaavaan [9, 10, 11]:

$$da / dN = C \cdot (\Delta K_I(a))^n, \quad (3)$$

missä C ja n ovat materiaaliarvoista riippuvaisia vakioita, a on särön pituus, N on kuormitus syklien määrä ja K_I on jännitysintensiteettikerroin. Erilaisia laskumenetelmiä särön synnylle ja särönkasvuajalle on esitetty lähteissä [2, 9, 12, 13 ja 14].

Tutkimuksessa tehdyt kokeet

Koeohjelmalla pyrittiin selvittämään kylmämuokkauksen vaikutuksia väsymisikään ja särönkasvunopeuteen avoimissa rei'issä, särönpysäytysrei'issä sekä yksinkertaisissa niittiliitoksissa (kuva 3). Erityisesti haluttiin selvittää kylmämuokkauksen tehokkuus ohuissa (alle 3 mm) levyissä.



Kuva 3. Koekappaleet.

Reikien kylmämuokkaus tapahtui WCI:n valmistamalla laitteistolla [15], joka perustuu samaan kartiotuurnaa ja rakoholkia käyttävään menetelmään kuin FTI:n Split Sleeve Cold Expansion™ (SsCx™). Koeohjelma sisälsi 14 koesarjaa koekappaleiden määrän ollessa 4-8 sarjaa kohden (taulukko 1).

Taulukko 1. Koeohjelma.

Koe-sarja	Kpl	Materi-aali	Pak-suus [mm]	Kylmä-muokkaus 4,2 %	Koekappale ja reiän koko Ø [mm]	Maksimi-jännitykset [MPa]	Taajuus [Hz]
A	8	2024-T3	2,03	ei	a 3,2	175	10
B	8	2024-T3	2,03	kyllä	a 3,2	175	10
C	8	2014-T6	1,0	ei	a 3,2	175	10
D	8	2014-T6	1,0	kyllä	a 3,2	175	10
E	6	2014-T6	1,0	ei	s 4,8	80	10
F	6	2014-T6	1,0	kyllä	s 4,8	80	15
G	6	2014-T6	0,6	ei	s 4,8	80	15
H	6	2014-T6	0,6	kyllä	s 4,8	80	15
I	6	2014-T6	2,0	ei	s 4,8	80	10
J	6	2014-T6	2,0	kyllä	s 4,8	80	15
K	4	2014-T6	2,0	ei	n 4,8	25	10
L	4	2014-T6	2,0	kyllä	n 4,8	25	10
M	5	2014-T6	1,0	ei	n 3,2	38	10
N	7	2014-T6	1,0	kyllä	n 3,2	38	10

a = avoin reikä

s = särönpysäytysreikä

n = niittiliitos

Koekappaleita kuormitettiin vakioamplitudisella kuormituksella pääasiassa 10 Hz:n taajuudella. Kuormitussuhde (R) oli kaikissa kokeissa 0,1. Taulukossa 2 on esitetty kaikkien koesarjojen kuormitus syklien keskiarvot (ka.), keskihajonnat (kh.) ja parannuskertoimet (p.). Tuloksissa ei ole otettu huomioon kiinnityksistään hajonneita koekappaleita, mikä olisi parantanut tuloksia erityisesti koesarjoissa D ja J.

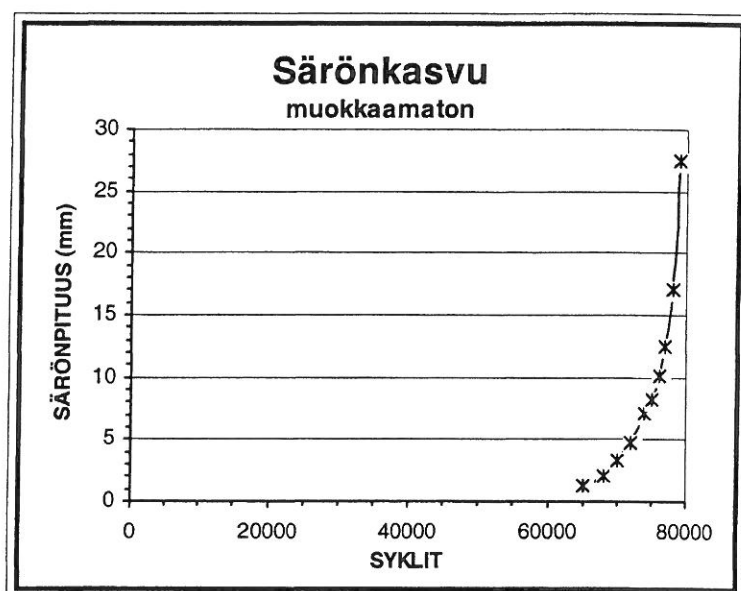
Kuormittamattomat reiät. Kylmämuokkauksen vaikutusta tutkittuihin materiaaleihin voidaan arvioida vertailemalla avointen reikien koesarjoja A, B, C ja D (taulukko 2). Vertailuja tehtäessä on otettava huomioon paksuusero. Tuloksista nähdään, että korkeamman myötölujuuden omaava 2014-T6 materiaali saa kylmämuokkauksesta suuremman hyödyn vaikka materiaalipaksuus on vain puolet 2024-T3:n paksuudesta (vrt. särönpysäytysreikien tapausta missä ero on selvä siirryttäessä ohuemmasta materiaalista paksumpaan). Paksuuden lisäksi tuloksiin vaikuttaa se, että 2024-T3 materiaali oli silattua ja 2014-T6 materiaali ei ollut.

Taulukko 2. Koetulosten yhteenveto.

KOETULOKSET						
Avoin reikä						
2024-T3 2,03 mm silattu			2014-T6 1,0 mm			
	ei muok. (A)	muok. (B)	ei muok. (C)	muok. (D)		
ka.	79 699	289 329	36 653	141 952		
kh.	6 139	34 080	4 510	14 296		
p.	3,68		3,87			
Särönpysäytysreikä 2014-T6						
	ei muok. (G)	muok. (H)	ei muok. (E)	muok. (F)	ei muok. (I)	muok. (J)
	0,6 mm		1,0 mm		2,0 mm	
ka.	53 029	198 819	52 397	424 556	57 251	646 414
kh.	12 550	70 911	11 993	184 054	4 317	180 577
p.	3,75		8,1		11,3	
Niitatut koekappaleet 2014-T6						
	ei muok. (M)	muok. (N)	ei muok. (K)	muok. (L)		
	1,0 mm			2,0 mm		
ka.	163 062	163 371	90 612	296 738		
kh.	83 576	71 294	4 963	21 551		
p.	1,0			3,27		

Koekappaleiden erot huomioon ottaen tulokset vastaavat hyvin Cookin [8] kokeissaan saavuttamia tuloksia. Koetuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että Al 2024-T3 koekappaleet kylmämuokattiin kaikki samassa nipussa ilman suositeltua taustakappaletta. Kylmämuokausprosessin kolmiulotteisuudesta johtuen alimmat koekappaleet saivat näin pienemmät jäännösjännitykset, mikä näkyi niiden hieman lyhyempänä elinikänä. Tukikappaleiden (kuva 1) tarkoituksena on taata yhtäläinen kylmämuokkaus muokattavan kappaleen ylä- ja alapinnalle, sekä estää ohuiden kappaleiden ei toivotut muodonmuutokset muokkauksen yhteydessä (aaltoilu). Laskettu eliniän vähennys alimmalla koekappaleella verrattuna viiden ensimmäisen koekappaleen keskiarvoon on n. 22 %.

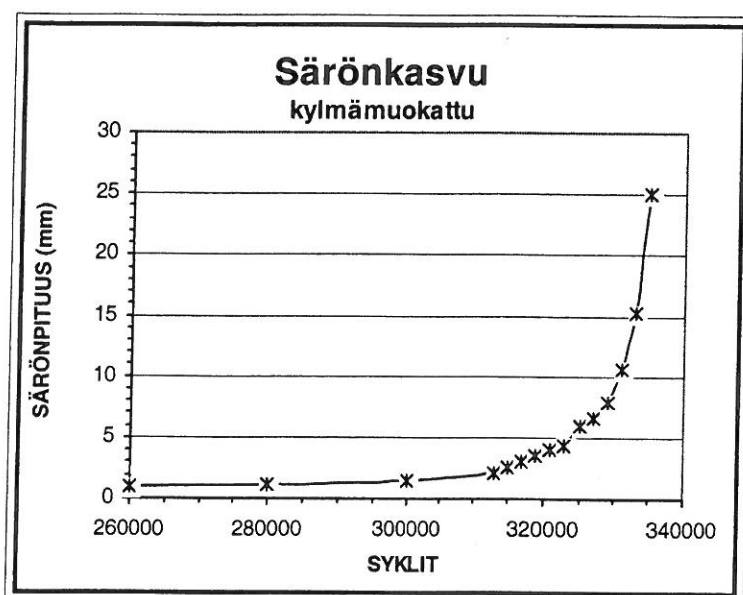
Särön ydintymisen seuranta silatussa materiaalissa oli hankalaa koska silaus murtui ensin useasta eri kohdasta. Särö havaittiin yleensä n. 0,5-1,5 mm mittaisena. Väsymyssärön kasvuun sen havaitsemisesta koekappaleen murtumiseen asti tarvittavista syklimääristä huomataan selvä ero kylmämuokattujen koekappaleiden hyväksi (kuvat 4 ja 5).



Kuva 4. Särönkasvu (2 säröä) muokkaamattomassa koekappaleessa (Al 2024-T3 silattu) [1].

Laskennallisin keinoin [5] määritelty jäännösjännitysten huippukohta sijoittuu n. 0,20-0,25 mm etäisyydelle reiän reunasta. Todennäköistä on, että alle 0,2 mm:n alkusärö on muodostunut kylmämuokattuun koekappaleeseen huomattavasti aikaisemmin, mutta sen

havaitseminen ilman tarkempia menetelmiä on mahdotonta. Esimerkin vuoksi laskettiin jännitysjakautuma kylmämuokatun reiän ympäristössä. Kuvassa 2 on esitetty arvioidut tangentiaaliset jäännösjännitykset Al 2024-T3 levyssä olevan kylmämuokatun reiän ympäristössä ($\varnothing$ 3,2 mm). Lisäksi kuvaan on piirretty ulkoisen kuormituksen aikaansaamat jännitykset ja efektiivinen jännitys. Teoriassa ei rakenteeseen pitäisi syntyä ollenkaan säröä, mutta käytännössä särö ydintyi n. 260 000 syklin jälkeen. Eteneminen muokatun alueen läpi oli kuitenkin huomattavasti hitaampaa kuin muokkaamattomassa kappaleessa (kuvat 4 ja 5).



Kuva 5. Särönkasvu (2 säröä) kylmämuokatussa koekappaleessa (Al 2024-T3 silattu) [1].

Särönpysäytysreiät. Muokkaamattomien särönpysäytysreikien tuloksissa esiintyy suurempaa hajontaa kuin avoimen reiän koekappaleilla. Tähän on todennäköisesti syynä vaihtelu alkusärön pituudessa (jännitysintensiteettikertoimen suuruudessa). Särönpysäytysreikiä muokattaessa ei myöskään voitu käyttää tukikappaleita kuin ainoastaan koekappaleen alapinnalla. Tämä aiheuttaa sen, ettei kylmämuokkauksesta saatava hyöty ole aivan yhtä suuri kuin avoimen reiän koekappaleilla. Tukikappaleiden puuttuminen koekappaleiden yläpinnalta johti myös ohuempien (0,6 mm) koekappaleiden aaltoiluun

muokkauksen yhteydessä. Selkeästi havaittava aaltoilevan alueen vyöhyke levisi n. 20-25 mm:n etäisyydelle reiän reunalta.

Tutkimuksen tulokset särönpysäytysreikien kylmämuokkauksen vaikutuksista vastaavat kirjallisuudesta löytyviä tuloksia (Landy et al. [2], L. Reid [16]).

Liitosreiät. Tässä tutkimuksessa ei ohuemmalla materiaalilla saatu aikaan lainkaan parannusta koekappaleiden elinikään. Paksummallaakin materiaalilla todellinen parannuskerroin jäi määrittämättä, kun kylmämuokatut koekappaleet murtuivat kaikki niitistä.

Kylmämuokattujen, niitattujen koekappaleiden huonot tulokset johtuvat koekappaleiden väärästä suunnittelusta ja käytetyistä kuormitustasoista. Ohuemmissa koekappaleissa käytetyt jännitystasot olivat lähellä niitin leikkautumiseen tarvittavia jännityksiä, mikä on vaikuttanut liitoksen käyttäytymiseen. Väsytykskokeiden jälkeen lasketuissa liitosreikien reunapuristusjännityksistä (bearing-jännityksistä) käy ilmi, että 1,0 mm:n materiaalipaksuudella alumiinin sallittu reunapuristuslujuus (n. 800 MPa) ylitettiin selvästi. Tästä johtuen ei 1,0 mm:n koekappaleiden voida olettaakaan saavan kylmämuokkauksesta hyötyä. Bearing-jännityksen pienentämiseen alle sallitun arvon olisi voitu käyttää matalampaa jännitystasoa, suurempaa niitin halkaisijaa tai useampaa niittiä liitoksessa.

Yhteenveto

Artikkelissa on tarkasteltu lyhyesti jäännösjännitysten vaikutuksia väsymiskestävyyteen, sekä esitelty kylmämuokkauksen erilaisia sovelluskohteita. Diplomityön kirjallisuustutkimuksessa on lisäksi pyritty löytämään väsytyskoetuloksia, joita on verrattu tehtyjen kokeiden tuloksiin. Väsytykskokeilla tutkittiin avointen reikien, särönpysäytysreikien ja yksinkertaisten niittiliitosten käyttäytymistä sinimuotoisessa vakioamplitudisessa kuormituksessa, jonka jännityssuhde oli 0,1. Kokeet koostuivat 14:sta koesarjasta. Kussakin koesarjassa oli 4-8 koekappaletta. Käyttämällä kylmämuokkauksessa WCI:n standardoimia menetelmiä ja työkaluja sekä seuraamalla mahdollisimman tarkasti manuaalin ohjeita pyrittiin parhaaseen mahdolliseen kylmämuokkausasteeseen (alumiinille n. 4,2%).

Väsytykskokeiden tulokset osoittivat kylmämuokkauksen parantavan koekappaleiden väsymiskestävyyttä avoimen reiän koekappaleilla miltei nelinkertaiseksi ja särönpysäytysreikien koekappaleilla materiaalipaksuudesta riippuen 3,75-14,2 kertaiseksi muokkaamattomiin koekappaleisiin verrattuna. Niitatuilla koekappaleilla ei kylmämuokkauk-

sella saavutettu parannusta ohuemmalla materiaalipaksuudella (1 mm). Paksummallakin materiaalilla (2 mm) saavutettu etu jäi odotettua pienemmäksi (n. 3,3 kertaiseksi). Pääsyyinä liitosten huonoon menestymiseen oli bearing-lujuuksien ylittyminen.

Lähteet

- [1] Karttunen, M.A., Kylmämuokkauksen vaikutus reiällisen alumiinirakenteen väsymiskestävyyteen. Teknillinen korkeakoulu, kevytrakennetekniikan laboratorio, diplomityö, Otaniemi 1997. 96 s.
- [2] Landy, M.A., Armen Jr., H., Eidinoff, H.L., Enhanced stop-drill repair procedure for cracked structures. In: Potter, J.M. (ed) American society for testing and materials, Special technical publication. ASTM STP 927, 1986, s. 190-220.
- [3] Toor, P.M., Cracks emanating from precracked coldworked holes. Engineering fracture mechanics, vol 8, 1976, s. 391-395.
- [4] Mann, J.Y., Machin, A.S., Lupson, W.F., Pell, R.A., Techniques for increasing the fatigue life of thick-section aluminium alloy bolted joints. Aluminium, vol 60, no 7, 1984, s. 515-520.
- [5] Rich, D.L., Impellizzeri, L.F., Fatigue analysis of cold-worked and interference fit fastener holes. Cyclic stress-strain and plastic deformation aspects of fatigue crack growth. American society for testing and materials, Special technical publication. ASTM STP 637. A symposium sponsored by ASTM committee E-9 on fatigue. St. Louis, 2-8 May 1976. 1977, s. 153-175.
- [6] Ozelton, M.W., Coyle, T.G., Fatigue life improvement by cold working fastener holes in 7050 aluminium. In: Potter, J.M. (ed) Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints. American society for testing and materials, Special technical publication. ASTM STP 927, 1986, s. 53-71.
- [7] Petrak, G.J., Stewart, R.P., Redartation of craks emanating from fastener holes. Engineering fracture mechanics, vol 6, no 2, 1974, s. 275-282.
- [8] Cook, R., Fatigue enhancement due to cold expansion in a range of aluminium alloys. Estimation, enhancement and control of aircraft fatigue performance. Proceedings of the 18th symposium of the international committee on aeronautical fatigue. Melbourne, Australia. 3-5 May, 1995, vol 1, s. 971-986.

- [9] Su, X., Gu, M., Yan, M., A simplified residual stress model for predictin fatigue crack growth behavior at coldworked fastener holes. Fatigue and fracture of engineering materials and structures, vol 9, no 1, 1986, s. 57-64.
- [10] Chang, J.B., Prediction of fatigue crack growth at cold-worked fastener holes. Journal of aircraft, vol 14, no 9, 1977, s. 903-908.
- [11] Amalbert, C., Cornuault, C., Thibaud, T., Modelling and analysis of the effect of "coldworking" on fatigue life. New materials and fatigue resistant aircraft design. The proceedings of the 14th symposium of the international committeeon aeronautical fatigue. Ottawa, Canada. 8-12 June, 1987, s. 445-463.
- [12] Chao, L., Xiulin, Z., Effects of cold expansion of a hole on fatigue crack initiation location and life of an LY12CZ alloy. Fatigue and fracture of engineering materials and structures, vol 15, no 3, 1992, s. 241-247.
- [13] Ball, D.L., Elastic-plastic stress analysis of cold expanded fastener holes. Fatigue and fracture of engineering materials and structures, vol 18, no 1, 1995, s. 47-63.
- [14] Clark, G., Modelling residual stresses and fatigue crack growth at cold-expanded fastener holes. Fatigue and fracture of engineering materials and structures, vol 14, no 5, 1991, s. 579-589.
- [15] Operation and maintenance manuals for WCI-1700, WCI-1800 and WCI-1900 puller guns and accessories. West Coast Industries.
- [16] Reid, L.F., Airframe life extension through cold expansion techniques. Proceedings of international conference on aircraft damage assessment and repair. Melbourne, Australia, 26-28 August 1991, s. 109-114.

Markku Karttunen, DI, Tutkija
 TKK, Kevytrakennetekniikan laboratorio
 Puumiehenkuja 5 A, 02150 ESPOO
 Markku.Karttunen@hut.fi