



**SÄÄTÖTEKNIIKAN LABORATORIO**

**Vikadiagnostiikka sulatuksen  
laadunohjauksessa: Syherön syntyminen  
ja siihen vaikuttavat tekijät**

Pasi Joensuu

Raportti B No 31, Tammikuu 2001

Oulun yliopisto  
Säätötekniikan laboratorio  
Raportti B No 31, Tammikuu 2001

## Vikadiagnostiikka sulatuksen laadunohjauksessa: Syherön syntyminen ja sen esiintymiseen vaikuttavat tekijät

Pasi Joensuu

**Tiivistelmä:** Oulun Yliopisto ja Rautaruukki Oyj Raahen tehtaat ovat mukana Tekesin rahoittamassa Vikadiagnostiikka sulatuksen laadun ohjauksessa -projektissa. Projektin yksi tarkoitus on tutkia valuaihioissa ilmeneviä syherövikoja ja lopulta muodostaa malli syherövikojen ennustamiseksi valunauhan pinnalta. Syherövikoihin kuuluvat sekä tähtihalkeamat että poikittaishalkeamat. Seuraavassa raportoidun tutkimustyön tarkoituksena on tutkia metallurgista kirjallisuutta ja kerätä yhteen syherön syntymiseen ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Työn sisältö keskittyy pääasiassa poikittaishalkeamien syntymismekanismeihin ja niihin vaikuttaviin tekijöihin. Tekijät ovat jaettu kemiallisiin vaikutuksiin sekä prosessin ja teknisten tekijöiden vaikutuksiin. Kuumahaurausalueiden vaikutuksia poikittaishalkeamiin on selvitetty useiden tutkimusraporttien avulla. Poikittaishalkeamien ja oskillointijälkien välistä yhteyttä on käsitelty Haradan et al. tutkimuksen avulla. Lisäksi työssä on kuvattu yleisesti Raahen tehtaiden tuotantoa ja jatkuvavalukone 6:n uudistuksia.

**Hakusanat:** jatkuvavalu, valuaihiot, vikadiagnostiikka, tähtihalkeama, poikittaishalkeama

ISBN 951-42-5893-2  
ISSN 1238-9404

Oulun yliopisto  
Säätötekniikan laboratorio  
PL 4300  
FIN-90014 OULUN YLIOPISTO

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	RAAHEN TERÄSTEHTAAN TUOTANTOPROSESSI	2
2.1	Jatkuvavalukoneen rakenne, tekniset tiedot ja merkittävät uudistukset	2
3	AIHIOVIAT	5
4	SYHERÖ	6
4.1	Tähtihalkeama	6
4.2	Poikittaishalkeama	7
5	KUUMAHAURAUSALUEET	8
6	OSKILLOINTIJÄLJEN VAIKUTUS POIKITTAIS-HALKEAMAAN	11
6.1	Oskillointijäljen syntyteoriat	11
6.2	Haradan et al. tutkimus	13
7	KEMIALLISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS POIKITTAISHALKEAMIIN	17
8	PROSESSIN JA TEKNISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS POIKITTAISHALKEAMIIN	24
8.1	Kokillin muodon vaikutus	24
8.2	Valupulverin vaikutus	25
8.3	Kokillin pinnankorkeuden säätö	25
8.4	Aihion jäähtytys	26
8.5	Rullien linjaus ja kunto	27
9	SYHERÖÄ SISÄLTÄVÄT TERÄSLAADUT	29
10	YHTEENVETO	31
	LÄHDELUETTELO	32

# 1 JOHDANTO

Syheröviat ovat terästehtaalla merkittävä aihio-, levy- ja kelahylkäksi aiheuttava vikatyyppe. Syheröviallisten tuotteiden myyminen asiakkaille aiheuttaa sekä asiakkaalle että tehtaalle taloudellisia menetyksiä. Syheröviallisten tuotteiden syntymisen estämiseksi on tärkeää, että syheröviat paikannetaan valukoneella mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Oulun yliopiston säätötekniikan laboratorio ja Rautaruukki Oyj ovat mukana yhteistyöprojektissa, jonka tarkoituksena on tutkia syherön muodostumismekanismeja ja muodostaa malli syherövian ennustamiseksi valunauhan pinnalta.

Mikroseostetuilla teräksillä esiintyy paljon syherövikoja. Syynä ovat todennäköisesti seosaineet, kuten niobi, vanadiini, titaani ja nikkeli. Näiden seosaineiden vaikutus syherövian syntymisessä perustuu teräksen ominaisuuksien muuttumiseen, esimerkiksi teräksen sitkeyden vähenemiseen. Lisäksi syherövian esiintymistodennäköisyys kasvaa, kun teräslaatujen hiilipitoisuus on peritektisellä alueella. Hiilellä on voimakas vaikutus syherövikojen syntymisessä.

Tutkittaessa erilaisia halkeamia ja niiden syntymistapoja on erityisen tärkeää, että teräksien mekaaniset ominaisuudet huomioidaan jatkuvavalun lämpötiloissa. Tämän näkökohdan avulla halkeamat voidaan jakaa kahteen selvästi erottuvaan lämpötila-alueeseen, jotka vaikuttavat teräksen sitkeyteen. Syherövikojen syntyminen liittyy teräksen sitkeyden alenemiseen tietyllä lämpötila-alueella.

Oskillointijälkien esiintymisellä on suuri merkitys poikittaishalkeamien syntymiseen. Kirjallisuudesta löytyy useita teorioita oskillointijäljen muodostumismekanismista. Lisäksi prosessin ja teknisten tekijöiden vaikutus syherövikaan on erittäin suuri.

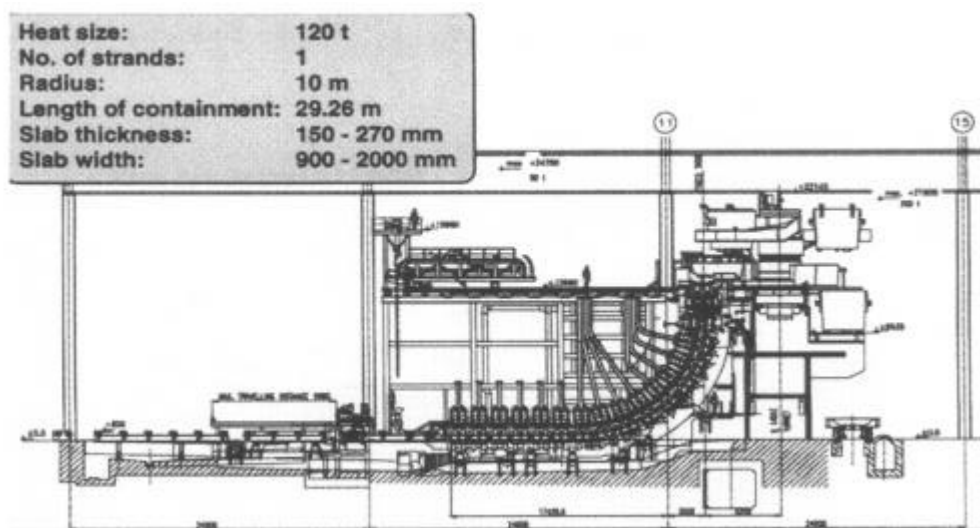
Tässä raportissa kootaan yhteen kirjallisuudesta löytyneitä tutkimuksia syherövian syntymismekanismeista ja niihin vaikuttavista tekijöistä.

## 2 RAAHEN TERÄSTEHTAAN TUOTANTOPROSESSI

Rautaruukki Oyj:n Raahen terästehtaalla valmistetaan vuosittain noin 2.8 miljoonaa tonnia terästä /14/. Tehtaalla valmistettavat teräslaadut voidaan jakaa neljään ryhmään tiivistystavan ja seostuksen mukaan. Teräslaatuja ovat alumiinitivistetyt, alumiini-piitivistetyt, mikroseostetut ja erikoisseostetut teräkset. Tehtaalla on oma koksaaamo, sintraamo sekä kaksi masuunia raudan tuotantoon. Teräs valetaan aihioiksi jatkuvilla kaarevavalu- ja pystyvalukoneilla. Raahen tehtaalla on kolme kaarevaa jatkuvavalukonetta sekä kaksi pystyvalukonetta /14/. Valunauhaa polttoleikkaamalla saadaan sopivan mittaiset esiaihiot. Suurin aihion leveys on 2000 mm ja paksuus 270 mm /6/. Esiaihiot käsitellään tuotteiksi valssausprosessissa. Raahessa valssauslinjoja on kaksi: levy- ja nauhavalssaus. Linjoilta saatavat tuotteet ovat kvarttolevyjä tai keloja. Liitteessä 1 on esitetty kuva Raahen terästehtaan tuotantokaaviosta. /9/

### 2.1 Jatkuvavalukoneen rakenne, tekniset tiedot ja merkittävät uudistukset

Valukoneen pääosat ovat kääntötorni, valusenkka, välisenkka, kokilli, taivutuslohko, valukaari, veto- ja oikaisukone ja lopuksi polttoleikkaus. Kuvassa 1 on Rautaruukki Steelin pystytaivutustyyppinen jatkuvavalukone 6. Jatkuvavalukoneella valetaan maksimissaan 125 tonnin panoskokoja. Valut voidaan tehdä joko yksi kerrallaan tai sarjavaluina. Jatkuvavalukoneen 6 välisenkan koko on 28 tonnia. Valukoneen tarkemmat tekniset tiedot ovat luettavissa taulukosta 1. /3/



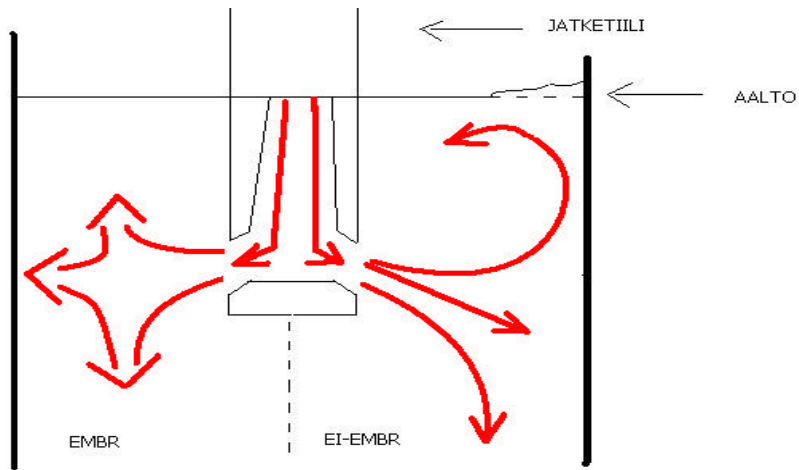
**Kuva 1.** Rautaruukki Steelin jatkuvavalukone 6 /6/.

**Taulukko 1.** Jatkuvavalukoneen 6 tekniset tiedot /6/.

Valukoneen tyyppi	Pystytaivutus
Valukoneen säde	10 m
Valukoot	150–1800 mm <sup>2</sup> 210–900–2000 mm <sup>2</sup> 270–1800 mm <sup>2</sup>
Välisenkan koko	28 t
Metallurginen pituus	29.3 m
Suurin valunopeus	2 m/min
Kapasiteetti	700 000–1 000 000 t/a
Valunauhan paksuuden säätö	Auto
Softreduktion säätö	Auto

Valmistuessaan 1997 jatkuvavalukone 6 on ollut maailman modernein aihiovalukone. Jatkuvavalukoneessa 6 on esimerkiksi hydraulinen oskillointi, automaattinen valunaloitus, suihkusuojauputken automaattinen asetinlaite ja mahdollisuus sekä dynaamiseen että staattiseen softreduktioon. Valunauhan reduktiota voidaan tehdä tasopalkein, puristusrullalla, segmentillä tai segmenttiryhmillä. Reduktio voidaan tehdä säätämällä automaattisesti segmenttejä hydraulikalla staattisessa tai dynaamisessa tilassa. Staattisessa tilassa valunauhan paksuuden sekä valukoneen kartiokkuuden säätö suoritetaan ennen valun aloitusta, jolloin valukoneen kartiokkuus ei muutu valun aikana. Softreduktiossa valunauhaa puristetaan enintään 6 mm juuri ennen sen lopullista jähmettymistä. Tällä toimenpiteellä halutaan estää keskilinjasuotauman ja -huokoisuuden syntymistä. /3/

Valukoneella 6 on mahdollista käyttää kokillin virtauksien hidastamiseksi ja tasoittamiseksi elektromagneettista jarrumenetelmää eli EMBR. Tällä hetkellä EMBR-menetelmää ei ole käytössä. Menetelmän avulla saadaan myös poistetuksi sulan pinnassa kokillin reunaan muodostuva aalto. Kuvassa 2 on vasemmalla käytetty EMBR-menetelmää ja oikealla ei. Kuva 2 on piirretty Rautaruukin kehitysinsinööri Jarkko Matkalan esitelmän mukaisesti.



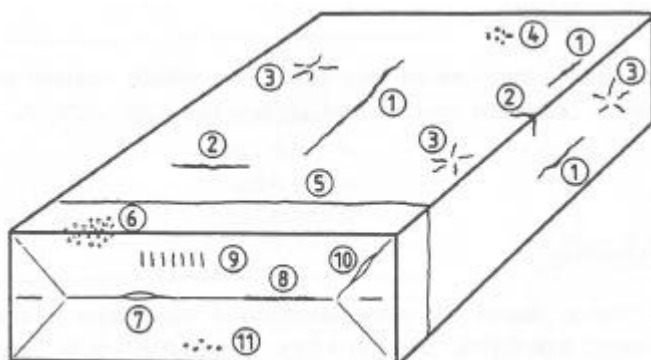
**Kuva 2.** Poikkileikkaus kokillista ja jatketiilestä, kun käytetään ja ei käytetä EMBR-menetelmää.

### 3 AIHIOVIAT

Jatkuvavalukoneen rakenteesta johtuen se on hyvin altis monille vioille. Jatkuvavalukoneen merkittävä ominaisuus on sen suuri lämmönpoistokyky. Lämpöä poistuu aluksi kokillissa primäärijäähdytyksen avulla ja myöhemmin valukaassa sekundäärijäähdytyksen avulla. Lisäksi lämpöä poistuu pelkästään säteilemällä (ilmakonvektio) ja johtumalla. Jos lämmönpoistuminen valunauhan pinnalta ei ole tasaista ja hallittua, aihiovikoja esiintyy lopputuotteessa. /1/

Halkeamia esiintyy sekä aihion sisä- että pintaosissa. Ne voivat muodostua kokillissa, taivutuslohkossa, sekundäärijäähdytysalueen aikana (valukaari) ja varsinkin oikaisu- vaiheessa. Syy halkeamiin on se, että aihioon muodostuu paikallisesti liian suuria lämpö- ja/tai mekaanisia jännityksiä. Kokillissa syntynyt valunauhan kuori voi paisua tai kutistua jännityksistä johtuen /1/. Teräslajin kuumalujuusominaisuuksista riippuu, kuinka ja milloin jännitykset aiheuttavat halkeamia. /10/

Valuaihoiden vikoja voidaan luokitella monella eri tavalla. Yleisin jako on pintaviat, sisäiset viat ja muotoviats /10/. Kuvassa 3 halkeamatyyppit ovat jaettu sisäisiin ja ulkoi- siin vikoihin ja ne on selitetty taulukossa 2.



**Kuva 3.** Aihioviat /9/.

**Taulukko 2.** Aihion halkeamatyyppijä /9/.

ULKOISET VIAT	SISÄISET VIAT
1) pitkittäishalkeama	7) keskilinjahalkeama
2) poikittaishalkeama	8) keskilinjasuotauma
3) syheröhalkeama	9) taivutus- ja oikaisuhalkeama
4) kuonasulkeuma	10) nurkka
5) kuonavyö	11) kuonasulkeuma
6) kaasuhuokonen	



## 4 SYHERÖ

Syherön määrittelemisen ei ole yksikäsitteistä ja sen syntymismekanismeja on monia. Syherö-sana kuuluu Rautaruukin omaan terminologiaan. Sekä tähtihalkeamaa että poikittaishalkeamaa voidaan kutsua syheröksi. Syherön todennäköisin syntypaikka on valukone. /7/

Kuvassa 4 on kuva syheröstä aihion pinnassa. Kuvasta voidaan havaita X-kirjaimen muotoinen halkeamakuvio.

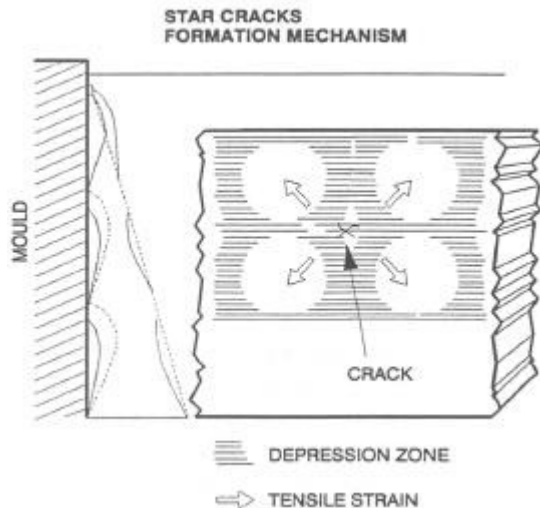


**Kuva 4.** Syherö aihion pinnassa /13/.

Syheröviialla tarkoitetaan levyn tai aihion pinnassa olevia tähtimäisiä matalia halkeamia. Halkeamat voivat olla silmin havaittavia tai ne tulevat esiin vasta magneettijauhetautarkastuksessa. Halkeamat ovat yleensä 0.5–3 mm syviä. Syheröitä esiintyy aihioissa, kvarttolevyissä ja keloissa. /7/

### 4.1 Tähtihalkeama

Tähtihalkeamat syntyvät yleensä kokillissa. Syynä on yleensä se, että kuparikokillista irtoaa kuparia, joka liukenee teräksen raerajoja pitkin. Toisin sanoen tähtihalkeama voi olla kuparin aiheuttama halkeama aihion raerajalla /7/. Kuparin sulamispiste on alhainen ja se heikentää huomattavasti teräksen raerajoja. Jos aihion pintaan kohdistuu samaan aikaan voimakas ja sahaava jäähditys, syheröä syntyy helposti. Sahaava lämpötila voi aiheuttaa jäähdityksessä sen, että pintalämpötila voi nousta kuparin sulamispisteen lähelle tai jopa sulamispisteen ylitse. Syheröä voi myös ilmetä, jos sekundaarijäähdityksessä käytetään messinkisiä vesisuuttimia. /10/ Epätasainen lämmönsiirtyminen on olennaisin syy halkeamien syntymiseen ja vetojännityksiin /13/.



**Kuva 5.** Tähtihalkeaman syntymismekanismi /13/.

Kuvasta 5 on nähtävissä, kuinka vetojännitykset aiheuttavat kokillissa tähtihalkeaman korkeamman kuumahaurauden alueella.

Rautaruukilla käytetään pinnoitettuja kokilleja, joten pieni osa syherövioista voi olla peräisin kuparista. On todettu, että aihion pinnassa olevat poikittaishalkeamat saavat syherömäisen ulkonäön, koska halkeamat etenevät austeniitin rajapintoja pitkin. Kun poikittaishalkeamia sisältäviä aihioita valssataan, ne muistuttavat yhä enemmän syheröä. /7/

## 4.2 Poikittaishalkeama

Valettaessa aihioita poikittaishalkeamat ovat vakava ongelma. Halkeamia on vaikea nähdä vasta valetun aihion pinnalta, koska halkeamat ovat usein hyvin matalia ja valuhilse peittää aihion pinnan. Poikittaishalkeamat, jotka esiintyvät ylemmällä kuumahaurausalueella, syntyvät raerajojen sulamisesta ja ovat helpommin havaittavia. Rautaruukin ongelman muodostavat 700–900°C lämpötilassa eli alemmalla kuumahaurausalueella syntyvät vaikeasti havaittavat matalat poikittaishalkeamat. /7/

Poikittaisia halkeamia esiintyy aihion eri osissa. Halkeamatyyppejä ovat poikittainen kulmahalkeama ja sivuhalkeama, joita voi esiintyä sekä kapealla että leveällä sivulla /4/. Poikittaishalkeamia aiheuttavat pitkittäiset vetojännitykset, joita syntyy sekundäärijäähdytyksessä ja oikaisuvaiheessa /1/. Lisäksi muun muassa typpipitoisuus, oskilointijälki ja sen syvyys, kokillin lämmönsiirto, valupulveri, valukoneen linjaus ja teräksen koostumus vaikuttavat poikittaishalkeamien syntymiseen /13/. Teräkset, jotka sisältävät alumiinia, vanadiinia, mangaania ja erityisesti niobia, ovat hyvin herkkiä poikittaishalkeamille /1/. Kuvassa 3 on esitetty poikittaishalkeamien sijainnit. Poikittaishalkeamiin vaikuttavista tekijöistä kerrotaan lisää myöhemmin.

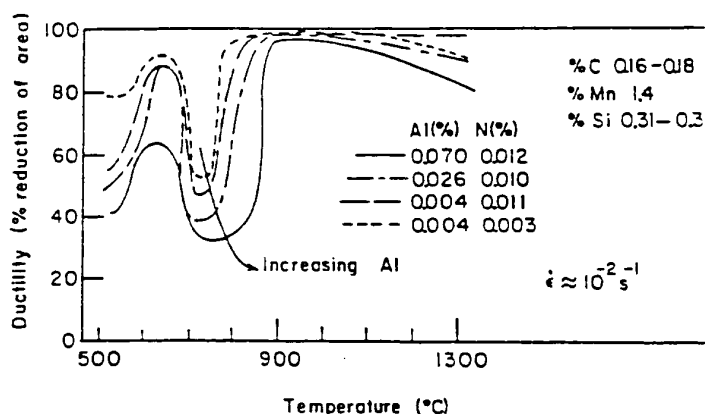
## 5 KUUMAHURAUSALUEET

Tutkittaessa erilaisia halkeamia ja niiden syntymistapoja on erityisen tärkeää, että teräksien mekaaniset ominaisuudet huomioidaan jatkuvavalun lämpötiloissa. Tämän näkökohdan perusteella halkeamat voidaan jakaa kahteen selvästi erottuvaan lämpötila-alueeseen, jotka vaikuttavat teräksen sitkeyteen. Syherövikojen syntyminen liittyy teräksen sitkeyden alenemiseen tietyllä lämpötila-alueella. /1/

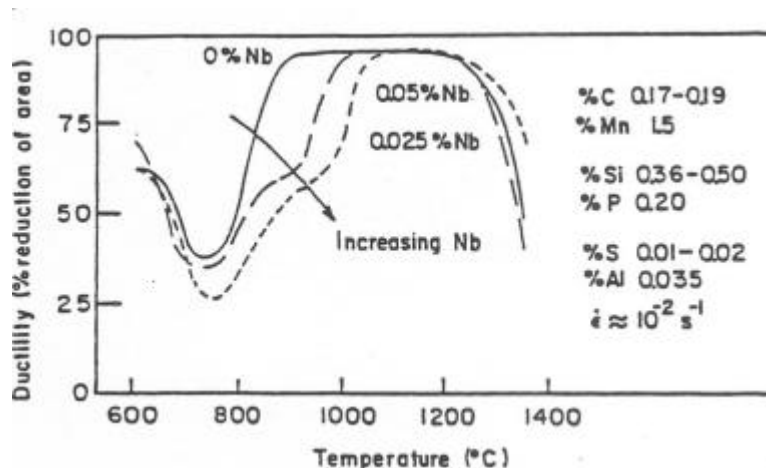
Ensimmäinen alue sijaitsee yli 1340°C:n lämpötiloissa. Tämä alue sijoittuu solidus-lämpötilan alapuolelle. Alueessa syntyvät mahdollisesti kaikki sisäiset halkeamat ja pitkittäishalkeamat. Sitkeyden aleneminen ensimmäisellä lämpötila-alueella aiheutuu raerajojen sulamisesta. Tähtihalkeaman syntyminen kokillissa liittyy edellä mainittuun alueeseen. /1/

Kirjallisuudesta löytyy useita eri arvioita ensimmäisen alueen rajalämpötilasta, ja rajalämpötilat vaihtelevat 10–100°C:n asteen välillä. Syynä on teräksen koostumuksen vaihtelu. Hiilen, rikin, fosforin ja mangaanin määrät vaikuttavat merkittävästi alueen laajuuteen. Kun esimerkiksi rikin ja fosforin mikrosuotautumista vähennetään, teräksen sitkeys paranee. /10/

Toinen lämpötila-alue sijaitsee 700–900°C:n asteen välillä /1/. Hiilellä, alumiinilla, vanadiinilla ja niobilla on voimakas vaikutus tämän alueen syntymiseen, kun tarkastellaan mikroseostettuja teräksiä /10/. Jos alumiinin ja typen osuutta lisätään, teräksen sitkeys laskee vahingollisella tavalla. Niobi myös vähentää sitkeyttä, kun taas titaanin ja vanadiinin lisäämisellä voidaan parantaa teräksen sitkeyttä tällä lämpötila-alueella /1/. Aihoiden poikittaishalkeamat syntyvät 700–900°C:n asteen välillä /1/. Kuvista 6 ja 7 voidaan nähdä alumiinin ja niobin vaikutus teräksen sitkeyteen. Kuvien hiilipitoisuus ei ole peritektilisellä alueella (0.08–0.15 %-yksikköä), mutta vaikutus olisi samantyyppinen, jos alue olisi peritektilinen /14/.

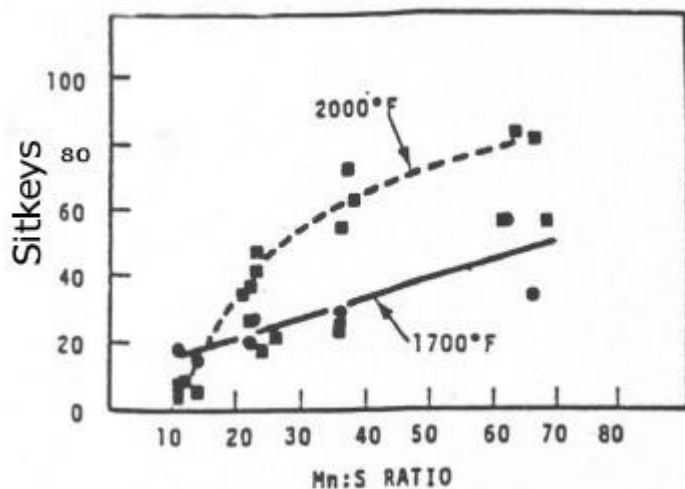


Kuva 6. Alumiinin vaikutus teräksen sitkeyteen /14/.



**Kuva 7.** Niobin vaikutus teräksen sitkeyteen /14/.

Suurin merkitys on ensimmäisellä ja toisella lämpötila-alueella, kun tutkitaan sisä- ja pintahalkeamien syntymistä. Tietysti on mahdollista huomioida kolmaskin lämpötila-alue, joka sijoittuu välille 900–1200°C /1/. Mangaanilla ja rikillä on voimakas vaikutus tämän alueen syntymiseen /10/. Kun mangaani-rikkisuhde kasvaa, teräksen sitkeys paranee. Syherön muodostumista ei tapahdu tällä lämpötila-alueella /7/. Kuvasta 8 nähdään Mn/S-suhteen muuttumisen vaikutus teräksen sitkeyteen jäähtytyksen aikana. Ylempi käyrä on piirretty 1095°C asteessa ja alempi 925°C asteessa.



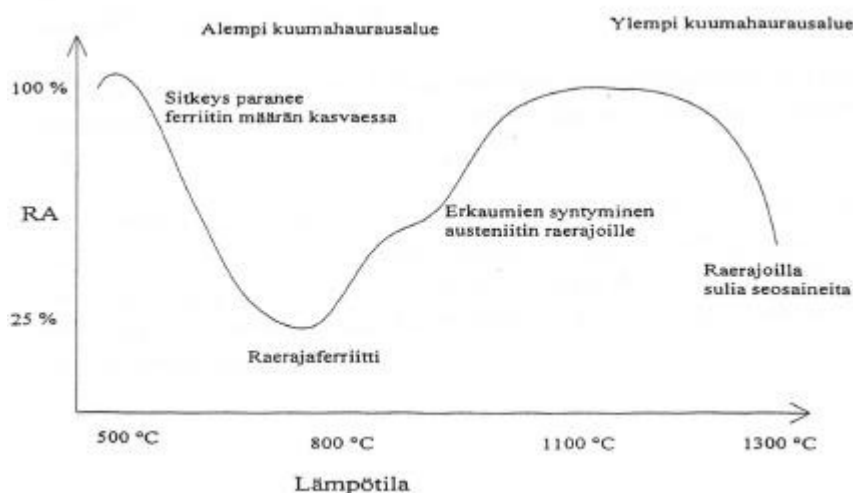
**Kuva 8.** Mn/S -suhteen vaikutus sitkeyteen /1/.

Lämpötila-alueista käytetään myös nimityksiä korkeampi (1340°C ja yli) ja matalampi (700–900°C) kuumahaurausalue. Alempi kuumahaurausalue voidaan jakaa haurastumismekanismien mukaan kahteen alueeseen eli erkautumislämpötila- ja faasi-transformaatioalueeseen. /7/

Erkautumislämpötila-alueella sitkeyden aleneminen johtuu austeniitin raerajoille syntyvistä pienistä erkaumista tai epäpuhtauksien suotautumisesta. Tämä tapahtuu lämpötila-alueen yläpäässä noin 900°C asteessa. Erkaumat ovat niobin ja titaanin nitridejä sekä karbonitridejä. Teräksen muodonmuutoskyvyn loppuessa murtuma yhdentyy usein johonkin sulkeumaan tai erkaumaan. Kun jännitys edelleen kasvaa rae-

rajalle, yhdentynyt murtuma pääsee etenemään helposti erkautumisjonoa pitkin. Erkautumislämpötila vaikuttaa erkautumien kokoon sekä jakaumaan. /7/

Faasitransformaatioalueella lämpötilan laskiessa alueelle 750–850°C teräksen kuumasitkeys huononee huomattavasti. Syynä on austeniitin raerajoille muodostuva raerajaferritti. Ferritti on pehmeämpi faasi kuin austeniitti, joten jännitykset keskittyvät ohuisiin ferrittifilmeihin raerajoilla. Yleensä minimisitkeysalue sijaitsee raerajaferrittialueella. Minimisitkeysalue on hyvin helposti havaittavissa kuvasta 9. Esimerkiksi teräksen koostumus, jäähtymisnopeus ja jännitykset vaikuttavat sitkeyden laskemiseen tällä lämpötila-alueella. Teräksen koostumuksen vaikutusta syherövikoihin ei tunneta tarkasti, koska viat ovat monimutkaisia ja niiden syntymismekanismeja ei tunneta tarkasti. /7/



**Kuva 9.** Kuumasitkeysikäykä mikroalloyetuilla hiiliteräksillä /7/.

Muodostumismekanismeja on useita. Yksi paljon tutkittu alue on alempi kuumahaurausalue, jossa teräksen kuumasitkeysominaisuudet ovat matalia. Austeniitti-ferritti-transformaatio aiheuttaa sen, että erkautumislämpötila-alue (n. 900°C) on erityisen herkkä halkeamille oikaisuvaiheen aikana. Toinen paljon tutkittu aihe on, miten poikittaishalkeaman syntyminen riippuu oskillointijäljestä. Tästä johtuu myös se, että kokillissa syntyvän oskillointijäljen syntymismekanismeja on tutkittu hyvin tarkasti. /4/

## 6 OSKILLOINTIJÄLJEN VAIKUTUS POIKITTAIS- HALKEAMAAN

### 6.1 Oskillointijäljen syntyteoriat

Kokillin oskillointia tarvitaan kokillin ja aihion välisen kitkan pienentämiseksi ja aihion kiinni tarttumisen estämiseksi. Jatkuva valu ilman kokillin jatkuvaa edestakaista liikettä ei ole mahdollista. Oskillointi on tavallisimmin sinimuotoista ja säädettävät parametrit ovat iskunpituus ja taajuus. Parametrien valinta vaikuttaa suoraan pinnanlaatuun. Pinnanlaadun kannalta on tärkeää, että valun aikana kokilli jaksottaisesti liikkuisi nopeammin alaspäin kuin aihio. Muuten aihion pintaan voi muodostua poikittaishalkeamia. Aikaa, jolloin kokilli liikkuu nopeammin alaspäin kuin aihio, kutsutaan negatiiviseksi strip-ajaksi (0.2–0.3 s). Vastaavasti positiivinen strip-aika tarkoittaa sitä aikaa, jolloin aihion nopeus on suurempi kuin kokillin. Jotta sopiva negatiivinen strip-aika toteutuisi valun aikana, kokillin liikkeen ja valunopeuden on oltava verrannollisia toisiinsa. Rautaruukin valukoneilla 4 ja 5 taajuus muuttuu valunopeuden funktiona, kun iskunpituus on vakiona. Valukoneella 6 voidaan muuttaa sekä taajuutta että iskunpituutta valunopeuden funktiona /14/. Pieni iskunpituus ja korkea taajuus pienentävät oskillointijäljen kokoa. /10/

Negatiivinen strip-aika lasketaan esimerkiksi seuraavasta kaavasta /10/:

$$T_n = \frac{1}{F\pi} \arccos\left(-\frac{V_G}{FH\pi}\right), \quad (1)$$

jossa  $T_n$  on negatiivinen strip-aika [s],  
 $F$  on kokillin taajuus [1/s],  
 $V_G$  on valunopeus [mm/s] ja  
 $H$  on iskunpituus [mm].

Negatiivinen strip-aika vaikuttaa myös oskillointijäljen syvyyteen. Vastaavasti oskillointitaajuus ja valunopeus vaikuttavat oskillointijälkien väliseen etäisyyteen. Vaikutus voidaan esittää seuraavalla kaavalla /10/:

$$D = \frac{V_G}{F}, \quad (2)$$

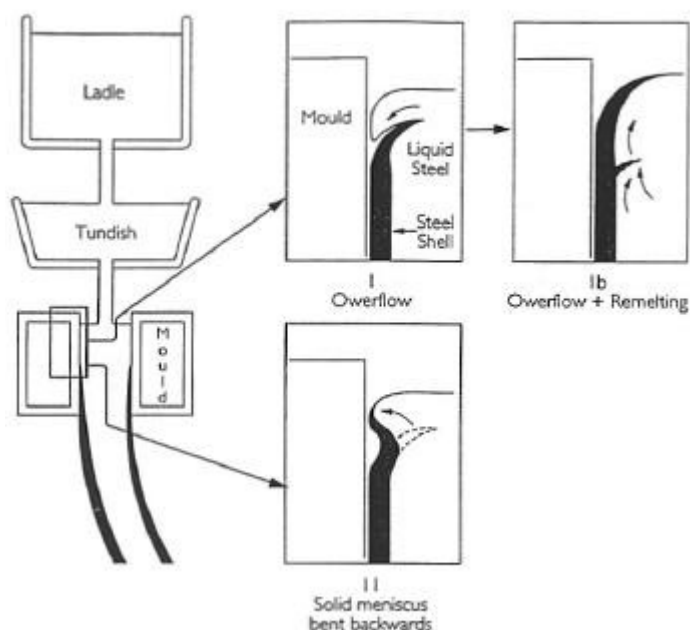
jossa  $D$  on oskillointijälkien välinen etäisyys [mm],  
 $F$  on kokillin taajuus [1/s] ja  
 $V_G$  on valunopeus [mm/s].

Melkein kaikki oskillointijäljen syntyteoriat perustuvat kuoren kärjen taivutusmekanismiin kokillissa. Oskillointijäljen muodostumisesta on esitetty kaksi tapaa, jotka vaikuttavat poikittaishalkeamien syntymiseen. Ensimmäisessä mekanismissa kuoren kärki taipuu jaksottaisesti sisäänpäin kohti meniskusta. Toisessa mekanismissa sula teräs virtaa kuoren kärjen yli ja samalla kuoren kärki taipuu sisäänpäin. Kuitenkaan

tutkijat eivät ole yksimielisiä siitä, mikä voima aiheuttaa kärjen taipumisen kokillissa. Alla on esitetty eri tutkijoiden johtopäätöksiä vaikuttavista voimista. /4/

- Nestemäisen kuonan jaksottainen sisäänvirtaus aiheuttaa kuoren kärjen taipumisen negatiivisen strip'n aikana.
- Nestemäisen kuonan jaksottainen sisäänvirtaus aiheuttaa kuoren kärjen taipumisen positiivisen strip'n aikana.
- Kiinteän kuonan reuna työntää jaksottaisesti kuoren kärkeä, mikä aiheuttaa kuoren kärjen taipumisen negatiivisen strip'n aikana.

Pieni yhteenveto tehdyistä tutkimuksista helpottaa asian ymmärtämistä. Aluksi tutkittiin ja laskettiin paineen muutoksia nestemäisessä kuonafilmissä. Tutkimustulokset johtivat ensimmäiseen syntymekanismiin. Seuraava askel oli se, että havaittiin positiivinen ja negatiivinen suotauma, jotka etenevät oskillointijälkeä pitkin. Johtopäätös oli, että on olemassa kaksi mekanismia. Takeuchi ja Brimacombe /15/ tutkivat kokillissa lämmönvirtauksien määriä ja myös sulan teräksen nestefilmin painetta kokillissa. He huomasivat kahdenlaista oskillointijälkeä. Toisessa oli kynsimäinen jälki ja toisessa ei. Takeuchi ja Brimacombe totesivat ensimmäisen jäljen syntyvän teräksen jäähmettymisen viiveestä, kun teräs virtaa kuoren kärjen päälle kokillissa. Toisen jäljen he huomasivat syntyvän makrosuotaumasta, kun kokillin sulassa nestefilmissä vallitsee imupaine. Makrosuotautuminen johtuu pääasiallisesti sulan virtauksista. Dendriittien väliin rikastunut sula voi esimerkiksi voimakkaan sekoituksen vaikutuksesta virrata dendriittien välistä pois ja tällöin rikastumatonta sulaa voi virrata tilalle. Makrosuotautuminen voi aiheuttaa suuria konsentraatioeroja valunauhan eri osien välillä. /4, 10/



**Kuva 10.** Kynsimäinen (I) ja tavallinen (II) oskillointijälki /10/.

Kuvassa 10 on esitetty kolme erityyppistä oskillointijäljen syntymismekanismia kokillissa. Ero kahdentyyppisen oskillointijäljen välillä on hyvin selvä. Kokillin liike on yksi syy siihen, miksi esiintyy kahdenlaista oskillointijälkeä. Kun kokilli liikkuu

ylöspäin, kuori taipuu takaisin lähinnä imun takia, joka syntyy, kun aihio liikkuu eri suuntaan kuin kokilli. Lisäksi ferrostaattinen paine auttaa kuoren kärjen takaisin palautumista. /10/

## 6.2 Haradan et al. tutkimus

Harada et al. /4/ tutkivat jatkuvavalettujen aihoiden poikittaishalkeamien syntymistä-pää ja varsinkin oskillointijälkien vaikutusta halkeamiin. Tutkimuksissa käytettyjen aihoiden hiilipitoisuus oli 0.05–0.16 % ja alumiini- ja alumiiniptiivistettyjä teräksiä ei huomioitu tutkimuksissa. Käytetty valunopeus oli 1.2–1.4 m/min ja kokilli oli kaarevatyypinen. Näytteitä otettiin eri puolilta aihion pintaa metallurgisia tutkimuksia varten. Halkeamista tehtiin läpileikkaus horisontaalisessa, vertikaalissa ja poikittaisessa suunnassa. Halkeamia käsiteltiin nital-, picral- tai Oberhoffer'n menetelmällä. Nital-syövyttäminen paljastaa halkeamat ja Pictal-syövyttäminen näyttää mikrosuotautumat. Oberhoffer'n menetelmä muuntaa fosforisuotautumat valkoisiksi. Fosforin ja mangaanin pitoisuudet suotaumassa mitattiin EPMA-laitteistolla.

Koejakson aikana poikittaishalkeamia löydettiin sivuilta ja kulmista. Yhteinen piirre halkeamille oli, että ne etenivät oskillointijäljen pohjasta. Halkeamia löydettiin usein teräksistä, joiden hiilipitoisuus oli 0.11–0.16 %-yksikköä. Myös Mn/S-suhde lisäsi huomattavasti halkeamia, kun se oli alle 80. Mn/S-suhteen vaikutus on merkittävä, koska pitkittäiset halkeamat esiintyvät tällä samalla alueella. Niobi vaikutti voimakkaasti halkeamaherkkyyteen. Lisäksi mikrosuotautumista löydettiin MnS-saostumaa. Tämä tarkoitti sitä, että MnS kiteytyi lopulta, kun erittäin rikastunut sula virtasi halkeamaan ja eristi sen.

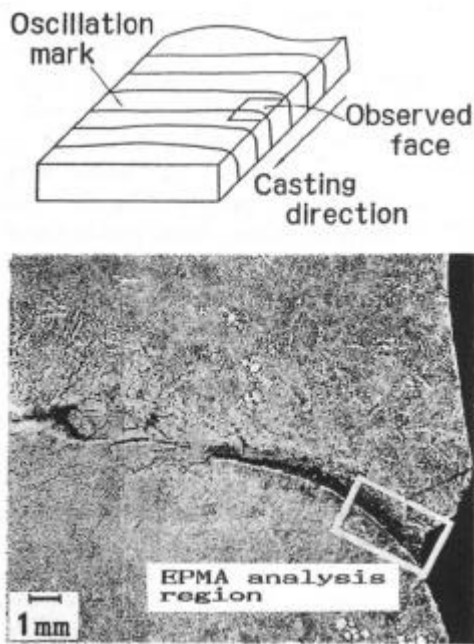
Alla on yhteenveto poikittaishalkeamien ominaisuuksista aihion sivulla:

- Oskillointijäljen alapuolella sijaitsee paikallisia mikrosuotautumia.
- Suotautuma-alue tunkeutuu syvälle austeniitin raerajojen läpi.
- Halkeamat etenevät suotautuma-alueita pitkin.
- Halkeamilla on samoja rakenneominaisuuksia kuin tavallisilla sisäisillä halkeamilla.

Poikittaiset kulmahalkeamat etenivät myös mikrosuotautuma-alueita pitkin. Varsinkin fosforisuotautumia löytyi kulmahalkeamista. Harada et al. /4/ totesivat, että fosforin suotautumisella on yhteys oskillointijäljen syvyyteen. Pintasuotautuman (fosfori) muodostumismekanismeilla on yleensäkin vaikutusta oskillointijäljen syntymiseen. Fosforin vaikutus oli erittäin suuri teräksillä, joiden hiilipitoisuus oli matala tai keskiluokkaa. Oskillointijäljen vaikutus riippuu valituista parametreista, joita on jo käsitelty aikaisemmin edellisessä luvussa.

Kuva 11 on horisontaalinen läpileikkaus aihion kulmassa esiintyvistä oskillointijäljistä, joka on hiottu tasaiseksi. Kuvasta nähdään voimakas suotautuma, joka etenee oskillointijäljen pohjasta alkaen. Negatiivinen suotautuma näkyy kuvassa 11 terävänä valkeana viivana pitkin oskillointijälkeä. Vastaavasti positiivinen suotautuma on kuvassa näkyvä musta alue, joka laajenee negatiivisen suotautuman yläpuolella.

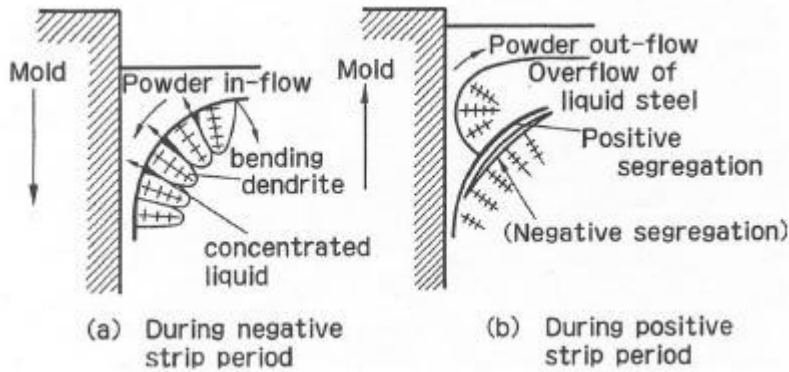




**Kuva 11.** Poikittainen kulmahalkeama ja sen sijainti /4/.

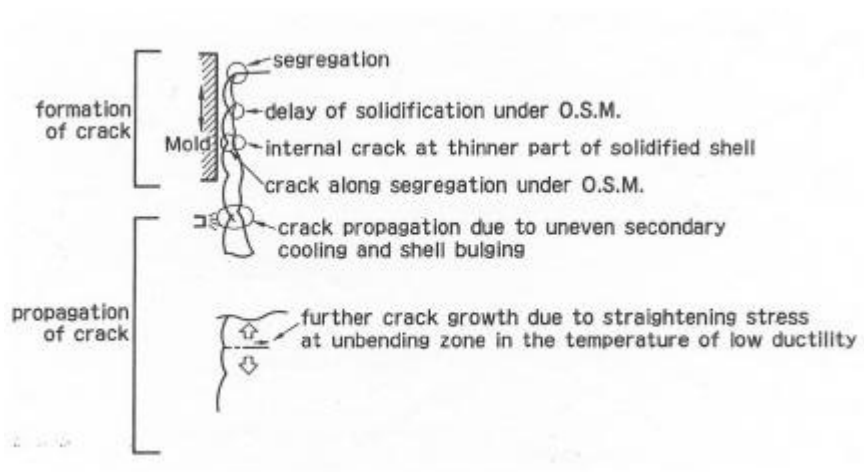
Edellisessä kappaleessa on esitetty muutama oskillointijäljen muodostumismekanismi. Harada et al. /4/ käyttivät näitä teorioita ja täydensivät niitä tiedoilla, joita havaitsivat omassa tutkimuksessaan. Tutkimuksissa todettiin, että ensimmäisen oskillointijäljen syntymismekanismiin vaikuttaa puolikiinteän kuoren epämuodostuminen. Kun osittain kiinteä kuori on muuttanut muotoaan, rikastunut sula teräs puristuu dendriittien haarojen välistä pintaan. Rikastunut sula teräs sisältää esimerkiksi fosforia. Sitten tapahtuu positiivinen suotautuminen ja suotautuma ulottuu laajasti kuoren kärkeen saakka. Kun rikastunut sula on puristunut pintaan, jäljelle jäänyt puolikiinteä kuori jähmettyy nopeasti. Epämuodostuman lähellä suuret kiinteät kuoren osuusrajat tulevat lähemmäksi toisiaan, mikä selittää negatiivisen suotautumisen.

Nestemäisen teräksen virtaus kuoren kärjen päälle johtaa toiseen mekanismiin. Tässä mekanismissa nestemäinen teräs, joka on virrannut kuoren kärjen päälle, kuumentaa uudelleen kuorta. Dendriittihaarojen välinen rikastunut nestemäinen teräs vaeltaa pintaan, koska vaikuttavana voimana teräksessä on painetasapaino. Näin pintasuotauma on muodostunut, vaikka kuoren epämuodostumista ei tapahdu. Kuitenkaan teräväpiirteisen suotautuman muodostumista ei voida selittää tällä mekanismilla. Näin ollen Harada et al. /9/ tyytyivät selitykseen, että on olemassa kahdenlaista oskillointijälkeä. Kuvassa 12 on kuvattu negatiivisen ja positiivisen strip'n aikana tapahtuva suotautuman muodostumismekanismi.



**Kuva 12.** Suotautuman muodostumismekanismi meniskuksessa /4/.

Kuvassa 13 on esitetty lyhyesti poikittaishalkeaman muodostuminen vaihe vaiheelta suotautuman syntymisestä oikaisuun saakka Harada et al. /4/ mukaan.



**Kuva 13.** Poikittaishalkeaman syntymismekanismi /4/.

Toimenpiteet, joilla Harada et al. /4/ mukaan voidaan estää poikittaishalkeamien syntymistä, jaetaan kahteen osaan. Ensimmäiseksi estetään suotautumien muodostuminen ja toiseksi estetään halkeamien syntyminen.

Keinoja suotautumien välttämiseksi:

- Tasainen jäähdytys on alussa tärkeää. Se toteutuu, kun kuori on tasaisesti kosketuksissa kokillin pinnan kanssa.
- Kokillissa hitaasti tapahtuva jäähdytys on parempi kuin nopeasti tapahtuva.
- Kokillin pinnan pitää olla tasainen ja virheetön.
- Oskilloinnin parametreilla vaikutetaan oskillointijälkeen ja sen syvyyteen. Kun valitaan lyhyt iskunpituus ja korkea taajuus, oskillointijäljen syvyys pienenee.
- Suotautumia syntyy varsinkin 0.10–0.15 % hiilipitoisuusalueella ja siksi tätä aluetta pitää välttää. Lisäksi fosforin ja rikin määriä pitää vähentää. Alue  $Mn/S > 80$  on suotautumien välttämiseksi hyvä.

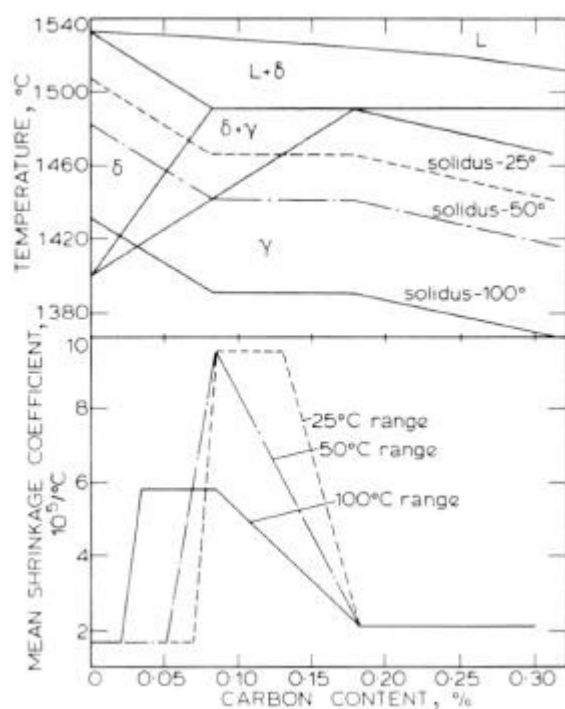
Keinoja halkeamien etenemisen estämiseksi:

- Esimerkiksi oikaisuvaiheessa pitäisi välttää alempaa kuumahaurausaluetta.
- Aihion taivutus- ja oikaisuvaiheessa esiintyviä rasituksia ja jännityksiä pitäisi vähentää.
- Valukaaren täytyisi tukea valunauhaa tarpeeksi hyvin. Muuten esiintyy mm. jännityksiä ja valunauhan pullistumista. Lisäksi kokillin kartiokkuuden pitää olla sopiva, jotta kontakti kokillin ja valunauhan välillä säilyy.
- Lämpöjännityksiä pitäisi vähentää tasaisella jäähtytyksellä niin kokillissa kuin sekundäärijäähtytysalueellakin.
- Oikeantyyppisen valupulverin valinnalla voidaan vaikuttaa halkeamien syntymiseen.

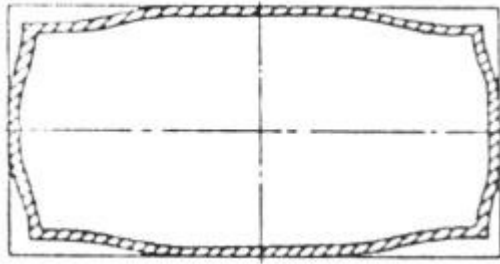
## 7 KEMIALLISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS POIKITTAISHALKEAMIIN

Hiilellä on suurin vaikutus lämmönsiirtoon kokillissa. Lämmönsiirtyminen kokillissa on hyvin vähäistä peritektisillä teräksillä (0.08–0.15 %-yksikköä C), kun hiilipitoisuus on noin 0.1 %-yksikköä. Lämmönsiirtymisen pieni määrä on seurausta voimakkaasta faasimuodonmuutoksesta. Faasimuodonmuutos tapahtuu ferriitistä austeniitiksi soliduslämpötilan alapuolella. Tämä aiheuttaa valunauhan kuoren kutistumista ja jaksoittaista ilmaraon muodostusta meniskuksen alapuolelle. Lämmönsiirtymisen pieni määrä johtuu siis kokillin pinnan ja valunauhan kuoren huonosta kosketuksesta. Kutistumista tapahtuu erityisesti hiilipitoisuusalueella 0.10–0.15 %-yksikköä /12/. Tämän hiilipitoisuusalueen aikana tapahtuu kuoren epätasaista kasvua, mikä on seurausta vähäisestä lämmönsiirtymisestä. Oskillointijälkien erilaisuus voi myös johtua kutistumisesta. /10, 11/

Kuvassa 14 on kaksi osaa. Ylemmässä kuvataan hiilipitoisuuden mukaan, miten faasimuodonmuutos muuttuu, kun teräs jäähtyy soliduslämpötilasta. Kuvassa L tarkoittaa sulaa terästä,  $\delta$  ferriittiä ja  $\gamma$  austeniittia. Kuvan alemmassa osassa nähdään hiilipitoisuuden vaikutus keskimääräiseen kutistumiskertoimeen, joka huomioi lämpötilan laskemisen. Kuvan mukaan hiilipitoisuudella 0.1 %-yksikköä esiintyy eniten kutistumista.



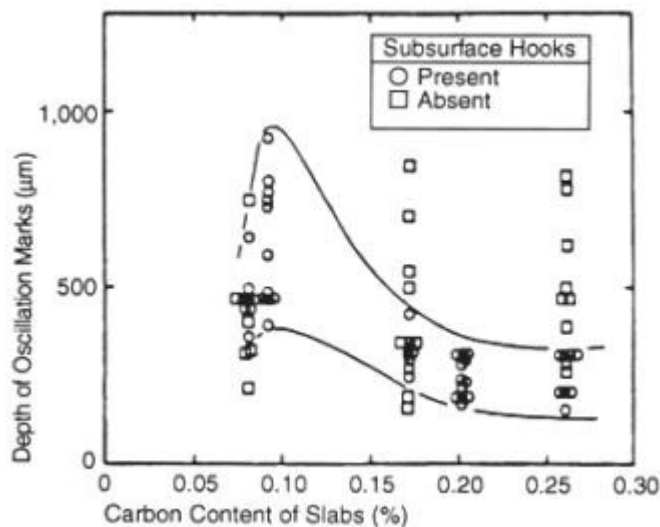
**Kuva 14.** Hiilipitoisuuden vaikutus kutistumiseen jähmettymisen jälkeen /2/.



**Kuva 15.** Kutistumisen aiheuttama ilmaraon syntyminen valunauhassa. Kuva on poikittainen leikkaus aiheista /17/.

Kuvassa 15 on esitetty, miten kutistuminen aiheuttaa ilmarakojen syntymisen valunauhan kulmiin. Valunauhan kontakti kokillin tai valukaaren välillä jää huonoksi varsinkin reunojen kohdalta. Tällöin lämmönsiirtyminen ei ole tasaista ja valunauhan paksuusprofiili vaihtelee, kun teräs kiteytyy.

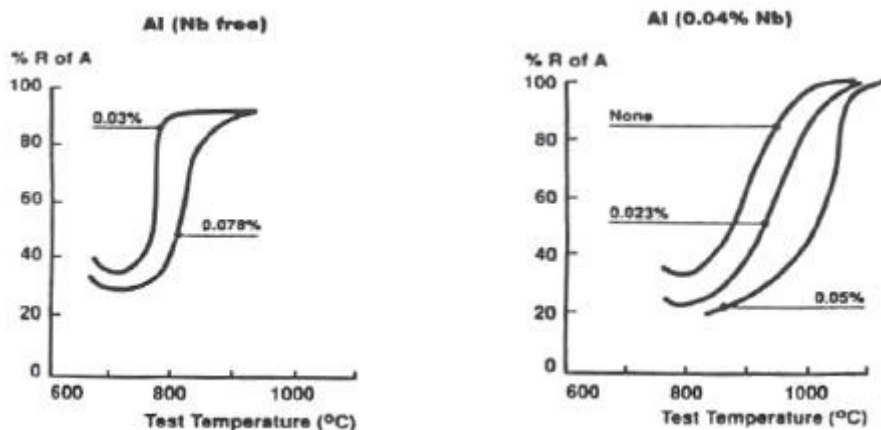
Hiilipitoisuuden ja poikittaishalkeamien välillä on selvä yhteys. Merkittävä asia on se, että poikittaishalkeamien määrän on havaittu kasvavan, kun hiilipitoisuus on 0.1–0.15 %-yksikön välillä /12/. Tämä voidaan osittain selittää, kun tutkitaan oskillointijälkien laatua ja niiden syvyyttä. Brimacombe ja Takeuchi /15/ ovat osoittaneet tutkimuksissaan, että oskillointijäljen syvyyden ja hiilipitoisuuden välillä on selvä yhteys. Tämä nähdään kuvasta 16, jonka mukaan syvimät oskillointijäljet syntyvät peritektisellä alueella, kun hiilipitoisuus on 0.1%. Lisäksi kuvassa mittaustulokset on lajiteltu sen mukaan, onko kyseessä kysymäinen vai normaali oskillointijälki.



**Kuva 16.** Hiilipitoisuuden vaikutus oskillointijäljen syvyyteen /16/.

Alumiinilla on vaikutusta poikittaishalkeamiin. Kun alumiinipitoisuus ylittää arvon 0.035%, alemman kuumahaurausalueen on todettu levenevän, ja samalla halkeamien määrä on kasvanut. Alumiinipitoisuuden 0.035% ylitys voidaan toteuttaa, jos typpitaisoa rajoitetaan tarkasti esimerkiksi 40 ppm:ään. AlN eli alumiininitridin määrän lisääntyminen vähentää teräksen sitkeyttä alemmalla kuumahaurausalueella. Alumiinin vaikutus voimistuu, kun niobia on läsnä. Kuvista 17 ja 18 on nähtävissä,

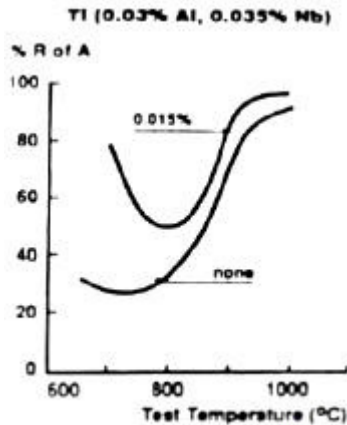
minkälainen vaikutus niobilla on. Alumiinin vaikutusta sitkeyteen on aikaisemmin esitetty kuvassa 6. Kuvan 6 käyrissä ei ole huomioitu niobia eivätkä käyrät ole peritektisellä alueella, mutta typpipitoisuudet on esitetty selventävästi alumiinin mukana. Nämä kolme kuvaa täydentävät toinen toisiaan. /12/



**Kuva 17.** Alumiinin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona ilman niobia /12/. **Kuva 18.** Alumiinin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona, kun mukana on niobi /12/.

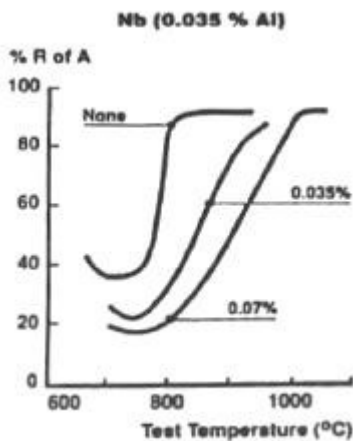
Poikittaishalkeamien syntymisestä on tehty useita tutkimuksia. Useat tutkijat ovat raportoineet, että AlN:n tai Nb(CN) eli niobihilinitridin saostuminen on syynä halkeamiin. Halkeamat tapahtuvat austeniitin raerajojen välillä ja raerajat ovat rikastuneet alumiinilla. AlN:n saostumista voidaan vähentää, kun lisätään teräkseen titaania. Titaaniosuus 0.02–0.04% vähentää myös liukenevan typen osuutta, mikä vähentää poikittaishalkeamia. Titaani sitoo typen TiN saostumaksi. Kuvassa 19 on esitetty, miten titaanin lisäys vaikuttaa teräksen sitkeyteen. AlN vaikuttaa ainakin osittain siihen, että poikittaishalkeamat ilmenevät alemmalla kuumahaurausalueella. Kun halutaan estää poikittaishalkeamia, ratkaisuna on estää AlN:n saostumista ja vähentää valunauhan pinnan pitkittäisten vetojännityksien syntymistä. Tämä tarkoittaa sitä, että valunauhan pintalämpötila ei voisi olla 700–900°C välillä. Lisäksi valunauhan pinnan lämpötilaprofiilin pitäisi olla mahdollisimman tasainen sekundäärijäähdytysalueella. Tällöin pitäisi välttää uudelleenlämpenemisen ja jäähdyttämisen jaksollista vaihtelua. /1, 13/

Mikroseostetuissa teräksissä, joissa on 0.02–0.05% niobia, esiintyy paljon poikittaishalkeamia. Niobikarbidit, niobinitridit ja Nb(CN) ovat niobin saostumia, jotka syntyvät teräksen koostumuksen perusteella. Saostumat lisäävät mikroseostettujen teräksien lujuutta, mutta vähentävät niiden sitkeyttä merkittävästi. Kuvassa 9 on esitetty kuumasitkeysikäykäriä mikroseostetuille teräksille. Jos esimerkiksi Nb(CN)- ja AlN-saostumia esiintyy teräksessä, kuvan 9 kuumasitkeysikäyriin laakso syvenee ja levenee edelleen. /7, 12/



**Kuva 19.** Titaanin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona /12/.

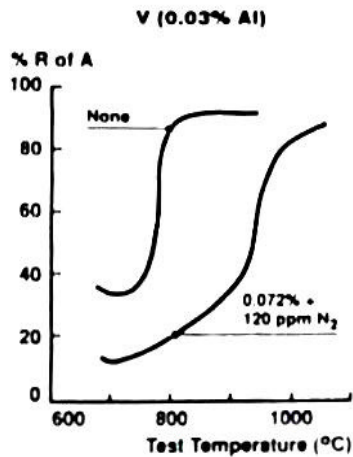
Niobilla mikroseostetut laadut, jotka sisältävät kuparia ja nikkeliä, ovat esimerkiksi Raahen tehtaiden eräs halkeamaherkimmistä laaduista /7/. Niobilla seostettujen teräksien halkeamaherkkyttä voidaan vähentää, kun säädetään alumiini- ja typpi- osuutta. Kuvassa 20 on esitetty niobin vaikutus sitkeyteen. /12/



**Kuva 20.** Niobin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona /12/.

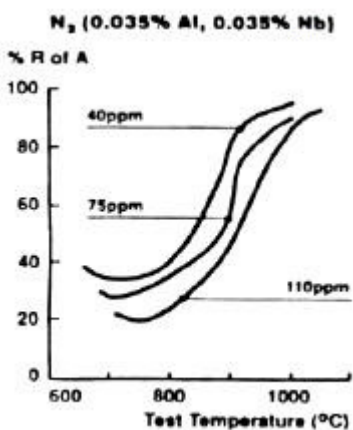
Boorin lisäämisen titaania sisältävään seokseen on todettu vähentävän halkeamia. Boorin vaikutus perustuu typen reaktiotaipumukseen boorin kanssa. Reaktiosta syntyy pääasiassa boorinitridi-saostumaa. Kun saostuma on syntynyt, se jää pois kiintoaineliuksesta ja vähentää muiden nitridien saostumista. /12/

Vanadiinin vaikutus vaihtelee typpipitoisuuden mukaan. Kun typpipitoisuus on alle 50 ppm, vanadiinilla on vain pieni vaikutus halkeamien syntymiseen. Kuitenkin vanadiini vaikuttaa merkittävästi halkeamiin, kun typpipitoisuus on 90–120 ppm välillä. Vanadiini laskee teräksen sitkeyttä, vaikka alumiinia ei olisi läsnä. Kuvassa 21 on esitetty vanadiinin vaikutus sitkeyteen. /12/



**Kuva 21.** Vanadiinin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona /12/.

Melkein kaikissa teräsladuissa tyypipitoisuus on se tekijä, joka vaikuttaa voimakkaasti halkeamien määrään. Vaikutus on suurin mikroseostetuilla teräksillä, joissa on niobia ja vanadiinia. Typpi lisää muun muassa AlN määrän saostumista, joka taas vähentää teräksen sitkeyttä. Voidaan sanoa, että typen vaikutus poikittaishalkeamien syntymiseen riippuu myös voimakkaasti alumiinin määrästä. Aikaisemmin jo todettiin, että korkeita alumiini- ja niobimääriä voidaan käyttää, jos tyypipitoisuus pidetään alle 40 ppm. Tällä toteutuksella voidaan minimoida halkeamisriskiä. Santa Maria et al. /13/ tekivät tyypipitoisuudesta mielenkiintoisen havainnon 900–1200°C välillä. He huomasivat, että niobia sisältävien terästen kuumasitkeyttä voidaan huomattavasti parantaa, kun vähennetään tyypipitoisuutta 60:sta 35:een ppm. Lisäksi tutkimuksessa osoitettiin, että poikittaishalkeamien esiintymistä voidaan vähentää, kun vähennetään typen kasautumia valun aikana Vastaavasti esimerkiksi British Steel tuottaa joitakin halkeamaherkkiä laatuja kuten hiili-, mangaani- ja niobiteräksiä, jotka sisältävät lisäksi kuparia ja nikkeliä. Näillä tyypipitoisuuden pitää olla alle 60 ppm. Kuvassa 22 on esitetty typen vaikutus sitkeyteen erilaisilla tyypipitoisuuksilla. /12/

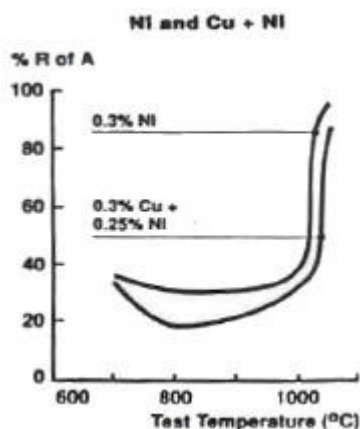


**Kuva 22.** Typen vaikutus teräksen sitkeyteen lämpötilan funktiona /12/.

Teräslevyladuilla nikkeliä käytetään teräksen laadun parantamiseksi. Nikkeli on austeniitin stabilointiaineena ja se vähentää liukenevan typen määrää austeniitissa. Kuitenkin sitoutumaton eli jäljelle jäänyt nikkeli vaikuttaa vahingollisella tavalla

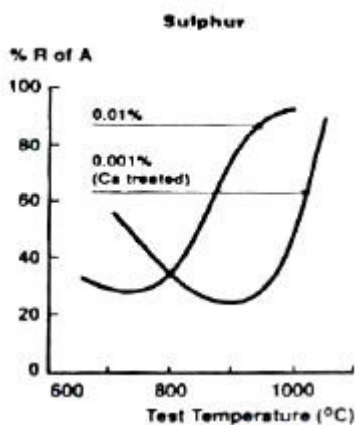


teräkseen, ja näin ollen poikittaishalkeamien määrä lisääntyy. Teräslevyalaaduilla voidaan typpisuuden säädöllä vähentää nikkelin aiheuttamia halkeamia. Kuvassa 23 on esitetty nikkelin ja sen seosaineiden vaikutus teräksen sitkeyteen lämpötilan funktiona. Kun tarkastellaan kuvaa 23, kuparilla näyttää olevan paljon vaikutusta mikro-seostettujen teräksien sitkeyteen /12/.



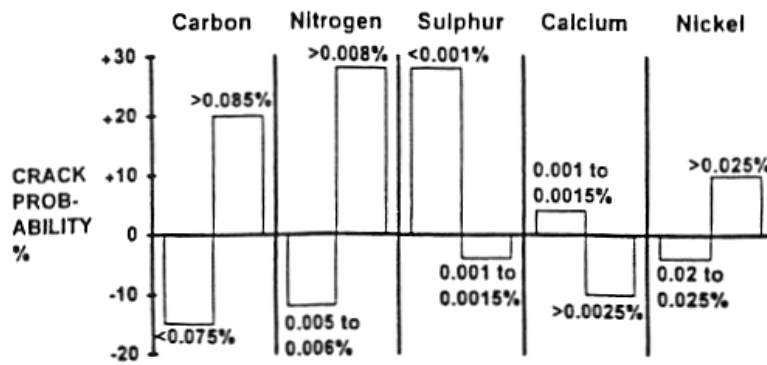
**Kuva 23.** Nikkelin sekä nikkelin ja kuparin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona /12/.

Vähennettäessä rikin määrää voidaan parantaa teräksen sitkeyttä. Kuitenkin tutkimuksissa on todettu, että poikittaishalkeamien määrä kasvaa, kun rikki pitoisuus on alle 0.005 %-yksikköä. Halkeamien lisääntyminen todistettiin kuumasitkeys kokeilla, kun rikki pitoisuus oli 0.001 %-yksikköä ja mukana oli kalsium. Kuvassa 24 on esitetty rikin sekä rikin ja kalsiumin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona. /12/



**Kuva 24.** Rikin vaikutus sitkeyteen lämpötilan funktiona /12/.

Kalsiumin vaikutuksesta halkeamiin on monenlaista tietoa. British Steelin tutkimuksen mukaan kalsiumilla käsitellyt teräkset ovat alttiimpia halkeamille kuin ne teräkset, jotka eivät sisällä kalsiumia. Varsinkin kalsiumsilikaatilla käsitellyt teräkset ovat hyvin taipuvaisia poikittaishalkeamiin. Toisaalta kuvassa 25 on esitetty diagrammeina, että kalsiumin käytöllä voidaan tilastollisesti vaikuttaa halkeamien esiintymistodennäisyyteen. Kun kalsiumpitoisuus on yli 0.0025%, halkeamien määrä tai ainakin halkeamien esiintymistodennäköisyys on vähäisin. Kuvassa 25 on myös esitetty muiden ainesosien tilastollista merkittävyyttä. /12/



**Kuva 25.** Teräksen ainesosien vaikutus poikittaishalkeamien todennäköisyyteen levylaaduilla /12/.

## 8 PROSESSIN JA TEKNISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS POIKITTAISHALKEAMIIN

Valukone on suuri tuotantoyksikkö, kuten kuvasta 1 ja taulukosta 1 voidaan huomata. Teräksen matka terässenkasta aihiksi on pitkä (29,3 m), ja tällä matkalla useat tekijät ovat kosketuksissa tai vaikuttavat jähmettyvään valunauhaan. Alla on lueteltu tekijöitä, joilla on vaikutusta vikaherkkyyteen ja halkeamien esiintymiseen. /7, 11, 12/

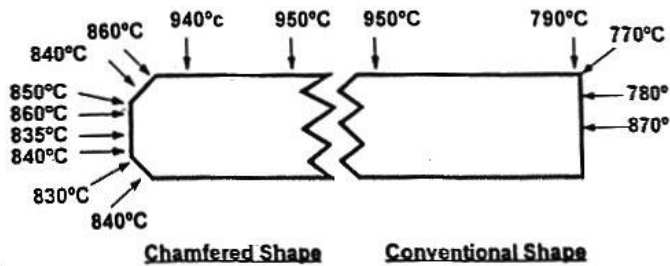
- kokillin oskillointi,
- kokillin pinnankorkeus,
- kokillin muoto ja pintamateriaali,
- valupulveri,
- primääri- ja sekundäärijäähdytys,
- rullien kunto ja niiden kohdistus,
- valunauhan pullistuminen,
- valukaaren säde,
- valukoneen säätö- ja ohjausjärjestelmät vaikuttavat muun muassa poikittaishalkeamien esiintymiseen.

Edellä luetelluista tekijöistä tarkastellaan seuraavaksi lähemmin kokillin muotoa, valupulverin ominaisuuksia, pinnankorkeutta, jäähdytystä, rullien linjausta ja kuntoa.

### 8.1 Kokillin muodon vaikutus

Kokillin muoto vaikuttaa lämmönsiirtymiseen. Patrick ja Lundlow /12/ tutkivat kokillin muodon vaikutusta lämpötilaprofiiliin. Tutkimuksien tarkoituksena oli vähentää poikittaishalkeamien määrää aihion sivuilla ja erityisesti kulmissa. Kokeet toteutettiin vertailemalla perinteisen ja modifioidun kokillin lämpötiloja valun aikana sekä tutkimmalla, miten muoto vaikuttaa halkeamien esiintymiseen. Kokeiden materiaalina oli niobilla mikroseostetut teräslevyalaadut. Modifioitu kokilli oli rakennettu siten, että kokillin kulmiin rakennettiin 40 mm leveät kammiot, jotta valunauhan sivujen muoto olisi kulmikas. /11/

Kuvassa 26 on esitetty normaalin ja modifioidun aihion lämpötiloja oikaisun jälkeen. Vasemmanpuoleinen on modifioitu ja oikeanpuoleinen on normaali aihion muoto. Kuvasta 26 nähdään, että modifioidun aihion kulmalämpötilat nousivat jopa 100°C:ta verrattuna perinteiseen. Modifioidussa kokillissa poikittaishalkeamien määrä väheni. Tämä johtuu lämpöjännityksien vähentymisestä, koska lämpötilaprofiilit tasoittuvat. Kuitenkin Patrick ja Lundlow /12/ totesivat, että tällainen kokillin modifikaatio on vain yksi vaihtoehto torjua poikittaishalkeamia. Tutkimuksissa todettiin, että paras tapa vähentää poikittaisia kulmahalkeamia on säätää valuparametrejä, kuten esimerkiksi oskillointia, jäähdytystä, koneen linjausta, valupulverin laatua ja määrää. /12/



**Kuva 26.** Lämpötilaprofiilin muuttuminen aihiossa, kun kokillin muotoa muutetaan kulumista /12/.

## 8.2 Valupulverin vaikutus

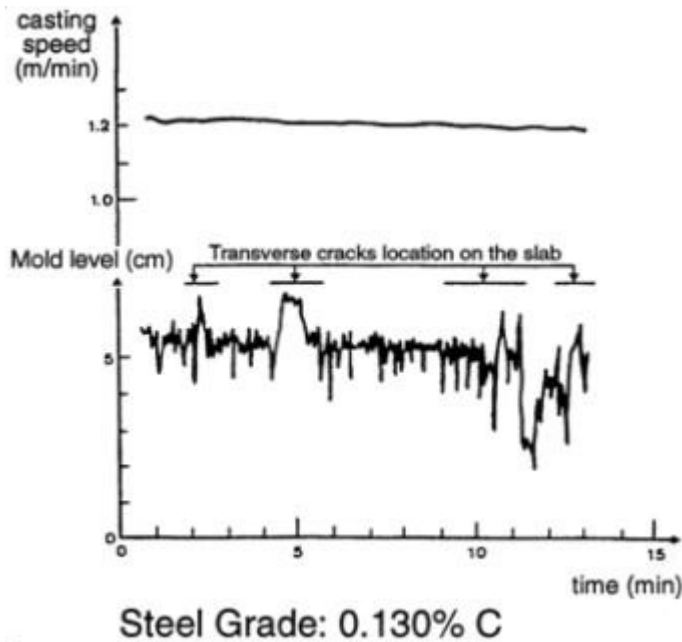
Valupulverilla on useita tehtäviä. Valupulveri toimii pääasiallisesti voiteluaineena kokillin ja aihion välillä. Sen muita tehtäviä ovat suojata sulan pintaa hapettumiselta, toimia lämmöneristeenä, sitoa itseensä epämetalliset sulkeumat teräksestä ja säättää lämmönsiirtymistä sulasta kokilliin. Edellä mainitut ominaisuudet vaikuttavat aihion laatuun. Lisäksi valupulverin käyttö tekee mahdolliseksi sulavirtauksien ohjauksen valuputken avulla. /10/

Valupulveria syötetään kokilliin sekä manuaalisesti että automaattisesti. Tavoitteena on saada sulan teräksen pinnalle 10–15 mm:n paksuinen kerros valupulveria. Valupulverin tärkein säädettävä ominaisuus on viskositeetti, kun halutaan vaikuttaa poikittaishalkeamien syntymiseen. Harris et al. /5/ ovat osoittaneet, että poikittaishalkeamien määrää voidaan vähentää, kun käytetään korkea viskositeettisiä valupulvereita. Tutkimukset tehtiin teräksillä, joiden hiilipitoisuus oli 0.17–0.23%. Poikittaishalkeamien määrä väheni tutkimuksissa kymmenyksen alkuperäisestä. /5/

## 8.3 Kokillin pinnankorkeuden säätö

Kokillin pinnankorkeuden säätö on valukoneen eräs tärkeimmistä säätökohteista. Säädon tarkkuusvaatimukset ovat niin suuret, että sen toteuttamiseen tarvitaan automatisoitua säätöpiiriä tai jopa automaatiojärjestelmiä. Yleensä pinnankorkeus mitataan jollain anturilla tai uimurilla. Kokillin virtausta säädetään välialtaan sulkutangon avulla, kun järjestelmä saa tiedon pinnankorkeudesta. Kuitenkin on hyvin tavallista, että pinnankorkeutta muutetaan noin 10 mm esimerkiksi 30 minuutin välein, koska jatketiili kuluisi muuten liikaa. Kulumista aiheuttavat muun muassa valupulveri ja sulan teräksen virtaukset. /10/

Kuvassa 27 on esitetty pinnankorkeuden vaihtelun vaikutus poikittaishalkeamiin. Valunopeus säilyy melkein vakiona. Poikittaishalkeamien esiintymisen ja pinnankorkeuden vaihtelun välillä on selvä yhteys, koska valunauhassa esiintyvät poikittaishalkeamat ovat yhdistettävissä voimakkaisiin pinnankorkeuden vaihteluihin valuajan funktiona. Tämä yhteys on selvästi havaittavissa kuvasta 27. /11/



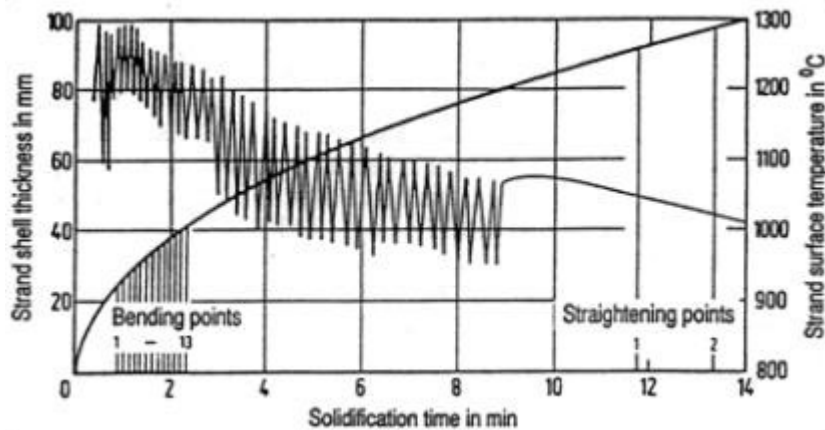
**Kuva 27.** Pinnankorkeuden vaihtelun vaikutus poikittaishalkeamiin /11/.

## 8.4 Aihion jäähdytys

Aihiota jäädytetään vesisuihkuin sekundäärijäähdytysalueella. Tässä kirjallisuustyössä sekundäärijäähdytys tarkoittaa aihion suoraa jäädyttämistä vesisuihkuilla ja sisäisesti jäähdytetyillä tukirullilla. Vesisuihkuissa käytettävää vettä kierrätetään, eli käytön jälkeen vesi kerätään talteen, puhdistetaan ja käytetään uudelleen. /10/

Valunauhan pintaa pitää jäädyttää siten, että pinnan lämpötilassa ei tapahdu nopeita vaihteluita. Suuttimien sijoituksella on suuri merkitys, kun halutaan tasainen lämpötilaprofiili. Suuttimet tulee sijoittaa siten, että lämpötilaprofiili on mahdollisimman tasainen niin pitkittäisessä kuin poikittaisessa suunnassakin. Yleensä suuttimien katvealueita ei voida välttää. Tästä on seurauksena, että rullien katvealueilla valunauhan pintalämpötila nousee paljon. Vastaavasti jäähdytettyjen rullien sektorilla ja suutinalueella valunauhan pinnan lämpötila laskee huomattavasti. Lämpötilan jatkuvasta voimakkaasta vaihtelusta on seurauksena suuria vetojäännityksiä, jotka voivat johtaa esimerkiksi poikittaishalkeamiin. Kuvassa 28 on esimerkki siitä, miten valunauhan pinnan lämpötila vaihtelee jäähdytyksen aikana ajan funktiona. Kuvasta nähdään myös valunauhan kuoren paksuus ajan funktiona. /10/

Erilaisia jäähdytyssuuttimia on rakennettu paljon. Tarkoituksena on ollut rakentaa suuttimia, jotka antavat erilaisia laajoja vesijakaumia. Vesi-ilmasuutin on yleistynyt jonkin verran valukoneissa, joissa käytetään paljon tukirullia. Suutin antaa laajan ja tasaisen vesijakauman. Tällöin katvealue jää erittäin pieneksi. /10/



**Kuva 28.** Valunauhan lämpötilavaihtelut /10/.

Nykyisin käytetään jäähtyksessä matemaattisia malleja. Tällöin voidaan saavuttaa haluttu lämpötilaprofiili tai saada valukoneen tiettyyn pisteeseen oikea lämpötila. Jäähdytysalue on jaettu eri jäähdytysvyöhykkeisiin, joita voidaan säätää erikseen. Jokaiselle vyöhykkeelle määritetään lämmönsiirtokerroin, jota mallit käyttävät jäähdytysveden virtauksen määrittelyssä. Matemaattisten mallien avulla voidaan dynaamisesti muuttaa esimerkiksi veden virtausta valunopeuden funktiona. Mallien parametrit tulee sovittaa aina valukonekohtaisesti. /10, 11/

Jäähdytysjärjestelmän eräs ongelma on suutinten kuluminen ja tukkeutuminen. Näistä ongelmista on seurauksena epätasainen lämpötilaprofiili, mikä aiheuttaa vetojännityksien syntymistä. Mallit eivät voi huomioida mekaanisia vikoja, joten pintavikojen syntyminen on todennäköistä. Toinen ongelma on jäähtytyksen puutteellisuus valunauhan kapealla sivulla. Erilaisia modifikaatioita on rakennettu ongelman korjaamiseksi, koska jäähtytyksen epätasaisuuden on epäilty aiheuttavan valunauhan sivuilla esimerkiksi poikittaishalkeamien syntymistä. /11/

Muita ongelmia ovat esimerkiksi yhteensopivuusongelmat. Esimerkiksi EMBR-menetelmä parantaa aihoiden laatua, kun käytetään kaarevia kokilleja. Kuitenkin EMBR-menetelmällä on vaikeuksia toimia pystytaivutustyypisen kokillin kanssa. Nykyään uuden teknologian kuten FC-kokillin avulla voidaan edelleen parantaa aihoiden laatua ja lisätä valunopeutta. FC-kokilli on kehittyneempi versio kuin EMBR. /8/

## 8.5 Rullien linjaus ja kunto

Valukaaren tehtävä on tukea ja kuljettaa jähmettyvää valunauhaa. Kokillin tehtävänä on poistaa teräksestä niin paljon lämpöä, että teräs jähmettyy pintaosistaan. Lisäksi kuoren pitää olla niin paksu, että se estää yhdessä tukirakennelmien kanssa aihion pullistumisen ja puhkeamisen /9/. Aihion pullistuminen ja sen suuruus johtuu muun muassa ferrostaattisesta paineesta, rullien välisestä etäisyydestä, valunopeudesta, kuoren paksuudesta ja lämpötilasta /10/.

Valukaaren tukirullien linjaus on hyvin tärkeää. Liian suuret eroavaisuudet rullien päiden sekä rullasegmenttien välillä aiheuttavat helposti valuvirheitä. Tarkkuusvaati-

mukset ovat noin yhden millimetrin luokkaa. Pintavikoja aiheuttavat myös rullien taipuminen, kuluminen ja pyörimättömyys. /7, 14/

Tukirullia on myös erilaisia. Rullia voidaan jäähdyttää sisäisesti tai ulkoisesti. Rautaruukilla kaikki rullat jäähdytetään sisäisesti. Telojen pinnan lähelle on tehty kanavia, joissa jäähdytysvesi kiertää. Rullien sisäiset jäähdytyspiirit ovat erillään ahion ulkopuolisesta jäähdytyksestä. Liitteessä 2 on esitetty poikkileikkauskuva Rautaruukin jatkuvavalukoneesta 6. Liitteen 2 kuvasta voidaan erottaa rullasegmentit ja lisäksi havaita suljetun jäähdytysveden kierron periaate.

## 9 SYHERÖÄ SISÄLTÄVÄT TERÄSLAADUT

Vuosien 1997–1998 välisenä aikana Rautaruukki Oyj toteutti syherövikojen seurannan kvarttolevyissä. Tutkimuksissa tarkastettiin 201 kvarttolevyä, jotka olivat 156:sta eri sulatuksesta. Syherövikaa esiintyi 18.4 %-yksikköä tarkastetuista levyistä. Suurimman syheröongelman aiheuttivat asiakaslaadut 2888 moniteräs ja 2976 S420 M3Z MOD. Taulukossa 3 on esitetty esimerkkejä syherölevyjen koostumuksesta edellä mainituilla asiakaslaaduilla. /7/

**Taulukko 3.** Syherölevyjen koostumuksia /7/.

SULATUS NRO.	60574	61148	56478	57342
Teräslaatu	S 420 M3Z MOD	S 420 M3Z MOD	Moniteräs	Moniteräs
Kunnostus (K)/ Romutus (R)	K	R	K	R
C %	0.083	0.087	0.147	0.163
Si %	0.42	0.42	0.45	0.43
Mn %	1.55	1.55	1.5	1.45
P %	0.013	0.013	0.015	0.014
S %	0.002	0.003	0.009	0.002
Al %	0.035	0.037	0.038	0.042
Nb %	0.037	0.036	0.02	0.036
V %	0.01	0.009	0.008	0.005
Cu %	0.013	0.008	0.009	0.052
Cr %	0.015	0.015	0.021	0.023
Ni %	0.201	0.213	0.03	0.043
Ce %	0.006	0.005	0.008	0.009
N %	0.0077	0.008	0.0038	0.0085
Mo %	0.002	0.002	0.007	0.008
Ti %	0.004	0.004	0.003	0.003
Ca %	0.002	0.002	0	0.002
Ti/N	0.52	0.5	0.79	0.35
Cew	0.36	0.37	0.41	0.42
Ca/S	1.533	0.786	0.011	1.045
Al/N	4.55	4.63	10	4.94

Tutkimuksista ilmeni, että syheröä esiintyy erityisesti peritektisellä hiilipitoisuus-alueella. Syherövikaa edistäviä tekijöitä havaittiin muutamia, joihin kirjallisuudesta on myös löytynyt viitteitä. Niobilla, nikkelillä ja kuparilla on hyvin selvä haitallinen vaikutus. Myös vanadiinilla, titaanilla ja rikillä on vaikutusta syherön syntymiseen, vaikka niiden vaikutus ei tullut tutkimuksissa esille. Suurin osa syherölevyistä oli valettu pystyvalukoneella 2. Raportin mukaan kaikki kvarttolevyt tehdään tulevaisuu-



dessa jatkuvavalukonella 6. Rakenne ja valuominaisuudet ovat pysty- ja jatkuvavalukoneilla erilaiset, joten syheröiden syntymekanismi on erilainen. Syheröiden syntymekanismista jatkuvavalukoneella 6 tiedetään enemmän, kun Oulun yliopiston ja Rautaruukin välinen projekti valmistuu. //

## 10 YHTEENVETO

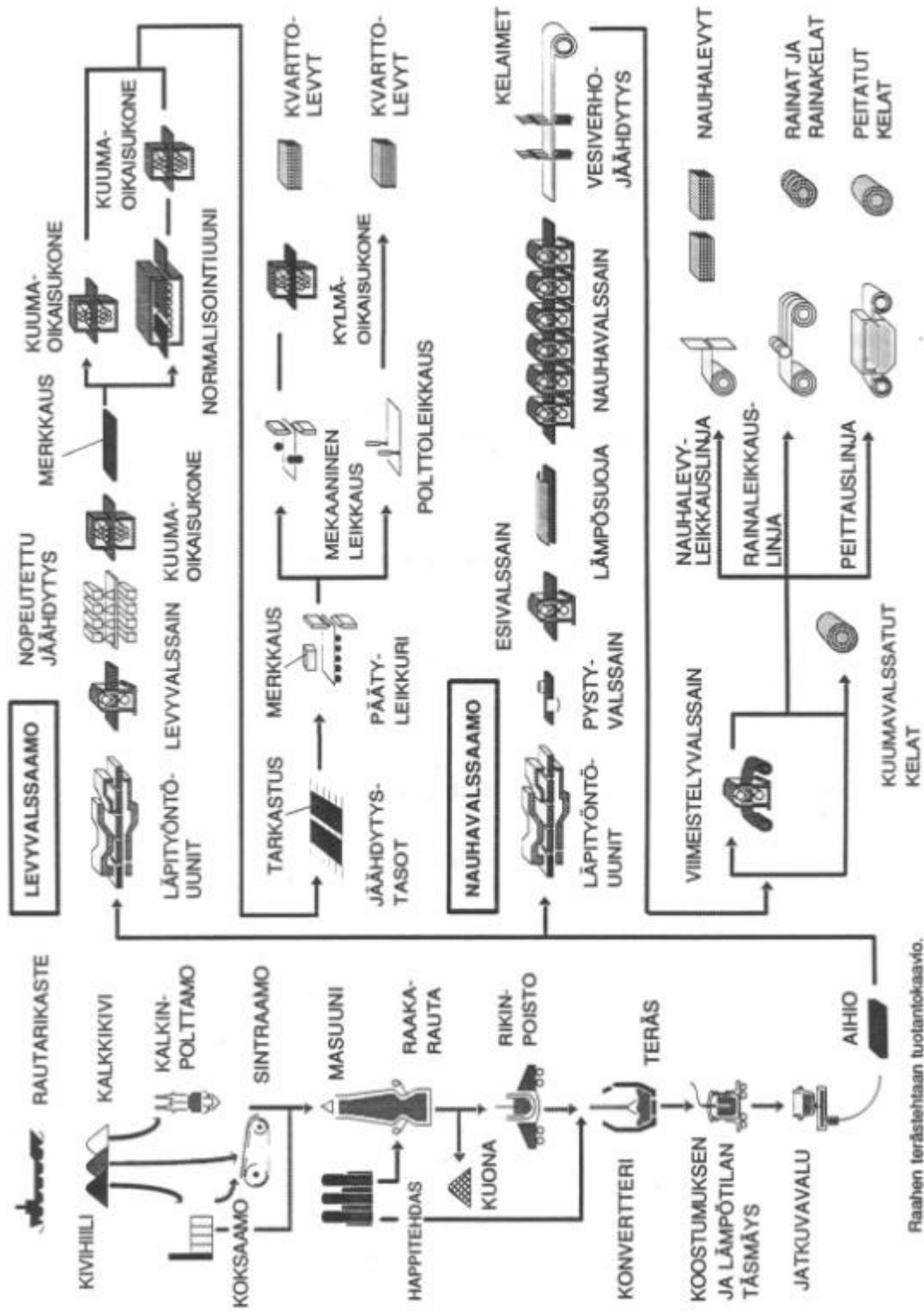
Metallurginen tutkimus on edistynyt paljon muutaman vuosikymmenen aikana. Kirjallisuudesta voidaan nähdä, kuinka tutkimustavat ja -välineet ovat kehittyneet. Huomattava on myös tutkimusten määrä, joita on tehty poikittaishalkeamien mekanismien ymmärtämiseksi. Lukuisien tutkimusten pohjalta on helpompi ymmärtää poikittaishalkeamien syntymistä ja vastaavasti yrittää estää niiden muodostumista.

Tämän raportin tarkoituksena oli tutkia metallurgista kirjallisuutta ja kerätä yhteen syherön syntymiseen vaikuttavia tekijöitä. Poikittaishalkeamien syntymiseen vaikuttavat monet tekijät. Kemiallisilla tekijöillä, kuten niobilla, nikkelillä, typellä, alumiinilla, hiilellä ja kuparilla, on suuri vaikutus. Myös prosessin ja teknisten tekijöiden vaikutus on suuri. Varsinkin kokillin oskillointi vaikuttaa poikittaishalkeamien syntymiseen, koska poikittaishalkeamien on todettu usein alkavan oskillointijäljen pohjalta. Lisäksi jäädytyksen tasaisuuteen on prosessiolosuhteissa kiinnitettävä huomiota, koska muuten aihioon muodostuu paikallisesti liian suuria lämpö- ja/tai mekaanisia jännityksiä, jotka aiheuttavat halkeamia. Rullien kuluminen ja laakeriviat sekä rullasegmenttien vääränlainen linjaus aiheuttavat myös mekaanisia jännityksiä. Myös alempi kuumahaurausalue (700–900°C) on ongelmallinen useille teräslaaduille, koska niiden sitkeysominaisuudet ovat alhaisimmillaan tällä alueella. Valunauhan pintalämpötila on oikaisuvaiheen aikana juuri tällä lämpötila-alueella.

Tähtihalkeaman syntyminen johtuu pääasiassa kuparista. Kuparikokilleista irtoaa kuparia, joka liukenee teräksen raerajoja pitkin. Seurauksena on X-muotoinen halkeama, jos muodostuvaan valunauhaan kohdistuu voimakkaita vetojännityksiä.

## LÄHDELUETTELO

1. Brimacombe, J.K., Sorimachi, K. Crack formation in the continuous casting of steel, Metallurgical Transaction B, Volume 8B, 1977, s. 489-505.
2. Gray, R.J., Perkins, A., Walker, B. Quality of continuously cast slabs, International Conference on Solidification, the University of Sheffield July 1977, London, 1979, The Metals Society, s. 300-305.
3. Haapala, M. Dynaaminen softreduktio, diplomityö. Oulu 1999, Oulun yliopisto. 93 s.
4. Harada, S., Tanaka, S., Misumi, H., Mozoguchi, S., Horiguchi, H. A formation mechanism of transverse cracks on cc slab surface, ISIJ International, Volume 30, 1990, No. 4, s. 310-316.
5. Harris, D.J., Otterman, B.A., Sellers, B.T., Young, J.D. Development of casting practices for defect-free steel, Slater, C.E., Continuous Casting: Transverse Cracking in Continuously Cast Products, volume 8, U.S.A, 1997, The Iron and Steel Society, s. 155-162.
6. Jatkuvavalukone 6:n esittelykalvot. Rautaruukki Steel Oyj.
7. Kinnunen, H. Syherölevyjen seuranta kvarttolevyissä. Raahe 1998, Rautaruukki Steel Oyj. 32 s.
8. Kitano, Y., Take, H., Ibaragi, M., Tozawa, H. Detect-free casting technologies and automation control process system aimed at synchronized operations of the continuous caster with a hot rolling mill, Iron and Steelmaker, Volume 20, 1999, No. 4, s. 41-45.
9. Lilja, J. Metallurgin hyvä tietää: Metallurgiset prosessit, osa 1. Oulu 1992, Oulun Yliopisto. s. 3-38.
10. Louhenkilpi, S. Opetusmoniste: jäähmettyminen ja jatkuvavalu, Prosessitekniikan osasto, Oulun yliopisto, Oulu, 1992, s. 14-74.
11. McPherson, N.A., McLean, A. Transverse cracking in continuously cast products, Slater, C.E., Continuous Casting: Transverse Cracking in Continuously Cast Products, volume 8, U.S.A, 1997, The Iron and Steel Society, s. 1-43.
12. Patrick, B., Ludlow, V. Development of casting practices to minimise transverse cracking in microalloyed steels, La Revue Metallurgie-CIT, July-August 1994, s. 1081-1089.
13. Santa Maria, E., Ferretti, A., Moschini, A., Salvemini, G. Settlement of suitable casting conditions of microalloyed steels for plates and tubes. METEC congress 94, 2<sup>nd</sup> European continuous casting conference, 6<sup>th</sup> International Rolling Conference, Dusseldorf 20-22 June 1994, Germany, 1994, Verein Deutscher Eisenhüttenleute. s. 135-140.
14. Syheröprojektimateriaali. Rautaruukki Steel.
15. Takeuchi, E., Brimacombe, J.K. Effect of oscillation-mark formation on the surface quality of continuously cast steel slabs, Metallurgical Transactions B, Volume 16B, 1985, s. 605-625.
16. Takeuchi, E., Brimacombe, J.K. The formation of oscillation marks in the continuous casting of steel slabs, Metallurgical Transactions, Volume 15B, 1984, s. 493-509.
17. Taylor C.R. Metallurgical Transactions, Volume 6B, 1975, s. 359.



Raahen terästehtaan tuotantokaavio.