
Tilaaaja	Onnettomuustutkintakeskus, Kai Valonen, Sörnäisten rantatie 33C, 00500 Helsinki
Tilaus	Sähköpostiviesti Kai Valonen 4.12.2012.
Yhteyshenkilö VTT:ssä	Johtava tutkija Jorma Salonen VTT, PL 1000, 02044 VTT (Käyntiosoite: Kemistintie 3, Espoo) Puh. 020 722 5422, Faksi 020 722 7002 Sähköposti: jorma.salonen@vtt.fi

Tehtävä	Jänneterästen katkeamisen syyn selvitys
----------------	--

Näyte	Vahanen Jyväskylä Oy:n toimittamia näytteitä jännenipuista ja jänneteräksistä.
--------------	--

Saadut asiatiedot	Tutkittavaksi saadut näytteet on irrotettu Kangasvuoren vesitornin ylävesisäiliön jännenipuista ja yksittäisistä betoniterästangoista. Vesitorni on rakennettu vuonna 1975 ja sen ylävesisäiliö romahti 3.11.2012 jännenippujen katkettua. Vahanen Jyväskylä Oy:n tekemässä silmämääräisessä tarkastuksessa on todettu katkenneiden jänneterästen murtopinnoissa muuta murtopintaa selvästi voimakkaammin ruostuneita alueita. Jänneteräkset ovat materiaaliltaan terästä Fe 1450/1600 (0,2-raja/murtolujuus, MPa). Tutkittavaksi saaduista yksittäisistä jänneteräksistä osa on katkennut pienehköllä voimalla tankoja käsin taivutettaessa ja syntyneitä murtopintoja tarkastettaessa murtopinnoissa on todettu ruostuneita alueita.
--------------------------	--

Suoritetut tutkimukset	Tutkittavaksi saaduista yksittäisistä jänneteräsnäytteistä valittiin kolme näytettä, joille tehtiin magneettijauhetarkastus ja kolme näytettä, joiden murtopintaa (käsin taivutettaessa syntyneen murtuman murtopintaa) tutkittiin stereomikroskoopilla ja pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) ja analysoitiin pyyhkäisyelektronimikroskoopiin liitettyllä energiadiispersiivisellä röntgenanalysaattorilla (EDS). Yhdelle magneettijauhetarkastuksessa säröytyneeksi todetulle ja yhdelle ehjäksi oletetulle jänneteräkselle (jänneteräs, joka valittiin jännenipusta J1, joka ei sisältänyt murtopinnastaan osittain ruostuneita tankoja) tehtiin vetokoe, mikrorakennetutkimus optisella mikroskoopilla, koostumuksen määrittäminen optisella emissiospektrometrillä ja kovuusmittaus Vickers-yksiköissä.
-------------------------------	---

Tutkimusten tulokset	Tutkittavaksi valittujen yksittäisten jänneterästankojen ulkonäkö ilmenee liitteen 1 kuvista 1 - 3. Saman murtuman vastakkaiset murtopinnat on asetettu kuvissa vastakkain. Kuvassa 1 olevat näytteet oli yhteisesti merkitty tunnuksella L4, mutta yksittäisissä tangoissa ei ollut tunnuksia. Kuvan 2 tangot oli yhteisesti merkitty tunnuksella L12 - L13 ja kuvassa ylin tanko tunnuksella J1, keskimmäinen tanko tunnuksella L2 ja alin tanko oli ilman tunnuksia. Kuvan 3 tankoja ei ole merkitty lainkaan. Tässä tutkimuksessa tangot merkittiin numeroilla 1 - 8 kuvien 1 - 3 mukaisesti.
-----------------------------	---

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Magneettijauhetarkastukseen valittiin näytteet 2, 3 ja 6. Tehdyssä magneettijauhetarkastuksessa todettiin poikkittaisia säröindikaatioita kaikissa tarkastetuissa näytteissä. Eniten säröindikaatioita oli näytteessä 3 ja pisimmät indikaatiot olivat noin 5 mm:n mittaisia (liite 1, kuva 4).

Vetokokeeseen valittiin runsaasti säröindikaatioita sisältänyt näyte 3 (kuvassa 4 keskellä) ja ehjäksi oletettu tanko nipusta J1, jossa Vahanen Jyväskylä Oy:n tekemän silmämääräisen tarkastuksen perusteella ei ollut osittain ruosteen peittämiä murtopintoja. Vetokokeen tulokset ovat liitteessä 2. Säröindikaatioita sisältäneen näytteen murtolujuus oli noin puolet ehjän tangon murtolujuudesta. Stereomikroskoopilla tehdyssä tarkastuksessa todettiin vetokokeessa syntyneessä murtopinnassa ruosteen peittämää vanhaa murtopintaa, jonka osuus poikkipinnasta oli suuruusluokkaa puolet (liite 1, kuva 5).

Murtopintatutkimuksiin valittiin liitteen 1 kuvien 1 ja 2 tankojen 1, 4 ja 5 vastakkain asetetut murtopinnat. Näistä murtumista stereomikroskoopilla otetut kuvat 6 - 11 ovat liitteessä 1. Murtopinnat olivat näytteen 3 vetokokeessa syntyneen murtopinnan kaltaisia. Kaikissa murtopinnoissa oli voimakkaasti ruostuneita alueita, joiden yhteinen osuus poikkipinnasta vaihteli silmämääräisesti arvioituna välillä 40-70%. Osassa ruostuneita alueita alueen leveys oli suurimmillaan tangon sisällä.

Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla tehdyissä tutkimuksissa todettiin kuvien 7, 9 ja 11 ruosteen peittämien murtopinta-alueiden olevan raerajamurtumaa. Raerajat olivat lisäksi osittain auki ja raerajapinnoilla oli paikoitellen kapeita sitkeän murtuman juovia (liite 1, kuva 12). Ruostuneen alueen ulkopuolinen murtopinta (käsin taivutuksessa syntynyt murtopinta) oli sitkeää murtumaa (liite 1, kuva 13).

Valomikroskoopilla tehtävää mikrorakennetutkimusta varten valittiin säröindikaatioita sisältänyt näyte 3 (liitteen 1 kuvassa 4 keskellä) ja vetokokeeseen valittu kimpun J1 tanko. Kummassakin näytteessä mikrorakenne oli martensiittia ja ulkopinnassa oli ohut ferriittinen hiilenkatokerros. Säröindikaatioita sisältäneen tangon tutkimuksessa pitkittäisleikkauksessa todettiin useita perinnäisen austeniitin raerajoja pitkin edenneitä säröjä (liite 1, kuvat 14-18).

Kovuusmittauksissa saatiin tulokseksi (HV 10):

Näyte 3: 518, 522, 532, 521 ja 529, joiden keskiarvo on 524.

Nipun J1 tanko: 510, 481, 486, 506 ja 501, joiden keskiarvo on 497.

Analyysitulokset ovat liitteessä 3.

Tulosten tarkastelu

Suoritettujen tutkimusten perusteella jänneterästankojen katkeamisen ovat aiheuttaneet tangoissa todetut ennen niiden lopullista katkeamista syntyneet säröt, joiden osuus poikkipinnasta on ollut huomattavan suuri. Säröytymistä aiheuttanut vauriomekanismi on niin sanottu viivästynyt vetymurtuma. Tutkituissa tangoissa todettuja viivästyneelle vetymurtumalle tyypillisiä piirteitä ovat murtuminen raerajoja pitkin, avautuneet raerajat ja raerajapinnan kapeat

sitkeät juovat. Viivästyneelle vetymurtumalle on myös tyypillistä ydintyminen materiaalin sisältä, johon viittaa se, että osassa pinnaltaan ruostuneita alueita (viivästyneen vetymurtuman aiheutamia säröjä) alueen leveys oli suurimmillaan tangon sisällä.

Viivästynyttä vetymurtumaa esiintyy lujilla staattisesti kuormitetuilla teräksillä, jotka sisältävät vetyä. Murtuma syntyy ilman merkittävää venymää tai kuroutumaa. Viivästynyt vetymurtuma voi syntyä selvästi myötölujuutta pienemmällä jännityksellä ja se syntyy viivästyneenä, eli jonkin aikaa kuormituksen alkamisesta. Riski viivästyneeseen vetymurtumaan kasvaa ja murtumiseen johtava aika lyhenee teräksen lujuuden kasvaessa, jännitysten kasvaessa ja vetypitoisuuden kasvaessa. Teräkset, joiden lujuus on alle 700 MPa ovat tälle vauriomekanismille käytännössä immuuneja, ja teräkset, joiden lujuus on yli 1200 MPa ovat viivästyneelle vetymurtumalle erityisen alttiita. Lujilla teräksillä vetymurtuman edellyttämä vetypitoisuus on muutama ppm.

Teräksessä oleva vety diffundoituu vähitellen pois ja ellei teräkseen tule uutta vetyä, vähenee vetymurtuman riski ajan kuluessa. Koska torni on noin 27 vuotta vanha, on näin ollen ilmeistä, että viivästyneen vetymurtuman aiheuttanut vety ei ole peräisin teräksen valmistuksesta. Koska terästankojen pinta oli ruosteinen, on ilmeistä, että teräkseen on joutunut vetyä korroosioreaktion seurauksena.

Tutkitut tangot ovat seostamatonta tai hyvin niukasti seostettua karkaistua ja päästettyä terästä. Ehjä nipun J1 tanko täytti teräksen 0.2-rajalle ja murtolujuudelle asetetut vaatimukset. Teräksen kovuus on suunnilleen suoraan verrannollinen murtolujuuteen ja kovuuseron perusteella säröjä sisältäneen näytteen 3 murtolujuus on noin 80 - 90 MPa nipun J1 testatun tangon murtolujuutta suurempi. Mitään materiaali- tai valmistusvikaan viittaavaa ei todettu. Murtopintatutkimuksissa todettiin, että käsin taivutettaessa katkenneissa murtopinnoissa lopullinen murtuminen on tapahtunut sitkeästi, joten katkenneiden tankojen teräs käyttäytyy ylikuormitustilanteessa sitkeästi.

Espoo, 29.1.2013



Jorma Salonen
Johtava tutkija



Petri Kinnunen
Teknologiapäällikön sijainen

LIITE 1
LIITE 2
LIITE 2

kuvat 1 – 18
vetokoetulokset
analyysitodistus

JAKELU

Tilaaaja
VTT / Kirjaamo

1 alkuperäinen
1 alkuperäinen

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



Kuva 1. Tutkittavaksi saatuja jänneteräsnäytteitä.



Kuva 2. Tutkittavaksi saatuja jänneteräsnäytteitä.



Kuva 3. Tutkittavaksi saatuja jänneteräsnäytteitä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



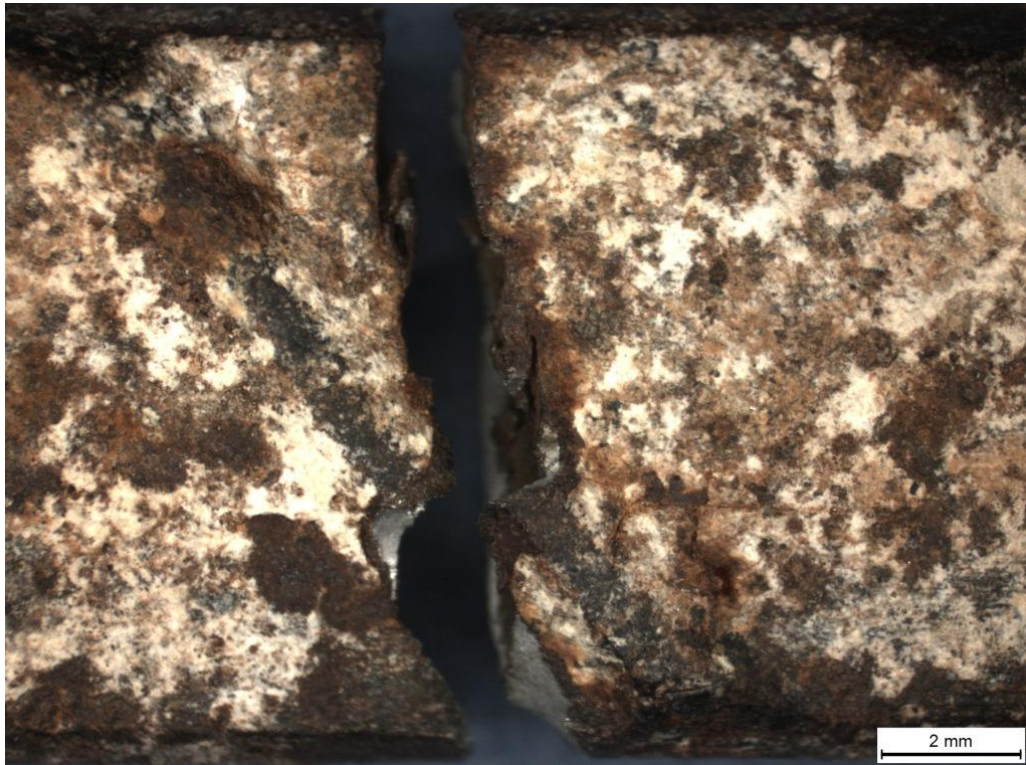
Kuva 4. Magneettijauhetarkastetut näytteet 2 (ylin), 3 (keskellä) ja 6 (alin).



Kuva 5. Stereomikroskoopilla otettu kuva näytteen 3 vetokokeessa syntyneestä murtopinnasta..

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



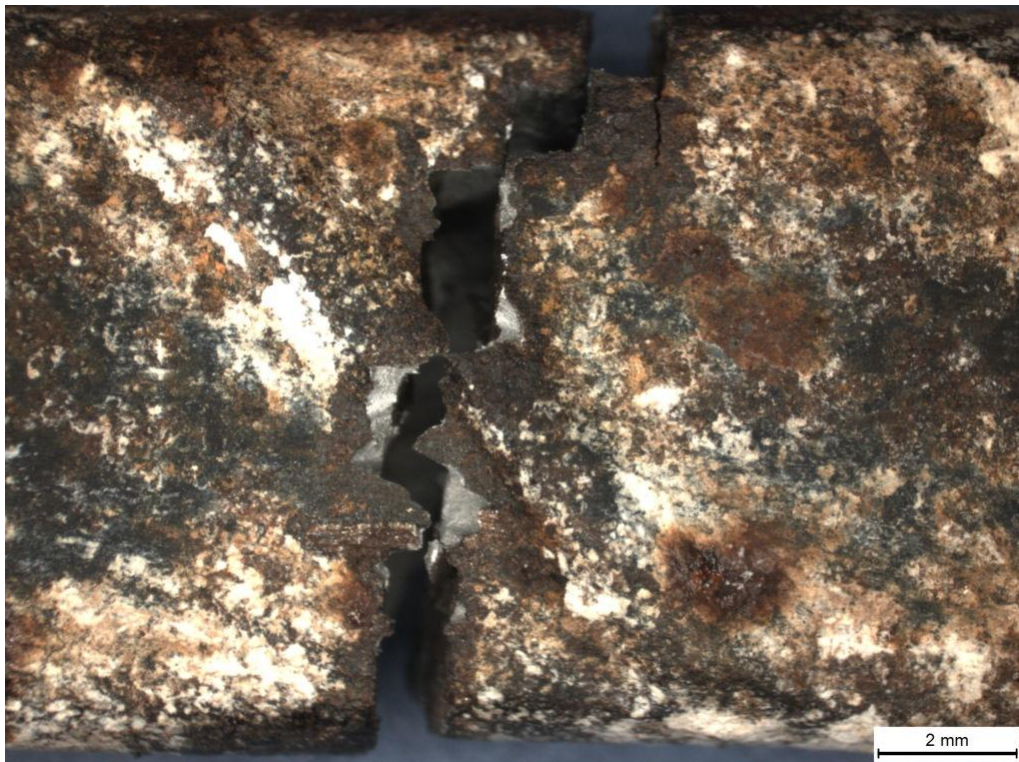
Kuva 6. Näytteen 1 vastakkain asetetut murtopinnat.



Kuva 7. Kuvassa 6 vasemmalla oleva murtopinta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



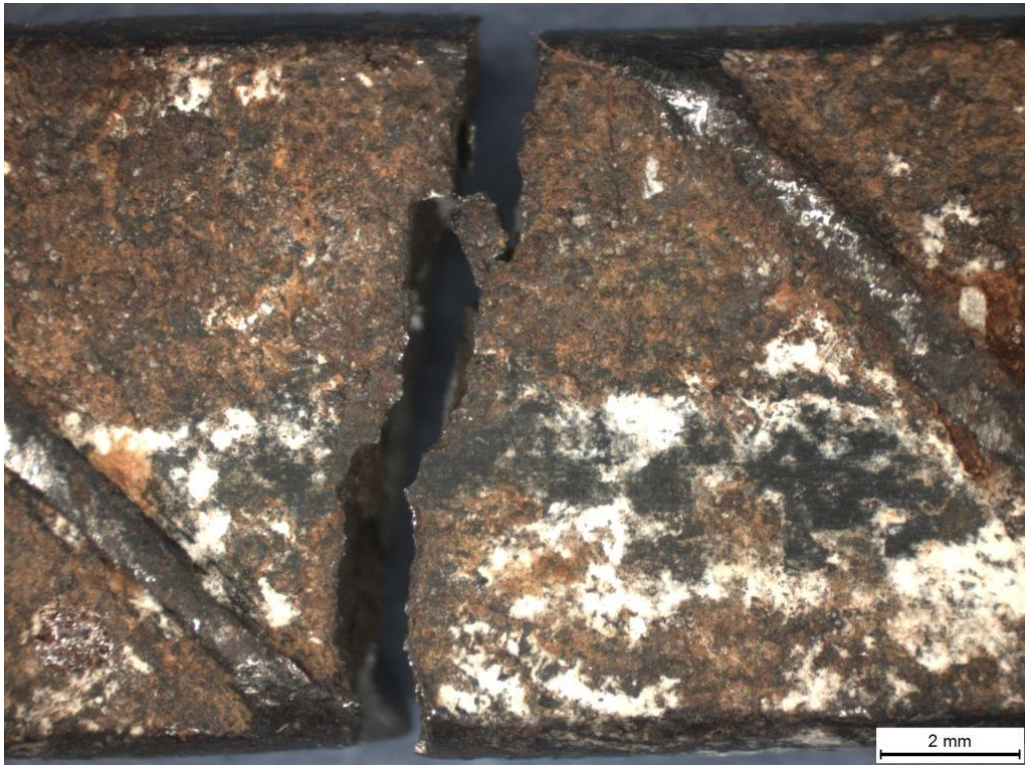
Kuva 8. Näytteen 4 vastakkain asetetut murtopinnat.



Kuva 9. Kuvassa 8 vasemmalla oleva murtopinta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



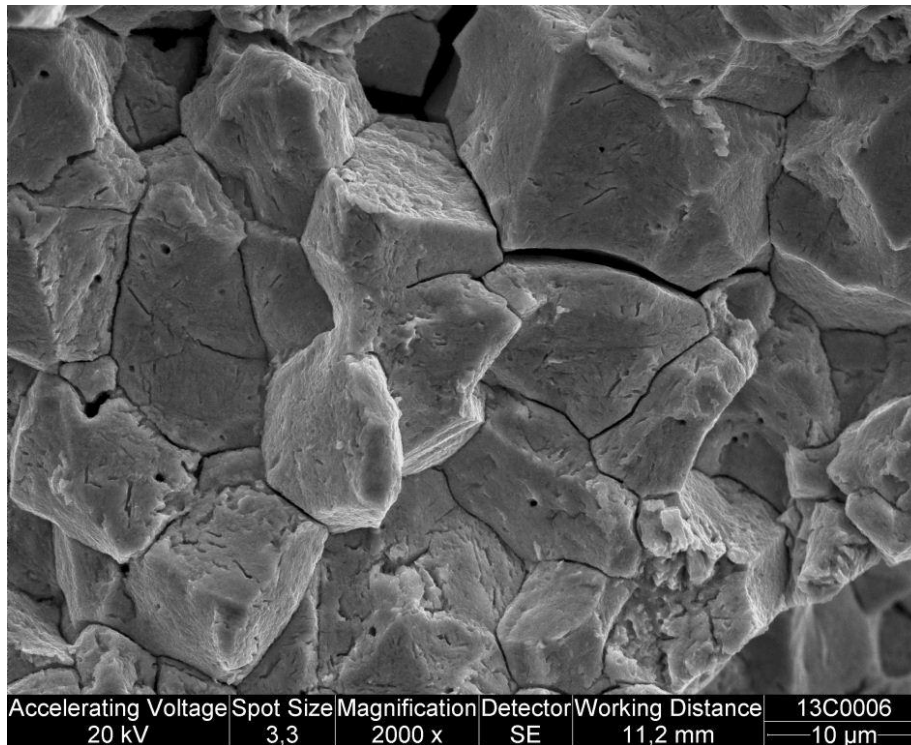
Kuva 10. Näytteen 5 vastakkain asetetut murtopinnat.



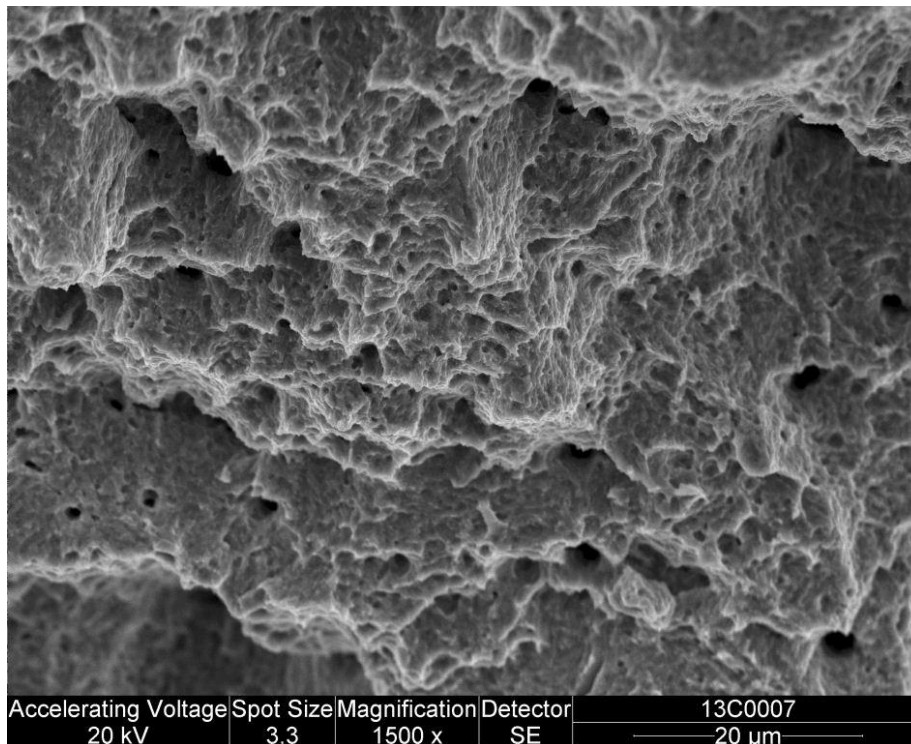
Kuva 11. Kuvassa 10 vasemmalla oleva murtopinta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



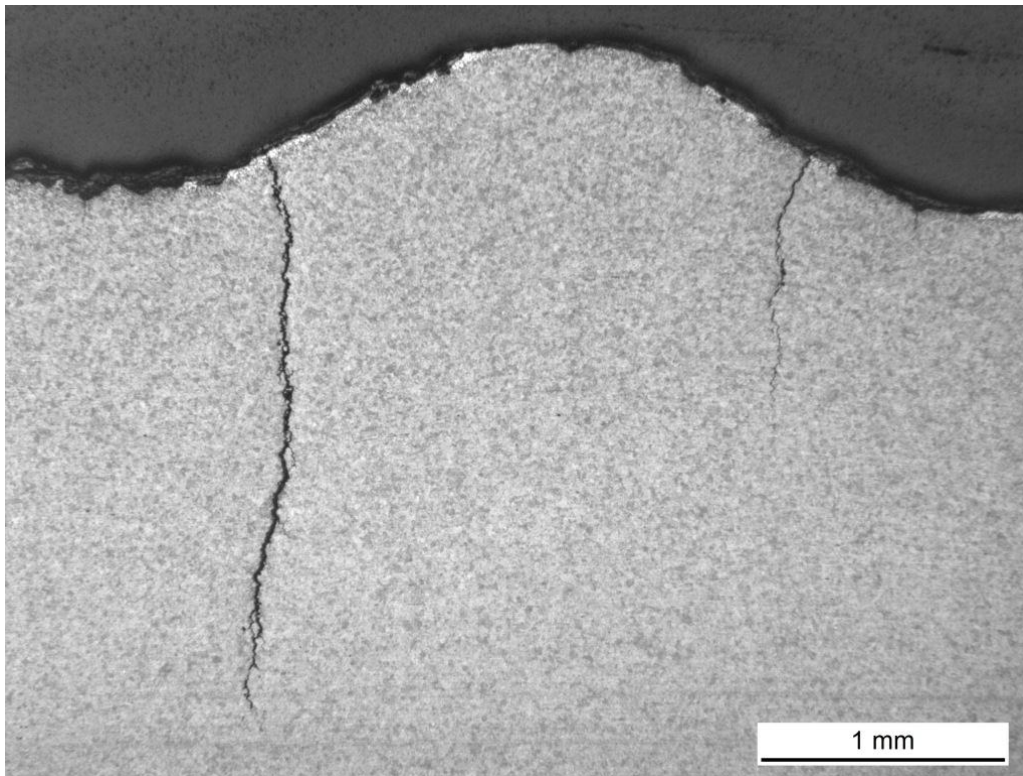
Kuva 12. SEM-kuva kuvan 7 murtopinnan ruostuneelta alueelta. Korroosiotuotteet on poistettu murtopinnasta happoliuoksella.



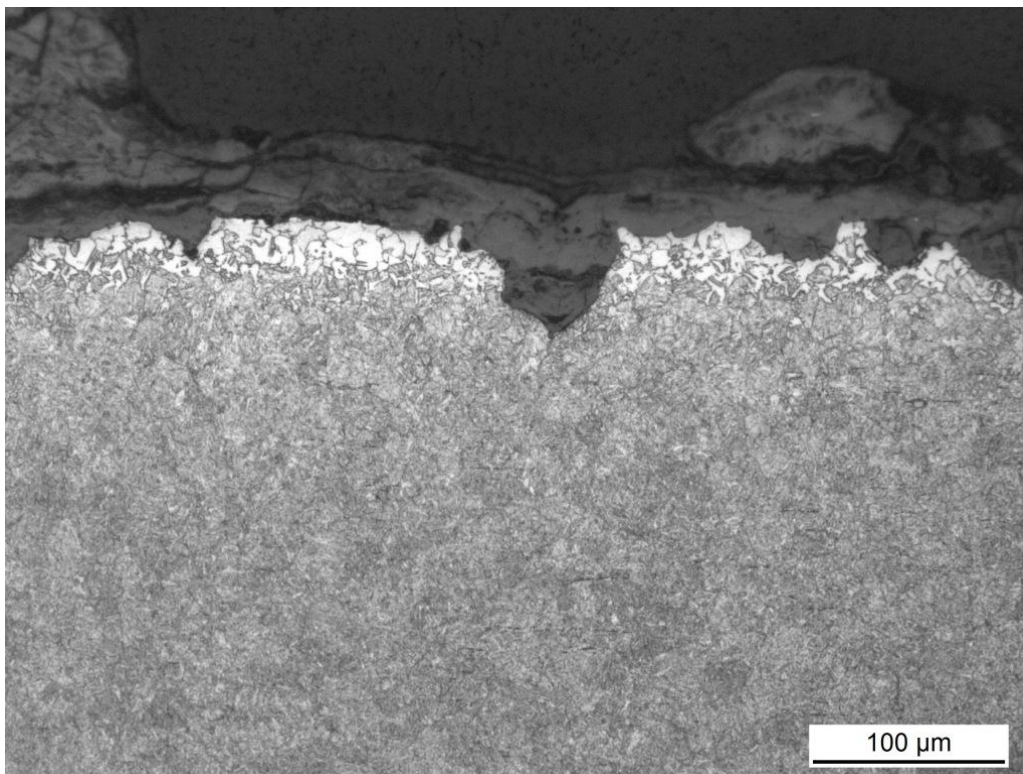
Kuva 13. SEM-kuva kuvan 7 ruostumattomalta murtopinta-alueelta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



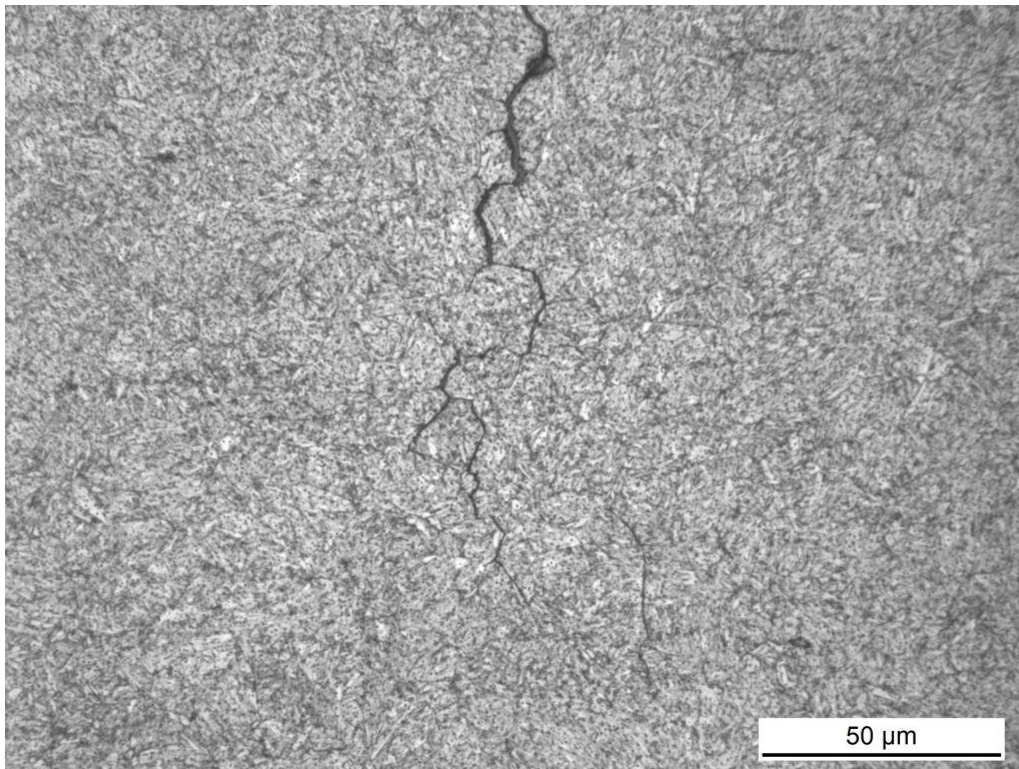
Kuva 14. Pitkittäisleikkaus säröjä sisältäneestä näytteestä 3.



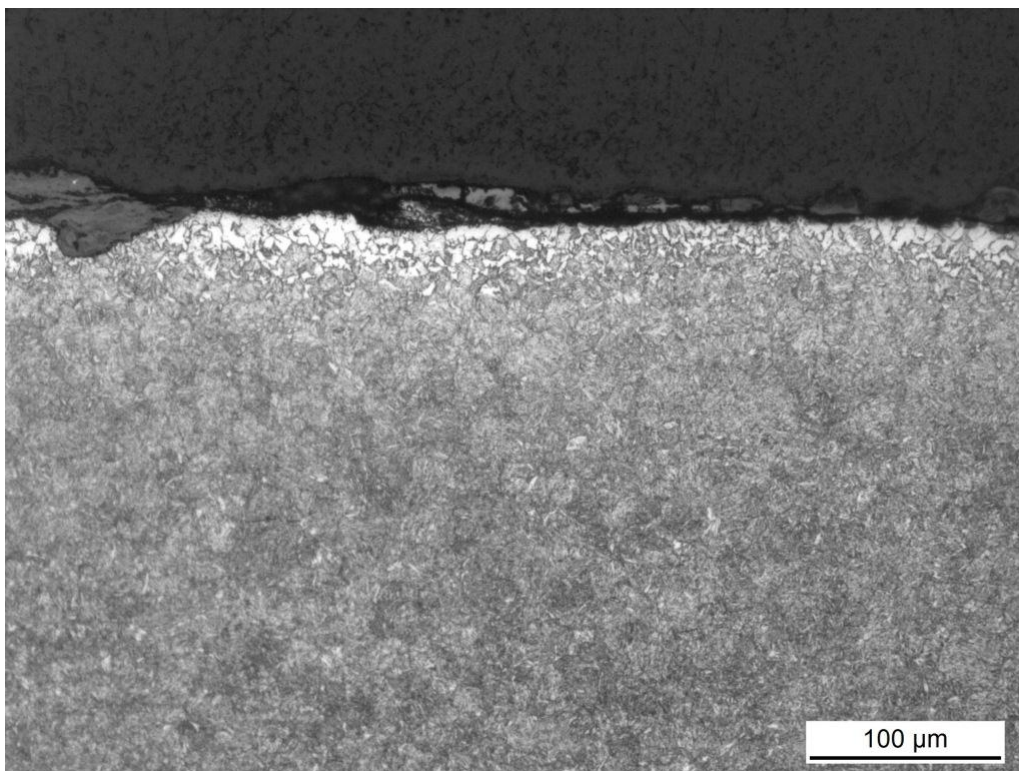
Kuva 15. Osasuurennus kuvasta 14 tangon ulkopinnalta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



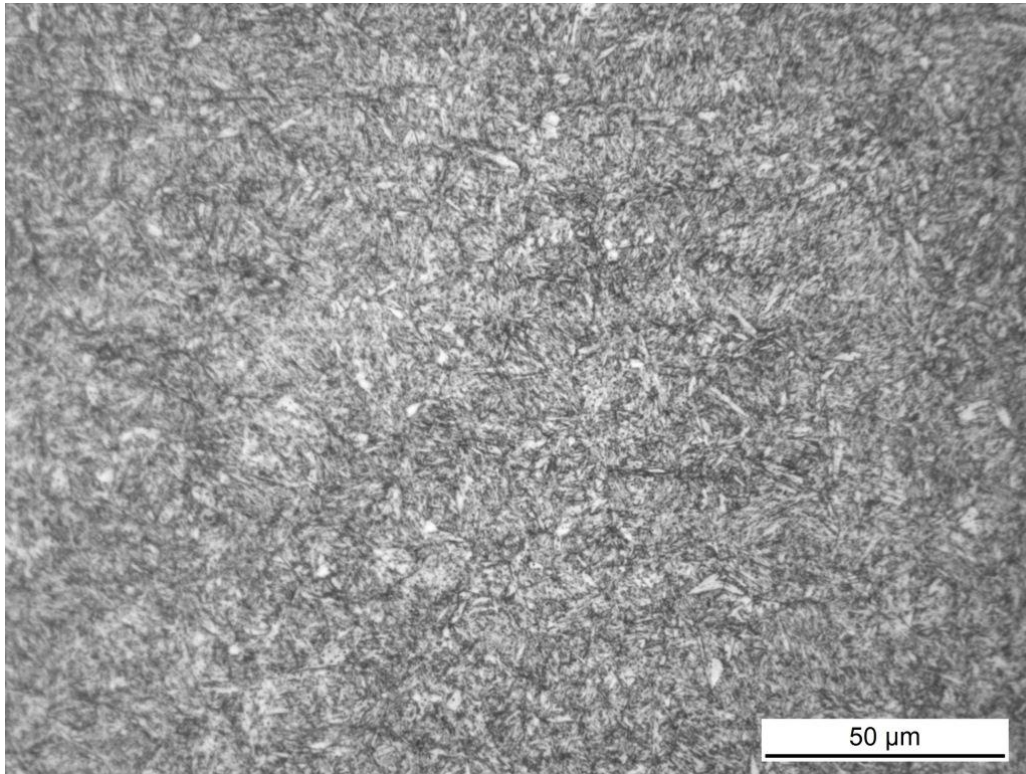
Kuva 16. Osasuurennus kuvasta 14 särön kärjestä.



Kuva 17. Kimpun J1 jänneteräksen ulkopinta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.



Kuva 18. Kimpun J1 jänneteräksen mikrorakenne.

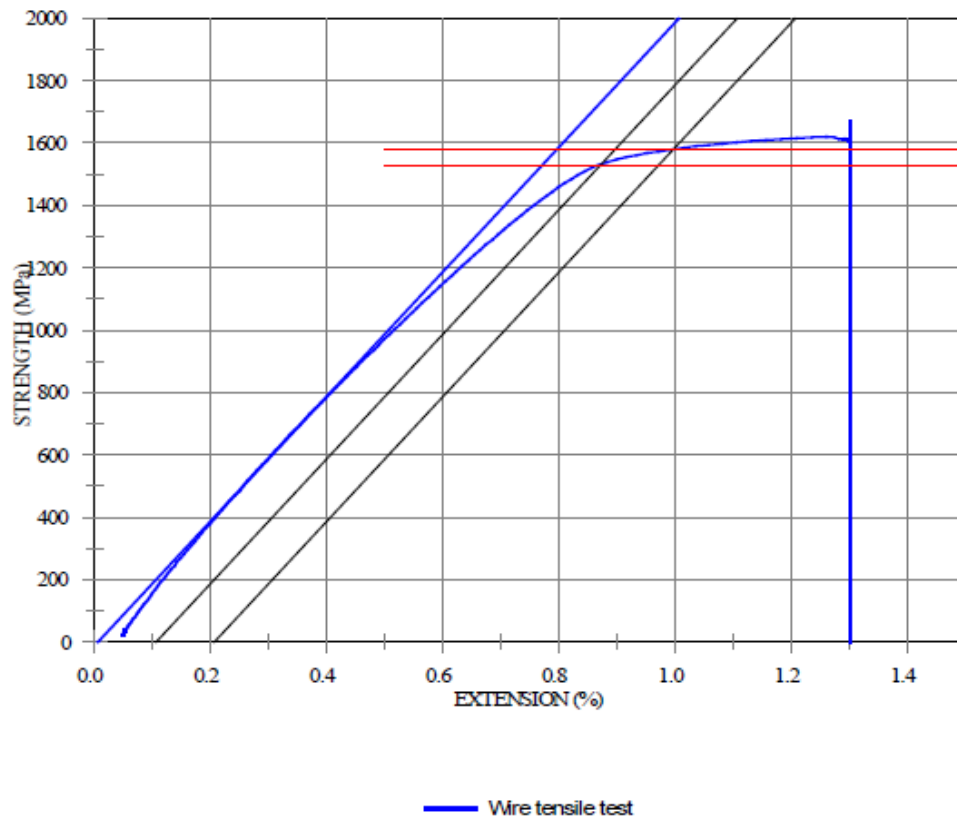
Jänneterästen vetokokeiden tulokset

Näytteet: Jänneteräksiä, otettu kohteesta.
 Näytteiden testauspäivä: 14.1.2013.
 Testausstandardi: SFS-EN ISO 15630-3.

Koekappale		0,1-voima	0,1-raja	0,2-voima	0,2-raja	Suurin voima	Murto-lujuus
nro	näyte	$F_{p0,1}$ kN	$R_{p0,1}$ N/mm ²	$F_{p0,2}$ kN	$R_{p0,2}$ N/mm ²	F_m kN	R_m N/mm ²
1	Säröytynyt jänneteräs	-	-	-	-	32,0	829
2	Ehjä jänneteräs J1	-	-	-	-	63,6	1650
3	Ehjä jänneteräs J1	59,1	1530	61,0	1580	64,4	1670

Jännitykset on laskettu käyttäen pituusmassasta määritettyä poikkipinta-alaa $S_m = 38,6 \text{ mm}^2$.

Näytteen nro 3 jännitys-venymäkäyrä on esitetty alla.



Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

[illegible]