

## Sulaperäiset valuviat

*Seija Meskanen, Teknillinen korkeakoulu*

*Pentti Toivonen, Teknillinen korkeakoulu*

Matkalla sulatusuuneilta valupaikalle sulan metallin lämpötila alenee aina. Tähän alenemiseen vaikuttavat valusenkan täyttönopeus, senkan esikuumennus, metallimäärän suuruus, kuljetusaika, kuonapeitteen paksuus ym. tekijät. Lämpö poistuu metallista joko säteilemällä tai johtumalla kuonaan tai senkan vuoraukseen. Tutkimukset ovat osoittaneet, että jälkimmäisen syyn johdosta ovat lämpöhäviöt yleensä 6-7 kertaa suuremmat kuin säteily- ja kuonahäviöiden johdosta. Lämpöhäviöiden pienentämiseksi on valusenkkujen vuoraus aina ennen valua kuumennettava öljy- tai kaasupolttimella hehkuvan punaiseksi. Lämpötila putoaa sitä enemmän mitä kauemmin metalli joutuu senkassa seisomaan.

Valun onnistumisen kannalta on tärkeää, että muotin valukanavisto ja kappaleen syöttöjärjestelmä on oikein suunniteltu. Tärkeä seikka on myös valulämpötilan valitseminen. Oikea valulämpötila riippuu paitsi valumetallista, myös kappaleen suuruudesta, seinämän paksuudesta, valukanavien sijoituksesta ym. tekijöistä, joiden vaikutusta ei aina voi etukäteen tarkalleen ennustaa. Kerran todettu sopiva valulämpötila on yritettävä säilyttää. Jotta tämä olisi mahdollista, metallin lämpötila on voitava tarkoin mitata joko sulatusuunien luona ennen kuin metalli tuodaan valupaikalle tai itse valupaikalla. Jälkimmäistä tapaa on kuitenkin vaikea noudattaa, jos valaminen tapahtuu laajalla alueella valimossa. Lämpötilan mittaus tapahtuu luotettavimmin Pt/PtRh-uppopyrometrillä.

Rajan vetäminen sulaperäisiin valuvikoihin ei ole yksiselitteistä. Kylmäjuoksujen nimellä tunnettujen valuvikojen syy on metallin jähmettyminen ennen muotin täyttymistä. Siten esimerkiksi liian alhainen valulämpötila johtaa kylmäjuoksuihin. Mutta syynä niihin voi olla myös virheellinen valujärjestelmä, liian hitaasti suoritettu kaato, liian pieni seinämänvahvuus kappaleessa tai alimitoitettu valujärjestelmä. Vastaavalla tavalla myös imuviat voivat olla sulaperäisiä vikoja. Jos sula on kaadettu muottiin liian kuumana, sen sulakutistuminen onkin laskettua suurempi. Imuviat voivat myös johtua alimitoitetusta tai virheellisesti sijoitusta syöttökuvusta eli suunnitteluvirheestä.

## Valurautojen sulaperäiset valuviat

---

Joskin suomugrafiittivalurauta on monessa suhteessa useita muita valumetalleja helpompi käsitellä, on silläkin ominaiset vikataipumuksensa. Pallografiittivaluraudan magnesiumkäsittelyn reaktiokuonat, jäännösmagnesium ja -alumiini voivat pallografiittivaluraudassa aiheuttaa virheellisyyksiä, joita suomugrafiittivaluraudassa ei yleisesti tavata.

Johtuen kiteytymistavan herkkyyydestä jäähtymisnopeuden vaihteluille voi valurautojen saavutettu mikrorakenne poiketa tavoitellusta normaalista rakenteesta. Tavallisimmat näistä ovat: kuohugrafiitin esiintyminen, karkea rakenne, osittain tai kokonaan valkea rakenne ja poikkeukselliset grafiittimuodot. Kuohugrafiitti on aina koostumusvirheen seuraus eli on toimittu liian korkealla hiiliekvivalenttiarvolla. Karkea kiderakenne tulee tavallisesti havaituksi työstön yhteydessä siten, että ei ole mahdollista saada hyvää sileää työstöjälkeä. Osittain tai kokonaan valkea kiderakenne on seuraus joko seinämnpaksuuteen tai jäähtymisnopeuteen nähden liian pienestä hiiliekvivalenttiarvosta, ylikuumennuksen aiheuttamasta kiteytymisytymien kadosta, mangaanilla tasapainottamattomasta rikkipitoisuudesta, karbideja stabiloivien seosmetallien (Cr, Mo, V, Mn) läsnäolosta taikka yksinkertaisesti liian suuresta jäähtymisnopeudesta. Eräät epäpuhtautena esiintyvät haitta-aineet (Niitä on käsitelty luvussa 3 "Haitalliset aineet valurautoissa") voivat aiheuttaa poikkeuksellisia grafiittimuotojen kiteytymisen.

Sula rauta voi liuottaa moninkertaisen määrän kaasuja verrattuna jähmeään rautaan. Sulaan metalliin voi liueta vetyä tai typpeä, jotka erottuvat metallista sen jähmettyessä. Hapettuneessa raudassa olevan oksidin (FeO, MnO) ja hiilen välisestä reaktiosta syntyy hiilimonoksidia (CO). Jos nämä kaasut eivät pääse poistumaan raudan jähmettyessä, aiheuttavat ne kaasuhuokosia valurautaan. Lisäksi sulan metallin ja muottimateriaalien väliset reaktiot voivat aiheuttaa kaasuhuokosia. Liuenneet kaasut voivat tehdä valukappaleen kauttaaltaan huokoiseksi tai ne muodostavat kapillaarihuokosia.

### **Mikrorakenteen viat**

Kiteytymistapansa erikoisuudesta ja sen herkkyystään jäähtymisnopeuden vaihteluille johtuen saavutettu mikrorakenne voi poiketa tavoitellusta normaalista rakenteesta. Tavallisimmat virheellisydet ovat:

- kuohugrafiitin esiintyminen
- karkea rakenne
- osittain tai kokonaan valkea rakenne
- ja poikkeukselliset grafiittimuodot.

Kuohugrafiitti on aina koostumusvirheen seuraus eli on toimittu liian korkealla hiilielivivalenttiarvolla. Ohuissa kappaleissa CE arvon on oltava alle 4,8 % ja paksuissa alle 4,5 %. Kuohugrafiitti erottuu raudan pinnalle ja sitä voi erottua myös muotissa raudan jäähtyessä. Kuohugrafiitti huonontaa raudan juoksevuutta ja voi aiheuttaa valukanavien tukkeutumista. Valukappaleen yläpinnat ovat kuoppaisia ja lisäksi kuohugrafiitti voi aiheuttaa kuonasulkeumia kappaleen sisälle.

Karkea kiderakenne tulee tavallisesti havaituksi työstön yhteydessä siten, että ei ole mahdollista saada hyvää sileää työstöjälkeä. Syynä on seinämänpaksuuteen verrattuna liian korkea hiilielivivalenttiarvo, usein ylieutektisen raudan käyttö paksuseinämisissä kappaleissa. Joskaan kuohugrafiittikasautumia ei vielä esiinnykään, voi hieessä jo olla mikroskoopilla nähtävissä suoraan sulasta erottunutta C-tyyppin primäärigrafiittia. Vaikka lujuusnäkökohdat eivät sitä vaatisikaan, täytyy suurta hiilielivivalenttiarvoa välttää paksuissa kappaleissa, jotta vältetään rosoisesta työstöjäljestä.

Osittain tai kokonaan valkea kiderakenne on seuraus joko seinämänpaksuuteen tai jäähtymisnopeuteen nähden liian pienestä hiilielivivalenttiarvosta, ylikuumennuksen aiheuttamasta kiteytymisytimien kadosta, mangaanilla tasapainottamattomasta rikkipitoisuudesta, karbideja stabiloivien seosmetallien (Cr, Mo, V, Mn) läsnäolosta taikka yksinkertaisesti liian suuresta jäähtymisnopeudesta. Kiteytymisytimien katoa voi tapahtua sulatuksessa ja kuumenapidosissa induktiouuneissa, mutta lievemmin muissakin laitteissa, joissa rautaa pidetään ylikuumassa tilassa pitempiä aikoja. Kiteytymisytimien puuttuessa tapahtuu valkeaksi jähmettyminen ohuehkoissa kappaleissa vieläpä erittäin ylieutektisillakin koostumuksilla. Ympäryksen tarkoituksena on edistää grafiitin ytimenmuodostusta ja saada valurautaa jähmettymään harmaana ja pienikiteisenä. Liian suuresta jäähtymisnopeudesta johtuvia paikallisesti vaikuttavia tekijöitä voivat olla mm. jäähtytyskappaleet. (Alla on vielä muistilista asioista, joka edistävät valuraudan jäähtymistä harmaana.)

Eräät epäpuhtautena esiintyvät haitta-aineet (Niitä on käsitelty enemmän luvussa "Rautametallien sulatuksen raaka- ja apuaineet" kohdassa "Haitalliset aineet valurauodoissa") voivat aiheuttaa poikkeuksellisia grafiittimuotojen kiteytymisen. Tästä aiheutuu erittäin alhaiset lujuusarvot. Esimerkiksi suomugrafiittivalurauodoissa pienetkin pitoisuudet Te, Bi ja Pb voivat johtaa lujuutta alentavan verkkomaisen Widmanstätten-grafiitin erkautumiseen. Pallografiittivaluraudan palloutumista ehkäiseviä aineita ovat Pb, Bi, Sb, Ti, Te, As, Al ja Se. Pallografiitin muodostumista voi ehkäistä myös liian korkea tai matala Mg-pitoisuus, korkea rikkipitoisuus ja karbidoivat seosaineet.

Valuraudan jäähtymistä harmaana edistävät:

- Hiiliekvivalentin suuri arvo: Hiiliekvivalentti  $CE = C \% + 1/3(Si \% + P \%)$ . Binäärisessä rauta-hiili-olotilapiirroksessa on eutektinen piste hiilipitoisuudella 4,3 %. Jos seoksessa on piitä ja fosforia, niin ne siirtävät eutektista pistettä vasemmalle pienempiin hiilipitoisuuksiin. Hiilen liukoisuus siis pienenee piin ja fosforin vaikutuksesta. Harmaissa valurauodoissa on keskimäärin noin 3,4 % hiiltä ja noin 2,2 % piitä. Fosforipitoisuus on yleensä alle 1 %. Jos raudan hiili- ja piipitoisuutta pienennetään, saadaan rauta lujemmaksi. Samalla raudan taipumus jäähtyä valkoisena lisääntyy ja imuonteloiden synnyn mahdollisuus kasvaa.
- Hidas jäähtymisnopeus: Ohuet seinämät jäähtyvät muotissa nopeammin kuin paksut osat ja voivat jähmettyä valkoisina muun osan jähmettyessä harmaana. Nopeasti jäähtyvät osat valukappaleesta ovat aina kovempia ja lujempia kuin hitaasti jäähtyvät osat, vaikka ne jähmettyisivätkin harmaina. Tätä rautavalun ominaisuutta kutsutaan seinämäherkkyudeksi ja sitä voidaan käyttää myös hyväksi kun halutaan määrättyihin kohtiin kovaa kulutusta kestävää rakennetta jäähdyttämällä muottia esim. kokilleilla.
- Seosaineista hiilen ja piin lisäksi grafiitin muodostumista edistävät nikkeli, alumiini ja kupari. Vahvat karbidinmuodostajat kuten kromi, vanadiini, ja molybdeeni ehkäisevät grafiitin muodostusta. Epäpuhtautena esiintyvä rikki ehkäisee grafiitin muodostumista samoin kuin mangaani erikseen. Jos mangaania lisätään valurautaan rikin sitomiseen tarvittava määrä ( $Mn \% = 1,7 \times S \% + 0,3$ ), se edistää grafitoitumista eliminoidessaan rikin vaikutuksen.
- Ympäryys suoritetaan lisäämällä ympäryysaineita CaSi, SiC tai kuten tavallista FeSi ennen valua valusenkkaan. Lisäksi on yleensä vielä suoritettava ns. elvytysympäryys lisäämällä ympäryysainetta valusuihkuun ja mahdollisesti vielä muottiin. Deoksidaation tuloksena syntyvät oksidiset sulkeumahiukkaset toimivat grafiitin kiteytysytiminä, jonka seurauksena valurauta jähmettyy harmaana silloinkin kun hiiliekvivalentti on niin pieni, että rauta muuten jähmettyisi valkoisena.

### **Kaasuhuokoisuus**

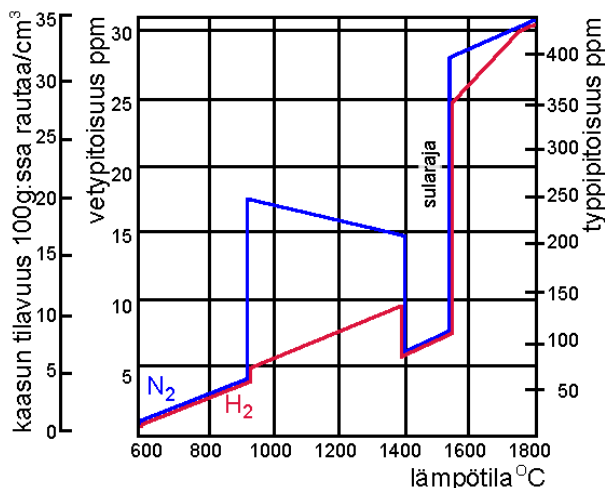
Sula rauta voi liuottaa moninkertaisen määrän kaasuja verrattuna jähmeään rautaan. Sulaan metalliin voi liueta vetyä tai typpeä, jotka erottuvat metallista sen jähmettyessä. Hapettuneessa raudassa olevan oksidin (FeO, MnO) ja hiilen välisestä reaktiosta syntyy hiilimonoksidia (CO). Jos nämä kaasut eivät pääse poistumaan raudan jähmettyessä, aiheuttavat ne kaasuhuokosia valurautaan. Lisäksi sulan metallin ja muottimateriaalien väliset reaktiot voivat aiheuttaa kaasuhuokosia. Liuenneet kaasut voivat tehdä valukappaleen kauttaaltaan huokoiseksi tai ne muodostavat kapillaarihuokosia. Kapillaarihuokosilla tarkoitetaan valukappaleen pintakerrokseen muodostuvia, tavallisesti pitkänomaisia ja dendriittien kasvun mukaisesti kohtisuoraan valupintaan nähden suuntautuvia kaasutäyhteisiä onteloita.

Kaasut, jotka aiheuttavat huokosia, syntyvät useista eri lähteistä. Vetyä syntyy lähinnä veden hajoamisen tuloksena tai muista vetyä sisältävistä aineista. Typpeä voi absorboitua ilmasta metalliin sulatuksen aikana. Sulat rautametallit liuottavat vetyä ja typpeä sitä enemmän mitä korkeampi on metallin lämpötila (Kuva 1). Valurauodoissa lisääntyvä hiili- ja piipitoisuus vähentävät kaasujen liukenevuutta. Eräät seosmetallit, mm. mangaani sen sijaan lisäävät liukenevuutta, (Kuva 2). Valuraudan jähmettyessä kaasujen liukoisuus metalliin huononee nopeasti ja ylimäärä kaasuista erottuu olosuhteista riippuen erikokoisina kaasurakkuloina.

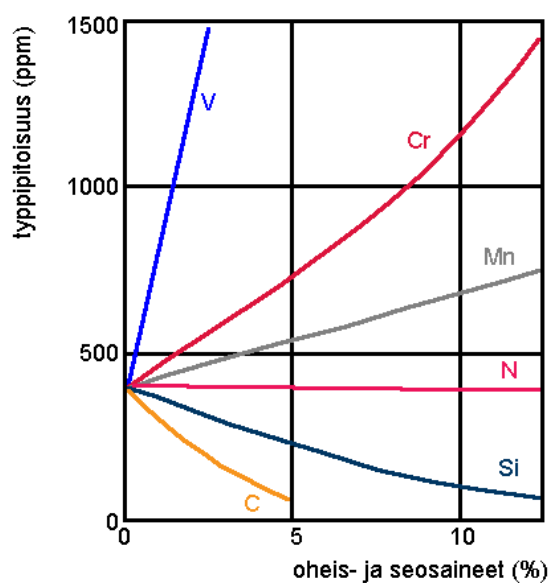
Perussy kaasuhuokosten syntyyn on rautaan liunneen hapen reagointi hiilen kanssa, sillä tämä reaktio synnyttää hiilimonoksidia. Jos CO-kuplat eivät pääse erottumaan jähmettyvästä sulasta, synnyttävät ne huokosia, joihin vety ja typpi voivat diffundoitua ja lisätä näin huokoisuutta. Jos CO-kuplia ei synny, jäävät muiden kaasujen vaikutukset usein pieniksi.

Magnesiumkäsittelyn ja ympäyksen jälkeen pallografiittivaluraudan kaasupitoisuus on pieni, mutta jäännösmagnesium ja -alumiini tekevät sen alttiiksi myöhemmin tapahtuville muotin seinämän ja metallin välisille reaktioille sekä vedyn liukenemiselle.

Raudan jäännösalmiini on pyrittävä rajaamaan 0,02 %. Lisäksi on kiinnitettävä huomiota siihen, että valuastiat ovat hyvin kuivatut ja vältettävä kaavaushiekan liiallista kosteutta.



Kuva 1. Veden ja typen liukoisuus teräkseen eri lämpötiloissa.



Kuva 2. Hiilen, piin ja eräiden seosaineiden vaikutus typen liukoisuuteen rautaan 1600 °C:een lämpötilassa ja 1 bar:n paineessa.

**Typpi.** Sulaan valurautaan voi liueta typpeä noin 400 ppm. Tavallisesti valuraudan typpipitoisuus on alueella 10–150 ppm. Jo 100ppm:n typpipitoisuus aiheuttaa yleensä kaasuhuokoisuutta. Sulaan valurautaan tulee typpeä pääasiassa kolmesta eri lähteestä:

- panosraaka-aineista
- ilmakehästä
- sulankäsittelyn aikana hiiletysaineista tai ferroseoksista

Kaikki raaka-aineet sisältävät vaihtelevia määriä typpeä. Erityisen runsastyppisiä voivat olla eräät hiiletysaineet kuten petrolikoksi. Myös ferroseoksissa on tavallisesti runsaasti typpeä. Myös sulaustapa vaikuttaa selvästi raudan typpipitoisuuteen, esim. kupoliuuniraudassa on sitä enemmän typpeä mitä suurempi on panoksen teräsromuus.

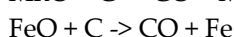
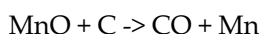
**Vety.** Vedyn liukoisuus on vähäisempää kuin typen. Sulassa valuraudassa voi olla korkeintaan 20–30 ppm vetyä. Tavallisesti vetypitoisuus on paljon pienempi eikä saisi ylittää 0,8–1,8 ppm, jos halutaan olla varmoja virheettömistä valukappaleista. Kaasujen summavaikutus erityisesti läsnäolevan CO:n kanssa voi kuitenkin aiheuttaa huokosia, vaikka mitään kaasulajia yksin ei olisi liian paljon.

Valurauudoissa esiintyvä vety on aina lähtöisin vedestä. Sula metalli hajottaa veden, jolloin siitä syntyvä vety liukenee osittain metalliin ja happi muodostaa metallioksiedeja. Vetyä tulee valurautoihin kosteista seosaineista, huonosti kuivatuista uunin vuorauksista ja valusenkoista sekä kosteista muoteista. Suuri ilman kosteus voi erityisesti induktiouunisulatuksissa nostaa sulan vetypitoisuutta. Jo 1 cm<sup>3</sup> vettä muodostaa hajotessaan 110 mg vetyä, joka liuotessaan 100 kg:aan rautaan nostaa sen vetypitoisuuden 1,1 ppm:n tasolle eli vaara-alueelle.

Myös teräsromun määrän panoksessa on todettu lisäävän raudan vetypitoisuutta. Mitä alhaisemalla CE-arvolla rautaa sulatetaan, sitä suurempi taipumus sillä on huokosiin. Alumiini ja vahvat pelkistimet lisäävät vedyn liukoisuutta sulaan rautaan. Jo 0,05 %:n alumiinipitoisuus voi olla vaarallinen. Mainittakoon, että se alumiinimäärä, joka ympäyksen yhteydessä joutuu alumiinipitoisesta FeSi:stä rautaan, jää normaalisti tämän rajan alapuolelle. Alumiinin pääsy rautaan pitää estää ensinnäkin panosmateriaalin huolellisella valinnalla ja toiseksi liiallista alumiinipitoisen ympäysmateriaalin käyttöä on vältettävä.

Happi- tai malmimellotuksella voidaan sulan vetypitoisuutta laskea. Vety saadaan poistumaan valurauudoista ja teräksistä jo pitempiaikaisella varastoinnilla huoneenlämmössä ja parin tunnin lämmityksellä 50–100 °C:ssa.

**Hiilimonoksidi.** Hapettumisen seurauksena muodostuu raudassa rauta- ja mangaanioksiedeja (FeO, MnO), jotka raudan jähmettyessä reagoivat raudan hiilen kanssa synnyttäen hiilimonoksidia:



Hiilimonoksidi erottuu raudasta aiheuttaen huokosia. Tällöin voivat typpi ja vety, jos niitä on runsaasti läsnä, diffundoitua CO-kupliin ja kasvattaa vian suuruutta. CO-kuplat toimivat täten eräänlaisina alkuytiminä, jotka laukaisevat muiden kaasujen erottumispaineen. Jos CO-kuplia ei synny, jää muiden kaasujen vaikutus usein pieneksi.

### Kapillaarihuukokset

Kapillaarihuukosten välttämiseksi olisi raudan sulatuksessa kiinnitettävä huomio mm. seuraaviin seikkoihin:

- Mitä suurempi on raudan Si/Mn-suhde sitä pienempi on sen taipumus kapillaarihuukosiin. Jos rauta täyttää ehdon: Si % - Mn % > 0,5, ei rauta yleensä muodosta kapillaarihuukosia.
- Raudan suuri mangaani- ja rikki-pitoisuus lisäävät kapillaarihuukosten syntymisvaaraa. Rikkipitoisuuden kompensoimiseen yleisesti suositeltu ohje Mn % = 1,7 × S % + 0,35, ei saisi johtaa siihen, että Mn-pitoisuus 0,65 % ja S-pitoisuus 0,12 % ylitettäisiin.
- Kapillaarihuukosten primäärinen syy on rauta- ja mangaanioksidien (FeO, MnO) reagointi muotissa raudan hiilen kanssa, jolloin syntyy kapillaarihuukoisuutta edistävää hiilimonoksidia. Rauta- ja mangaanioksidien syntymistä on tästä syystä pyrittävä välttämään sulatuksen aikana. Jos rauta joudutaan kuumentamaan lämpötilaan, jossa se hapettuu joko ilman hapen vaikutuksesta tai kuonan ja vuorauksen pelkistymisen seurauksena, on rauta tehokkaasti ympättävä ennen valua liiallisen hapen poistamiseksi.
- Varottava raaka-aineita, jotka sisältävät typpeä.
- Alumiinipitoista romua vältettävä.
- Uunien vuorauksen, valuastioiden ym. on oltava ehdottomasti kuivia.

## Sulkeumat

**Kuonasulkeumat.** Kuonasulkeumia voi muodostua valukappaleeseen, jos kuona pääsee muottiin sulan metallin mukana tai kuonaa muodostuu valun aikana.

Uunikuonan pääsy valusenkaan ja edelleen muottiin on estettävä kuonavikojen välttämiseksi. Parhaiten kuonan pääsy muottiin voidaan estää ns. teekannusenkkojen avulla, joista sula rauta valetaan kuonapinnan alta. Kuonan pääsyä muottiin voidaan estää myös muottiin asennettävien keraamisten suodattimien avulla.

Runsaasti mangaania ja rikkiä sisältävät valuraudat muodostavat herkkäliikkeisiä sulia kuonia, jotka raudan jähmettyessä erottuvat valukappaleiden yläpinnoille muodostaen oksideja ja sulfideja käsittävän kuonakerroksen. Mitä suurempi on Si/Mn suhde, sitä vähemmän syntyy oksidirikasta kuonaa ja sitä pienempi on myös raudan taipumus muodostaa kapillaarihuokosia.

Pallouttamiskäsittelyn yhteydessä rautaan lisätty magnesium reagoi raudassa olevan rikin ja hapen kanssa muodostaen magnesiumsulfidia MgS ja -oksidia MgO. Rautaan liuenut jäännösmagnesium reagoi sulan raudan paljaana olevalla pinnalla jatkuvasti ilman hapen kanssa muodostaen lisää magnesiumoksidia. Näin muodostunutta kuonaa poistetaan ja estetään pääsemästä muottiin tavanomaisia kuonanerotusmenettelytapoja noudattaen, mutta koska magnesiumoksidia muodostuu jatkuvasti, ovat vaikeudet suuremmat kuin tavallisen kuonan ollessa kysymyksessä. Muottiin joutuneena - ja sitä voi vielä muotissa sen täyttämisen aikana muodostua lisää - on reaktiokuonalla taipumus kohota muotin yläpinnalle, missä se muodostaa pintavikoja ja sulkeutumia. Putoavan, pyörteisen valun yhteydessä kalvosulkeutumia jää kappaleen muihinkin osiin, varsinkin valulämpötilan ollessa alhainen.

Reaktiokuonavikojen välttämiseksi tulisi:

- perusraudan rikkipitoisuuden olla mahdollisimman alhainen
- valita magnesiumseos ja lisäystapa siten, että saavutetaan hyvä magnesiumin saanto
- välttää suurempaa jäännösmagnesiumpitoisuutta kuin tarvitaan grafiitin varmaan pallouttamiseen
- käyttää tehokkaita kuonan erotustapoja raudan käsittelyssä ja valussa välttää putoavaa ja pyörteistä valua, sekä pyrkiä rauhallisesti nousevaan valuun.

## Valuterästen sulaperäiset valuviat

---

Epämetallisten sulkeumien aiheuttamat pintaviat ovat teräsvalukappaleissa tavallinen ongelma. Ne lisäävät valujen viimeistelyhitaustarvetta ja työstökustannuksia ja pahimmassa tapauksessa saattavat aiheuttaa kappaleen hylkäämisen. Pintavioilla on tunnetusti useita mahdollisia aiheuttajia, sekä sulasta että sulan kanssa kosketuksessa olevista materiaaleista lähtöisin olevia. Tyypillisiä pintavikojen aiheuttajia ovat reoksidaatio (sulan hapettuminen varsinkin muottiin kaadon aikana), sulan aiheuttama valukanaviston ja muotin eroosio sekä senkkakuonasta ja senkan vuorauksesta lähtöisin olevat epäpuhtaudet. Tämän lisäksi kaasut osallistuvat pintavikojen muodostukseen. Liuenneet kaasut voivat tehdä valukappaleen myös kauttaaltaan huokoiseksi.

Valusenkassa suoritettavalla teräksen loppupelkistyksellä on suuri vaikutus teräsvalukappaleiden laatuun. Teräkseen jäävästä happipitoisuudesta riippuu mm. sulfiditulkeumien muoto sekä taipumus kapillaarihuokosten muodostumiseen. Tavoitteena on estää ns. II-tyyppin sulfidien synty, jotka muodostavat yhtenäisiä kalvoja raerajoille ja voivat aiheuttaa valukappaleisiin kuumarepeämiä. Teräksen deoksitoinnilla voi olla myös merkittävä rooli valuvikojen synnyssä. Liiallisen alumiinin käytön seurauksena voi olla alumiininitridien syntyminen, jotka aiheuttavat haurautta erkautessaan raerajoille. Riittämätön deoksidointi puolestaan johtaa kaasuvikojen ohella II-tyyppin

sulfidisulkeumiin. Paitsi sulkeumien muoto ja ryhmittyminen vaikuttaa lujuusominaisuuksiin luonnollisesti myös niiden paljous.

## Sulkeumat

**Sulfidi- ja oksidisulkeumat.** Sulfidisulkeumat luokitellaan muodon ja ryhmittymisen mukaan seuraavasti:

- **Tyyppi I:** Eri kokoisia pallomaisia sulkeumia hajallaan raerakenteessa.
- **Tyyppi II:** Sulfidit esiintyvät primääridendriittien raerajoilla joko pienien hiukkasten muodostamina helminauhamaisina ketjuina tai yhtenäisinä kalvoina.
- **Tyyppi III:** Sulfidit esiintyvät hajaryhmityksessä kulmikkaina rakeina; toisinaan on joukossa alumiinioksidikiteitä.

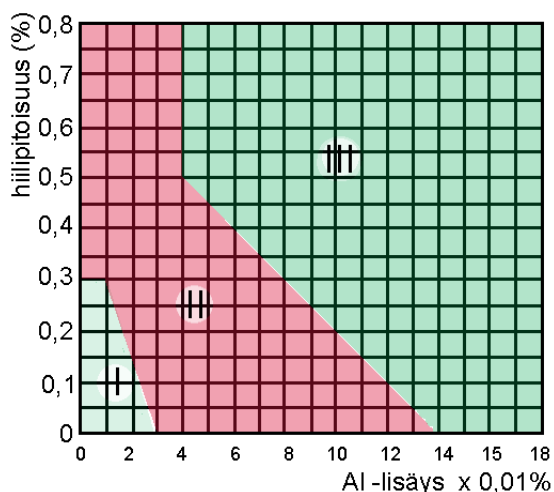
Eri sulfidityypit vastaavat suunnilleen seuraavia hapen jäännöspitoisuuksia:

1. yli 0,012 % (120 ppm)
2. 0,012–0,008 % (120-80 ppm)
3. alle 0,008 % (80 ppm)

Loppupelkistyksellä saadaan teräksen happipitoisuus entisestään vähentymään ja valukappaleiden huokoisuusvaara pienenemään. Teräkseen jäävästä happipitoisuudesta riippuu mm. sulfidisulkeumien muoto sekä taipumus kapillaarihuokosten muodostumiseen. Hyvien lujuusominaisuuksien saavuttamiseksi on loppupelkistys pyrittävä suorittamaan siten, että saadaan joko tyyppin I tai III sulfidisulkeumia. II-tyypin sulfidien synty on estettävä, koska ne muodostavat yhtenäisiä kalvoja raerajoille ja voivat aiheuttaa valukappaleisiin kuumarepeämiä. Koska sulfidisulkeumien määrä riippuu teräksen rikkipitoisuudesta, on ymmärrettävää, että pyrkimällä mahdollisimman alhaiseen rikkipitoisuuteen saavutetaan parempia mekaanisia ominaisuuksia. Varsinkin sitkeys paranee.

Pelkistysmenettelyä, joka pyrki tyyppin I sulkeumiin, ei yleisesti käytetä. Tämä menettelytapa sopisi lähinnä teräksille, joiden kaasupitoisuus on erittäin alhainen. Emäksisesti sulatetut teräkset sisältävät yleensä runsaammin vetyä, joka tyyppin I sulkeumien edellyttämän heikon pelkistykseen takia voisi edistää kapillaarihuokosten muodostuksen vaaraa. Mikäli kuitenkin pyrittäisiin tyyppin I sulkeumiin, mitä voi suosittaa ainoastaan alle 0,3 % hiilipitoisuuksilla, on käytettävä alumiinimäärä vain 0,01–0,02 %. Alumiinilisäys on silloin varsin kriittinen, sillä pienikin ylitys johtaa tyyppi II sulkeumien esiintymiseen.

Kaikille teräksille, joiden hiilipitoisuus on yli 0,5 %, käytetään loppupelkistykseen 0,04 % alumiinia. Alle 0,5 % hiilipitoisuuksilla ovat alumiinilisäykset suuremmat, 0,04–0,12 %. (Kuva 3) Koska alumiinin pelkistyskyky heikkenee hiilipitoisuuden aletessa, ei alle 0,2 % hiilipitoisuuksilla saavuteta yksinomaan alumiinia käyttäen riittävän matalaa happipitoisuutta, vaan alumiinipelkistystä on vielä täydennettävä kalsiumpii- tai kalsiumpiimangaanilisäyksellä, jonka suuruus on 0,1–0,15 %.



Kuva 3. Ohjediagrammi teräksen loppupelkistykseen tarvittavan alumiinilisäyksen määrittämiseksi. Alle 0,2 % hiilipitoisuuksilla alumiinipelkistystä on vielä täydennettävä kalsiumpii- tai kalsiumpiimangaani -lisäyksellä, jonka suuruus on 0,1–0,15 %.

Loppupelkistykseen käytettyjen aineiden oksideja voidaan tavata valukappaleessa sulkeumina. Loppupelkistyksessä ei päästä niin matalaan kokonaishappitasoon eli oksidisulkeumapitoisuuteen, ettei sulkeumilla olisi merkitystä. Lisäksi matalahappinen teräs aina enemmän tai vähemmän reoksidoituu sekä senkkäkäsittelyssä että valuvaiheessa. Siksi on otettava lisäksi huomioon syntyneiden sulkeumien poistaminen ja reoksidaation eli uusien sulkeumien syntymisen estäminen. Teräksen sulkeumakoostumus määräytyy periaatteessa sulan deoksidaatioaineiden pitoisuuksien perusteella. Esimerkiksi alumiinitiivistetyllä teräksellä oksidisulkeumat ovat alumiinioksideja. Käytännössä deoksidaatio- ja reoksidaatioreaktioihin osallistuvat useat alkuaineet, jolloin sulkeumien tasapainokoostumus on vastaavasti usean komponentin yhdistelmä. Koska ne ovat varsin kovia kuten alumiinioksidikin, on niillä vaikutusta työstettävyyteen. Paitsi sulkeumien muoto ja ryhmittyminen vaikuttaa lujuusominaisuuksiin luonnollisesti myös niiden paljous.

Loppupelkistysaineiden tarpeettoman runsasta käyttöä vältettävä. Tämä koskee erityisesti alumiinia. Pelkistyksessä ylijäänyt osa alumiinia muodostaa teräksessä olevan tyypin kanssa alumiininitridiä, joka kalvoina erottuu primääridendriittien raerajoille lujuutta alentaen. Kaasuhuokoisuuden ja epäedullisten tyyppi II sulfidisulkeumien vaara toisaalla sekä primääriraerajamurtuman vaara toisaalla asettavat loppupelkistykseen käytettävän alumiinin määrälle sekä ala- että ylärajan.

### Kuonasulkeumat

Kuonasulkeumia voi muodostua valukappaleeseen, jos kuona pääsee muottiin sulan metallin mukana tai kuonaa muodostuu valun aikana.

Uunikuonan pääsy valusenkkään ja edelleen muottiin on estettävä kuonavikojen välttämiseksi. Parhaiten kuonan pääsy muottiin voidaan estää ns. teekannusenkköjen avulla, joista sula teräs valetaan kuonapinnan alta. Kuonan pääsyä muottiin voidaan estää myös muottiin asennettavien keraamisten suodattimien avulla.

Valun aikana muodostuvia kuonasulkeumia synnyttävät myös pyörteellinen valu, suuret mangaani-, pii- ja happipitoisuudet.

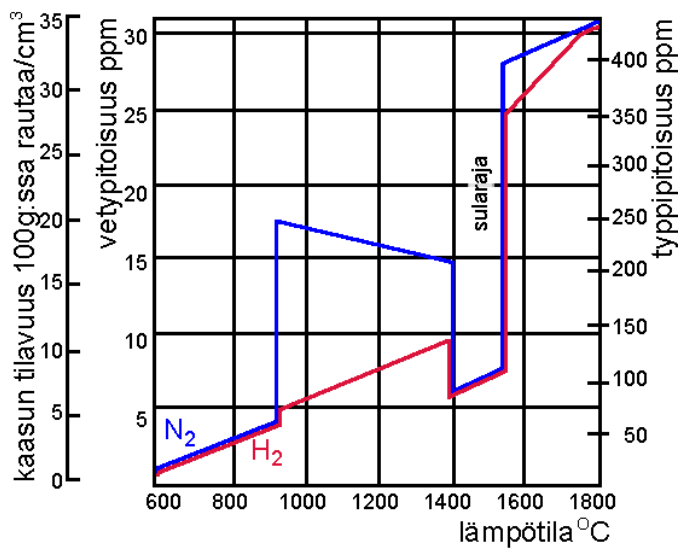
### Kaasuhuokoisuus

Sula teräs voi liuottaa moninkertaisen määrän kaasuja verrattuna jähmeään teräkseen. Sulaan metalliin voi liueta vetyä tai tyypeä, jotka erottuvat metallista sen jähmettyessä. Hapettuneessa teräksessä olevan oksidin (FeO, MnO) ja hiilen välisestä reaktiosta syntyy hiilimonoksidia (CO). Jos nämä kaasut eivät pääse poistumaan teräksen jähmettyessä, aiheuttavat ne kaasuhuokosia. Lisäksi sulan metallin ja muottimateriaalien väliset reaktiot voivat aiheuttaa kaasuhuokosia. Liuenneet kaasut voivat tehdä valukappaleen kauttaaltaan huokoiseksi tai ne muodostavat **kapillaarihuokosia**.

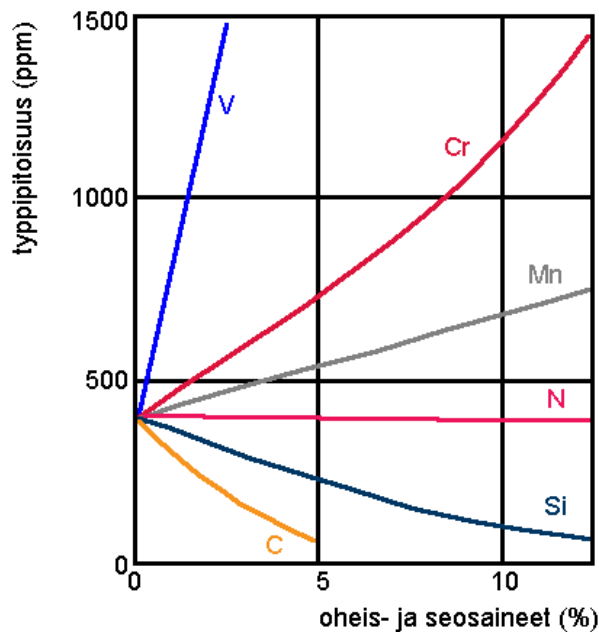


Kaasut, jotka aiheuttavat huokosia, syntyvät useista eri lähteistä. Vetyä syntyy lähinnä veden hajoamisen tuloksena tai muista vetyä sisältävistä aineista. Tyypeä voi absorboitua ilmasta metalliin sulatuksen aikana. Sulat rautametallit liuottavat vetyä ja tyypeä sitä enemmän mitä korkeampi on metallin lämpötila (Kuva 4). Eräät seosmetallit, mm. mangaani lisäävät liukenevuutta, (Kuva 5). Teräksen jähmettyessä kaasujen liukoisuus metalliin huononee nopeasti ja ylimäärä kaasuista erottuu olosuhteista riippuen erikokoisina kaasurakkuloina.

Perussy kaasuhuokosten syntyyn on metalliin liuenneen hapen reagointi hiilen kanssa, sillä tämä reaktio synnyttää hiilimonoksidia. Jos CO-kuplat eivät pääse erottumaan jähmettyvästä sulasta, synnyttävät ne huokosia, joihin vety ja typpi voivat diffundoitua ja lisätä näin huokoisuutta. Jos CO-kuplia ei synny, jäävät muiden kaasujen vaikutukset usein pieniksi.



Kuva 4. Vedyn ja typen liukoisuus teräkseen eri lämpötiloissa.



Kuva 5. Vedyn ja typen liukoisuus teräkseen eri lämpötiloissa.

Kapillaarihuokosilla tarkoitetaan valukappaleen pintakerroksen muodostuvia, tavallisesti pitkänomaisia ja dendriittien kasvun mukaisesti kohtisuoraan valupintaan nähden suuntautuvia kaasutäytteisiä onteloita. Joskin vian syntyy aina vaikuttavat muotin pinnan ja terässulan väliset reaktiot, liittyy se myös sulatukseen ja varsinkin läheisesti loppupelkistykseen. Kapillaarihuokosten

syntyyn osallistuu useita erilaisia reaktioita, joiden keskinäinen osuus on erilainen eri metalliseoksilla, kuten valuteräksillä, valuraudoilla, kupariseoksilla ja kevytmetalleilla. Käytännön vaikeutena on ettei ole olemassa yksinkertaista nopeaa keinoa terässulan happipitoisuuden määrittämiseksi ennen loppupelkistetyistä. Tarvittavan alumiinimäärän oikea arviointi on vaikeaa, varsinkin kun taipumus primääriraerajamurtumaan uhkaa lisätyn alumiinimäärän ollessa liian suuri.

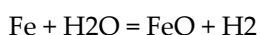
Mahdollisina kapillaarihuokosia aiheuttavina syinä on otettava huomioon:

- teräkseen liennut vety
- teräkseen liennut typpi
- raudan ja vesihöyryn välinen reaktio ja
- teräksessä liuenneena olevan rautaoksidin ja hiilen välinen reaktio.

**Vety.** Vety ei yksinään voi aiheuttaa teräsvalussa luonteenomaisia pinnanalaisia kapillaarihuokosia. Jos teräs on riittävästi alumiinilla pelkistetty, ei kapillaarihuokosia tule vaikka vetypitoisuus olisi suurikin. Dendriittien muodostuessa teräksen jähmettyessä vety rikastuu jäännössulaan, ja kun liukoisuusraja on ylitetty, muodostuu rakkuloita, jotka kuitenkin eivät ole ominaisia kappaleen pintakerroksille, vaan sisäosa on kauttaaltaan huokoinen. On kuitenkin aivan selvää, että jos muiden kaasujen aiheuttamana syntyy kapillaarihuokosia, erottuu myös vety näihin ja vaikuttaa siten vian alttiutta lisäävänä osatekijänä.

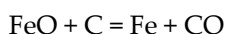
**Typpi.** Liunneen typen määrä on seostamattomassa teräksessä tavallisesti pieni. Se esiintyy sulassa teräksessä nitrideinä eikä vapaan typen muodostumisen vaara jähmettymisen yhteydessä ole erittäin suuri. Suurehkot tyypipitoisuudet ovat ominaisia teräksille, jotka sisältävät nitridejä muodostavia seosmetalleja kuten kromia, alumiinia tai titaania. Eräät keernan sideaineet ja niiden kovetteet sisältävät typpiyhdisteitä. Ne hajoavat valun yhteydessä muodostaen typpeä, joka liukenee teräkseen. Ylittäessään läsnäolevia nitridejä muodostavia seosaineita vastaavan määrän erottuu typpikaasua teräksen jähmettyessä aiheuttaen läpikotaisen kaasuhuokoisuuden kuten runsas vety-  
määräkin. Sekä terässulassa ollut että sideaineista peräisin oleva typpi on kuitenkin tavallisesti osatekijän asemassa, eikä typpeä sisältävien sideaineidenkaan käytöstä tarvitse seurata, että kapillaarihuokosia aina muodostuisi, mutta alttius kyllä lisääntyy.

**Vesihöyry.** Vesihöyry ei liukene terässulaan. Valun yhteydessä sitä muodostuu muotin kosteuden höyrystyessä. Korkeissa lämpötiloissa rauta hajottaa vesihöyryä seuraavan yhtälön mukaisesti:



Ko. reaktio on selvä osasyys kapillaarihuokosten muodostumisessa. Liennut vetykaasu lisää edellä selostetulla tavalla kapillaarihuokosten muodostumisalttiutta, ja kuten seuraavaksi selostetaan, on rautaoksidin muodossa teräkseen liennut happi kapillaarihuokosten pääasiallinen aiheuttaja. Kapillaarihuokokset ovat nimenomaan tuorehiekkamuotteille ominainen vika, jota kuiviin muotteihin valetuissa kappaleissa harvoin tavataan.

**Rautaoksidin ja hiilen reaktio.** Happi esiintyy terässulassa siihen liuenneena rautaoksidina FeO tai liukenemattomina oksideina kuten piidioksidina SiO<sub>2</sub>, mangaanioksidina MnO ja alumiinioksidina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Näistä hiilen vaikutuksesta pelkistyy helpoimmin rautaoksidi, koska se on teräksessä liuenneena ja rikastuu jähmettymisen yhteydessä jäännössulaan. Rautaoksidin pelkistyminen tapahtuu yhtälön



mukaan. Muodostunut hiilimonoksidi erottuu rakkuloina, joihin edellisessä kappaleessa mainittu vesihöyryreaktiossa vapautuva ja teräkseen liukeneva vety myös diffundoituu. Koska vesihöyryreaktio tapahtuu juuri muotin seinämän ja teräksen rajapinnalla, kasvavat rautaoksidi- ja vetypitoisuudet juuri kappaleen pintakerroksessa ja saavuttavat kriittisen tason rikastuessaan kappaleen pintaan nähden kohtisuoraan kasvavien dendriittien väliin jäävään jäännössulaan. Silloin alkaa muodostua pieniä hiilimonoksidirakkuloita, joihin myöskin liennut vety erottuu.

Kapillaarihuokosien synnyn edellytys on siis teräkseen liuenneen hapen läsnäolo. Jos teräs on jo uunista kaadettaessa erittäin alhaiseen hapen arvoon pelkistettyä, eikä se saa hapetta myöhemminkään, kosteasta tai oksidikuonaisesta valuastiasta, ilmasta tai muotista, ei kapillaarihuokosiakaan synny.

Tuoremuottivalussa on huolehdittava ensinnäkin siitä, että teräksen happipitoisuus ennen sen muottiin joutumista on mahdollisimman alhainen ja että teräs kosketuksessaan muotin seinämään olisi mahdollisimman vähän alttiina hapen liukenemiselle, tapahtuipa se sitten vesihöyryreaktiosta, muotin pinnassa olevista oksideista tai valutavasta riippuen. Käytännöllisiä suosituksia ovat mm:

- Hiekan kosteuden tulee olla mahdollisimman alhainen.
- Rauta- ym. oksidit muotin pinnassa ovat haitallisia.
- Muotin pinnan peitostaminen alumiinijauheella estää teräksen hapettumista ja lieventää siten alttiutta.
- On vältettävä tyypeä sisältäviä keernan sideaineita.
- Muotin tulee täytyä mahdollisimman nopeasti.

Kapillaarihuokosten esiintymisalttiudella on selvä yhteys valettavien kappaleiden seinämänpaksuuteen. Huokosia ei esiinny aivan ohuissa eikä kovin paksuissa kappaleissa. Noin 10-40mm alueella näyttää vaara olevan suurin. Aivan ohuissa kappaleissa jähmettyy jo teräsvirtauksen kärjen myötä ohut teräskalvo muotin pintaan estäen vesihöyryn ja sulan teräksen kosketuksen. Paksuissa kappaleissa pysyy teräs muotissa sulana jonkin aikaa, ennenkuin pinta jähmettyy. Vesihöyryreaktio päättyy muotin pinnan hehkuessa kuivaksi. Muodostunut rautaoksidi ja vety liukenevat teräkseen, mutta voivat sen sulana ollessa sekoittua koko teräsmäärään ilman, että kriittisiä pitoisuuksia ylitetään missään kohdassa. Mitä alhaisempi teräksen happipitoisuus on sen joutuessa muottiin, sitä pienempi on vaara, että kriittinen vapaan hapen pitoisuus ylitetään kappaleen pintaosissa muotissa tapahtuvan vesihöyryreaktion vaikutuksesta.

Yhteenveto happipitoisuuden muutoksista sulan teräksen valmistuksessa:

- Sulatuksen mellotus- eli keittovaiheen aikana ja sen päättyessäkin on happipitoisuus suuri, valettuna teräs jähmettyisi läpikotaisin huokoiseksi.
- Sulatuksen loppuvaiheen aikana alennetaan happipitoisuutta aluksi lievempiä pelkistysaineita - ferromangaania ja ferropiitä (tai ferropiimangaania) - käyttäen.
- Välittömästi ennen kaatoa uunista tai sen aikana suoritetaan loppupelkistys. Hiilipitoisuuden ollessa yli 0,2 % riittää pelkistys alumiinilla, pienemmillä hiilipitoisuuksilla on alumiinilla pelkistuksen jälkeen vielä suoritettava täydentävä pelkistys kalsiumpiillä tai kalsiumpiimanganilla.
- Lähtökohtana alumiinin annostelulle voidaan pitää kuvan 3 ohjetta. Ellei valu voi tapahtua aivan välittömästi loppupelkistuksen jälkeen, on kuitenkin varauduttava alumiinijäämän pienenemiseen ja happipitoisuuden nousuun ilman hapen sekä valuastian seinämän vaikutuksesta, ja käytettävä hieman enemmän alumiinia. Korkeampi valulämpötila ja kosteampi muotti edellyttävät myös suurempaa alumiinimäärää.
- Kaikkien pintojen (kuten siirto- ja valuastiat), joiden kanssa teräs joutuu kosketukseen ennen joutumistaan muottiin, tulee olla ehdottoman kuivia, eikä niissä myöskään saa olla hehkuhilsettä eikä ruostetta.
- Reoksidoituminen on tapahtuma, jossa deoksidoidun sulan happimäärä kohoaa uudelleen. Erityisesti kaadettaessa sulaa senkasta muottiin valusuihku on alttiina hapettumiselle. Hapettumisen määrä riippuu seoksesta ja virtauksen pyörteellisyydestä. Erityisesti valettaessa pohjavalusenkoilla, JOS sulavirta pääsee "hajoamaan" (sen seurauksena, että stopparilla yritetään muuttaa sulan virtausnopeutta) on siinä suurempi pinta-ala, joihin kaasut voivat siirtyä.

## **Lähteet**

---

Arola Raimo - "Teräsvalujen kuonapuhautuden ja mekaanisten ominaisuuksien kehittäminen sulakäsittelyjen avulla"

Autere, Ingman & Tennilä - "Valimotekniikka I"

Toivonen Pentti - "Sulatustekniikka ja materiaalioppi"

Väinölä Reima - "Happi ja kuonapuhautus"

MET tekninen tiedotus 3/85 - "Valuvirhekäsikirja syyanalyysin"