



Sulan teräksen valmistus

Terästen valmistus ja ominaisuudet

3.10.2019

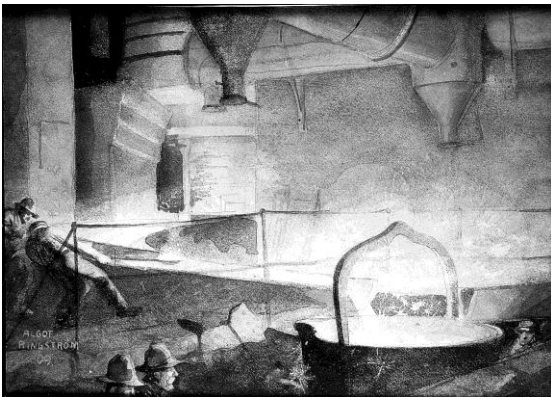
Eetu-Pekka Heikkinen

(eetu.heikkinen@oulu.fi)

Oulun yliopisto



Sisältö



Teräksenvalmistusta Nykroppassa, Värmlannissa, 1909.
 Algot Ringströmin akvarelli.
 Kuva: Jernkontoret.

Teräksen valmistuksen vaiheet

- Malmipohjainen teräksen valmistus

Terässulatto (malmipohjainen valmistus)

- Mellotus, konverterit
- Senkkäkäsittelyt
- Jatkuvalu

Keskeisimmät vaiheet muista tuotantoketjuista

- Romupohjainen teräksen valmistus
 - Valokaariuunit
- Ruostumattoman teräksen valmistus
 - AOD-prosessi

Sulkeumat

- Muodostuminen
- Muokkaus ja poisto

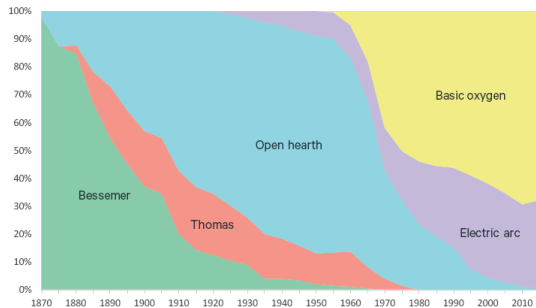
Yhteenveto

Oulun yliopisto



Perustelu tähän luentoon valituille prosesseille

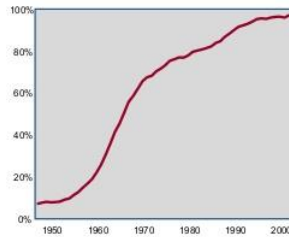
Figure 1. Percentages of global steelmaking processes 1870-2015.



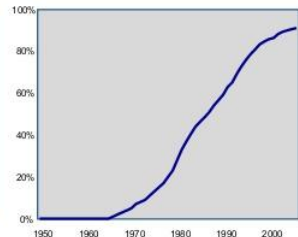
Valokaariuuni, LD-KG-konvertteri ja jatkuvavalu

Crude steel production is now almost exclusively produced via EAF or BOF and continuously cast

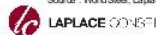
BOF + EAF crude steel production (% world total production)



Continuous casting evolution rate (% world crude steel production)



Source: WorldSteel, Laplace Conseil analysis



15



Oulun yliopisto

Lähde: M Åhman et al.: "Hydrogen steelmaking for a low-carbon economy – A joint LU-SEI working paper for the HYBRIT project". EESS report no 109. SEI working paper WP 2018-07. Stockholm Environment Institute & Lund University, 2018.



Malmipohjainen teräksen valmistus



Happipuhallus LD-konvertterissa SSAB:n Oxelösundin tehtailla Södermanlandissa, 2002.

Kuva: Stig-Göran Nilsson (Jernkontoretin arkisto).

(Raaka-aineiden esikäsittely)

- Rautarikasteen sintraus tai pelletointi
- Koksaus

Pelkistys ja sulatus: Masuuni

- Rautaoksidien pelkistys
- Hiilen liukeneminen pelkistyneeseen rautaan, sulaminen

Primääriuuni: LD-KG-konvertteri

- Piin ja hiilen poisto happipuhalluksella (mellotus)

Sekundäärimetallurgia: Senkkakäsittelyt

- Teräksen koostumuksen ja lämpötilan säätö
- Tasalaatuisuuden varmistaminen

Jatkuvavalu

- Teräksen jähmettyminen

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- **Oksidinen rautamalmi** (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- **Rautarikaste** (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus

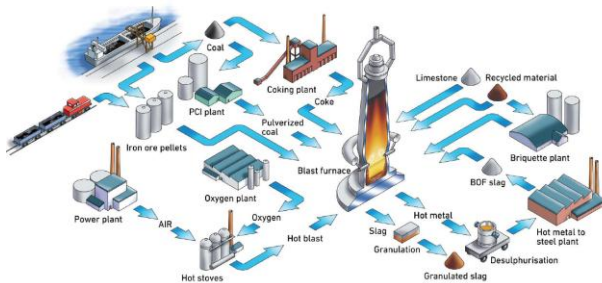


- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- **Rautarikastepelletti** (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus **masuunissa**
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- **Raakarauta** (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = **Mellotus**
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- **Terässula** (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- **Terässula** (rautaa)
- **Seostus, viimeistely, valu**
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- **Aihiot**
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- **Valssaus**, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus

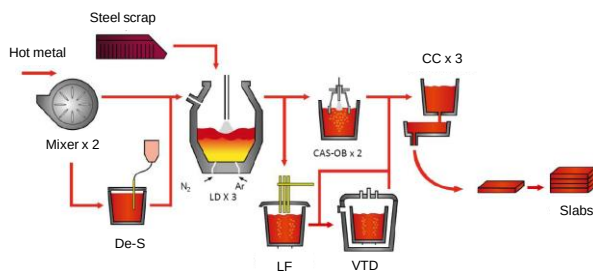


- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- Teräksen valmistus = Mellotus
- Terässula (rautaa)
- Seostus, viimeistely, valu
- Aihiot
- Valssaus, viimeistely
- **Terästuotteet**

Oulun yliopisto



Teräksen valmistus



Terässulatto

- Oksidinen rautamalmi (rautaa ja happea)
- Rikastus
- Rautarikaste (rautaa ja happea)
- Agglomerointi
- Rautarikastepelletti (rautaa ja happea)
- Oksidin pelkistys ja syntyvän metallin sulatus masuunissa
- Raakarauta (rautaa ja hiiltä)
- **Teräksen valmistus = Mellotus**
- **Terässula (rautaa)**
- **Seostus, viimeistely, valu**
- **Aihiot**
- Valssaus, viimeistely
- Terästuotteet

Oulun yliopisto



Terässulatto

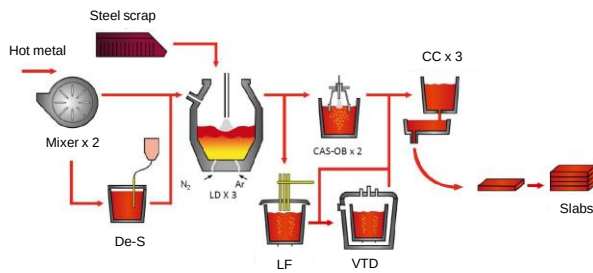
Raakateräksen valmistus konverterissa

- Mellotus = Hiilenpoisto

Teräksen koostumuksen ja lämpötilan ohjaus senkkäkäsittelyissä

- Kuumennus
- Tiivistys
- Seostus
- Epäpuhtauksien poisto
- Homogenisointi

Terässulan jäähmettyminen jatkuvavalussa



Oulun yliopisto



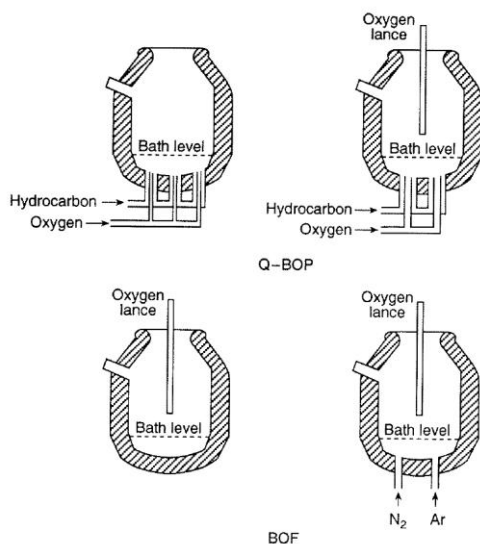
Konverterit

Tavoitteena: Mellotus = Hiilenpoisto

- Hiilipitoisuus (4,5 %) raakarauta matalahiiliseksi (jopa alle 0,01 %) raakateräkseksi
- Erilaisten teräslajien valmistus konverteriproessin jälkeen toisistaan poikkeavilla käsittelyillä
 - Mellotukseen asti tuotetaan "samaa" terästä
- Toteutus happipuhalluksen avulla konverteriproessissa
 - Samalla hapettuu muita epäpuhtauksia (Si, Mn, P)
 - Hapettumistuotteet savukaasuun (CO, CO₂) ja kuonaan
 - Hapetusreaktiot nostavat lämpötilaa – voidaan hyödyntää romun sulattamiseksi
- Voidaan tehostaa hiilimonoksidin osapainetta laskemalla
 - Erittäin matalahiiliset lajit tyhjäkäsitellään
 - Terästä ei tiivistetä konverterin jälkeen
 - Hiilen poisto jatkuu, kun painetta alennetaan

Erilaisia teknisiä toteutustapoja

- Päältäpuhalluskonverterit (LD, BOS, BOF, BOP, ...)
- Pohjapuhalluskonverterit (OBM, Q-BOP, ...)
- Yhdistelmäpuhalluskonverterit (LD-KG, K-BOP, ...)



Kuvallähde: Turkdogan:
Fundamentals of steelmaking.

Oulun yliopisto



Konvertterit

Taulukko 1. Happikonvertteriprosessin ryhmittely puhallustavan perusteella
Table 1. BOF terminology. Classifying of processes

↓ päättää puhallus	↑ pohjasta puhallus	← sivusta puhallus
Happikonvertteriterminologiaa		
BOF	Basic Oxygen Furnace	
BOP	Basic Oxygen Process	
BOS	Basic Oxygen Steelmaking	
Yhdistetty puhallettavat konvertterit ↓		
LD	Linz-Danawitz	
LD-AC	LD-ARBED	
OLP	Oxygen Lime Powder	
LD-CL	LD-Circulating Lance	
Sulan alapuolelta puhallettavat konvertterit ↑		
OBM	Oxygen Bottom Maxhütte	
Q-BOP	QuelieQuick – BOP	
LWS	Loire-Wendel-Sideler	
KS	Klöckner Stahlerzeugung/Schrott	
AOD	Argon Oxygen Decarburization	
CLU	Crowd-Loire-Uddeholm	
Yhdistelmäkonvertterit, joissa pohjapuhallus inertillä kaasulla ↓ ↑		
LD-AB	Argon Bottom	
LD-TB	Top and Bottom	
LD-SB	Spouten	
LD-KG	Kawasaki Gas	
ATH-B	Austal Thyssen Hütte-Bottom	
LBE	Lance Bubbling Equilibrium	
NK-CB	Nippon Koken Combined Blowing	
YODC	Vacuum Oxygen Decarburization Converter	
Yhdistelmäkonvertterit, joissa pohjapuhallus hapella ↓ ↑		
LD-OB	Oxygen Bottom	
LD-BD	Bottom Dyse	
STB	Sumitomo Top and Bottom	
LD-HC	Halsaut Samire, CRM	
LD-OTB	Oxygen Top And Bottom	
OBM-S	OBM-Scrap	
K-BOP	Kawasaki-BOP	
BAP	Bath Agitation Process	
Japanilaisia ohjausjärjestelmiä		
NKK:	NARC NKK's Automatic Refining Control	
NSC:	CONTEC Controlling Measures for Temperature and Carbon	
	LD-TOP Total Optimum Process Control	
	CQT Controlled Quick Tapping	
	OS Oxygen accumulated in slag	
KSC:	SMART System for Measuring and Attaining Refining Target	
	QDT Quick Direct Tapping	
	ISCO Index for Selective Carbon Oxidation	

Tavoitteena: Mellotus = Hiilenpoisto

- Hiilipitoisuus (4,5 %) raakarauta matalahiiliseksi (jopa alle 0,01 %) raakateräkseksi
- Erilaisten teräslajien valmistus konvertteriprosessin jälkeen toisistaan poikkeavilla käsittelyillä
 - Mellotukseen asti tuotetaan "samaa" terästä
- Toteutus happipuhalluksen avulla konvertteriprosessissa
 - Samalla hapettuu muita epäpuhtauksia (Si, Mn, P)
 - Hapetus tuotteet savukaasuun (CO, CO₂) ja kuonaan
 - Hapetusreaktiot nostavat lämpötilaa – voidaan hyödyntää romun sulattamiseksi
- Voidaan tehostaa hiilimonoksidin osapainetta laskemalla
 - Erittäin matalahiiliset lajit tyhjökäsittellä
 - Terästä ei tiivistetä konvertterin jälkeen
 - Hiilen poisto jatkuu, kun painetta alennetaan

Erilaisia teknisiä toteutustapoja

- Päättäpuhalluskonvertterit (LD, BOS, BOF, BOP, ...)
- Pohjapuhalluskonvertterit (OBM, Q-BOP, ...)
- Yhdistelmäpuhalluskonvertterit (LD-KG, K-BOP, ...)

Oulun yliopisto



Konvertterit

Raakaraudan panostus konvertteriin. Kuva: SSAB, Raahe.



Raakaraudan panostus konvertteriin.
SSAB:n Luleån tehtaasta, Norrbotten, 2002.
Kuva: Stig-Göran Nilsson, JK:n arkistot.



Raakateräksen lasku konvertterista.
SSAB:n Luleån tehtaasta, Norrbotten, 2002.
Kuva: Stig-Göran Nilsson, JK:n arkistot.



Mellotus.
Kuva: Heikki Pärkkä, Esitys, POHTO, 2017.



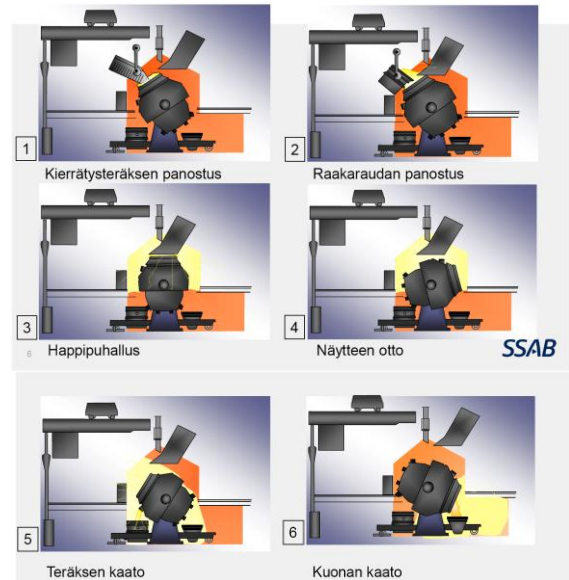


Konvertterit

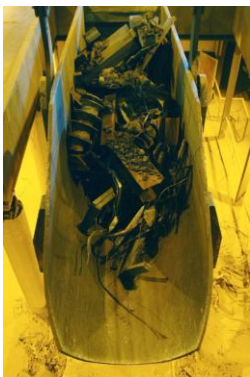


Kuvat: Tuomas Antola, Esitys, POHTO, 2018.

Vaiheet



Konvertterit



Konverttertiin panostettavaa romua. SSAB, Luleå, Norrbotten, 2002.

Kuva: Stig-Göran Nilsson (JK:n arkisto)



Kuonankaato. SSAB, Luleå, Norrbotten, 2002.

Kuva: Stig-Göran Nilsson (JK:n arkisto)

Raaka-aineet

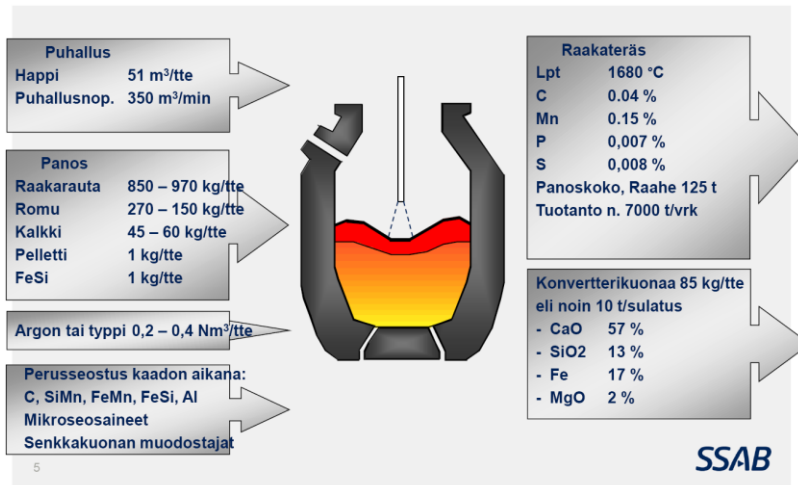
- Sula raakaurata
- Teräsromu
- Jäähdytysmateriaalit
 - esim. raudan oksidit
- Kuonanmuodostajat
 - Poltetu kalkki
- Happi päältäpuhallussista
- Inertit kaasut pohjapuhalluksesta

Tuotteet

- Sula raakateräs
 - Tiivistetään ja seostetaan kaadon yhteydessä
 - Jatkaa senkkakäsittelyihin
- Konvertterikuona
 - Kuonanpidätys, jotta hapettava konvertterikuona ei päätyisi teräsenkkaan
- Savukaasut
- Pölyt kaasunpuhdistuksesta



Konvertterit



Raahessa on käytössä LD-KG-konvertterit

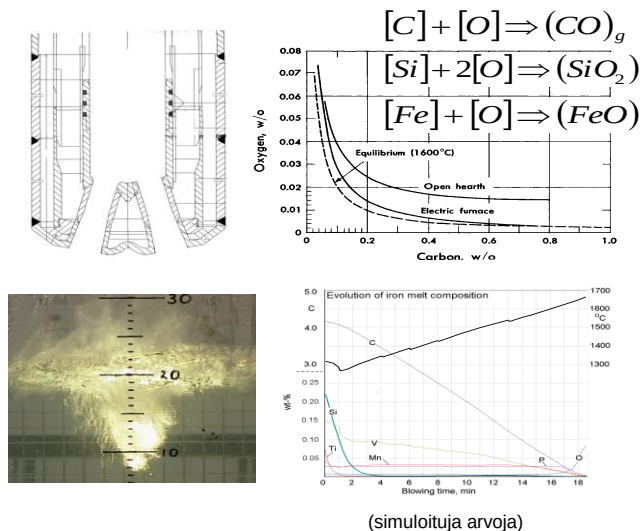
- 3 kpl à 125 tonnia
- MgO-C-tiilivuoraus
- Kahdenlaisia (-kokoisia) pohjasuuttimia
- Vuorauksen kulumisen lasermittausmahdollisuus
- Pneumaattinen kuonanpidätys

Kuva: Tuomas Antola, Esitys, POHTO, 2018.

Oulun yliopisto



Konvertterit



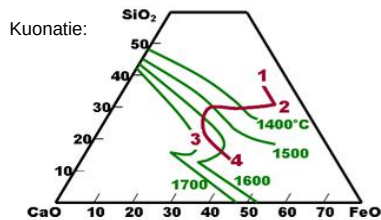
Mitä konvertterissa tapahtuu?

- Happipuhallus Laval-tyyppisellä päältäpuhalluslanssilla
 - 1 – 5 suutinta
 - Yliäänennopeus
 - Lanssin korkeus ja kaasunopeus vaikuttavat
 - muodostuvan kraaterin syvyyteen ja pinta-alaan
 - roiskumiseen ja pisaroitumiseen
 - kalkin liukenemiseen ja kuonan muodostumiseen
 - raudan hapettumiseen kuonafaasiin
 - vuorauksen ja lanssin kestoon
- Hapen liukeneminen sulaan → Hiilen, piin, ym. palaminen
 - Eksotermiset reaktiot → Lämpötilan nousu, romun sulatus
 - Tarvittaessa jäähdytys rautaoksidgeja lisäämällä
- Kuonanmuodostuminen
 - Kalkin liukeneminen
 - Raudan ja siihen liuenneiden aineiden hapettuminen
- Sekoituksen parantaminen pohjapuhalluksella (N₂, Ar)
 - Puhallusaika, kuonanmuodostajien kulutus, seosaineiden kulutus, tuotannon joustavuus, laatu
- Pölyn muodostuminen
 - Pisarat ja roiskeet, hienojakoiset raaka-aineet
 - Höyrystymisen kautta

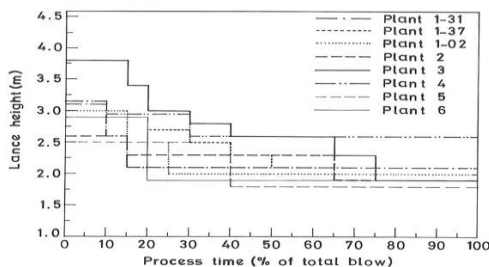
Oulun yliopisto



Konvertterit



Kuva: www.steeluniversity.org



Konvertterikuonan tehtävät

- Koota hapettumistuotteet yhteen faasiin (paitsi CO , CO_2)
- Epäpuhtauksien poisto
- Lämmöneristys
- Teräksen suojaus typettymiseltä

Kuonanmuodostus

- Kuonanmuodostajat: CaO , MgO , ...
- Hapettumistuotteet: SiO_2 , FeO , MnO , Al_2O_3 , ...
- Vuorauksesta liuenneet: MgO , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , ...
- (edellisten prosessivaiheiden kuonat)
- Aluksi pii ja rauta hapettuvat – kalkki ei ole vielä liuennot
- Kalkin liukeneminen – kuonan CaO -pitoisuus kasvaa
 - Kalkin liukenemista nopeutetaan "korkealla lansirilla"
- Hapettunut rauta pelkistetään kuonasta metalliin
 - Raudan pelkistymistä nopeutetaan "matalalla lansirilla"
- Puhallettaessa liian pitkään raudan hapettuminen jatkuu
- Kuonan tulee olla sulaa ja se ei saa aiheuttaa liian suurta räsistystä vuorausmateriaaleille

Oulun yliopisto

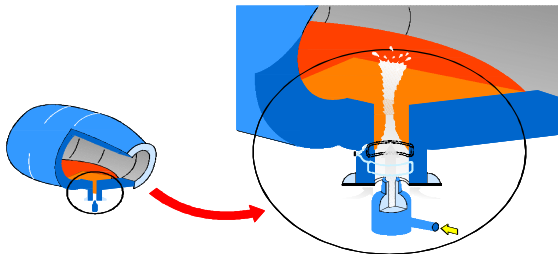


Konvertterit

CaO	SiO ₂	MgO	Mn	Fe	S	V	P	Ti
53,6	12,2	1,71	2,66	17,0	0,04	1,71	0,34	0,92

Voi olla korkeampi käytettäessä dolomakalkkia kuonanmuodostajana.

Voi olla korkeampi (riippuu käytettävien raaka-aineiden koostumuksista)



Kuva:
Paananen, Ollila, Syrjänen & Mäkiyörö:
Esitys. POHTO, Oulu. 2011.

Konvertterikuonan pääkomponentit ovat CaO , FeO ja SiO_2

- Tyypillinen kuonamäärä 50 – 100 kg/tte
- Kalkin lisäys n. 40 – 60 kg/tte
 - Kalkkiylimäärää pyrittävä välttämään, koska liukenematon kalkki ei kuitenkaan osallistu reaktioihin (turha kustannuserä)
 - lisäksi kiinteää kalkkia sisältävä kuona on heterogeenisenä vaikeammin käsiteltävä
- Vuorauksesta liukenee jonkin verran MgO :a
 - Voidaan vähentää käyttämällä dolomiittikalkkia kuonanmuodostajana
 - Liian suuri MgO -pitoisuus johtaa heterogeeniseen kuonaan

Kuona puhalluksen lopussa

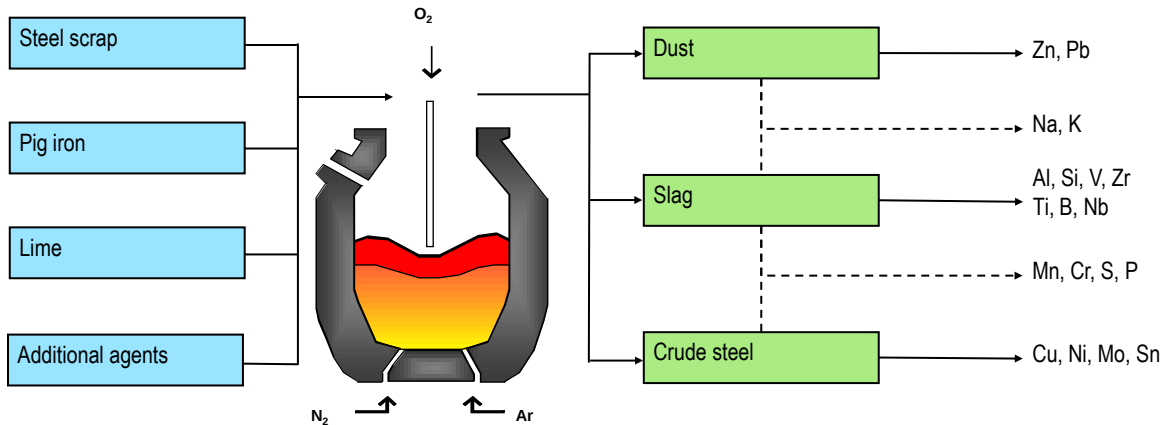
- Sisältää hapettunutta rautaa – hyvin hapettava kuona
- Senkkaan päätyessään hapettava kuona
 - laskee seosaineiden saantia
 - huonontaa teräksen kuonapuhautta – sulkeumat
- Konvertterikuonaa ei tulisi päästää senkkaan
 - Kuonanpidätys

Oulun yliopisto



Konvertterit

Mitä alkuaineille tapahtuu konvertterissa?

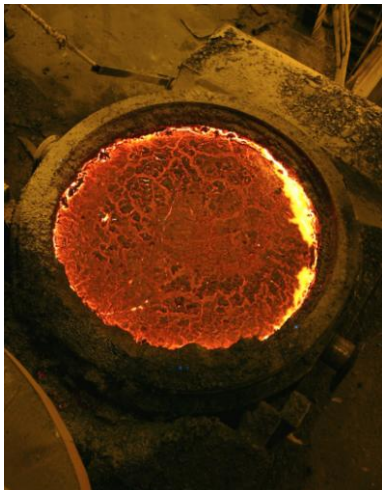


Epäpuhtauksien hallinta = Kuonan hallinta!

Oulun yliopisto



Senkkakäsittelyt



Raakaterästä senkassa.
SSAB:n Luleån tehtaat, Norrbotten, 2002.
Kuva: Stig-Göran Nilsson, JK:n arkistot.

Konvertteriin asti teräksen valmistus on "samanlaista kaikille lajeille"

- Keskeistä tuotantotehokkuus
 - Aikaa vievien vaiheiden siirto sekundäärikäsittelyihin

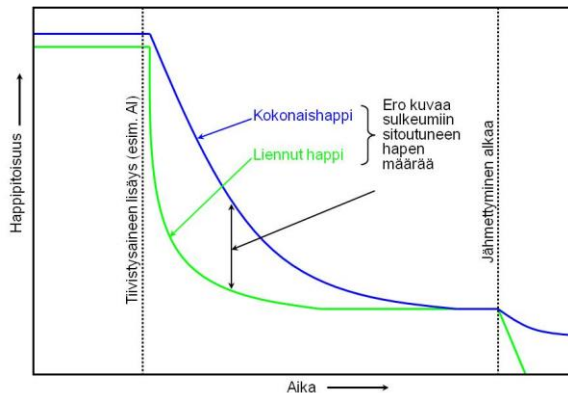
Erilaisten teräslajien valmistus ja "laadun luominen" sekundäärimetallurgiassa eli senkkakäsittelyssä

- Tiivistys – Hapen poisto ennen valua
- Reoksidaation eli uudelleenhapettumisen välttäminen
 - Ilma, kuonat, oksidiset vuorausmateriaalit
- Muiden kaasumaisten epäpuhtauksien (H, N, S) poisto riittävän alhaiselle ja tarkasti määritetylle tasolle
 - esim. tyhjäkäsittely
- Seostus ja tarkka koostumuksen hallinta
- Tarkka lämpötilan hallinta
 - Kuumennus tarvittaessa (Pitkät käsittelyajat)
- Sekoitus ja homogenisointi
 - Koostumus ja lämpötila
- Sulkeumien hallinta
 - Määrä, koko(jakauma), muoto, koostumus, ...

Oulun yliopisto



Senkkakäsittelyt



Teräksen happipitoisuus nousee mellotuksen yhteydessä

- 1000-2000 ppm

Hapen liukoisuus sulaan teräkseen on (paljon) korkeampi kuin kiinteään teräkseen

- Happi on poistettava teräksestä ennen jäähmettymistä

Tiivistys (Deoksidaatio) = Korkean happi-affiniteetin omaavan aineen lisäys teräkseen

- Yleisesti käytettyjä tiivistysaineita: Al, Si, Mn
- Yleensä kaadon yhteydessä
- $y \underline{O} + x \underline{Me} = (Me_xO_y)$

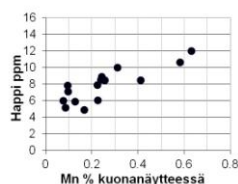
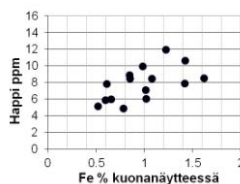
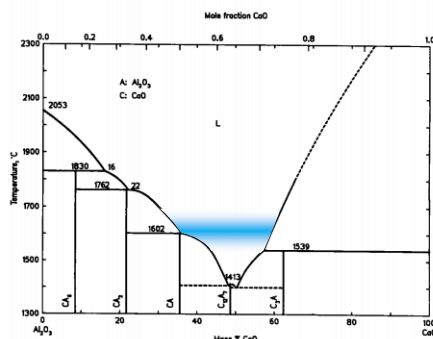
Liunneen hapen pitoisuus putoaa nopeasti n. 2 – 10 ppm:n tasolle

- Kokonaishappi (liennut + sulkeumiin sitoutunut) laskee paljon hitaammin

Oulun yliopisto



Senkkakäsittelyt



Senkkakuonan Fe- ja Mn-pitoisuuden vaikutus terässulan O-pitoisuuteen Ovakon Imatran tehtaalla.

Lähde: Helena Kumpulainen & Reima Väinölä: Esitys, POHTO, 2011.

Senkkakuonan tehtävät

- Suojella terässulaa atmosfääriin aiheuttamalta reoksidaatiolta
- Toimia lämmöneristeenä
- Ottaa vastaan teräksestä poistuvat sulkeumat
 - Kuonaan nousevilla tiivistystuotteilla (esim. Al_2O_3 , SiO_2) on korkea sulamispiste
 - Sula kuona aikaansaadaan kalkkiliisäyksellä

Vaatimuksia senkkakuonan koostumukselle

- Vain vähän epästabiileja oksideja kuten FeO, MnO
 - Ei liikaa SiO_2 :a
 - Aiheuttavat reoksidaatiota – sulkeumapuhtaus, valettavuus, ...
- Ei saa tuhota vuorauksmateriaaleja (MgO) liian nopeasti
 - MgO-lisäys
- Oltava sula-alueella
 - Tietyt koostumusalue $CaO-Al_2O_3$ -systeemissä

Tyypillisiä senkkakuorien koostumuksia (SSAB Raahe):

	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	FeO	MnO	Muut
Al/Si-tiivistetty	52.0	7.1	26.6	11.5	0.6	0.6	1.6
Al-tiivistetty	49.5	6.4	31.8	5.1	2.3	3.7	1.2

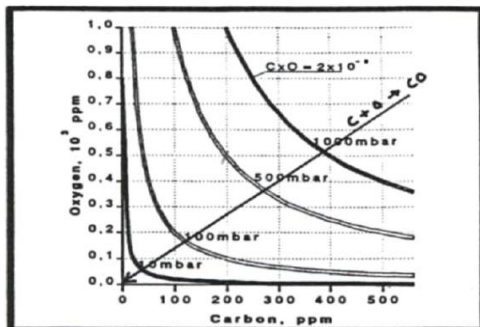


Senkkakäsittelyt

Tyhjökäsittelyllä
saavutettavia
pitoisuuksia:

(ppm)

Component	VD	RH
Carbon	< 30	< 10
Sulfur	< 5	< 20
Nitrogen	< 30	< 30
Hydrogen	< 1,0	< 1,0



Tyhjökäsittelyjä käytetty 1950-luvulta lähtien

- Alunperin teräksen vetypitoisuuden alentamiseksi

Nykyisin myös muiden (kaasumaisten) epäpuhtauksien poistamiseksi

- Happi, typpi, vety, rikki, hiili (poistuu CO:na)
- Käytetään yleisesti tiettyjen teräslajien valmistuksessa
 - Ultra Low Carbon (ULC) –teräkset
 - Super Ultra Low Carbon (SULC) –teräkset
 - Interstitial Free (IF) –teräkset

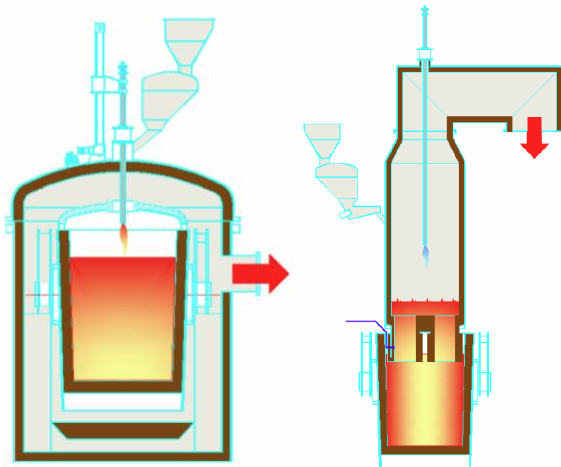
Idea: kaasumaiset epäpuhtaudet poistuvat teräksestä helpommin alipaineessa

- $2 \text{X} = \text{X}_2(\text{g})$
 - Kokonaispainetta laskettaessa X_2 :n osapaine laskee – reaktio-
tuotteen aktiivisuus laskee, jolloin tasapaino siirtyy oikealle
- HUOM: Hiili ei ole kaasu, mutta mellotusreaktion tuote (CO) on. Sen vuoksi myös hiilenpoistoa voidaan tehostaa tyhjökäsittelyllä
 - Mahdollisuus saavuttaa n. 20 ppm:n hiilipitoisuuksia

Oulun yliopisto



Senkkakäsittelyt



Tankkivakuumi (VTD, Vacuum Tank Degasser)

- Koko senkka tankissa, jonka painetta lasketaan
- Kaasupuhallus pohjasta
- Vaatii yleensä lämmityksen, koska lämpötila laskee voimakkaasti käsittelyn aikana
- Korkeat saannit seosaineille
- Matalammat investointi- ja ylläpitokustannukset

RH-vakuumi (Ruhstahl Heraeus)

- Senkka on normaalipaineessa
- Terässula kulkeutuu tyhjökammioon ja palaa sieltä senkkaan
- Erillinen sekoitus ei ole tarpeen
- Nopeampi kuin VTD
- Varustettu usein happilanssilla
 - Mellotuksen tehostaminen (ULC-teräkset)
 - Kemiallinen kuumennus
- Eniten käytetty tyhjökäsittelymenetelmä

Oulun yliopisto



Senkkäkäsittelyt



Teräksen seosaineita.
SSAB:n Oxelösundin tehtaasta, Södermanland, 2002.
Kuva: Stig-Göran Nilsson, JK:n arkistot.

Seostus konverterissa puhalluksen jälkeen tai konverterin kaadon yhteydessä

- Epätarkka saannin suhteen
- Seostetaan "hieman alle" tavoitepitoisuuksien

Jälkitäsmäys senkkäkäsittelyjen yhteydessä

- Tarkempi – tavoitepitoisuuteen
- Palamateriaali, langansyöttö tai pulveri-injektio

Seosaineiden tasainen sekoittuminen varmistettava sekoituksella

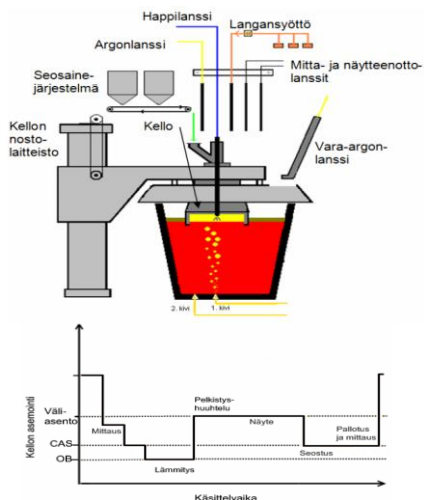
- Induktiivinen sekoitus
- Kaasuhuuhtelu inerttiä kaasua käyttäen

Seostuksen/saannin tarkkuutta voidaan parantaa suorittamalla seostus tyhjössä tai argon-suojattuna

Oulun yliopisto



Senkkäkäsittelyt



Kuva 4. Kellon aseointi ja käsittelytoimenpiteet käsittelyajan funktiona.

Kuvat: Sakari Tuomikoski.

Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling – Oxygen Blowing (CAS-OB)

- Nippon Steelin vuonna 1982 kehittämä ja patentoima senkkäkäsittelyprosessi
- Käsittely tehdään keraamisen kellon alla Ar-suojattuna
 - Seostus, lämmitys, kaasuhuuhtelu
 - Seostus pala- tai lankaseosaineilla
 - Lämmitys polttamalla alumiinia tai piitä teräksen pinnalla (hapon puhallus lanssilla)
- Saavutettavia etuja:
 - Seosaineiden korkea ja ennustettava saatavuus
 - Alhainen alumiinin kulutus
 - Teräkselle saadaan alhainen kokonaishappipitoisuus
 - Konverterin loppulämpötilaa voidaan laskea
 - Konverterin lisäpuhallusten määrää voidaan vähentää
 - Ajoitus ja teräksen lämpötila jatkuvavaluun osuvat paremmin kohdalleen

Oulun yliopisto

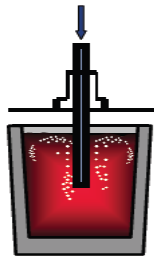


Senkkakäsittelyt

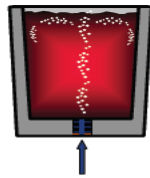
Kaasuhuuhtelu: Kaasukuplan tilavuus muuttuu, kun kupla nousee pohjasta teräskuona-rajapinnalle

- Ferrostaattinen paine pienenee
- Lämpötila nousee
- Kaasupuhalluksen kineettinen energia muuttuu sekoitustyöksi

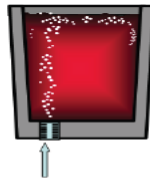
Induktiivinen/sähkömagneettinen sekoitus



Lancing
Ar / N₂
0-500 Nm³/h



Centric / Excentric Plug
Ar / N₂
0-25 Nm³/h



600-1300 Ampere
1,4 Hz

Kuva: Liebig & Pieper, 2010.

Oulun yliopisto



Senkkakäsittelyt

Senkkakäsittelyt (seostus, tyhjäkäsittely, jne.) vievät aikaa, jolloin teräs jäähtyy

Teräs ei saa jähmettyä ennen valua

- Tavoitteena likviduslämpötila + pieni yllilämpö valun alkaessa

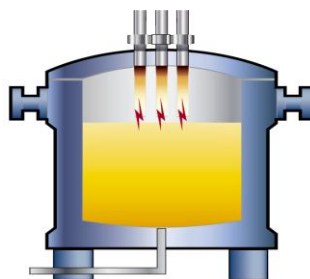
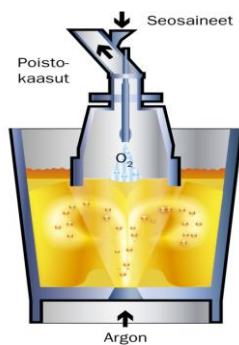
Lämpötilan hallinnan vaihtoehdot:

1) Yllilämmitys konverterissa

- Tulisi välttää
 - pitemmät puhallusajat (tuotantomäärät laskevat)
 - lisääntynyt vuorauksien kuluminen korkeammista lämpötiloista johtuen
 - heikentynyt fosforinpoisto

2) Lämpötilan hallinta teräsenkassa

- Lämpöhäviöiden (vuoraukset, säteily, kaasusekoitus) hallinta
 - Kannet
- Kemiallinen tai sähköinen lämmitys
 - CAS-OB
 - Valokaarisovellukset
 - Polttimet
- (Tarvittaessa jäähdytys esim. romun avulla)



Oulun yliopisto



Jatkuvavalu



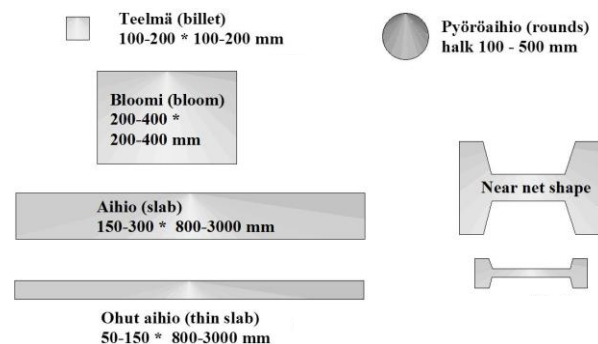
Teräksen jatkuvavalu AB Sandvik Materials Technologyn tehtailla Sandvikenissä, Gästriklandissa, 2015.
Kuva: Pia & Hans Nordlander (Jernkontoretin arkisto).

Tavoitteena terässulan saattaminen

- sulasta kiinteään muotoon
- haluttuun mittoihin

Pyrometallurgisten sulaprosessien viimeinen vaihe

- "Casting is the final frontier where process metallurgists can still do something for the steel."



Jatkuvavaletun teräksen osuus kaikesta teräksen tuotannosta

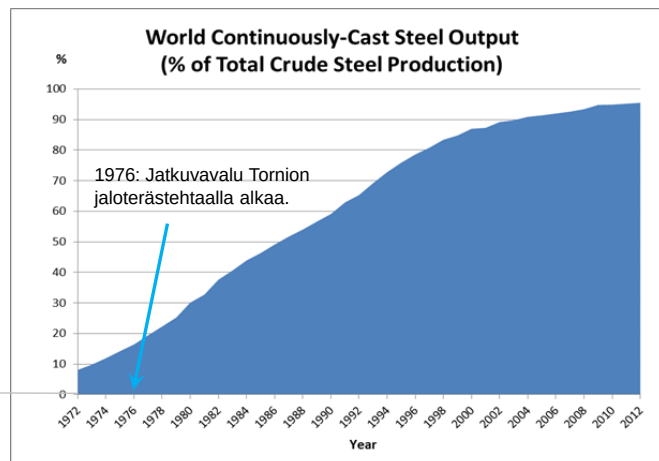
Lähde: www.worldsteel.org

CONTINUOUSLY-CAST STEEL OUTPUT 2014 TO 2016

	Million tonnes			% Crude steel output		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Austria	7.6	7.4	7.2	96.3	96.6	96.6
Belgium	7.5	7.5	7.7	100.0	100.0	100.0
Bulgaria	0.6	0.5	0.5	100.0	100.0	100.0
Croatia	0.2	0.1	-	100.0	100.0	-
Czech Republic	4.9	4.8	4.9	91.6	91.2	92.6
Finland	3.8	4.0	4.1	99.5	99.6	99.6
France	15.5	14.4	14.0	96.2	96.3	96.9
Germany	81.6	81.4	80.1	96.8	97.0	95.3
Greece	1.0	0.9	1.2	100.0	100.0	100.0
Hungary	1.2	1.7	1.3	100.0	100.0	100.0
Italy	22.3	20.9	22.1	94.2	94.3	94.9
Luxembourg	2.2	2.1	2.2	100.0	100.0	100.0
Netherlands	6.8	6.9	6.8	98.2	98.5	98.7
Poland	8.4	9.0	8.9	98.1	98.3	98.3
Portugal	2.1	2.0	2.0	99.2	99.3	101.1
Romania (a)	3.1	3.3	3.2	98.2	97.9	97.7
Slovak Republic	4.7	4.6	4.8	99.9	99.9	99.9
Slovenia	0.5	0.5	0.5	80.2	80.1	80.7
Spain	13.9	14.6	13.4	97.8	98.2	98.2
Sweden	4.0	3.8	4.1	87.6	88.0	88.2
United Kingdom	11.9	10.0	7.5	98.6	98.6	98.7
European Union (28)	163.6	160.9	154.5	96.6	96.8	96.8
Turkey	34.0	31.5	33.2	100.0	100.0	100.0
Others	6.3	4.2	4.5	99.9	99.7	99.7
Other Europe	38.4	35.9	37.6	100.0	100.0	100.0
Russia	58.5	58.0	58.0	81.9	81.8	81.9
Ukraine	14.7	11.2	11.8	84.1	83.9	84.8
Other CIS	7.4	7.7	7.3	99.9	99.9	99.9
CIS	60.6	76.9	77.1	76.0	75.7	75.4
Canada	12.5	12.2	9.9	99.9	97.6	78.2
Mexico	18.9	18.2	18.8	99.9	99.9	99.8
United States	86.9	78.1	78.0	99.5	99.0	99.4
NAFTA	108.3	108.5	106.7	99.7	99.5	99.6
Argentina	5.5	5.0	4.1	99.7	99.7	99.7
Brazil	33.4	32.9	30.9	98.5	99.0	98.7
Venezuela	1.5	1.7	0.8	100.0	100.0	100.0
Other Latin America	5.4	5.7	5.0	100.0	100.0	100.0
Central and South America	45.8	44.9	40.5	98.9	99.2	99.0
Egypt (a)	6.5	5.5	5.0	100.0	100.0	100.0
South Africa	6.4	6.4	6.1	99.5	99.4	99.5
Other Africa (a)	2.0	1.8	1.9	99.7	99.7	99.7
Africa	14.9	13.7	13.1	99.6	99.7	100.0
Iran	16.9	16.1	17.9	100.0	100.0	100.0
Saudi Arabia	6.3	5.2	5.5	100.0	100.0	100.0
Other Middle East (a)	7.4	8.0	9.1	99.9	99.9	99.9
Middle East	14.3	14.1	17.0	100.0	100.0	100.0
China (a)	809.0	789.9	795.0	96.3	96.3	96.3
India (a)	72.3	75.0	82.0	82.8	84.2	85.6
Japan (a)	109.9	103.5	103.2	98.4	98.4	98.5
South Korea	79.4	68.7	67.7	98.4	98.6	98.7
Taiwan, China	23.0	21.3	21.7	99.6	99.6	99.6
Other Asia (a)	20.8	22.6	23.9	100.0	100.0	100.0
Asia	1104.3	1076.6	1095.4	97.8	97.2	97.4
Australia	4.6	4.9	5.2	99.4	99.5	99.4
New Zealand	0.9	0.8	0.8	100.0	100.0	100.0
Rest of world countries	100.2	100.6	104.2	94.5	94.2	94.1
Total of world steel production in 2016	2154.2	2154.2	2154.2	96.8	96.8	96.8

The countries in this table accounted for more than 99% of world crude steel production in 2016.

a = estimate



1967: Jatkuvavalu Raahen terästehtaalla alkaa.

1976: Jatkuvavalu Tornion jaloterästehtaalla alkaa.

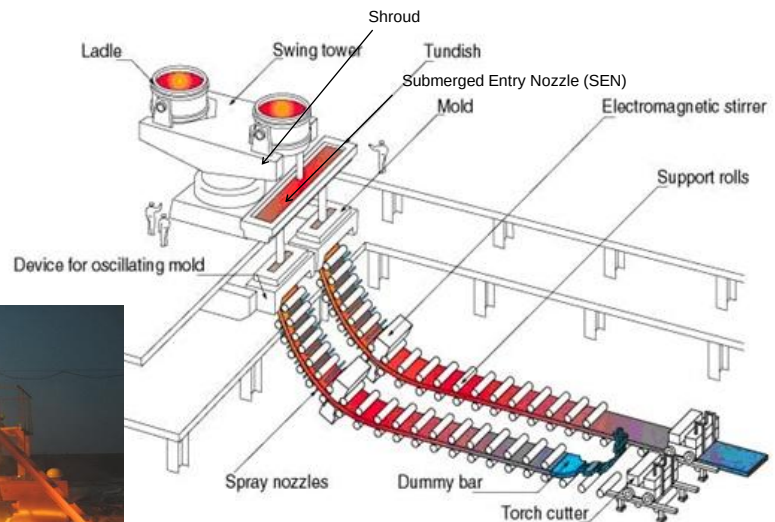
Lähteet suomalaisen metallurgian historiaan liittyen:

Veikko Heikkinen: Rautaa ja terästä – 50 vuotta terästudkimusta. 2015.

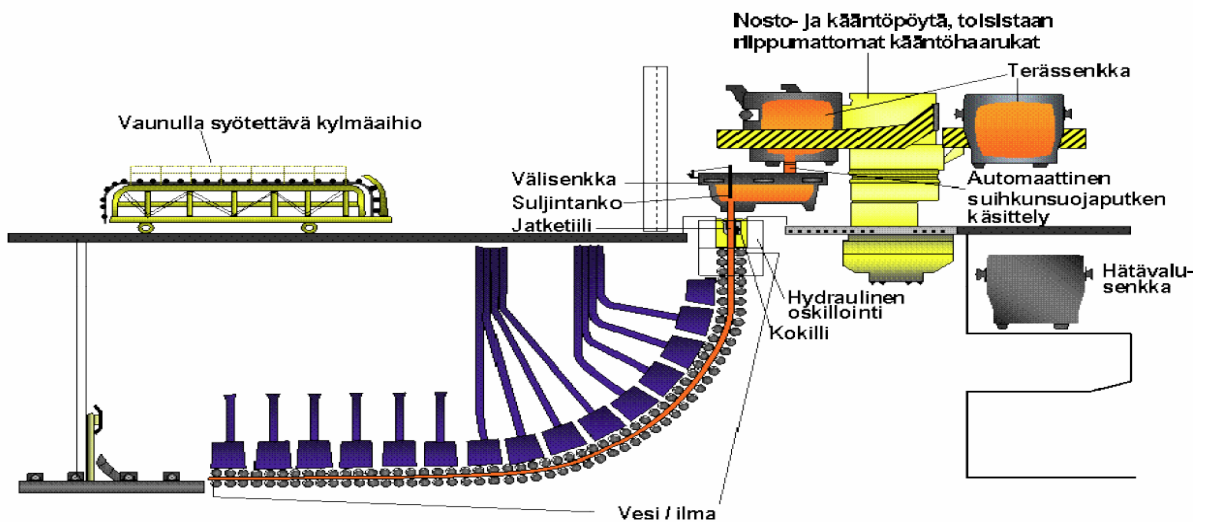
Tuomo Särkikoski: Outo malmi, jalo teräs – Outokummun tie ruostumattomaan teräkseen. 2005.



Jatkuvavalu



Jatkuvavalu

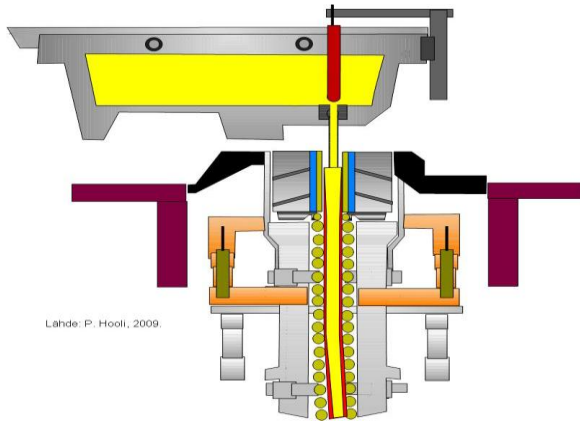


Kuva: SSAB:n esittelymateriaali.

Oulun yliopisto



Jatkuvavalu



Välialtaan tehtävät

- Ohjaa sulan virtausta kokilliin
- Toimii välivarastona valusarjoissa
- Lämpötilan ja koostumuksen tasaaminen
- Sulkeumien erotus terässulasta

Kokillin tehtävät

- Antaa muodon jäähmettyvälle aihiolle
- Jähmettyminen alkaa
- Riittävä ja tasainen jähmettyminen

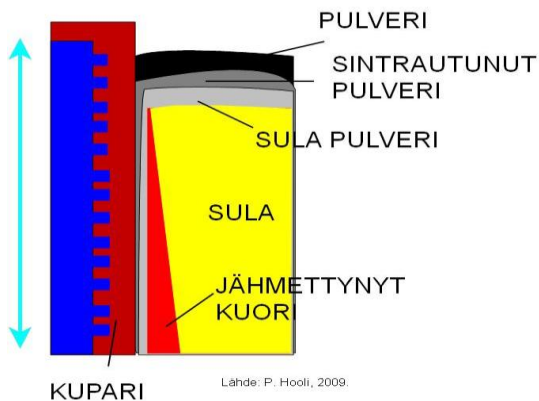
Kokillin rakenne

- Vesijäähdytetyt kuparilevyt
- Lyhyet sivut liikkuvia
 - Mahdollistaa eri levyisten aihoiden valamisen
- Oskillointi

Oulun yliopisto



Jatkuvavalu



Väliallaspeitosteen tehtävät

- Suojata terästä atmosfääriin aiheuttamalta reoksidaatiolta
- Pienentää lämpöhäviöitä
- Sitoo itseensä sulkeumia

Valupulverin tehtävät

- Voiteluaine
- Pienentää lämpöhäviöitä
- Suojata terästä atmosfääriin aiheuttamalta reoksidaatiolta
- Sitoo itseensä sulkeumia

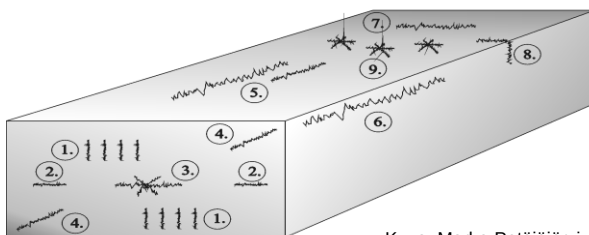
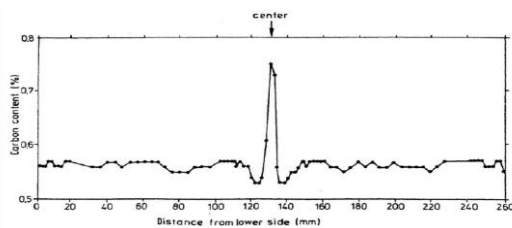
Valupulverin käyttö n. 0,5 kg/min

	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O	F
Väliallaspeitoste (Ovako Imatra)	26,0	30,6	13,7	17,8	2,7	
Valupulveri (Tyypillinen)	25 – 45	25 – 45	0 – 6	2 – 6	2 – 10	0 – 10

Lähteet: Helena Kumpulainen & Reima Väinölä: Esitys, POHTO, 2011 / Paavo Hooli, Outokumpu / Mills, Fox, Thackray & Li: VII Int. Conf. on Molten Slags, Fluxes and Salts, South Africa, 2004.



Aihioviat



Kuva: Marko Petäjäjärvi.

Mekaaniset viat

- Halkeamat
- Virheet aihion muodossa

Kemialliset viat

- Mikro- ja makrosuotaumat
 - Usein seosaineiden kohonneet pitoisuudet keskilinjalla
 - Hauraiden faasien muodostuminen mahdollista
 - Ongelma erityisesti paksuilla levyillä
- Sulkeumat ja erkaumat

1. Sisähalkeama
2. Kolmoispisteen halkeama
3. Keskilinjjan halkeama
4. Kulmahalkeama
5. Pitkittäinen sivuhalkeama
6. Pitkittäinen kulmahalkeama
7. Poikittainen sivuhalkeama
8. Poikittainen kulmahalkeama
9. Tähtihalkeama

Oulun yliopisto



Romupohjainen teräksen valmistus



Romun sulatus valokaariuunissa Scana Steelin tehtailla Björneborgissa, Värmlannissa, 2015.
Kuva: Pia & Hans Nordlander (Jernkontoretin arkisto).

(Raaka-aineiden esikäsittely)

- Romun luokittelu ja kuivaus
- (Koksaus)

Sulatus: Valokaariuuni (primääriuuni)

- Romun sulatus, ei pelkistystarvetta
- Suuri sähkönkulutus

Sekundäärimetallurgia: Senkkakäsittelyt

- Teräksen koostumuksen ja lämpötilan säätö
- Tasalaatuisuuden varmistaminen

Jatkuvavalu

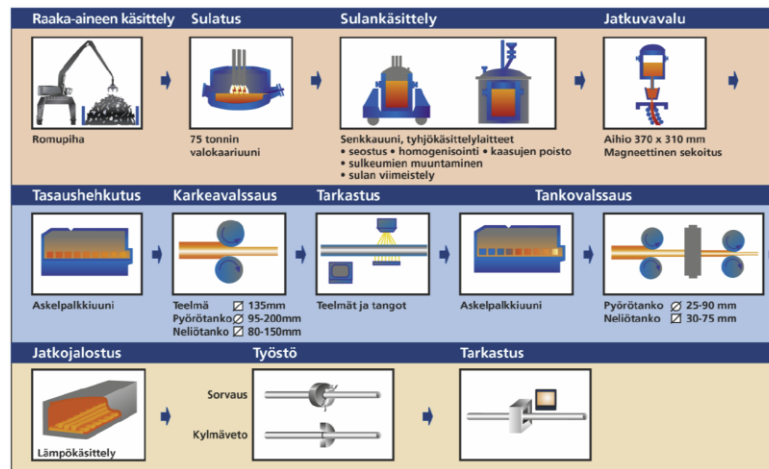
- Teräksen jäähdyttäminen

Oulun yliopisto



Romupohjainen teräksen valmistus

Romupohjainen teräksen valmistus Imatralla



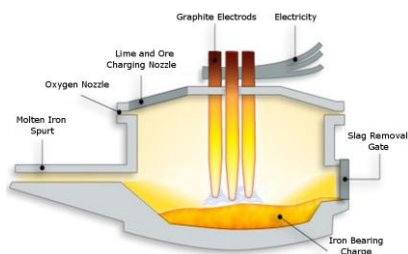
Kuva: Ville Fomkin, Esitys, POHTO, 2015.

OVAKO

Oulun yliopisto



Valokaariuuni



Romun sulatus sähköä käyttäen

- Joissain uuneissa on lisäksi polttimet

Mellotus (hiilenpoisto) on tarvittaessa mahdollista happipuhallusta hyödyntäen

- Myös piin hapettaminen pois terässulasta

Vuoraus täytyy suojata kuohuvalla kuonalla

- Kuonan viskositeetin ja pintaominaisuuksien optimointi
- Hiili-injektio kaasun muodostamiseksi

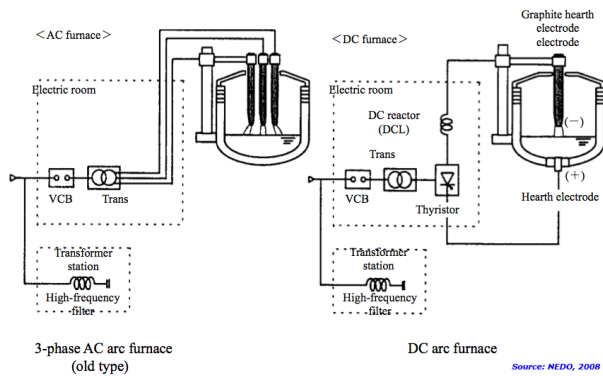
Sekoitusta ja lämmönsiirtoa voidaan tehostaa pohjapuhalluksella (Ar, N₂)

Kuonan kaato valokaariuunista Ovakon tehtailla Hoforsissa, Gästriklandissa, 2015.
Kuva: Pia & Hans Nordlander (Jernkontoretin arkisto).

Oulun yliopisto



Valokaariuuni



Kuva: <http://ietd.iipnetwork.org/content/direct-current-dc-arc-furnace>

Lähde: Helena Kumpulainen & Reima Väinölä, Esitys, POHTO, 2011.

Vaihtovirtauuni

- AC EAF = Alternating Current Electric Arc Furnace
- Perustuu Héroultin patenttiin vuodelta 1889
- Valokaari elektrodien ja panoksen välissä
- Käytössä lähinnä metalliromun sulatuksessa
- Käytössä esim. Ovakon Imatran tehtaalla ja Outokummun Tornion tehtaalla

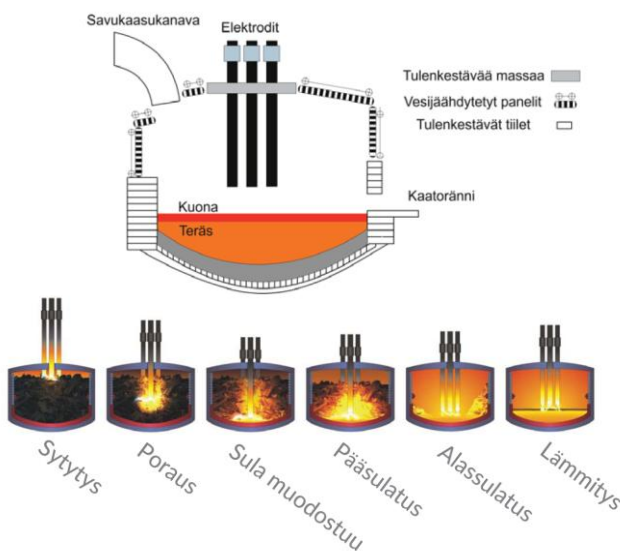
Tasavirtauuni

- DC EAF = Direct Current Electric Arc Furnace
- Kehitettiin 1980-luvun lopulla – kaupalliseen käyttöön 1990-luvulla
- Yksi grafiittielektrodi, joka toimii katodina
- Uunin pohja toimii anodina
- Käytössä esim. pölyjen käsittelyssä
- Suomessa ei käytössä teollisessa mittakaavassa

Oulun yliopisto



Valokaariuuni



Valokaariuunisulatuksen vaiheet

- Romun panostus
- Sytytys
- Elektrodien porautuminen panokseen
- Sulatus
- Kuumennus
- Kaato

Raaka-aineet

- Teräsromu, pölyt
- Seosaineet
- Kuonanmuodostajat
- Koksi, hiili

Tuotteet

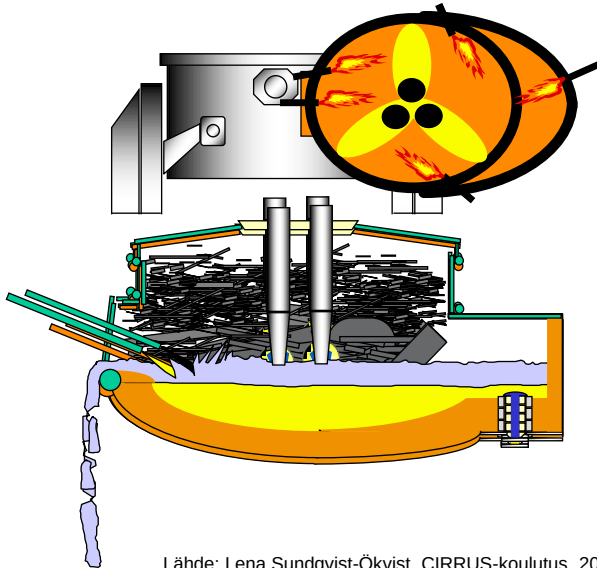
- Terässula
- Kuonasula
- Savukaasu ja pölyt

Kuvat: Matti Aula, Esitys, POHTO, 2017.

Oulun yliopisto



Valokaariuuni



Lähde: Lena Sundqvist-Ökvist, CIRRU-koulutus, 2019.

Raaka-ainekorien panostus yläkautta

- Romu, DRI, raakarauta, hiili, kuonanmuodostajat, briketit, jne.

Panosmateriaalien sulatus sähkölle

- Tarvittaessa lisäkuumennus polttimille (maakaasu, nestekaasu, öljy)

Joissain uuneissa on mahdollisuus syöttää lisää materiaalia jatkuvatoimisesti

- Vaihtoehtona syöttö useammassa korissa, jolloin sulatus keskeytyy uudelleensyötön ajaksi

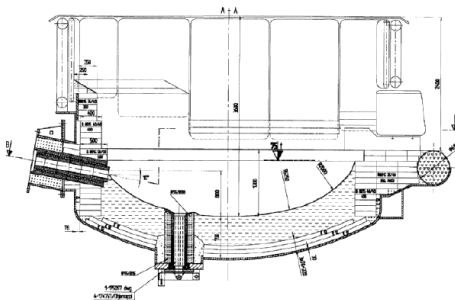
Loppuvaiheessa voidaan injektoida happea ja/tai hiiltä

- esim. kuohuvan kuonan edistämiseksi

Oulun yliopisto



Valokaariuuni



Esimerkki: Imatran terästehtaan VKU

- 1 kpl vaihtovirtauuni, panoskoko 75 t
 - Kalkin- (2 kpl) ja hiilen- (1 kpl) injektointimahdollisuus
 - Happi-maakaasupolttimet (3 kpl)
 - Sivusta kaadettava
 - Romun esikuumennus
- Raaka-aineet
 - Kappalekoon ja alkuperän mukaan luokiteltu ostoromu
 - Seostuksen mukaan luokiteltu oma kiertoromu (15 % panoksesta)
 - Tuotannon jättemateriaalien sisäinen kierrätys
 - Valssihilse, aihoiden hiomajäte, jne.
 - Koksi
 - Kuonanmuodostajat (Käytetyt MgO-vuoraukset, kalkki)
- Sulatuksen eteneminen
 - Romun sulatus
 - Happipuhallus: Mellotus + Hapettuvien epäpuhtauksien poisto
 - Myös rautaa, mangaania ja kromia kuonautuu
 - Hiilen ja kalkin injektointi kuohuvan kuonan ylläpitämiseksi
 - Sekoituksen parantaminen pohjapuhalluksella (Ar, N₂)
 - Fosforinpoisto
 - Kaato – VKU-kuonaa ei tulisi päästää senkkaan (FeO!)

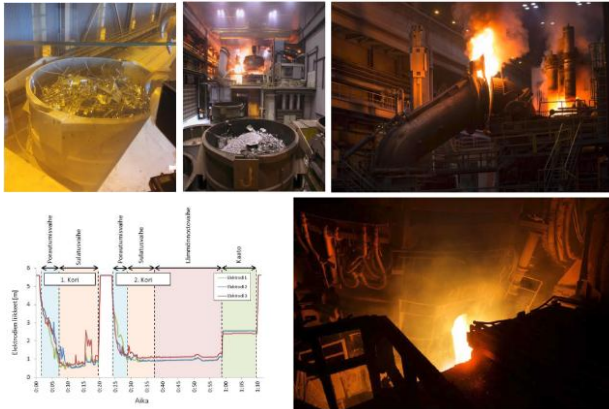


Lähteet: Helena Kumpulainen & Reima Väinölä, Esitys, POHTO, 2011 & Ville Fomkin, Esitys, POHTO, 2015.

Oulun yliopisto



Valokaariuuni



Esimerkki: Tornion jaloterästehtaan VKUt

- 2 kpl vaihtovirtauuneja, 95 ja 150 t
 - Polttimet, hapen injektointimahdollisuus
- Raaka-aineet
 - Romut ja seosaineet
 - Kuonanmuodostajat
 - Koksi
- Energialähteet
 - Sähköenergia n. 2/3 – 3/4
 - Metallien hapettuminen n. 1/5 – 1/4
 - Polttimet
- Energiantarve
 - Terässulaan sitoutuneena > 1/2
 - Savukaasut ja pölyt n. 1/5
 - Vesijäähdytys n. 1/10
 - Kuona, vuoraukset, säteily, konvektio
- Vaiheet
 - Romun panostus korilla (holvi ja elektrodit siirretty sivuun)
 - Porautumisvaihe
 - Sulatusvaihe
 - (2. korin panostus, porautuminen ja sulatus)
 - Lämmönnostovaihe
 - Kaato
- Välttettävä kromin liiallista hapettumista

Oulun yliopisto

Lähteet: Hyttisen (2013) ja Karassaaren (2008) diplomityöt. Oinaksen (2016) opinnäytetyö. Hoolin esitys POHTOssa 2015.



Ruostumattoman teräksen valmistus



AOD-konverterin panostus Outokummun Tornion tehtailla, 2011.
Kuvälähde: Juha Roininen, Pentti Kupari & Timo Parviainen.

(Raaka-aineiden esikäsittely)

- Rauta- ja kromirikasteen sintraus tai pelletointi
- Koksaus

Pelkistys ja sulatus: Uppokaariuuni

- Rauta- ja kromioksidien pelkistys, materiaalin sulatus
- Suuri sähkönkulutus

Primääriuuni: AOD- (tai VOD-)konverteri

- Epäpuhtauksien poisto happipuhalluksella

Sekundäärimetallurgia: Senkkakäsittelyt

- Teräksen koostumuksen ja lämpötilan säätö
- Tasalaatuisuuden varmistaminen

Jatkuvavalu

- Teräksen jähmettyminen

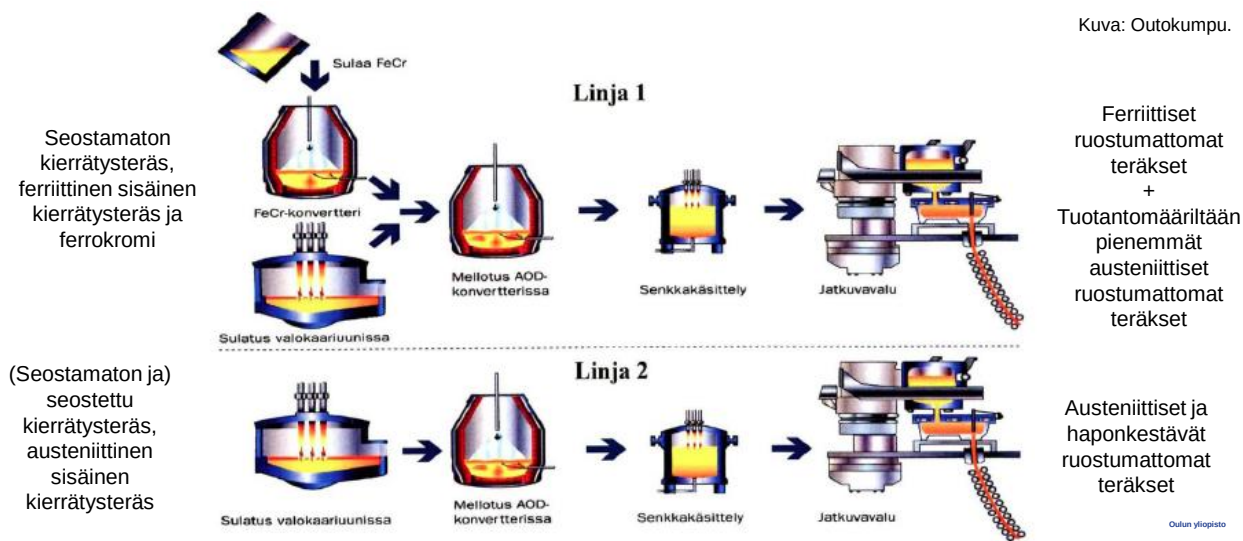
Oulun yliopisto



Ruostumattoman teräksen valmistus

Ruostumattoman teräksen valmistus Torniossa

Kuva: Outokumpu.



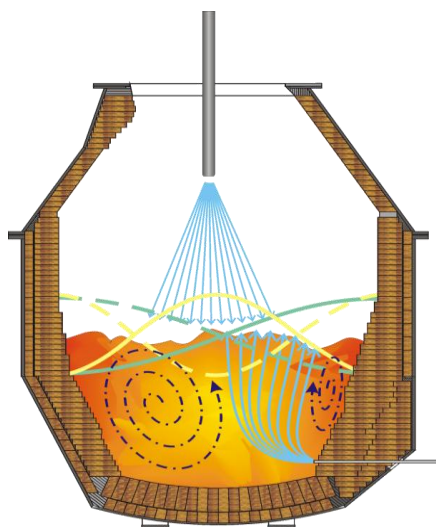
AOD-konvertteri

Kromin hapettumisen ehkäisy/vähentäminen

- Hiilenpoisto ilman liiallista kromin hapettumista
 - Kilpailevat reaktiot:

$$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$$

$$4/3\text{Cr} + \text{O}_2 = 2/3\text{Cr}_2\text{O}_3$$
 - Molempia voidaan edistää lisäämällä hapen määrää/osapainetta
 - Hiilimonoksidin osapainetta laskemalla voidaan edistää mellotusta ilman, että kromin hapettuminen tehostuu
- Keinoit hiilimonoksidin osapaineen laskemiseksi
 - Kokonaispaineen alentaminen → kaikki osapaineetkin laskevat
 - CO:n osapaineen laskeminen lisäämällä muiden kaasukomponenttien osuutta
- AOD – Argon Oxygen Decarburization
 - Perustuu CO:n osapaineen laskemiseen argonin avulla
- VOD(C) – Vacuum Oxygen Decarburization (Converter)
 - Perustuu kokonaispaineen laskuun ("Tyhjäkonvertteri")



Kuva: Petri Mure

Outokumpu



AOD-konvertteri



Raakateräksen panostus AOD-konvertteriin AB Sandvik Materials Technologyn tehtailla Sandvikenissä, Gästriklandissa, 2015.
Kuva: Pia & Hans Nordlander (Jernkontoretin arkisto).

Raaka-aineet

- Metallisula valokaariuunista ja kromikonvertterista
 - Cr 20 %, Ni 6 %, C 2 %, Si 0,1 %
- Siiloista
 - Kuonanmuodostajat: Kalkki, dolomiittikalkki, fluspaatti
 - Cr, Ni, Mo -seosaineet
 - Siiloromu
 - Pelkistimet: FeSi, SiMn
- Kaasupuhallus
 - Mellotusvaiheessa happea päältäpuhalluslanssin ja pohjapuhallussuutinten kautta
 - Mellotuksen edetessä happea korvataan ensin typellä ja sitten argonilla
 - Mellotuksen viimeisessä vaiheessa ei lanssipuhallusta
 - Pelkistys- ja rikinpoistovaiheissa argonpuhallus pohjasuutinten kautta

Tuotteet

- AOD-sula – Koostumus riippuu teräslajista
 - esim. Cr 18 %, Ni 8 %, C 0,04 %, Si 0,5 %
- Kuona (CaO-MgO-SiO_2)
- Savukaasut (CO_2) + pölyt

Oulun yliopisto



AOD-konvertteri

Stage	Purpose	Approximate duration	Gas	Other remarks
A	Decarburisation	20-40 min	O_2 (top, tuyères), N_2 (tuyères)	Top blowing only in the beginning.
B	Reduction of oxides	5-8 min	N_2 / Ar (tuyères)	Nitrogen replaced by argon in stages.
C	Desulphurisation	5 min	Ar (tuyères)	May be combined with the reduction stage



Näytteenotto AOD-konvertterista.
AB Sandvik Materials Technology, Sandviken, Gästrikland, 2015.
Kuva: Pia & Hans Nordlander, JK:n arkistot.
Taulukkolähde: Heikkinen *et al.*: EOSC2018, Taranto, Italy, 2018.

1-vaihe: Mellotus

- Happipuhallus
- Piinpoisto
- Hiilenpoisto
- Kromin hapettuminen
- Kuonan muodostuminen

2-vaihe: Pelkistys

- Typen ja argonin puhallus
- Kuonan pelkistys (yleensä FeSi:llä)
 - Hapettunut kromi pelkistetään takaisin metallifaasiin
 - Myös muiden aineiden (Fe, Mn) pelkistymistä
- Teräksen tiivistys
- Typpi-pickupia voi esiintyä

3- vaihe: Rikinpoisto

- Rikinpoisto CaO :n avulla – emäksinen kuona
- Voidaan toteuttaa yhdessä pelkistysvaiheen kanssa

Oulun yliopisto



AOD-konvertteri

Tyypillinen AOD-kuonan koostumus
mellotusvaiheen lopussa:

Cr ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	MnO	S	E-aste
25	10	1	4	40	5	10	0,1	7

Lähde:
Roininen, Kupari & Parviainen:
Esitys. POHTO, Oulu. 2011.

AOD-kuona muodostuu

- Hapettumisreaktioiden tuotteista
 - SiO₂, Cr₂O₃, FeO, MnO
- Kuonanmuodostajista
 - kalkki, doloma
- Liuenneista vuorausmateriaaleista

Mellotusvaiheen kuona

- Piillä on korkein happiaffiniteetti – hapettuu ensin
- Kalkin lisäys alkuvaiheessa
 - CaO+SiO₂ –pohjainen kuona
 - Kalkin tulisi liueta nopeasti – vältetään vuorauksen kulumisen
 - Liiallinen kalkinlisäys johtaa kuonamäärän kasvuun ja hidastaa mellotusta
- Piinpoiston jälkeen happi reagoi hiilen ja kromin kanssa
 - riippuu lämpötilasta, metallin koostumuksesta ja p_{CO}:sta
 - Kromin hapettumisen vähentämiseksi happipuhallusta korvataan happi/typpi- ja happi/argon-puhallukseksi
 - Jos Cr₂O₃ > 5 % kuonassa – erkaantuu omaksi faasikseen
- Rautaa ja mangaania hapettuu jonkin verran

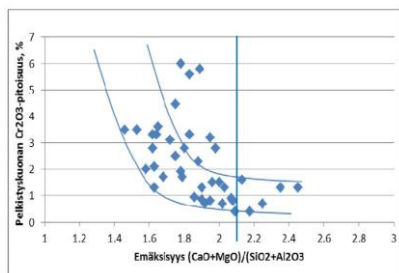
Oulun yliopisto



AOD-konvertteri

Tyypillinen AOD-kuonan koostumus
pelkistysvaiheessa:

Cr ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	MnO	S	e-aste
0.5	0.5	1	9	55	30	0.5	0.2	2.1



Lähde:
Roininen, Kupari & Parviainen:
Esitys. POHTO, Oulu. 2011.

Pelkistysvaiheen kuona

- Kromia, rautaa ja mangaania on hapettunut mellotuksessa
- Pelkistys – FeSi tai SiMn lisäys
- Teräksen tiivistys piillä samanaikaisesti
 - Jos vaaditaan erittäin matalia happipitoisuuksia, voidaan lisätä alumiinia tiivistysaineeksi
- Jos kuonanpelkistys epäonnistuu:
 - kromihävikki kuonaan kasvaa
 - rikinpoisto epäonnistuu
 - teräksen tiivistys epäonnistuu
- Kuonanpelkistys vaatii emäksisen ja juoksevan kuonan
 - CaF₂:n lisäys viskositeetin alentamiseksi
 - Pelkistystä nopeutetaan sekoituksella ja korkealla lämpötilalla

Rikinpoistovaiheen kuona

- Vaatii matalaviskositeettisen ja emäksisen kuonan
- Kaksikuona- tai yksikuonapraktiikka

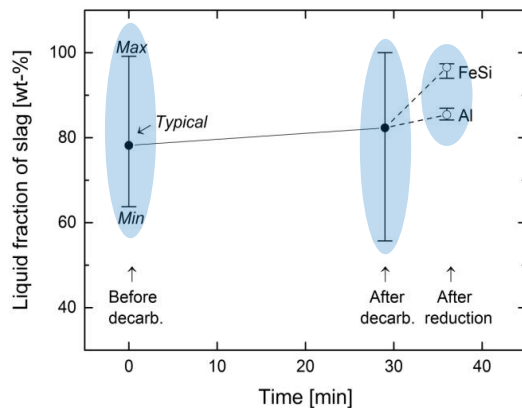
Doloman käyttö kuonanmuodostajana

- MgO alentaa viskositeettia ja likviduslämpötilaa
 - Ei tarvetta fluspaatille
- Vähentää MgO:n liukenemista vuorauksista kuonaan

Oulun yliopisto



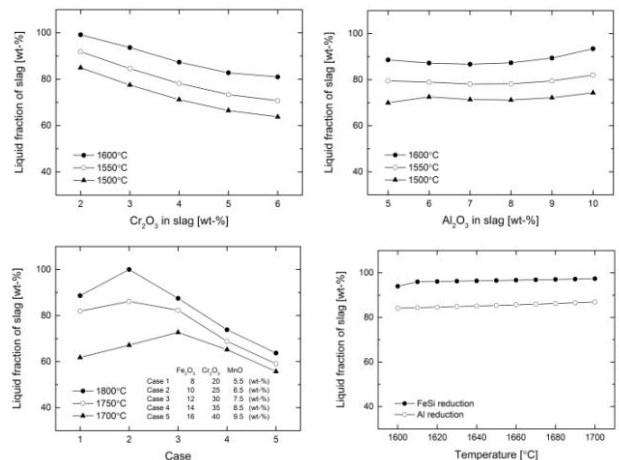
AOD-konvertteri



Lähde:
Heikkinen, Visuri & Fabritius: "On the heterogeneity of AOD slags in different stages of blowing". EOSC2018-conference. Taranto, Italy. 10-12 October 2018.

AOD-konvertterin kuona on heterogeeninen

- esim. sulafaasin osuus puhalluksen eri vaiheissa



Oulun yliopisto



Sulkeumat

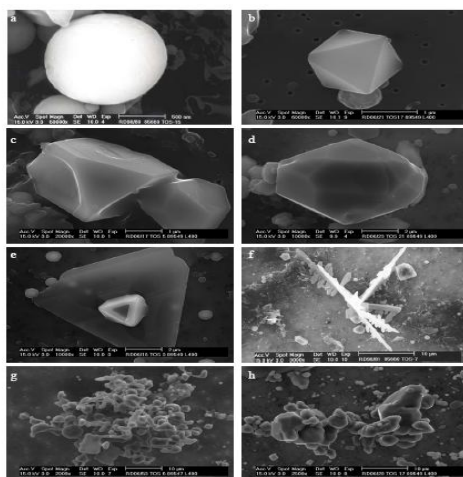


Fig. 4.2 Typical inclusion shapes. The inclusions are extracted from the steel matrix. (a) small spherical inclusion, (b) octahedral inclusion, (c) small polyhedral inclusion, (d) large polyhedral inclusion, (e) plate-like inclusion, (f) dendrite, (g) cluster, and (h) aggregate.

Pieniä, ei-metallisia yhdisteitä teräksessä

- Oksidit, sulfidit, nitridit

Tavoitteena on poistaa sulkeumat senkassa, väliahtaassa ja kokillissa, mutta TERÄKSEEN JÄÄ AINA SULKEUMIA

Voivat aiheuttaa ongelmia prosessille

- Valettavuus heikkenee (kurominen/jatketiilen tukkeutuminen)
 - Epästabiili prosessi, vaikea hallita
 - Alentuneet valunopeudet

Voivat aiheuttaa ongelmia lopputuotteeseen

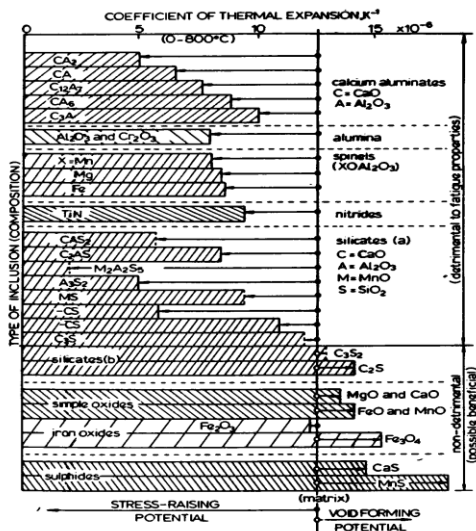
- Teräksen puhtaus heikkenee (enemmän sulkeumia)
- Vaikutus pinnanlaatuun, lujuuteen, hitsattavuuteen, jne.

Sulkeumien muokkaus vähemmän haitalliseen muotoon

Oulun yliopisto



Sulkeumien ominaisuuksia



Oulun yliopisto

Määrä

- Kokonaishappipitoisuus kuvaa kohtalaisesti

Koko(jakauma)

- Sisäsyntyiset sulkeumat ovat yleensä pieniä (< 25 μm ; mikrosulkeumat) ja muodostuvat kemiallisissa reaktioissa
- Ulkosyntyiset sulkeumat ovat yleensä suuria (> 200 μm ; makrosulkeumat) ja ovat seurausta kuonapisaroiden tai vuorausten kappaleiden päätyemisestä terässulaan
- (Lisäksi jäähdyttämisen yhteydessä syntyvät vielä pienemmät erkaumat)

Kemiallinen ja mineraloginen koostumus

- Vaikuttavat käyttäytymiseen jatkokäsittelyissä
 - Kovuus
 - Lämpölaajeneminen suhteessa teräkseen



Sulkeumien alkuperä

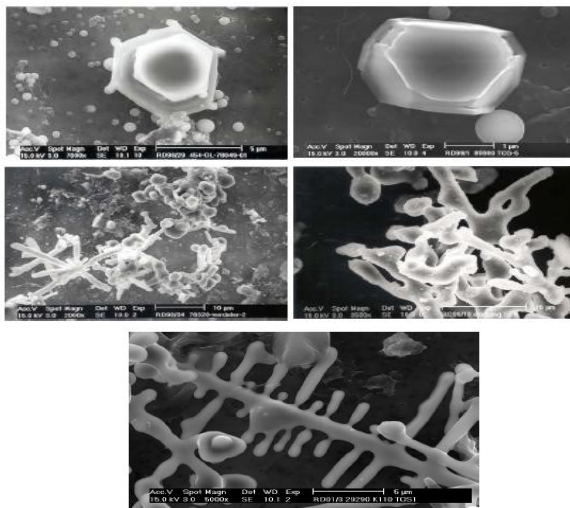


Fig. 2.6 Spheroidization of dendrites in a sample taken a few minutes after deoxidation.

Oulun yliopisto

Tiivistystuotteet

Ca-käsittelyn aikana muodostuneet sulkeumat

Reoksidaatio tuotteet

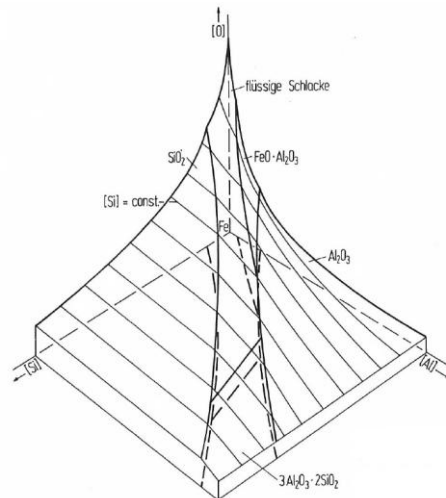
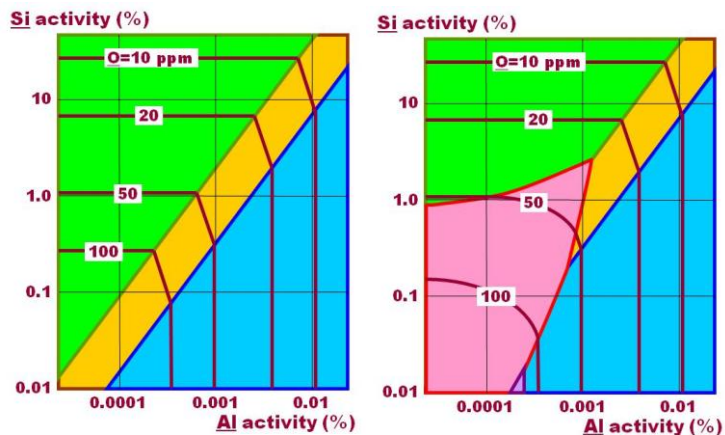
- Kuona, vuorausmateriaalit, ilma

Vuorauksen kappaleet

Kuonapisarot



Sulkeumien alkuperä – Tiivistys



Fe-Al-Si-Mn-O
T = 1600 °C
 $a_{Mn} = 0.0 / 0.5$

Oulun yliopisto



Sulkeumien alkuperä – Tiivistys

Tiivistyksen termodynamiikkaa

- Liuenneen hapen määrä tasapainossa määräytyy tiivistysaineen ja sen määrän perusteella

Tiivistyksen vaiheita

- Kemiallinen reaktio on yleensä erittäin nopea teräksenvalmistuslämpötiloissa
 - Liuenneen hapen määrä laskee erittäin nopeasti
- Sulkeumien ydintyminen
 - Homogeeninen ydintyminen vaikeampaa kuin heterogeeninen
- Sulkeuminen kasvu
 - Diffuusio, laminaarinen ja turbulenttinen virtaus, neste
- Sulkeumien kulkeutuminen rajapinnoille
 - Voidaan tehostaa sekoituksella
- Sulkeumien poistuminen
 - Kuonaan tai vuorausten pinnalle
 - Kokonaishappipitoisuus laskee vasta sulkeumien poistuessa

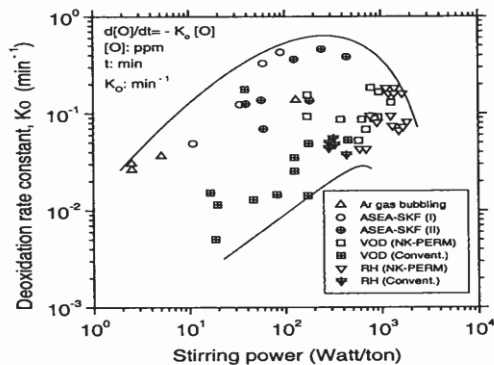


Fig. 16. Effect of stirring power on deoxidation rate in various refining processes (Ar gas bubbling⁹⁾; ASE-A-SKF⁹⁾; VOD and RH⁷⁷⁾).

Kuva: Zhang & Thomas, ISIJ International 43 (2003), 271-291

Oulun yliopisto



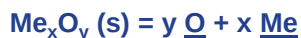
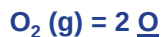
Sulkeumien alkuperä – Reoksidaatio



Kuvat: Eetu-Pekka Heikkinen, TkL-työ, 2001.

Matala happitaso tiivistyksen jälkeen

- Ajava voima reoksidaatiolle aina kun tiivistetty sula teräs on kontaktissa happea sisältävien aineiden kanssa
 - Kuona
 - Vuorausmateriaalit
 - Ilma



Liennut happi reagoi teräkseen liuenneiden seosaineiden kanssa

Oulun yliopisto



Sulkeumien alkuperä – Reoksidaatio

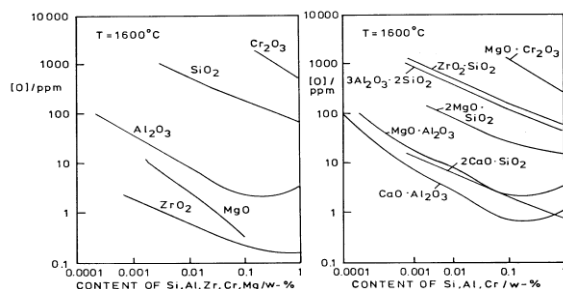
Reoksidaation aiheuttamia ongelmia

- Teräksen puhtaus heikkenee / Sulkeumien määrä kasvaa
 - Lopputuotteen ominaisuudet heikkenevät
- Sulkeumien koostumus ja kokojakauma muuttuvat
 - Prosessinhallinta vaikeutuu
- Kuonan koostumuksen muuttuminen
 - Prosessinhallinta vaikeutuu
- Tulenkestävien materiaalien kuluminen

Reoksidaatiolähteet

- Ilma
 - Hapen osapaine ilmassa (0,21 atm) on aina riittävä reoksidaatiolle
 - Estettävä "kineettisesti" – tehdään hapensiirrosta ilmasta teräkseen niin hidasta, ettei se aiheuta ongelmia
 - Käytännössä estettävä tiivistetyn terässulan ja ilman kontakti
- Oksidiset materiaalit – Kuona ja vuorausmateriaalit
 - Terässulan ja oksidien kontaktia ei voida täysin välttää
 - Kuonissa ja vuorauksissa käytettävä termodynaamisesti mahdollisimman stabiileja oksideja
 - Reoksidaatiolle on ajava voima mikäli terässulan happitaso on matalampi kuin tasapainohappitaso teräksen kanssa kosketuksissa olevan oksidimateriaalin kanssa

Oulun yliopisto





Sulkeumien alkuperä – Reoksidaatio

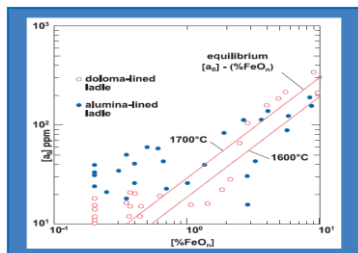


Figure 4. Relationship between the FeO -content of the slag and the oxygen-activity of liquid steel

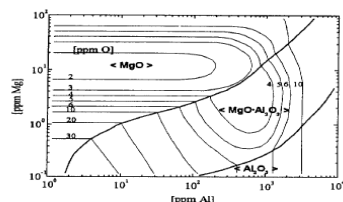


Fig. 5. The stability diagram of Fe-Mg-Al-O at 1873 K.

Senkkakuonan tulisi koostua stabiileista oksidikomponenteista

- SiO_2 :a epästabiilimpia komponentteja ei tulisi olla paljon
- Erityisen haitallisia ovat FeO ja MnO
 - Konverterikuonasta

CaO- Al_2O_3 -pohjaiset kuonat ovat yleisiä

- Sekä CaO että Al_2O_3 ovat erittäin stabiileja
 - Hapen liukeneminen CaO- Al_2O_3 -kuonista teräkseen hyvin vähäistä
 - CaO:lla voi kuitenkin olla vaikutus sulkeumien koostumukseen

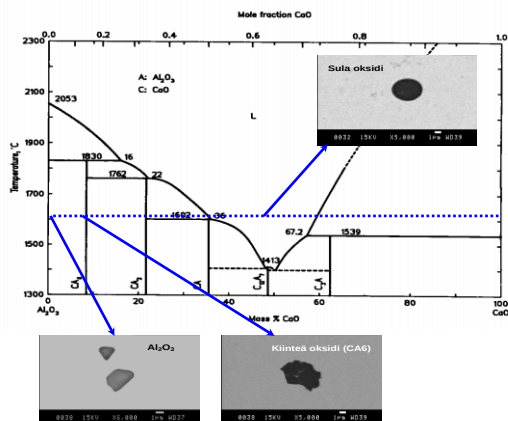
Vuorausten MgO ei juurikaan liukene terässulaan, mutta se voi liueta kuonaan, josta se voi päätyä myös terässulaan ja muuttaa sulkeumien koostumusta

- Spinellisulkeumien ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) muodostuminen
 - Kovia, kiinteitä sulkeumia
 - Vaikeampia muokata sulaan muotoon

Oulun yliopisto



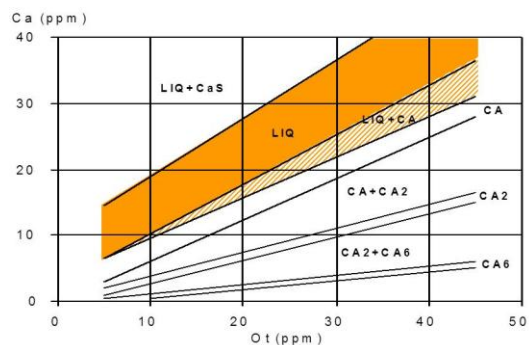
Sulkeumien kalsiumkäsittely



Ca-käsittelyn tavoitteena on muokata kiinteät alumiinioksidisulkeumat suliksi kalsiumaluminaateiksi

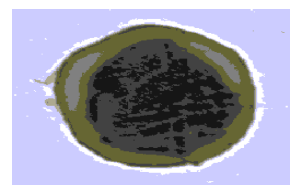
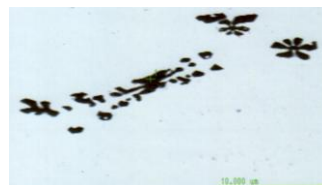
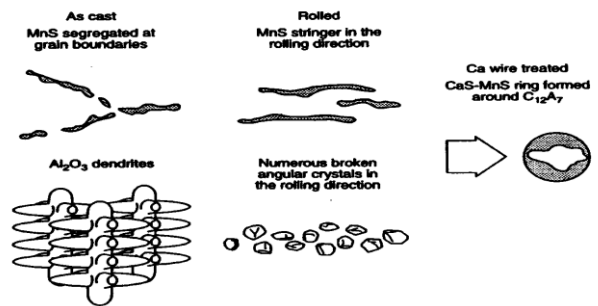
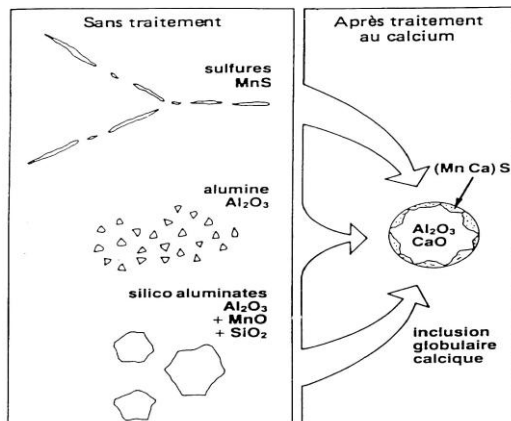
- Helpompia poistaa terässulasta
- Vähemmän haitallisia valussa (ei kuromista)
- Vähemmän haitallisia lopputuotteen ominaisuuksille

Vaadittava Ca-määrä riippuu kokonaishapesta





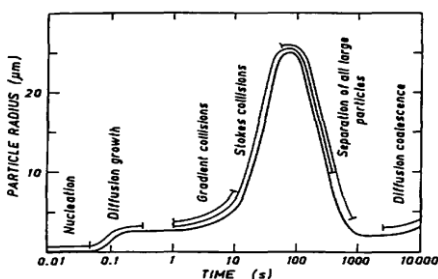
Sulkeumien kalsiumkäsittely



Oulun yliopisto



Sulkeumien poisto



Figur 2.1. Tillväxten och partikelstorlek enligt Lindborg och Torssell².

Sulkeumien kasvu

- Diffuusio
- Törmäykset
 - Brownin liike
 - Laminaarivirtaukset
 - Turbulentiset virtaukset
 - Tiheyserot

Sulkeumien poistuminen

- kuonaan
- vuorausten pinnalle
- kaasukuplien mukana

Sulkeumien poistoa voidaan tehostaa

- tehokkaalla sekoituksella aluksi
- rauhallisemmalla sekoituksella lopuksi

Oulun yliopisto



Sulkeumien poisto

Edellytyksiä hyvälle sulkeumapuhtautehdelle

- Onnistunut tiivistys
 - Riittävästi alumiinia liuennan hapen sitomiseksi
 - Vähemmän happea reagoimassa valun aikana
- Pelkistävä, emäksinen pintakuona
 - Matala FeO- (ja MnO-)pitoisuus
 - Ei kuonan aiheuttamaa reoksidaatiota
 - Kuonan kyky sitoa itseensä sulkeumia
- Riittävä käsittelyaika
 - Sulkeumilla aikaa erottua kuonaan
- Hapettumisen/Reoksidaation estäminen
 - Stabiilit kuonat, peitosteet ja vuoraukset
 - Ei ilmakontaktia

Lähde: Tuomas Antola, Esitys, POHTO, 2018.

Oulun yliopisto



Sulkeumien analysoinnista

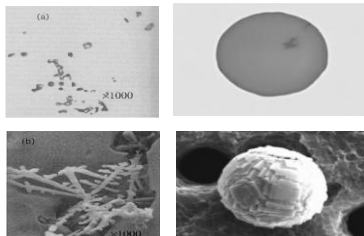
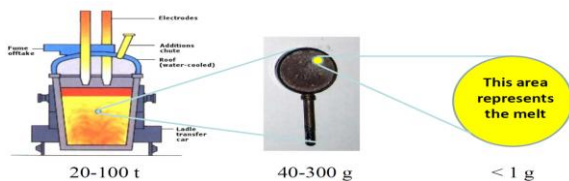
Monia sulkeumia ei havaita ennen kuin ne aiheuttavat ongelmia lopputuotteessa

Sulkeumien analysoinnin haasteet

- Valtavat teräsmäärät vs. mitättömän pienet näytteet
 - Edustavuus – suuret sulkeumat erittäin harvinaisia
- Valtavat määrät (pieniä) sulkeumia
 - Kertovatko keskiarvot yhtään mitään?
- Erilaiset analysointimenetelmät kertovat eri asioita
 - Koko, koostumus
 - "Täydellistä" kokojakaamaa ei saada yhdellä menetelmällä
- Jotkut analysointimenetelmistä aikaavieviä
 - Eivät ehdi osaksi prosessinsäätöä ja -ohjausta
- Monet menetelmät kertovat vain poikkileikkauksista
 - Näyte sulasta – analyysi jähmettyneestä teräksestä
 - Vastaavuus?

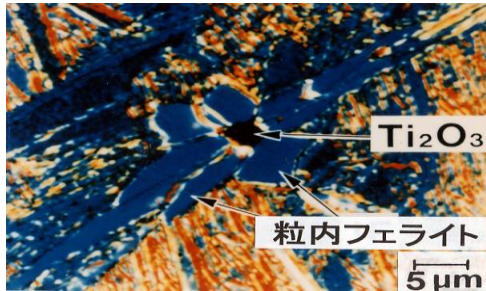
ks. erillinen lisäaineisto (englanniksi) sulkeumien analysoinnista

Oulun yliopisto





Hyödyllisiä sulkeumia?



粒 = つぶ = tsubu = rae
内 = うち = uchi = sisällä
フェライト = feraito = ferriitti

粒内フェライト = tsubunaiferaito
= asikulaarinen ferriitti

Sulkeumat ovat useimmiten haitallisia sekä prosessinhallinnan että tuotetominaisuuksien kannalta

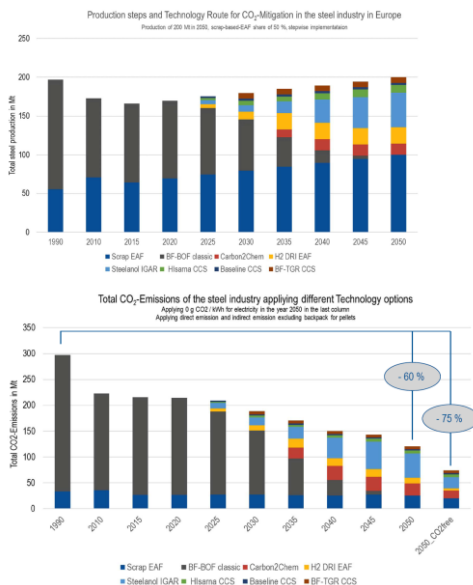
Joissain tapauksissa sulkeumista on hyötyä

- Sulfidisulkeumat parantavat tiettyjen teräslajien työstettävyyttä
 - Toimivat voiteluaineina esim. sorvauksessa
- Erkaumakarkeneminen
 - Sulkeumat/erkaumat rajoittavat dislokaatioiden liikettä
- Teräksen rakennetta ja ominaisuuksia voidaan ohjata käyttämällä pieniä sulkeumia uusien faasien ydintäjinä
 - esim. asikulaarisen (rakeiden sisäisen) ferriitin muodostuminen pienten sulkeumien (Ti_2O_3 , ZrO_2 , CeS , MnOTiO_2 , TiN , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ympärille
 - "Normaalisti" terästä voidaan lujittaa pienentämällä raekokoa ydintämällä ferriittiä austeniitin raerajoille – lisääntynyt raerajojen määrä rajoittaa dislokaatioiden liikettä
 - Sulkeumat mahdollistavat ferriitin muodostumisen austeniittirakeiden sisälle
 - Vaatii erittäin tarkan koostumuksen hallinnan

Oulun yliopisto



Yhteenveto



Teräksen valmistuksen prosessit riippuvat raaka-aineista ja valmistettavista tuotteista

- Malmipohjainen teräksen valmistus
 - Masuuni – Konverteri – Senkkakäsittelyt – Jatkuvavalu
- Romupohjainen teräksen valmistus
 - Valokaariuuni – Senkkakäsittelyt – Jatkuvavalu
- Ruostumattoman teräksen valmistus
 - (Valokaariuuni) – AOD – Senkkakäsittelyt – Jatkuvavalu
- Jatkossa tullaan siirtymään kohti hiilivapaampaa raudan- ja teräksenvalmistusta
 - Vetypelkistys

Kuva: R Fandrich: "Steel production in Europe and Germany – A progress report". 10th Int. Conf. on Clean Steel. Budapest, Hungary, 18-20.9.2018.

Oulun yliopisto