

# JERNKONTORETS FORSKNING

---

## Järn- och stålframställning

### Skänkmetallurgi och gjutning

**Jernkontorets utbildningspaket – del 4**



# JERNKONTORET

## Förord

På initiativ av Jernkontorets fullmäktige togs under 1990-talet fram ett läromedel, det s k "Utbildningspaketet", som i tolv delar täcker hela produktionskedjan vid stålframställning. Läromedlet författades av experter inom nordisk stålindustri. Delarna 1 – 4 och 6 – 12 granskades dessutom av styrelserna för Jernkontorets teknikområden. Varje del omfattade en pärm med ett fyrtiotal OH-bilder samt ett textkompodium.

För att göra utbildningspaketet mer lättåtkomligt beslöt Jernkontoret senare att ge ut läromedlet i s k pdf-format (dvs elektroniska dokument möjliga att distribuera via e-post och webbplats). I samband med detta omarbetades och uppdaterades delarna 1 – 5.

Läromedlet behandlar följande områden:

<i>Del</i>	<i>Titel</i>	<i>Omarbetat av</i>	<i>År</i>
1	Historia, grundläggande metallurgi.....	Sven Ekerot	2000
2	Malmbaserad processmetallurgi.....	Sven Ekerot	2000
3	Skrotbaserad processmetallurgi .....	Henrik Widmark	2000
4	Skänkmetallurgi och gjutning .....	Sven Ekerot	2000
5	Underhåll och driftsekonomi .....	Hans Gillberg och Niklas Brodd, ABB	2001
		<i>Författat av</i>	
6	Analytisk kemi .....	Carl Bavrell	1996
7	Energi och ugnsteknik.....	Jan Fors och Martti Köhli	1997
8	Bearbetning av långa produkter .....	Magnus Jarl, Håkan Lundbäck, Jan-Olov Perä och Åke Sjöström	1996
9	Bearbetning av platta produkter .....	Nils-Göran Jonsson, Jan Levén Åke Sjöström och Olof Wiklund	1996
10	Oförstörande provning .....	Jan-Erik Bohman, Bernt Hedlund, Bengt Moberg, Bert Pettersson och Björn Zetterberg	1996
11	Olegerade och låglegerade stål.....	Bengt Lilljekvist	1996
12	Rostfritt stål.....	Staffan Hertzman och Hans Nordberg	1997

Den första utgåvan av delarna 1 – 4 utarbetades av Jan Ugglå och bilderna producerades av Jenö Debröczy. Några av dessa bilder återfinns i den omarbetade utgåvan.

Del 5 bygger på ABB Handbok Industri och har sammanställts av Hans Gillberg och Niklas Brodd.

Databild AB har producerat bilderna i delarna 6 – 12.

Utbildningspaketet vänder sig i första hand till anställda vid stålföretagen, elever vid gymnasie- och högskolor samt stålföretagens kunder.

Hans Sandberg, Teknisk direktör

Jernkontoret, 2004

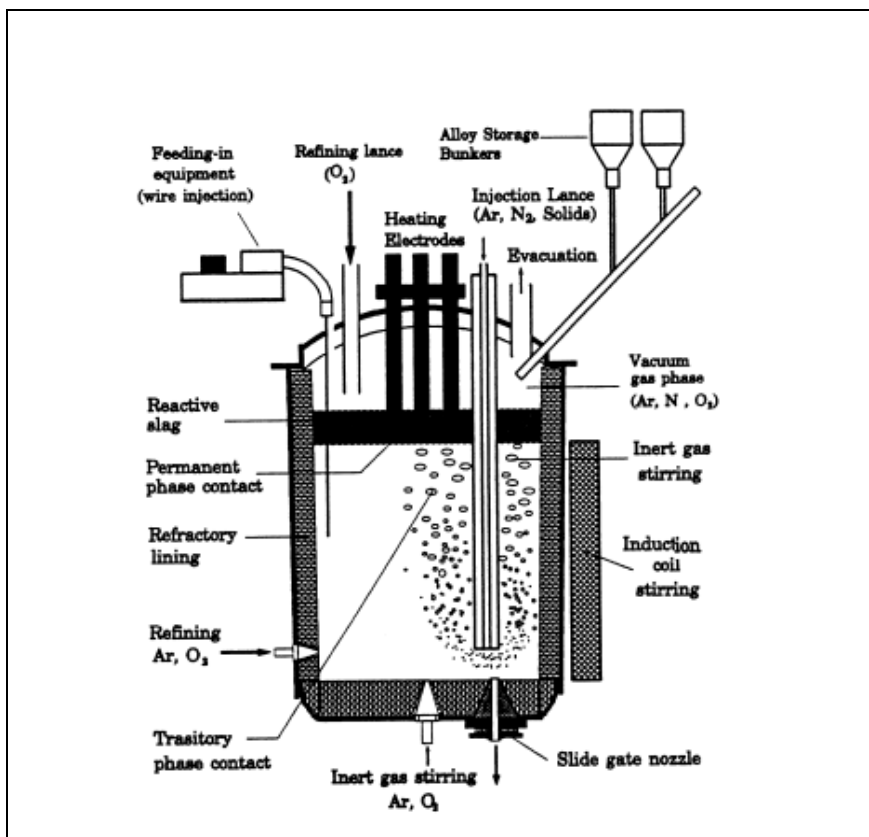
## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>4.</b>	<b>SKÄNKMETALLURGI OCH GJUTNING .....</b>	<b>1</b>
4.10.	BEGREPPET SKÄNKMETALLURGI.....	1
4.11.	EKONOMISKA OCH KVALITETSMÄSSIGA DRIVKRAFTER FÖR SKÄNKMETALLURGI .....	3
4.12.	KVALITETSKRAV FÖR EFTERBEHANDLING AV FLYTANDE STÅL.....	4
4.12.1.	<i>Kemiska analysen</i> .....	4
4.12.2.	<i>Slagginneslutningar</i> .....	4
4.12.3.	<i>Gasinnehåll</i> .....	6
4.12.4.	<i>Svavelhalten</i> .....	6
4.13.	EFTERBEHANDLINGENS OPERATIONER OCH PROCESSER.....	7
4.14.	ENHETSPROCESSER VID EFTERBEHANDLING .....	9
4.14.1.	<i>Omröring</i> .....	9
4.14.2.	<i>Vakuumbehandling</i> .....	10
4.14.3.	<i>Värmning</i> .....	11
4.14.4.	<i>Tillsättning av slagg och andra produkter</i> .....	11
4.14.5.	<i>Avslagning och tömning</i> .....	12
4.15.	ENHETSOPERATIONER VID EFTERBEHANDLING .....	14
4.15.1.	<i>Homogenisering av analys och temperatur</i> .....	14
4.15.2.	<i>Temperaturkontroll</i> .....	14
4.15.3.	<i>Svavelrening</i> .....	14
4.15.4.	<i>Desoxidation</i> .....	14
4.15.5.	<i>Legeringstillsatser</i> .....	20
4.15.6.	<i>Modifiering av oxidiska inneslutningar</i> .....	20
4.16.	GJUTNING .....	22
4.16.1.	<i>Inledning</i> .....	22
4.16.2.	<i>Teoretisk bakgrund för stelnandet</i> .....	22
4.16.3.	<i>Fenomen vid gjutningen</i> .....	24
4.17.	GÖTGJUTNING.....	29
4.17.1.	<i>Inledning</i> .....	29
4.17.2.	<i>Beskrivning av götgjutning och dess utvecklingssteg</i> .....	29
4.18.	STRÄNGGJUTNING.....	32
4.18.1.	<i>Inledning</i> .....	32
4.18.2.	<i>Beskrivning av stränggjutningsmetoden</i> .....	32
4.18.3.	<i>Olika typer av stränggjutningsmaskiner och olika ämnestyper</i> .....	34
4.18.4.	<i>Kvalitetsförbättrande utrustning</i> .....	36
4.18.5.	<i>Stränggjutning jämfört med götgjutning</i> .....	37
4.18.6.	<i>Drift av stränggjutningen</i> .....	38
4.18.7.	<i>Kvalitetsfrågor vid stränggjutning</i> .....	39
4.19.	FRAMTIDA UTVECKLING AV STRÄNGGJUTNINGEN.....	42
4.20.	DIREKTGJUTNING.....	43

## 4. SKÄNKMETALLURGI OCH GJUTNING

### 4.10. Begreppet skänkmetsallurgi

Med begreppet skänkmetsallurgi menas att i ett separat behandlingssteg i specialutrustad skänk eller skänkgugn göra färdigställningen av stålet. Typiska färdigställningsoperationer är svavelrening, desoxidation, legering och temperaturinställning. Historiskt genomförde man oftast i t.ex. ljusbågsugnen färdigställningsoperationerna beskrivna ovan. Skänken användes i princip enbart för transport av stålet till gjutstationen. För konverterprocesserna var det något annorlunda. I konverten gjordes färskning av kol och fosfor samt temperaturhöjning medan legering och desoxidation gjordes vid tappning i skänk. Här fanns sålunda en viss form av skänkmetsallurgi även om begreppet inte i sig var lanserat. En annan äldre process som var en föregångare till skänkmetsallurgin var Perrinprocessen där en försmält slagg hälldes i skänken med en sammansättning som var lämplig för svavel- eller fosforrening. Under tappningen erhöles genom den kraftiga omblandningen en stor kontaktyta mellan stål och slagg, vilket gav en snabb och för den tiden acceptabel svavel- och fosforrening. Andra föregångare till skänkmetsallurgin var installationen av särskilda vakuumbehandlingsstationer på 50-talet och pulverinjektion som kom på 70-talet. Med vakuumbehandling ville man desoxidera med kol medan pulverinjektionen i första hand användes till svavelrening till mycket låga värden. Det stora steget mot skänkmetsallurgi togs dock när man införde separat värmning i skänken. Detta skedde 1965 när den första ASEA-SKF skänken installerades, se figur 1.



Figur 1 ASEA-SKF-ugn med tillhörande utrustning

Den hade elektrisk värmning med ljusbågeelektroder i skänken och samtidig induktiv omröring. Genom värmningsmöjligheten skapades ett koncept där flera viktiga operationer kunde genomföras på ett metallurgiskt optimalt sätt vid det flytande stålets färdigbehandling. Skänkmetsallurgin, ”secondary steelmaking”, blev ett vedertaget begrepp. Ett flertal skänkungsalternativ utvecklades och utnyttjandet av det nya konceptet ökade snabbt inom världens stålindustri och är idag en viktig del i ett modernt stålverk.

#### 4.11. Ekonomiska och kvalitetsmässiga drivkrafter för skänkmetsallurgi

När man inför skänkmetsallurgi i ett stålverk kan man lite förenklat se det som att man går från att göra stål i ett steg till att göra det i två steg, vilket kan synas oekonomiskt. I själva verket visar dock en investeringskalkyl på stora effektivitetsvinster. Detta beror främst på att charge-tiden (tap to tap) kan minskas rejält i stålugnen varigenom en total kapacitetshöjning uppnås. Eftersom skänkgugnar är billigare i investeringar och drift än ordinarie stålugnar uppstår ett starkt produktionsekonomiskt incitament att installera skänkgugnar även i existerande anläggningar. Detta gäller främst vid stålframställning med ljussågsugn där flera färdigställningsoperationer utförs i ugnen. Vid stålframställning i konverterverk är snarare drivkraften att man tack vare skänkmetsallurgi kan tillverka fler ståltyper och utvidga sitt produktsortiment. Till detta kommer i båda fallen att flera färdigställningsoperationer kan göras effektivare och billigare i en skänkgugnsstation. Exempel på detta är bättre utbyten vid legering och ett mindre behov av höga överhettningstemperaturer vilket minskar in-fodringskostnader. Värdet av de kvalitetshöjningar som skänkmetsallurgin ger är svåra att kvantifiera men att kvalitetsaspekten har haft stor strategisk betydelse för besluten att investera i skänkmetsallurgi är helt klart.

## 4.12. Kvalitetskrav för efterbehandling av flytande stål

Utformningen av skänkungsmetallurgin styrs naturligtvis av krav på rationell produktion men också av att det är i efterbehandlingen efter stålugnen som man kan påverka de faktorer som inverkar på stålets slutliga kvalitetsegenskaper. Nedan sammanfattas därför de viktigaste kopplingarna mellan faktorer hos det flytande stålet och det färdiga stålets kvalitetsegenskaper. Slutegenskaper som påverkas av förhållanden i flytande stål är:

Sammansättning (Kemisk analys)

Slagginneslutningar, oxidiska och sulfidiska

Gasinnehåll, som lösta gaser eller gasbubblor (porer)

Föreningselement ex.vis svavel

Indirekta faktorer ex.vis temperatur

### 4.12.1. *Kemiska analysen*

Ur slutanvändarsynpunkt är ett viktigt kvalitetsmått på stål dess jämnhet och reproducerbarhet. Detta är i sin tur i hög grad kopplat till repeterbarhet i den kemiska sammansättningen hos stålet. Kunden beställer i regel ett stål mot en specifikation enligt internationell norm. Normalt har man utöver detta en styrning internt inom stålverket genom en intern specifikation som dels syftar till att ytterligare öka jämnheten hos egenskaperna men också kan ha syftet att minimera legeringskostnaderna. Det är alltså viktigt att ha väl utvecklade provtagningsrutiner och att provet tas ur en homogen smälta.

### 4.12.2. *Slagginneslutningar*

Slagginneslutningar i stål kan vara av två slag, oxider och sulfider. Oxidiska inneslutningar brukar man dela upp i endogena och exogena. De endogena som är den viktigaste gruppen är inneslutningar som bildas i stålet genom att syre reagerar med starka syrebindare som ex.vis Si, Al eller Ca. De exogena inneslutningarna som definieras som att de kommer in utifrån hör oftast från toppslag, keramiskt infodringsmaterial eller liknande källor. Denna typ minskar generellt i förekomst i takt med att nyare teknik införs i stålverken. Speciellt vid götgjutning finns dock alltid en risk att de uppträder. När de förekommer kan inneslutningarna vara flera millimeter stora och naturligtvis helt förödande för stålets egenskaper. De endogena oxidiska inneslutningarna är i storleksordningen några  $\mu$  som minst och 50 à 100  $\mu$  som störst. Beroende på desoxmedel erhåller man olika typer av inneslutningar.

Eftersom olika typer inverkar olika på stålets egenskaper behöver man hålla kontroll på vilken typ av inneslutning man har i stålet.

Många stålverk tillämpar en gammal indelning av inneslutningstyper beroende bl.a. på hur de deformeras vid bearbetningen. Indelningen görs i 4 klasser;

- A Duktila inneslutningar som följer stålets deformation vid varmbearbetningen. Inneslutningarna förlängs kraftigt i valsriktningen. Typiskt är mangansulfider samt kalcium- och mangansilikater med relativt hög SiO<sub>2</sub>-halt.
- B Spröda inneslutningar som är uppbrutna i strängar eller separata fragment under bearbetningen. Typiskt är deformerade Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-svärmar, titankarbo-nitrider och MnO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- C Inneslutningar bestående av en hård kärna som omges av en deformerbar fas. Typiskt är silikater med en lägre SiO<sub>2</sub>-halt jämfört med A.
- D Hårda inneslutningar som inte deformas vid bearbetningen. Kaviteter syns ofta i valsriktningen. Typiskt är kalciumaluminater, MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-spinneller och små Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-inneslutningar.

Beroende på vilka egenskaper som är viktiga försöker man styra typ av inneslutning. Nedan ges några av de vanligaste exemplen på detta.

Ytor d.vs. ytfinish är i många applikationer viktig. En typisk störning är att långa stråk av små Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-inneslutningar kommer upp i ytan och blir synliga. I dessa fall bör Al-desoxidation undvikas och i stället bör man sträva efter duktila inneslutningar enligt klass A.

Utmattningshållfastheten påverkas direkt negativt av oxidiska inneslutningar. Här har storleken stor betydelse och man bör således försöka hålla nere maxstorleken. T.ex. har en sänkning från en maxstorlek på 20-30μ till 5-10μ visat sig ha en påtagligt förbättrande inverkan. Speciellt negativt för utmattningshållfastheten är inneslutningar som har kaviteter i valsriktningen eftersom dessa utgör utgångspunkter för brottet. Man bör således undvika typ D och se till att man har en bra avskiljning så att maxstorleken kan hållas låg.

Tvärhållfastheten (d.v.s. hållfastheten i tjockleksriktningen) som är viktig för vissa konstruktionstillämpningar kan påverkas negativt av inneslutningar som har sträckts ut i tvärsriktningen. Detta kan ske hos glasiga silikater och vissa sulfider (enl. Typ A). Man bör i dessa fall sänka total halt svavel syre samt undvika desoxidation med Si-Mn.

Skärbarheten d.v.s. egenskaperna när stålet utsätts för skärande bearbetning har stor ekonomisk betydelse. Här har sulfider en starkt positiv inverkan på den s.k. spånbrytningen och därför upplegas oftast stål för skärande bearbetning med svavel. I allmänhet anses oxider vara negativa för skärbarheten och då speciellt stora hårda inneslutningar som kalciumaluminater (Typ D). En del stål specialdesignas med deformerbara glasiga silikater.

Korrosionsegenskaperna påverkas negativt av sulfider. I rostfria stål ersätter man mangansulfider med kalciumsulfider för att höja motståndet mot s.k. gropfrätning.



#### **4.12.3. Gasinnehåll**

De gaser som är intressanta för ståls egenskaper är väte och kväve. Båda dessa gaser kan lösa sig i flytande stål. Väte kan tas upp av smältan i kontakt med fukt i luft eller annan fukt medan kväveupptaget i regel kommer från kontakt med luft. Lösligheten för väte i fast stål är låg vilket gör att väte kan uppträda som porer i gjutet material s.k. pinholes. Detta är naturligtvis negativt för stålets egenskaper och vätehalten måste hållas ordentligt under löslighetsgränsen som är i storleksordningen 10 ppm. Löst väte är också negativt för stålets seghetsegenskaper men löst väte brukar speciellt vid klenare dimensioner diffundera ut ur stålet vid de värmebehandlingar som stålet genomgår. Vid stora smidesgöt kan segring av H och N ge porer i mitten av götet som inte kan vällas ihop. Kväve har en relativt hög löslighet i fast stål. Behovet att sänka kvävehalten före gjutning beror på att kväve i vissa fall bildar oönskade nitrider som kan vara negativa för framförallt duktilitetsegenskaperna. Kväve är inte alltid negativt, i vissa stål används det som ett legeringsämne. Sammanfattningsvis kan sägas att vätehalten i flytande stålet måste hållas ordentligt under lösligheten i fast fas medan krav på kvävehalten varierar mellan olika stålsorter.

#### **4.12.4. Svavelhalten**

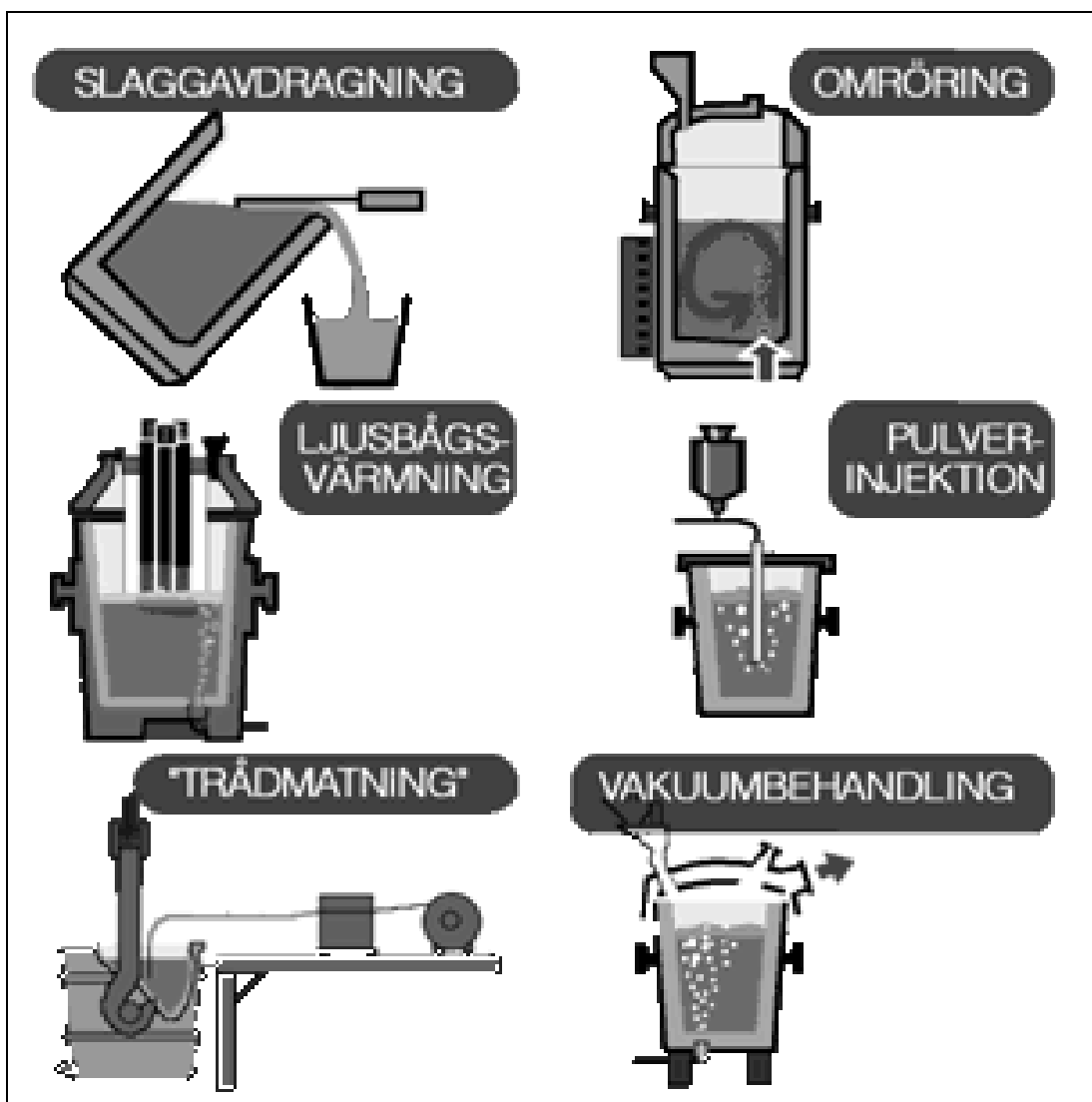
Svavlets negativa inverkan på ståls hållfasthet beror på att svavel har en låg löslighet i fast fas vilket gör att svavel segrar d.v.s. svavlet skiljs ut i de sist stelnade partierna. Detta gör att svavel även om det binds som sulfider kan försvaga korngränserna i stålet. För vissa applikationer ställs därför mycket stränga krav på låga svavelhalter.

#### 4.13. Efterbehandlings operationer och processer

För att systematisera och beskriva efterbehandlingen brukar man indela den i enhetsprocesser verktyg och enhetsoperationer. Enhetsprocesserna är egentligen de fysiska verktygen medan enhetsoperationerna definieras av metallurgiska mål.

Typiska enhetsprocesser är (se fig.2):

- Omrörning
- Vakuumbehandling
- Värmning
- Tillsättning av slagg och andra produkter
- Avslagning och tömning



Figur 2 Enhetsprocesser - skänkmetsallurgiska verktyg

Typiska enhetsoperationer är:

- Homogenisering av analys och temperatur
- Temperaturkontroll
- Svavelrening
- Desoxidation
- Legeringstillsatser

Nedan beskrivs först enhetsprocesserna varefter enhetsoperationerna och dess metallurgi behandlas.

## 4.14. Enhetsprocesser vid efterbehandling

### 4.14.1. Omröring

Tre typer av omröring används inom stålindustrin.

- Gasomröring
- Induktiv omröring
- Mekanisk omröring.

Den vanligaste omröringsmetoden är gasomröring. Den utförs genom att inert gas spolats genom en spolsten eller en lans. Spolstenen består av en porös keramisk plugg som är inmurad i botten på skänken eller i spetsen på lansen.

I regel används argon som spolgass men av kostnadsskäl kan även kvävgas förekomma när man kan tolerera en viss kväveökning. Argon är olösligt i stål och uppträder således inert.

Vid gasspolning åstadkommes omröringen genom att gasbubblorna stiger upp genom smältan. Effekten av gasen förstärks kraftigt när bubblorna expanderar i volym p g a minskande ferrostatiskt tryck. Därför blir omröringen relativt mer effektiv vid låga baddjup. Samma positiva effekt av växande bubblor erhålles även då överytan är satt under vakuum. Ett normalt gasflöde ligger mellan 1-5 liter per ton och minut.

Mekanisk omröring blir alltmer ovanlig i takt med att de alternativa omröringsmetoderna utvecklas. Det mekaniska slitaget på utrustningen är stort vid mekanisk omröring.

Vid induktiv omröring skapas en rörelse av att stålet utsätts för ett elektromagnetiskt kraftfält.

Kraftfältet induceras när ström leds genom induktionslingor som omger skänken, Omröringsintensiteten kan ökas med ökad strömstyrka. Med en omslutande induktionsspole strömmar smältan vertikalt genom centrumaxeln och ut mot kanterna, antingen medurs eller moturs beroende på strömriktningen i spolen.

Vid en jämförelse mellan gas – respektive induktiv omröring är den största skillnaden att gasomröringen ger bättre kontaktytor mellan stål och toppslag samt att endast gasomröringen kan ha en avgasande effekt på gasinnehållet i stålet.

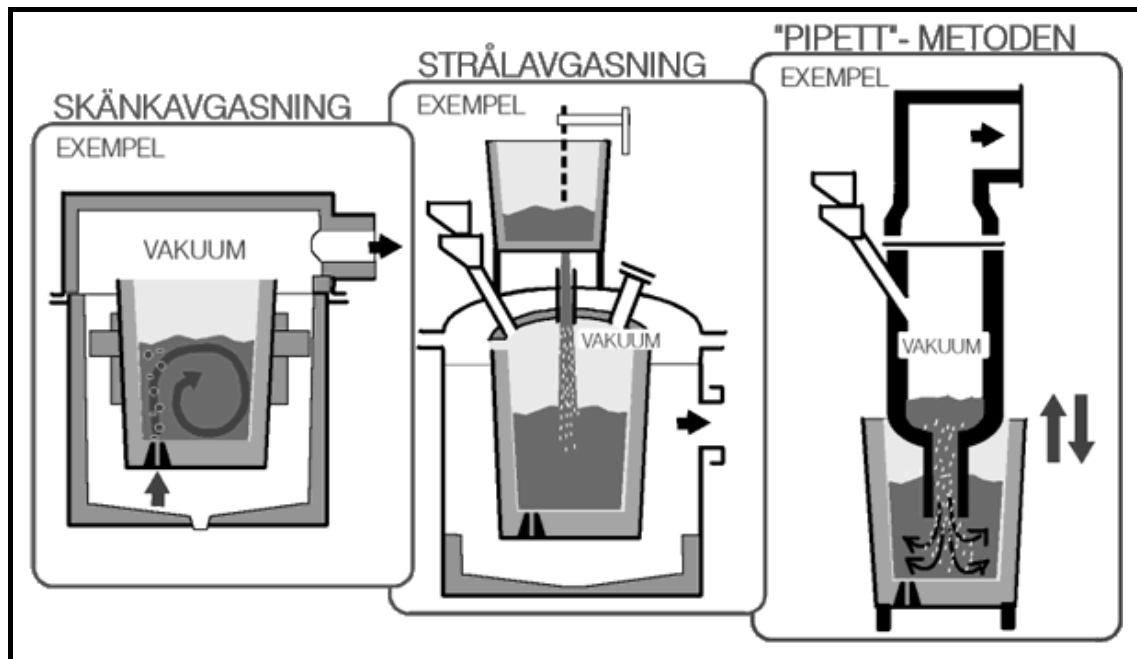
Vid vakuumbehandling ger också gasomröringen en effektivare påverkan på resultatet. I en kostnadsjämförelse har gasomröringen en högre rörlig kostnad medan den induktiva omröringen har en högre investeringskostnad.

I ökande utsträckning utrustas skänkungar med möjlighet till båda omröringssätten.

#### 4.14.2. Vakuumbehandling

Det finns principiellt tre olika praktiska metoder att vakuumbehandla (se fig.3):

- Tankavgasning
- Strålavgasning
- Pipettavgasning

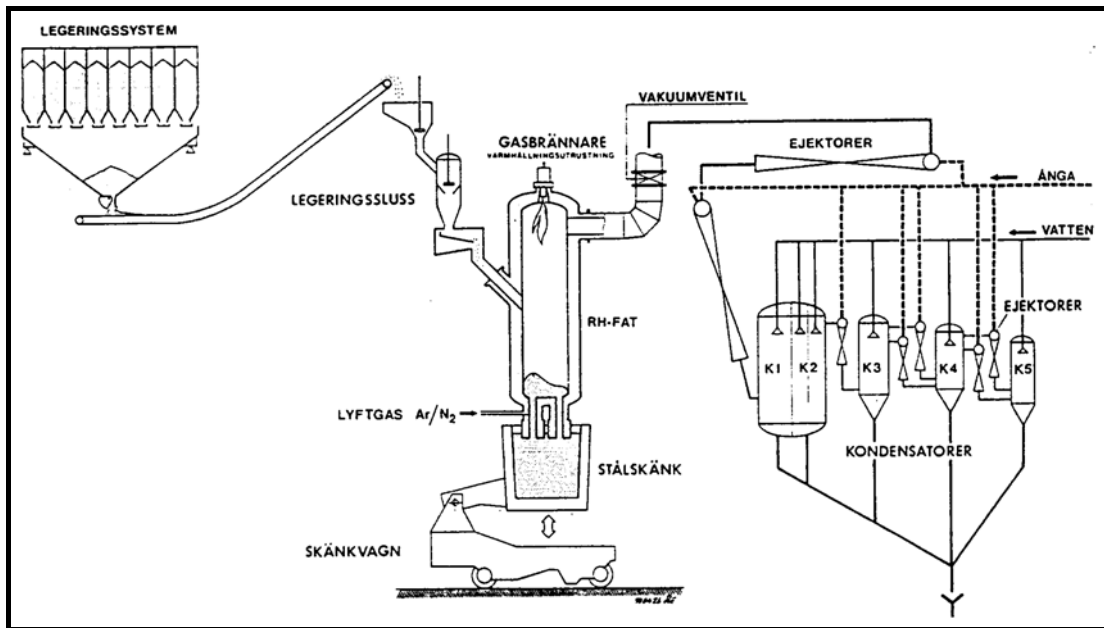


Figur 3 Olika typer av gasomröring

Ursprungligen utfördes tankavgasning genom att skänken sattes i en tank med lock varefter evakuering skedde. Detta system är ovanligt idag och har ersatts av den enklare varianten av tankavgasning där skänken fungerar som tank och ett vakuumlock läggs direkt på skänken. För att få en bra effekt på vakuumbehandlingen måste stålet omröras och då är gasomröring överlägset induktiv omröring.

Strålavgasning görs i samband med överhällning i annan skänk eller överhällning till gjutkokill. Ståldropparna utsätts för vakuum under stålstrålens fall ned i skänken eller kokillen. Man skapar med detta den stora stålyta som är nödvändig för en bra vakuumbehandling. Metoden är ovanlig och används mest vid gjutning av speciallegeringar.

Pipettavgasning finns i praktisk drift i en process som heter RH-avgasning, (se fig.4). Två långa keramikinfordrade ben stoppas ned i smältan varefter vakuum läggs på klockan ovan benen. Genom att underifrån tillföra argongas i ena benet blir ena stålpelaren lättare och man får ett kontinuerligt flöde från ena benet över till det andra.



Figur 4 R-H-avgasning

#### 4.14.3. Värmning

För ett fullständigt skänkm metallurgikoncept är värmning en nödvändighet. Det vanligast värmningssättet är att elektrisk energi tillförs med ljusbågelektroder precis som i en ljusbågsugn. Normalt är dock effekten i en skänkvagn mindre än en fjärdedel av effekten i en vanlig ljusbågsugn som mer är att likna vid en smältmaskin. Normal temperaturhöjning ligger vid 5 °C per minut. Det är nödvändigt att under värmningen röra om med gas eller induktivt för att undvika överhettning av stålet i överdelen av skänken. Normalt sker inte värmning samtidigt med vakuumbehandling. I ASEA-SKF-processen och dess efterföljare lyfts vid vakuumbehandling elektroderna bort och ett vakuumlöck appliceras på skänken.

I RH-anläggningen tillförs värme hos vissa användare genom en förbränning av kol genom tillsatser av syrgas i det gasomrörda benet.

I en annan efterbehandlingsprocess som kallas CAS-OB-processen tillförs värme genom att aluminium och syrgas sätts till i stökiometriska mängder för att bilda  $Al_2O_3$ . Ur den exoterma processen när aluminium oxideras erhålles nödvändig energi direkt in i stålet. De bildade inneslutningarna skiljs av genom en extra inertgasspolning. I dessa två exempel på värmeförsel utnyttjas för vad man kallar kemisk energi.

Andra exempel på värmning är elenergi via en plasmabrännare eller elenergi genom motståndsvärmning av toppslagen.

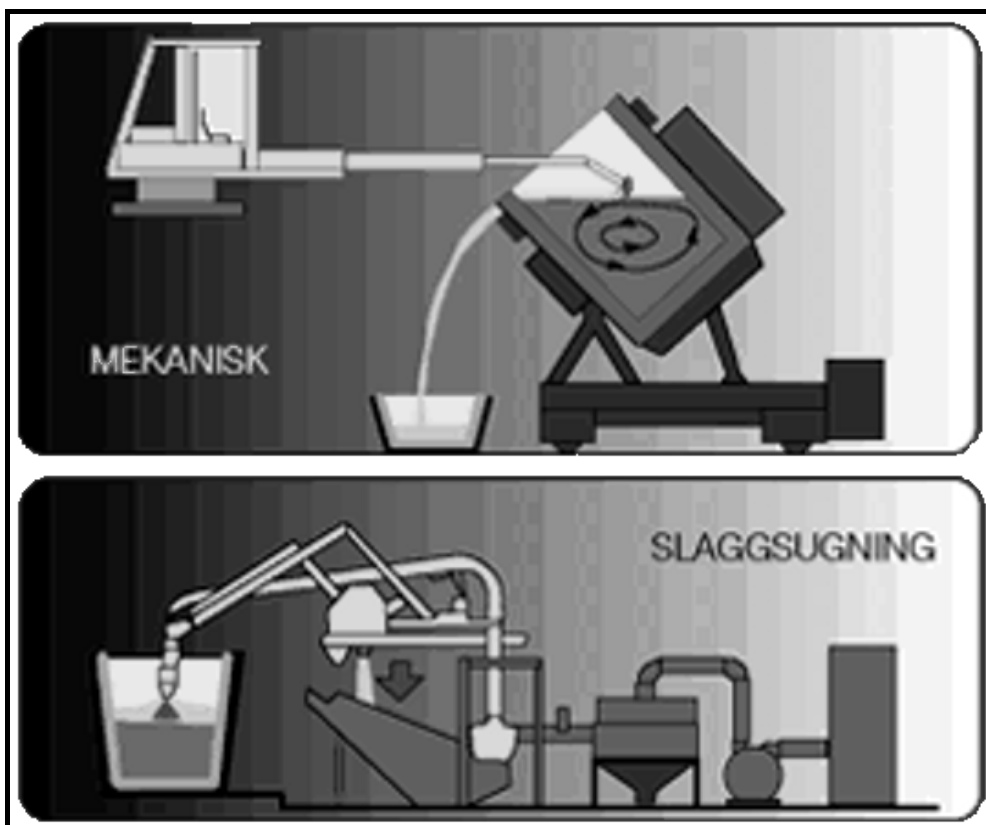
#### 4.14.4. Tillsättning av slagg och andra produkter

Önskemål om en stor kontaktyta mellan en tillförd slaggkomponent och smältan finns vid t.ex. svavelrening och vid modifiering av slagginneslutningar. Därför utvecklades under 70-talet en metod att injicera pulver med en bärande gas genom ett munstycke

som kunde tryckas ned i smältan. Metoden kallas **lansinjektion**. Förutom slaggkomponenter kunde även legeringstillsatser göras. Metoden var mycket framgångsrik men har numer alltmer ersatts av en ännu effektivare tillsatsmetod nämligen sk **trådmatning**. Metoden går ut på att fylla ett tunnväggigt metalliskt rör med tillsatserna i form av pulver. Röret har en diameter på några cm och rörväggen välls ihop kontinuerligt vartefter pulver fylls på i centrum av röret. Det färdiga röret kan behandlas som en tråd och hasplas på i stora haspeltrummor och tillförseln av tråd ner i smältan kan ske med ett vanligt trådmatarverk och en lans för styrning. Metoden gör att tillsatserna kan styras med stor exakthet och god reproducerbarhet. Ur metallurgisk synpunkt är lansinjektion och trådmatning likvärda.

#### 4.14.5. Avslagning och tömning

En av de viktigaste förutsättningarna för en effektiv skänkgugsbehandling är att man kan undanskaffa den slagg som följer med i tappningen från föregående stålframställningssteg. Detta kallas att dra slaggen. I fig 5. visas två sätt, dels att mekaniskt dra slaggen med en raka i en lutande skänk och dels genom en vakuumsug. Den mekaniska metoden är den vanligaste.



Figur 5 Slagdragning

En annan viktig detalj för skänkmetsallurgins utveckling har varit tappningen av stålet ur skänken. Historiskt höllde man över kanten ”över läpp” som man gör med vatten i en tillbringare eller hade man en lång stopparstake genom smältan som reglerade utflödet genom en dysa (tärning). Man fick naturligtvis stora oönskade syre-upptag-

ningar vid den typen av överhällningar. Stakreglering av flödet är fysiskt svårt att kombinera med ljusbågsvärmning eller vakuumavgasning. Parallellt med skänkmatalurgins utveckling har därför sk skivtärningar utvecklats. De består av en keramikskiva som skjuts in i dysan (tärningen) så att stålflödet kan öppnas och stängas. Till sammans med skivtärningen används i dag i regel keramiska skyddsror som skyddar tappstrålen från kontakt med luft. Målet är att den goda kvalitén som uppnås för stålet i skänkgugnen skall bibehållas ner i gjutlådan och vidare ner i gjutkokillen.



## 4.15. Enhetsoperationer vid efterbehandling

### 4.15.1. Homogenisering av analys och temperatur

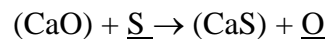
Exakt kemisk analys är ett av de viktigaste kvalitetskraven. För att få rätt analys är det viktigt att inför varje provtagningstillfälle homogenisera smältan. Detta görs med styrd omrörning av smältan. För att mäta rätt temperatur gäller på samma sätt att man måste röra om. Smältan är i regel varmast i toppen av skänken eftersom värme tillförs ovanifrån men även p g a att stålet skiktat sig på grund av de täthetsskillnader som temperaturskillnader ger upphov till.

### 4.15.2. Temperaturkontroll

En viktig funktion hos skänkungnen är förmågan att värma stålet. Varje enhetsoperation innebär temperatursänkningar framför allt p.g.a. att de tar en viss tid i anspråk. Eftersom man i regel vill genomföra flera enhetsoperationer är det inte möjligt att klara sig genom att enbart överhetta stålet vid tappning från stålugnen. Eftersom en exakt ståltemperatur vid överlämnandet till stränggjutningen är ett krav är värmning nödvändig för att tillräcklig flexibilitet och säkerhet.

### 4.15.3. Svavelrening

När man behöver nå låga svavelhalter kan det vara nödvändigt med en svavelrening. Den utförs nästan uteslutande med CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-baserade slaggen. Under behandlingen raffinerar svavlet från stålet till slaggen enligt följande reaktion



Reaktionsformeln skall läsas så att vänstra sidan med CaO i slaggsfasen plus löst svavel i stålet står i jämvikt med högra sidan med CaS i slaggsfasen och löst syre i stålet. För god svavelrening vill man ha hög halt CaO i slaggen och låg syreaktivitet i badet. Syreaktiviteten är låg efter desoxidation och därför görs i regel svavelreningen efter desoxidationen. Negativt för möjligheten att hålla en låg syreaktivitet är om ugnesslagg finns kvar i toppslaggen som håller höga halter av lättreducerade oxiden främst FeO och MnO. Om en alltför hög CaO halt uppnås finns risk för att slaggens viskositet ökar och svavelreningen går långsammare av kinetiska skäl. För att minska viskositeten kan ofta det vara nödvändigt att tillsätta flusspat eller bauxit. Gynnsamt för svavelreningen är också att ha en stor slaggvolymer (ca 7-10 kg/ton stål) samt en god omrörning så att en stor kontaktyta mellan slag och bad upprätthålles.

### 4.15.4. Desoxidation

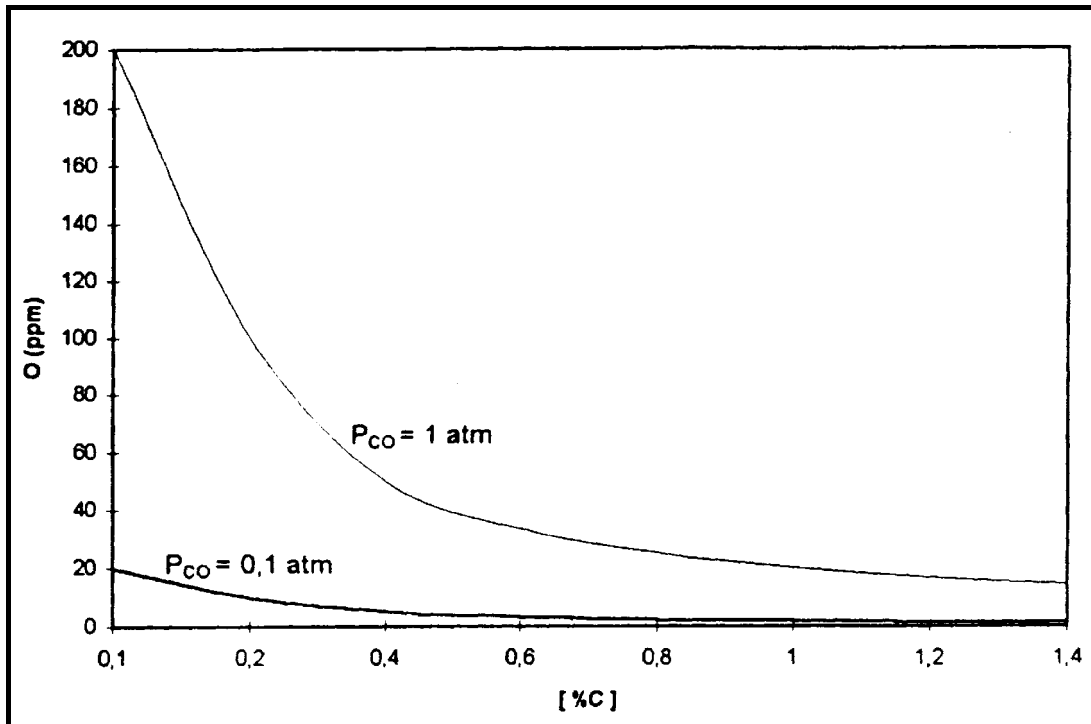
#### *Inledning*

Desoxidation är en operation där man sänker smältans syrehalt. Efter konverten eller ljusbågsugn kan stålet beroende på legeringsinnehåll och framförallt kolhalt innehålla 100 – 800 ppm syre. I fast fas är lösligheten av syre i det närmaste noll. Målet är

därför för desoxidation att minska det totala syret så mycket som möjligt innan stelnings. Det är dessutom viktigt att få kontroll över storleksfördelning och egenskaper hos de oxider som bildas av kvarvarande syre.

### *Olika vägar att desoxidera*

Om man inte tillsätter ämnen som binder det lösta syret så kommer syret att stå i jämvikt med kol. Se fig.6.



**Figur 6** Jämvikt med löst kol och syre i olegerat stål vid 1600°C

Vid 0,1% C i det flytande stålet blir tex jämviktssyrehalten ca 200 ppm. När ett sådant stål stelnar kommer syret att reagera med kol och bilda  $CO_g$  i form av gasblåsor som blir kvar i det stelnade stålet. Historiskt tillverkades en viss del av ståltonnaget på detta sätt. Stålet kallades otätat till skillnad från tätade stål som inte avgav gas(kokade). Gasbubblorna som blev kvar i otätat stål välldes ihop vid valsningen.

Det finns principiellt två vägar att undvika att stålet bildar  $CO_g$  vid stelmandet. Det vanligaste är att tillsätta ett ämne tex Si, Al eller Ca, som reagerar med syret och bildar oxider. Detta kallas fällningsoxidation. Den andra metoden är att applicera ett vakuum s.k. vakuumdesoxidation där syre före stelmandet avlägsnas genom att med kol bilda gasen  $CO_g$ .

### *Vakuumdesoxidation*

Vid vakuumavgasning appliceras ett vakuum ovanför smältan så att reaktionen  $C + O \rightarrow CO_g$  går åt höger. Vid tex ett  $p_{CO}$  på 0,1 atm har jämviktshalten sänkts till 20 ppm syre. I praktiken är det av kinetiska skäl svårt att nå jämvikt eftersom enbart det översta skiktet av smältan utsatts för vakuum. Om man bubblar en inert gas genom smältan samtidigt som man har ett vakuum ovan stålytan förbättras emellertid kineti-

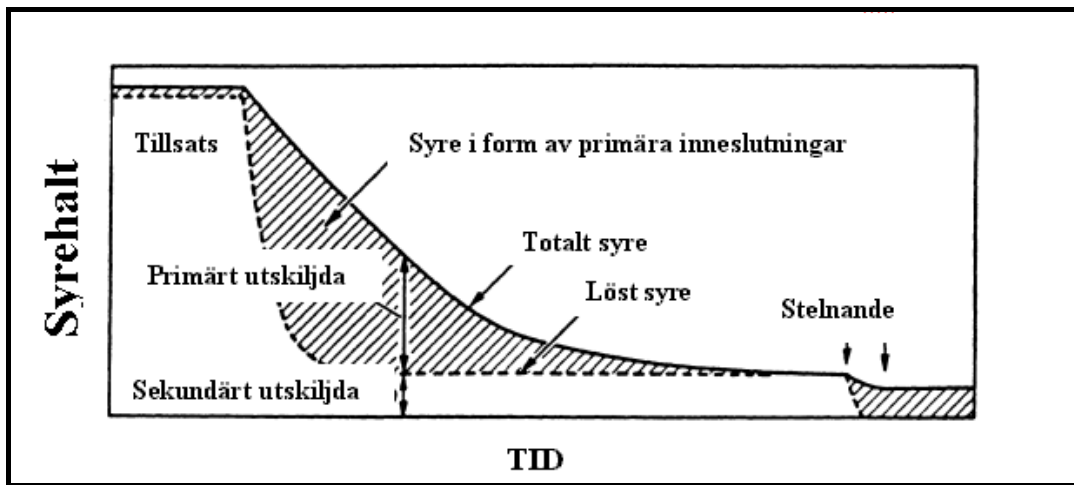
ken avsevärt genom att stora växande gasbubblor skapar stora ytor vid överytan. Den inerta gasen gör också att partialtrycket av  $\text{CO}_g$  minskas vilket driver på  $\text{CO}_g$ -bildningen kraftigt. Trots de möjligheter som kombinerat vakuum och gasspolning ger används inte metoden i normalfallet för desoxidation.

Ett skäl är att stålet blir känsligt för återoxidation vid luftkontakt och att det krävs relativt långa tider vilket försämrar produktionsekonomin.

### Fällningsdesoxidation

När ett element med hög affinitet till syre, som aluminium eller kisel, tillsätts till en smälta med hög löst syrehalt bildas en **fällning** av flytande eller fasta oxidiska inneslutningar. Inneslutningarna avskiljs, med tiden, ur smältan vilket gör att den totala syrehalten i smältan minskar. Detta brukar kallas för fällningsdesoxidation.

Det schematiska förloppet vid fällningsdesoxidation framgår av fig 7.



Figur 7 Fällningsdesoxidation

Man startar med en hög ingående syrehalt i det inkommande stålet. Vid tillsats av desoxmedlet kärnbildas oxider och den lösta syrehalten minskar snabbt ned till jämvikten med desoxmedlet. Den totala syrehalten minskar också genom att inneslutningarna avskiljs ur smältan men går i praktiken sällan ner till jämvikthalten. Det innebär att en stor del primära inneslutningar återfinns i det stelnade stålet. Ungefärlig tid för huvuddelen av detta förlopp är 5-15 minuter. Vid stelndet kommer det lösta syret att bindas som oxider eftersom lösligheten i det närmaste är noll i fast fas. De inneslutningar som bildas vid stelndet kallas för sekundära till skillnad från de som bildades i smältan som kallas primära. De primära och sekundära inneslutningarna kallas i ett gemensamt namn för endogena inneslutningar. Definitionen av endogena inneslutningar är att de bildas av element i smältan till motsats mot de exogena som har sina källor utanför smältan. Exempel på exogena inneslutningars ursprung är toppslag, bitar ur infordringen eller luft som dragits ner i smältan. En annan indelning av oxidiska inneslutningar som brukar göras är i makro- och mikroinneslutningar beroende på storlek. Makroinneslutningar ligger över 0,1 mm (100  $\mu$ ) och är synliga för blotta ögat. Makroinneslutningar är ofta exogena inneslutningar och vice versa. I moderna stålverk är såväl makro- som exogena inneslutningar alltmer

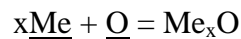
sällsynta och kvalitetsarbetet inriktas mot att minska totala syrehalten och maxstorleken på de primära oxidiska inneslutningarna.

### *Kärnbildning av icke metalliska inneslutningar*

Vid fällningsdesoxidation måste produkten som är en oxid först kärnbildas för att jämvikt skall uppnås. Man skiljer på homogen och heterogen kärnbildning. Vid homogen kärnbildning sker en nybildning av den aktuella fasen, i detta fall oxiden medan heterogen kärnbildning innebär att oxiden växer till från en redan existerande fas. För att homogent bilda en kärna behövs en extra drivande kraft för att övervinna kärnbildningsarbetet. Det åtgår energi för att bilda ny yta. En liten kärna har i starten en stor yta i förhållande till volymen och därför är starten ett problem. Homogen kärnbildning gynnas av låg gränsytspänning mellan oxid och stål, en stor övermättnad av syre och desoxmedel samt ett starkt desoxidationsmedel. Forskarna är fortfarande inte helt överens om graden av homogen kärnbildning vid desoxidationsförloppet.

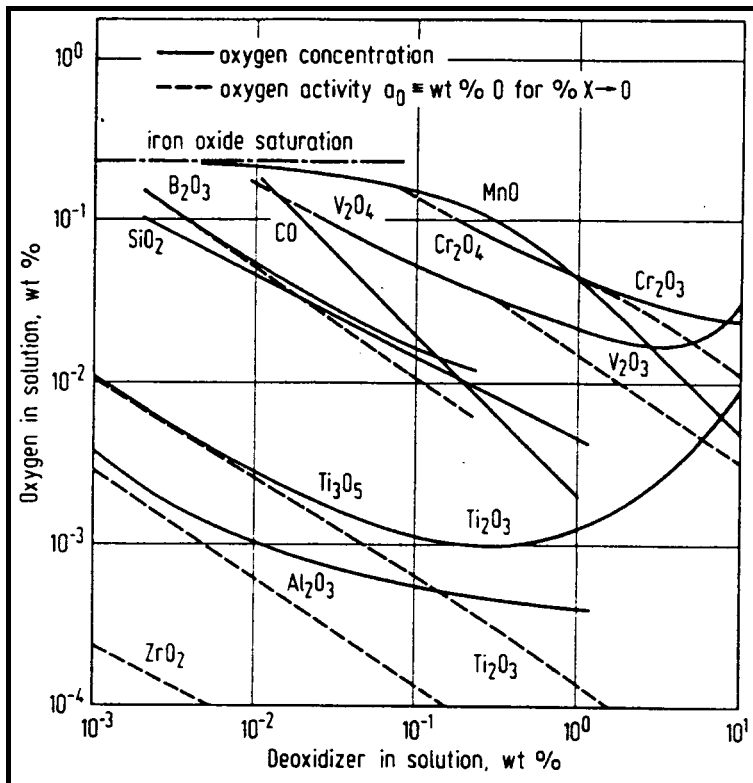
### *Jämviktshalter för syre*

Olika typer av desoxmedel och olika mängder ger naturligtvis olika jämviktshalter syre. Desoxidationen kan skrivas med följande reaktion:



Där  $x$  betecknar det stökiometriska förhållandet mellan Me och O i fällningsprodukten medan  $\text{Me}$  och  $\text{O}$  betecknar ämnen lösta i smältan.

För varje desoxmetall finns en temperaturberoende jämviktskonstant. I fig.8 har jämviktssyrehalt avsatts mot mängd desoxmedel i ett låglegerat stål vid 1600 °C. För att bestämma jämviktshalten syre enligt ekvation ovan skall aktiviteterna för de enskilda element användas vilket innebär att hänsyn måste tas för interaktion mellan  $\text{Me}$  och  $\text{O}$ . Interaktionskoefficienten ändrar sig med halten desoxmedel vilket förklarar att vissa linjer inte är raka. En del böjer t. o.m. av uppåt vid höga halter vilket innebär att jämviktshalten syre kan öka med ökande halt desoxmedel inom vissa intervall. I fig.8 ser man att man med starka desoxmedel som Zr,Al eller Ti kan nå mycket låga jämviktshalter. För Si och Mn är jämviktshalterna mer måttliga.



Figur 8 Desoxidations-jämvikter

### Komplex desoxidation

Från desoxidationsekvationen  $x\text{Me} + \text{O} = \text{Me}_x\text{O}$  ser vi att jämviktshalten syre kunde sänkas om **oxidens aktivitet** kunde sänkas. Detta är möjligt om två eller fler oxider blandas vilket kallas komplex desoxidation.

I praktiken kan komplex desoxidation tillämpas på två sätt.

- Tillsats av desoxmedel med fler komponenter exempel kiselman-gan( $\text{FeMnSi}$ ) eller kalciumkisel ( $\text{CaSi}$ ) vilket resulterar i en komplex des-oxidationsprodukt bestående a  $\text{MnO-SiO}_2$  respektive  $\text{CaO-SiO}_2$  med akti- viteter väsentligt lägre än för de rena oxiderna.
- Injektion av slaggbildare(genom lansinjektion eller trådmatning) som löser in sig i den primärt bildade oxiden. Komplexa  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ -inneslut- ningar kan exempelvis bildas då  $\text{CaO}$  injiceras i en  $\text{Al}$ -desoxiderad smälta. I praktiken är dock denna metod svår att utnyttja eftersom man måste ha en mycket intensiv omröring för att slaggbildaren skall hinna delta i reaktionen till fullbordan.

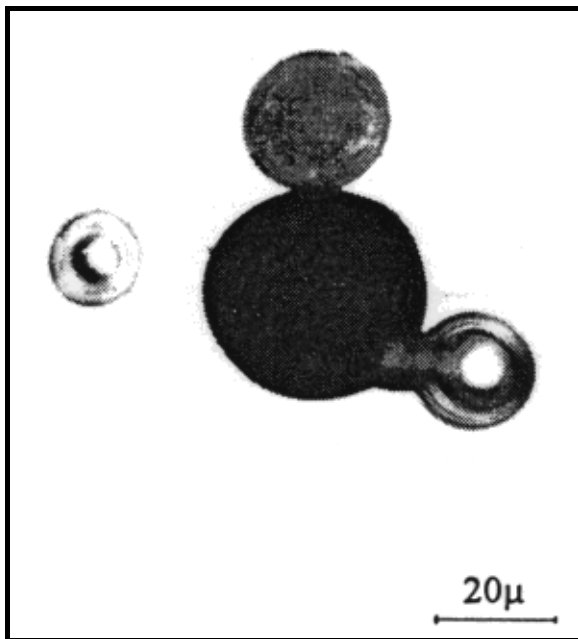
### Tillväxt och avskiljning

Målet för fällningsdesoxidationen är att minska den totala syrehalten och framförallt få primärt bildade inneslutningar avskiljda. Från fig. 7 sid 16 ser vi att avskiljningen är desoxidationsförloppets hastighetsbestämmande steg. Avskiljningssteget har stude- rats av en mängd forskare de senaste 30 åren. Eftersom man inte kan se in i smältan

eller mäta någonting måste alla slutsatser dras från indirekta iakttagelser. Det finns i huvudsak två förklaringar av förloppet för avskiljningen. Den ena bygger på att stora inneslutningar flyter upp ur smältan medan den andra förklarar avskiljningen genom att omröringen för ut inneslutningar till väggarna och toppslaggen där de fastnar. Hur en partikel flyter upp ur en smälta regleras av en fysikalisk lag som kallas Stokes´ lag. Enligt denna lag påverkas uppflytning av täthetskillnader mellan partikel och vätska samt absoluta storleken hos partikeln. Större inneslutningar flyter upp fortare. Att större inneslutningar försvinner snabbare ur smältan har man också kunnat påvisa genom att studera förändringarna i den statistiska storleksfördelningen över tiden. Detta har man tagit som bevis för att Stokes´uppflyttningslag gäller för avskiljningsförloppet.

Eftersom det är de stora inneslutningarna som står för avskiljningen är tillväxten av enskilda inneslutningar viktig att förstå. Tillväxten beror i huvudsak på följande mekanismer:

- Diffusion och utfällning av löst syre och löst desoxmetall på redan existerande inneslutningar.
- Diffusionskoalescens; en mekanism där små inneslutningar minskar medan stora ökar p.g.a. ytspänningskrafterna.
- Kollisioner genom hastighetsgradienter p.g.a. olika uppflytningshastigheter (Stokes´ lag)



**Figur 9** Kollision mellan oxidpartiklar i stål

Genom iakttagelser i mikroskop se fig 9 har man visat att flytande inneslutningar (oftast Mn-silikater) vid kollisionen fastnar i varandra och växer till en större partikel. Fasta inneslutningar, typ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , fastnar också i varandra men koalescerar inte. De bildar istället stora svärmor som hålls ihop av starka ytspänningskrafter. Svärmorna kan bli stora i diametrarna, flera  $100\mu$ , men den skenbara densiteten för svärmorna skiljer inte mycket från stålet och därför är uppflytningen i detta fall inte en domine-

rande avskiljningsmekanism. Istället skiljs de av mot väggar och toppslag. Studier med olika omröringsintensitet visar att ökad omröring ger ökad avskiljning. Detta har tagits som bevis för att inneslutningar avskiljs genom att fastna på väggar och toppslag. Man bör dock observera att omröringen i sig också ökar desoxhastigheten genom att det ger en snabb upplösning och inlösning av desoxmedlet och ökar kollisionfrekvensen. Båda avskiljningsmekanismerna, avskiljning genom uppflyttning och avskiljning genom att fastna på väggen, har betydelse men omfattningen sinsemellan skiljer från fall till fall beroende på bl a typ av inneslutning.

### *Reoxidation*

Med reoxidation menas att stålet efter desoxidation återigen tar upp syre från externa syrekällor. Eftersom den lösta syrehalten är låg efter desoxidationen finns det en drivande kraft att lösa in syre. Det finns flera källor för syret vid reoxidation. Kvarvarande ugnsslagg med höga MnO- och FeO halter ger direkt ett högt syreupptag.

Slaggdragningen och påläggandet av en ny toppslag är därför viktig. Lufttillträde t.ex. vid överföring av stålet till gjutlåda och kokill ger också syreupptagning. Ett annat tillfälle när man kan få ett lufttillträde är om överytan exponeras mot luft vid stark omröring.

En tredje principiell oxidationskälla är fodret.

Om man använder en starka syrebindare som t.ex. Al, Zr eller Ca vid desoxidationen kan t ex SiO<sub>2</sub> från infordringen lösa upp sig och generera löst syre och kisel i badet.

En hög reoxidation märks förutom på högre syrehalter på försämrade utbyten av desoxmedlet och vissa legeringstillseter.

### **4.15.5. Legeringstillseter**

Legeringstillseter görs efter en homogenisering och en fördesoxidation. Fördesoxidationen görs för att sänka den lösta syrehalten. Syret står normalt i jämvikt med kol när stålet överförs till skänkbehandlingen. Om man inte genomför en fördesoxidation riskerar man kraftiga kok när syre reagerar med kol på den lokala temperatursänkningen som sker vid legeringstillseten. Dessutom kan utbytet för legeringar som bildar oxider bli försämrade om lösta syrehalten är för hög. Mängden legeringstillseter beräknas så att nedre gränsen i den aktuella specifikationen innehålls. Finjustering av sammansättningar sker senare i skänkgugsbehandlingen. Slaggbildare, i huvudsak bränd kalk, tillsättes efter legeringarna.

### **4.15.6. Modifiering av oxidiska inneslutningar**

Att desoxiderna med aluminium är billigt och effektivt. Tyvärr är de svärmar(cluster) av Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> som bildas ofta negativa för ytegenskaper och skärbarhet. Dessutom har Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-svärmar en benägenhet att fastna i dysan vid tömning av skänk eller gjutlåda vilket kan vara mycket störande. En lösning är att omvandla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-svärmarna till flytande kalciumaluminater bestående av lika delar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> och CaO. Praktiskt görs detta genom att ett CaSi pulver tillförs genom lansinjektion eller vanligare trådmatning (dvs med pulvret i en rörtråd). Det gäller att få flytande kalciumalumina-

terna eftersom flytande inneslutningar inte sätter igen dysan som de fasta kan göra. Tyvärr är metoden inte så mycket praktiserad i förhållande till behovet vilket beror på att det sätts stora krav att tillsatsen blir exakt. Sätter man till för lite uteblir effekten helt och sätter man till för mycket kan man istället omvandla inneslutningarna till stora hårda kalciumaluminater som kan vara mycket negativa för stålets egenskaper.



## 4.16. Gjutning

### 4.16.1. Inledning

Gjutning av stål innebär att det flytande stålet omvandlas till fast fas för fortsatt bearbetning. De tekniska målen vid gjutning är att bibehålla de halter av olika element man uppnått i den metallurgiska behandlingen av det flytande stålet samt att uppfylla de kvalitetskrav som ställs från efterföljande varm- och kallbearbetningssteg och slutanvändning.

Typiska kvalitetskrav på gjutningar är:

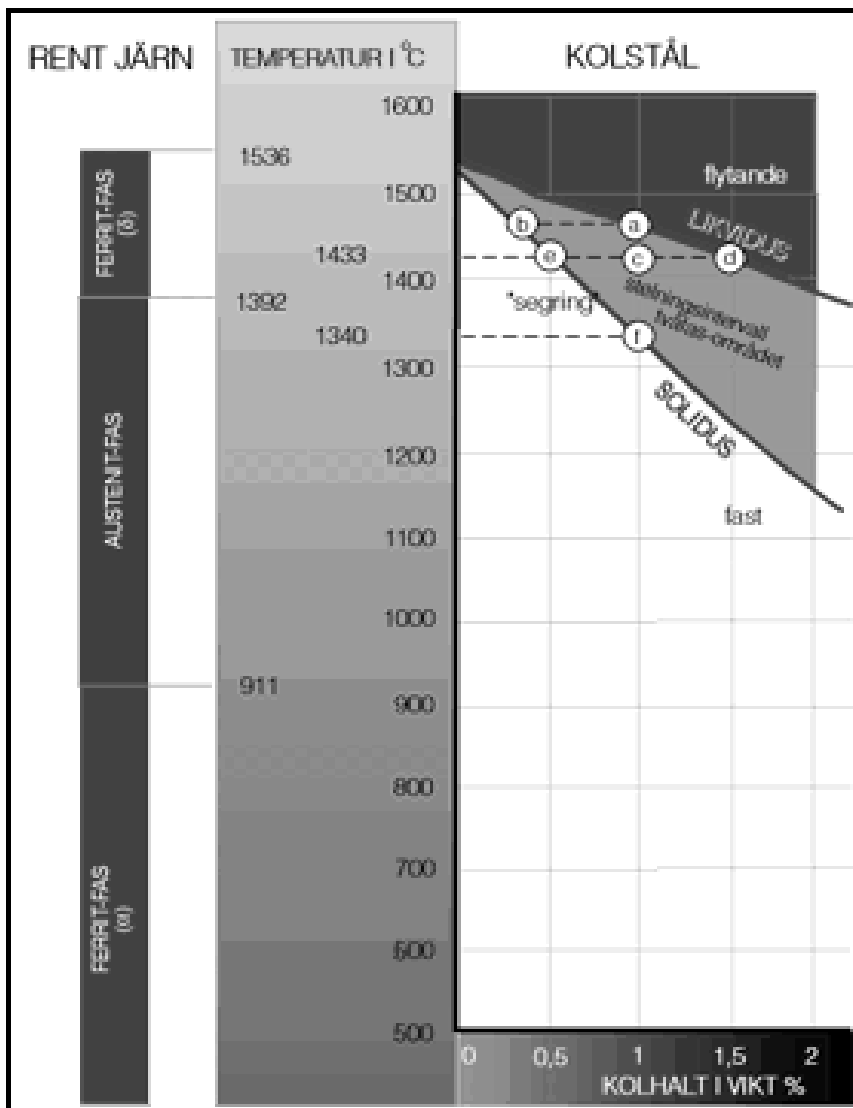
Goda ytor, sprick- och porfrihet, jämn struktur med minimala sammansättningskillnader.

### 4.16.2. Teoretisk bakgrund för stelhandet

Skillnaden mellan stål i flytande fas och fast fas är att atomerna är rörliga i den flytande fasen medan de i den fasta fasen är ordnade i ett en regelbunden ordning i en kristall. Varje kristall växer i en riktning till den stöter på en annan kristall och kristallerna kan alltså vara olika i både form av storlek. Tillsammans bildar de en kristallstruktur i det fasta materialet. Gränserna mellan kristallerna är inte för alltid given utan kan ändras vid tex värmebehandling. Den struktur man ser i ett mikroskop på ett uppslipat prov behöver därför inte alltid vara gjutstrukturen.

I kristallen är atomerna lagrade i bestämda ordningar som kallas för gitter. Stålets kristallgitter är kubiskt, vilket i sin tur kan vara av två olika typer, rymdcentrerat eller ytcentrerat.

När det gäller stål finns alltså två huvudstrukturer, dels den rymd-centrerade som kallas för ferrit och dels den ytcentrerade som kallas austenit. När temperaturen för en stålsmälda sänks och temperaturen når stålets likvidustemperatur inleds stelningen. Stelningen sker dock inte fullständigt vid en konstant temperatur utan sker efterhand i ett temperaturintervall. Den nedre temperaturen där stelningen är fullbordad kallas solidustemperaturen. Temperaturskillnaden mellan likvidus och solidus kallas för stelningsintervall. Att man får ett stelningsintervall beror på att det finns legeringsämnen i järnet. Rent järn stelnar vid en temperatur 1536°C och har inget stelningsintervall. I ett fasdiagram visas jämvikter mellan olika faser som funktion av legeringsämnen och temperatur. I fig. 10 visas en del av ett fasdiagram för det i praktiken viktiga Fe-C systemet. Utan att här gå in på de bakomliggande teorierna kan man ur figuren utläsa som exempel att när ett stål med 1% C temperatur sänks så att man möter likvidustemperaturen i punkt **a** så kommer smältan att så i jämvikt med fast stål med sammansättning (kolhalt 0,5%) i punkt **b**.



Figur 10 Del av fasdiagram Fe-C

Det först stelnde stålet har således en annan sammansättning än smältan. Vid fortsatt temperatursänkning stelndar alltmer material som successivt får en högre kolhalt. I fig 10 visas t.ex. att när hälften av smältan har stelndat har det fasta stålet en sammansättning motsvarande **e** och det flytande stålet en sammansättning motsvarande **d**. När man nått temperaturen 1340°C har allt stål stelndat. Man bör hålla i minnet att resone-mangnet ovan förutsätter ideala förhållanden. I verkligheten måste en viss underkyl-ning till för att stelndingsprocessen skall starta. Graden av underkylning bestäms bl a av svalndingshastigheten. En konsekvens av stelndingsförloppet är således att det först stelndande stålet inte har samma sammansättning som det sist stelndande. Dessa ana-lysskillnader kallas för segring och skall diskuteras mer nedan. En annan konsekvens är att det först stelndande partiet vill fortsätta in i ny "oförstörd" smälta där anrikning inte skett. Detta sker med diffusion och därför utbildas stelndingsfronten i form av runda spetsar s.k. dendriter, se fig.11. När en dendrit blivit tillräckligt lång och tem-peraturen sjunkit ytterligare kan nya spetsar bildas vinkelrätt mot den första till-växtriktningen. Dendrittillväxten får ett julgransliknande utseende. Om tendensen till vinkelrät tillväxt undertrycks växer dendriterna parallellt och bildar s.k. pelar-kristaller. Detta gäller t.ex. vid stark underkylning.



**Figur 11** Exempel på dendriter i ett mikroprov

I fig 10 visas också vilken typ av struktur som stålet stelnar till. Inledningsvis stelnar stålet ferritiskt för att senare stelna austenitiskt. Vid fortsatt stelninge omvandlas sedan stålet återigen till ferrit. Genom legeringstillsatser kan stabilitetsområdet för de olika kristallfaserna förändras. Ett exempel på detta är austenitiskt rostfritt stål där austenitfasen är stabil ner i rumstemperatur.

Ett annat viktigt fenomen som inte framgår av figuren är att stålet vid stelninge avger stelningvärme som också måste kylas bort för att stålet skall stelna. Stelningvärmene motsvarar ca 300 å 400°C temperaturskillnad. Vid uppsmältning åtgår motsvarande värmemångd.

#### **4.16.3. Fenomen vid gjutningen**

Under gjutningen och stelninge är följande frågeställningar aktuella:

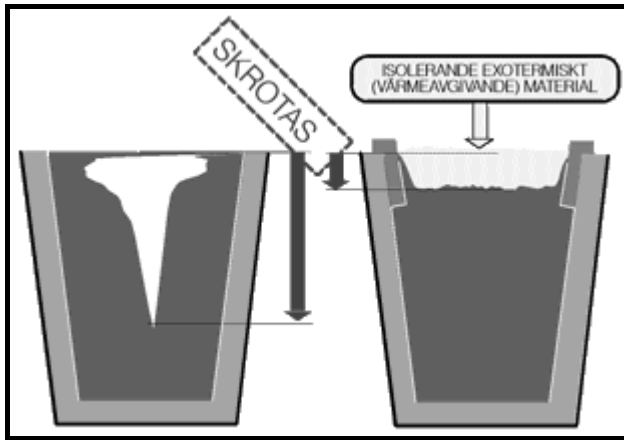
- Krympning
- Rörelse i flytande stålet
- Stelningstrukturen utbildas
- Segringar
- Gasblåsor
- Inneslutningar
- Sprickor

##### *Krympning*

Krympningen beror på åndring av tätheten med temperaturen. En kubikmeter (m<sup>3</sup>) flytande stål (kolstål) väger ca 6,9 ton medan en kubikmeter stelnat stål väger ca 7,9 ton. Räknat per ton stål betyder krympningen ca 18 liter.

I mikroskolan betyder detta att man behöver suga in material i de sist stelninge partierna mellan växande dendritspetsar. Det kan hända att transporten av material är så

trög att materialet inte når fram. Då bildas porer som dock relativt enkelt väljs ihop vid varmbearbetningssteget. I makroskolan kan framförallt vid göt gjutning och vid avslutandet av en stränggjutning stora insjunkningar ske vilka kallas pipe. Se fig.12



**Figur 12** Exempel på pipe och hur den kan undvikas

### *Rörelse i stålet*

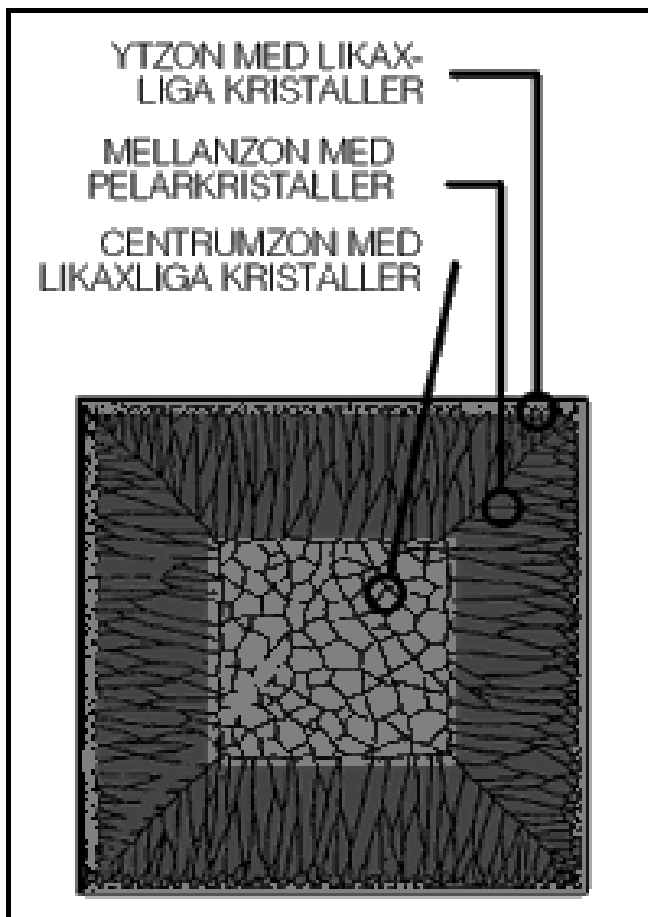
När stålet hålls i en kokill uppstår badrörelsen pga täthetsskillnader som i sin tur beror på temperaturskillnad. Stålet blir kallast närmast kokillväggen och därför rör sig stålet neråt utefter kanterna och uppåt i mitten.

Detta gäller för både göt- och stränggjutning och anses ha effekt på var oxidiska inneslutningarna slutligen hamnar. I princip är det negativt eftersom man vill att inneslutningarna skall flyta upp och fastna i gjutpulvret. För göt gjutning innebär rörelsen att sammansättningsskillnaden kan uppträda mellan olika delar av götet. Dessa sammansättningsskillnader kallas makrosegringar.

### *Stelningsstruktur*

När stål stelnar drivs tillväxten i praktiken av en underkylning, dvs att ståltemperaturen ligger under likvidustemperaturen. Underkylning behövs för att kärnbildning skall äga rum. Intill den kalla kokillytan får det först stelnade materialet en stark underkylning och därför bildas många kärnor för nya kristallkorn se fig 13. Den först stelnade ytzonen får på grund av det stora antalet kärnor ett utseende som karaktäriseras av likaxliga kristaller. Denna zon blir i regel rätt tunn för att övergå i en mellanzon med pelarkristaller. I mellanzonen har man en mindre underkylning eftersom värmen måste transporteras genom den yttersta zonen till kokillväggen. Den lägre underkylningen leder till att tillväxten måste ske på redan existerande kärnor och därför växer materialet företrädesvis i en riktning.

Oftast utbildas en tredje zon kallad centrumzonen. Där är återigen kristallerna likaxliga dvs de växer i alla riktningar. Detta beror på att den totala temperaturen sänkts under likvidus (men ovan solidus) så att en uppstart av många nya kristaller lättare kan äga rum.



Figur 13 Kristallzoner för stål som stelnat i en kokill

### *Segringar*

Man brukar skilja på mikrosegtringar och makrosegtringar. Mikrosegtringar som också kallas kristallsegtringar sker genom att det först stelnade materialet i dendritspetsen är annorlunda än det sist stelnade materialet vilket förklaras i fig. 10 ovan. En förenklad förklaring är att material med lägre legeringsinnehåll stelnar tidigare än högre legerat och eftersom det finns stelningsintervall mellan likvidus (påbörjad stelning) och solidus (avslutad stelning) finns ett utrymme för stålet att stelna med olika sammansättning som avviker från smältans sammansättning.

Makrosegtringar innebär analyskillnader över större avstånd. Mekanismen är för vissa typer av makrosegtringar samma som för mikrosegtringar medan den för andra typer kan finna sin förklaring i rörelser i materialet som bl.a. uppkommer genom täthetskillnader. Makrosegtringarna är naturligtvis allvarigare för stålets egenskaper p.g.a. den större skalan. Mikrosegtringar kan minska avsevärt genom diffusion vid vanlig värmebehandling medan makrosegtringar ger oönskade egenskapsskillnader i materialet. Vid göt gjutning åtgärdas i stor utsträckning segringsproblemet genom en kraftig varmbearbetning. För stränggjutning är bearbetningsgraden lägre och därför existerar för stränggjutning av vissa sorters stål ett segringsproblem.

### *Gasblåsor*

Gasblåsor kan naturligtvis vara mycket negativa för stålets egenskaper. Typen av gasblåsa spelar dock en stor roll. De gasblåsor som går ut till ytan och vars inre därför kan bli oxiderat av luften är mycket negativa eftersom de inte går att välla ihop under valsningen. Vanligaste exemplet på detta är väteblåsor som helt enkelt beror på för hög löst väte i det flytande stålet. Väteblåsorna kan kärnbildas direkt vid stålets stelnande och går då ofta ut till ytan. Dessa typer av blåsor kallas pinholes.

I de sist stelnade partierna utbildas ibland undertryck pga trögheten att mata fram nytt stål i de trånga kanaler som uppstår. Därigenom kan porer som innehåller väte och kväve utbildas. Dessa porer valsas dock i regel enkelt ihop vid påföljande varmbearbetning.

En tredje typ av gasporer som är mycket negativ är argonblåsor. Dessa kommer från argon som använts tidigare i processen och inte hunnit avskiljts. Det är relativt ovanligt men där det förekommer blir det katastrofalt eftersom porerna kan vara rätt stora och argon p.g.a. sin totala olöslighet i stål inte trycks samman vid varmbearbetningen. Man kan minska risken genom att se till att det finns tid mellan sista argonanvändningen och gjutningen så att eventuella argonblåsor kan flyta upp och avskiljas.

### *Inneslutningar*

De primärt utskilda oxidiska inneslutningar (dvs de som utskiljts innan gjutningen) vill man hålla nere i antal och begränsa maxstorleken hos. Det största avskiljningsarbetet sker i skänk och gjutlåda. En viss del sker dock även i kokillen. Även om man försöker skydda stålet från en återoxidation vid flödet av stål ner i kokillen är det oftast svårt att undvika helt. I kokillen sker därför ett viktigt avskiljningsarbete av både nybildade oxider och oxider som inte hunnit avskiljas tidigare. Vid stränggjutning har man utvecklat gjutrörsutformningen och en elektromagnetisk broms för att optimera avskiljningen i kokillen. Vid götgjutning kan metoder att hålla övre delen av kokillen varm förbättra avskiljningen. Förutom mängd och storlek kan inneslutningarnas läge och ansamling ha en betydelse. I götgjutning talar man om en "slaggdriva" i nedre delen av götet medan man vid stränggjutning kan få en ansamling av inneslutningar till centrum av ämnet. Införandet av böjd sträng ökade tendensen till anrikning genom att inneslutningar kunde flyta uppåt och på så sätt ytterligare anrikas i ett plan. Genom att röra om strängen (som beskrivs mer nedan) kan situationen förbättras.

De sekundärt utskilda oxiderna dvs de som skiljs ut vid stelnandet har genom sin ringa storlek ingen känd negativ effekt. Däremot kan finnas anledning att ha kontroll över de sekundärt utskilda sulfiderna, eftersom de kan utvecklas som oönskade filmer i korngränserna.

### *Sprickor*

Sprickor är naturligtvis negativt för egenskaperna. Sprickor uppstår p.g.a. de spänningar som kopplade till stålets stelnande och krympning överskrider hållfastheten vid den aktuella temperaturen. Man måste således arbeta såväl med stålets högttemperaturegenskaper som konstruktion av gjutprocessen så att spänningar begränsas i möjligaste mån. Hållfastheten vid hög temperatur påverkas negativt av element som

lägger sig i korngränserna. Även låga halter av föroreningsämnen kan därför ha en negativ inverkan. Typexempel är svavel som kan utbilda tunna filmer i korngränserna. Vid strängjutning kan man skapa spänningar som leder till sprickor genom att välja felaktiga geometrier eller val av kylningshastigheter. I kapitlet nedan om stränggjutning kommer detta att behandlas mer i detalj.

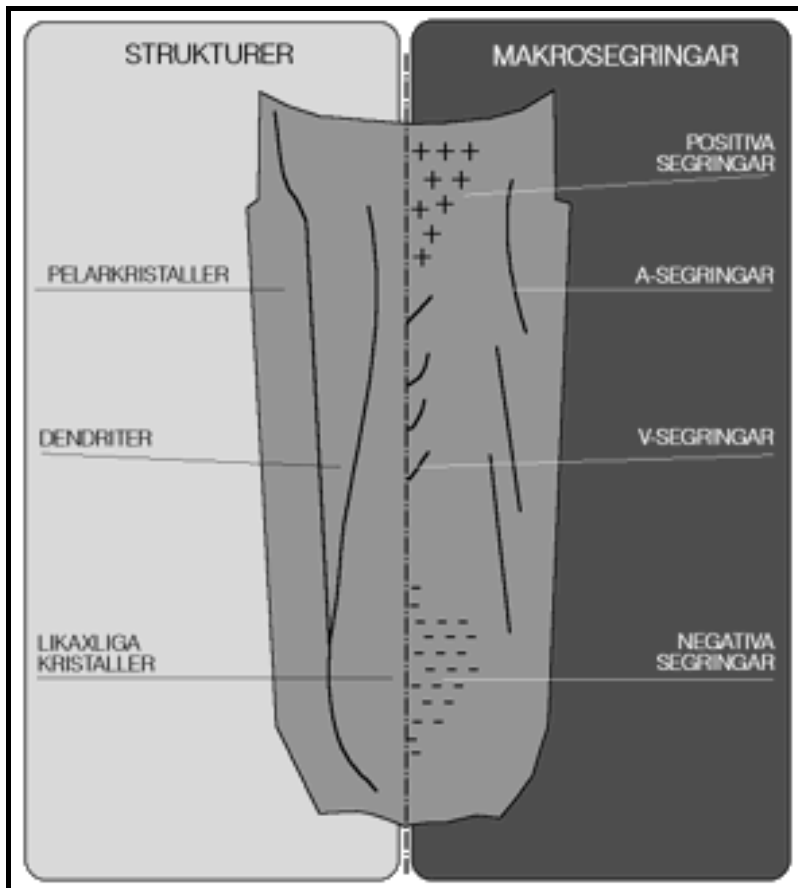
## 4.17. Götjutning

### 4.17.1. Inledning

Götjutning startade i och med att man började tillverka flytande stål i mitten av 1800 talet. Götjutning görs idag i huvudsak av vissa stålsorter som inte är lämpliga att gjuta i strängjutningen. I första hand beror olämpligheten på att dessa ståltypers segrar för mycket. Eftersom en del ståltypers fortfarande gjuts med götjutning samt att det finns ett visst historiskt intresse skall vi sammanfatta det karaktäristiska för götjutningen och de viktigaste utvecklingsstegen.

### 4.17.2. Beskrivning av götjutning och dess utvecklingssteg

Smältan hålls i princip i en form (kokill) bestående av gjutjärn. När stålet stelnat vänds kokillen upp och ned och götet trillar ur kokillen. Götet låter man antingen svalna eller transporteras det direkt till en värmnings- och varmhållningsugn före götvalsningen. Ett typiskt tvärsnitt av ett göt visas i fig 14.



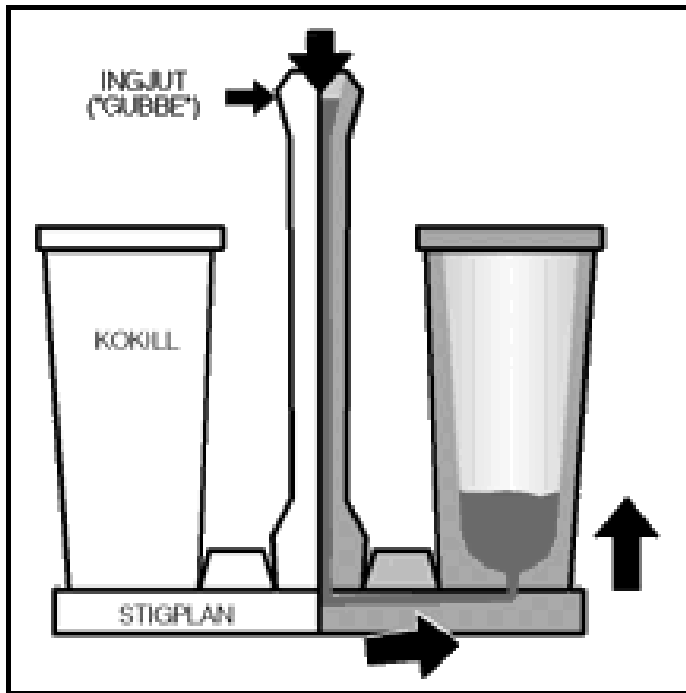
Figur 14 Strukturer och makrosegringar i göt

Strukturmässigt övergår pelarkristallzonerna till en mer dendrit-inriktad zon. I centrum har vi en likaxlig zon. Omslagen beror på förändrade betingelser för underkylningen vilket i sin tur påverkar kärnbildningen. Bilden visar också att man får en rad



olika typer av makrosegringar vilka kan förklaras av smältans rörelse under stelning.

Götgjutning utvecklades från att man hällde i stålet uppifrån till att man började använda stigplan enligt fig 15. Detta ger mindre luftneddragning i smältan men risken för att få in exogena inneslutningar är fortfarande stor.



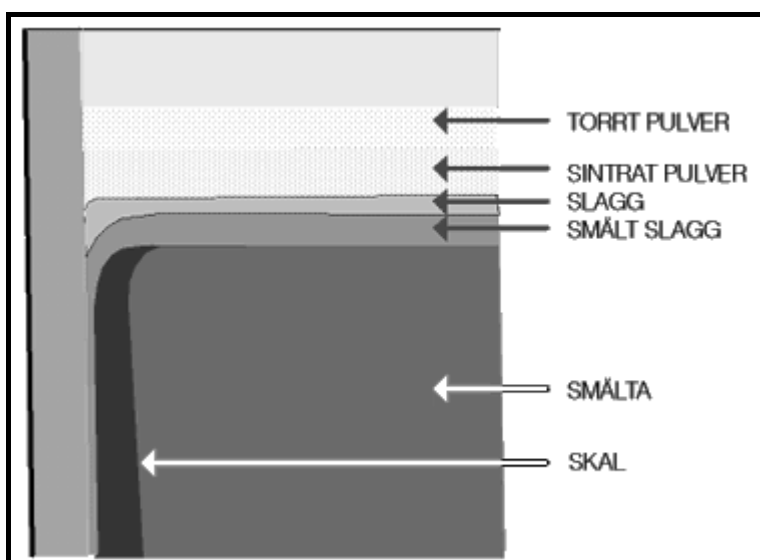
Figur 15 Götgjutning med stigplan

När stål stelnar krymper volymen och om inga åtgärder vidtas får man en stor pipe i stålet och en stor del av götet måste skrotas och smältas om se fig.12. Historiskt löstes problemet genom att man gjöt s.k. otätat stål. I dessa stål fick man ett kok av CO som kompenserade för volymminskningen. När man ville gjuta tätade (desoxiderade) stål löste man problemet med för stor pipe genom att sätta på en s.k. sjunkbox på toppen av kokillen så att det översta stålet stelnade först mot slutet och man fick en jämnare nedsjunkning vid stelning, se fig. 16 och fig. 12.



Figur 16 Sjunkbox

En annan stor förbättring för kvaliteten var när man på 1960 talet började med gjutpulver, se fig 17, som hade funktionen att skydda överytan och samtidigt bilda ett skyddande skikt mot kokillytan. Pulvret som i sig är värmeisolerande uppträder överst där det är förhållandevis kallt i torr pulverform. Längre ned finns ett lager som sintrat ihop för att närmast smältan nått en så hög temperatur att det är smält och kan fungera som ett smörjande skikt mot kokillens yta.



Figur 17 Gjutpulver vid kokillgjutning

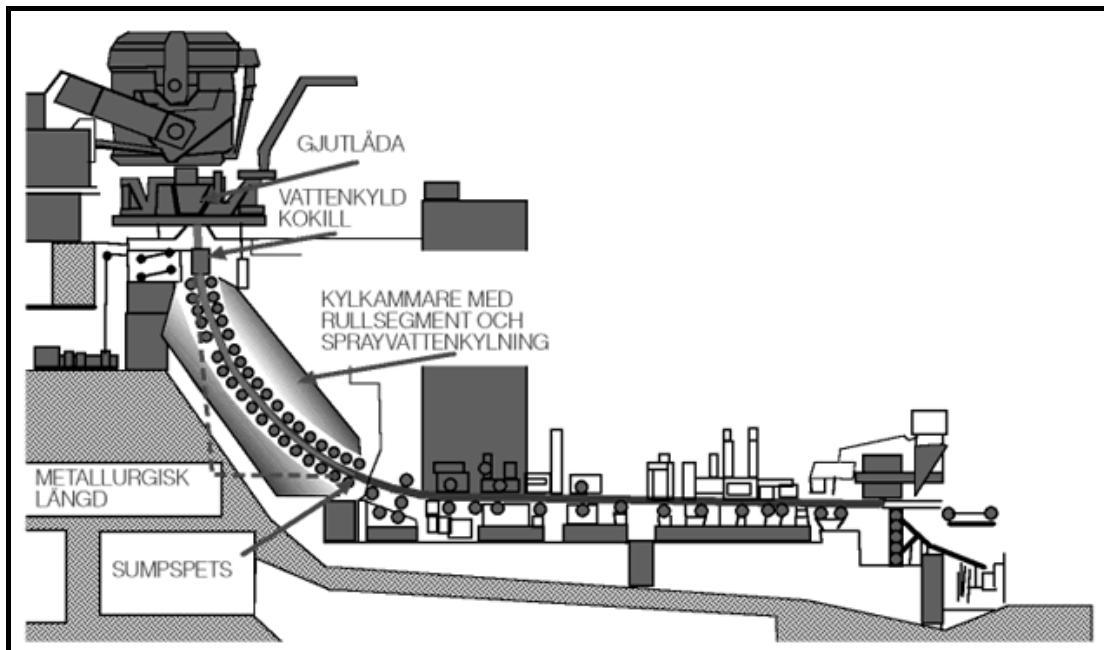
## 4.18. Stränggjutning

### 4.18.1. Inledning

Idén att gjuta kontinuerligt presenterades av Sir Henry Bessemer i England redan på 1850-talet. Han föreslog att man skulle gjuta direkt till tunna band. Detta var ett stort språng som ännu inte genomförts kommersiellt. Däremot tog man tag i idén att gjuta kontinuerligt. De första pilotskaleförsöken gjordes 1943 i Tyskland och ca 20 år senare på 1960-talet togs de första kommersiella anläggningarna i drift. P.g.a. stränggjutningens överlägsenhet över götjutningen vad gäller såväl ekonomi som kvalitet skedde en förhållandevis snabb tillväxt av stränggjutningskapaciteten. Snabbast gick det i Japan där över 95% andel stränggjutet uppnåddes redan i början av 80-talet medan denna andel nåddes i början av 90-talet i Europa och i slutet av 90-talet i USA.

### 4.18.2. Beskrivning av stränggjutningsmetoden

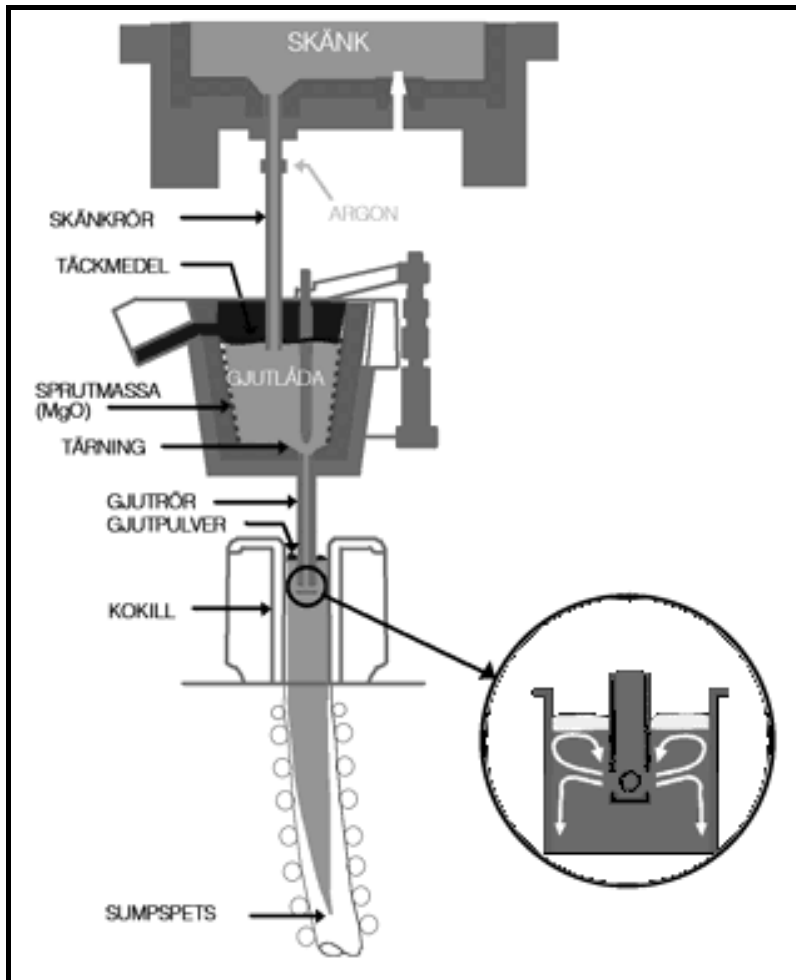
Principerna för stränggjutning framgår av fig 18.



Figur 18 Stränggjutningsmaskin

Stålet transporteras till gjutstationen i en skänk. Från skänken tappas stålet i en gjutlåda. Tappningen görs genom botten av skänken genom en dysa, även kallad tärning. Stålflödet regleras i regel med hjälp av en skivtärning. I och med att man har några minuters uppehållstid av stålet i gjutlådan kan man växla till en ny skänk när den gamla gjutits färdig. Man brukar tala om att gjuta i sekvenser. Rekordet för antalet sekvenser (dvs urgjutna skänkar i rad utan stopp) var år 1998 inte mindre än 1721st. Normalt gjuts från några tiotal sekvenser till flera hundra beroende på möjlighet att gjuta samma stålsort. Från gjutlådan flyter stålet genom en dysa (tärning) ner i kokill-

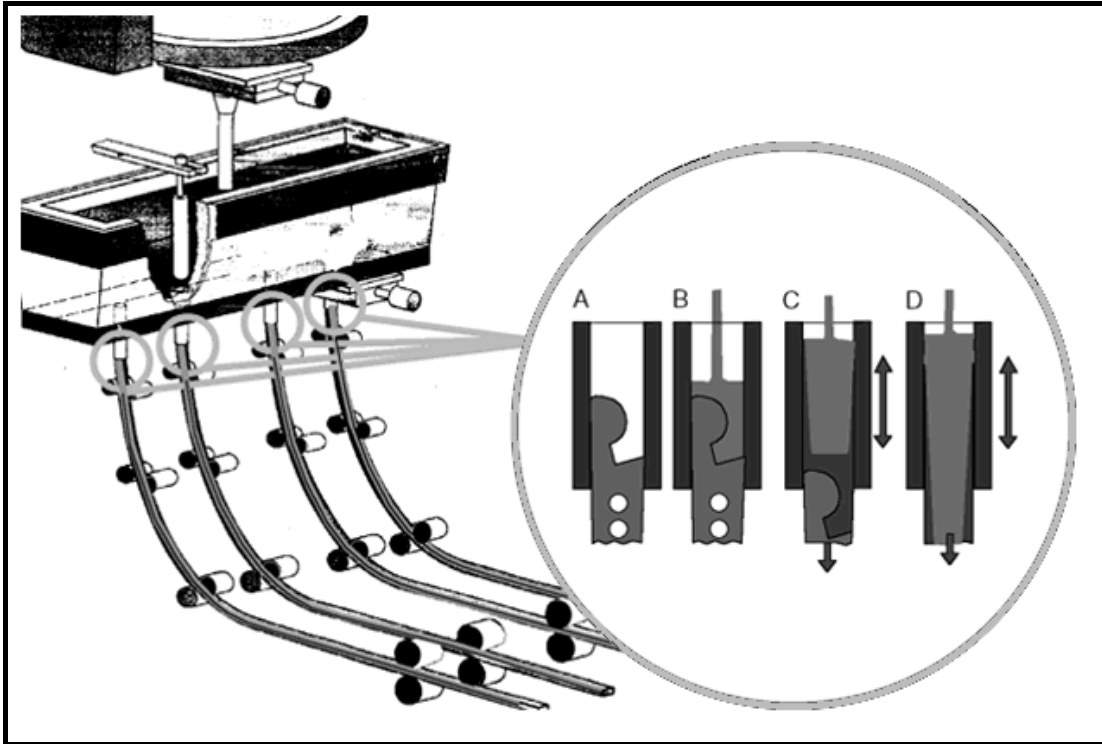
len. I kvalitetsmedvetna verk skyddar man såväl smältan från att ha luftkontakt när den transporteras från skänk till gjutlåda och från gjutlåda ner i kokill genom att ha gjutrör enligt fig 19. I gjutlådan skyddas överytan mot luft med täckmedel. I kokillen tillsätts gjutpulver som har en skyddande verkan av överytan mot luft men i första hand skall fungera som ett smörjlagert mot kokillen. Överytan av gjutpulvret är inte smält medan ytan mot stålet och kokillen är smält. (se fig. 17)



**Figur 19 Skyddad gjutning**

När stålet hamnat i den vattenkylda kopparkokillen stelnar ett skal och strängen kan transporteras ut genom botten av kokillen. För att stålet inte skall fastna rör sig kokillen i en oscillerande rörelse som minskar friktionen mellan kokill och skal. Strängen dras ut med drivrullar under kokillen. När stålskalet lämnat kokillen kommer det ut i en rad kylzoner med sprayvattenkyllning. Fortfarande är inte ämnet genomstelnat utan det finns en smälta kvar i mitten. Denna smälta kallas ofta för sumpen och dess slutspets sträcker sig normalt 30 till 35 meter ner i strängen. Det viktiga är att det är stelt innan kapning sker.

För att starta strängjuttingen har man en sk startstång som underifrån förs upp i kokillen. I ändan av stängen sitter ett stort huvud som inledningsvis tjänar som en botten i kokillen och sedan drar ämnet ur kokillen. Se fig.20.



Figur 20 Startkedja

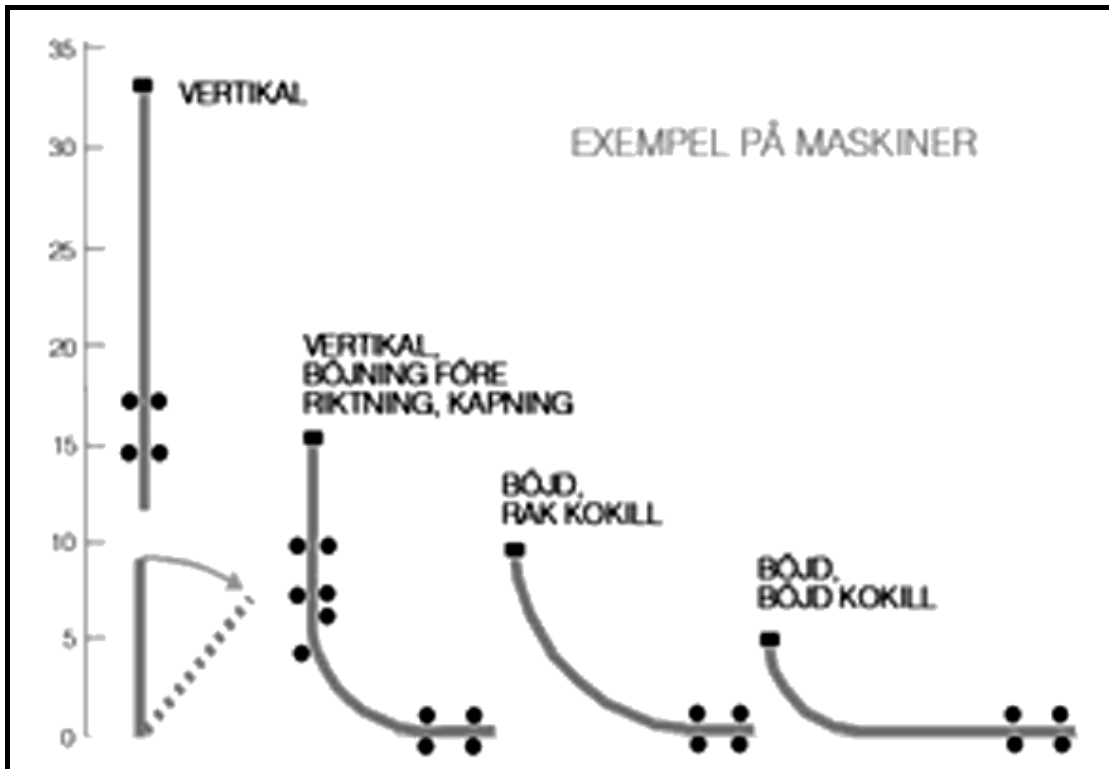
Kokilllängden ligger mellan 500-900 mm. Gjuthastigheten som varierar med ämnesdimensionerna och stålsort ligger mellan 1 meter till 4 meter per minut. Detta betyder att stålets uppehållstid i kokillen är ca ½ minut. Under den tiden måste skalet hunnit bli tillräckligt tjockt för att motstå belastningen av det flytande stålet. Det fortsatta stelandet sker genom direkt vattenbesprutning av ämnet. Vattenbesprutningen har här tre funktioner:

- styrning av stelningshastigheten så att ämnet är helt fast innan det når driv- och riktverket
- kontroll av yttemperaturen
- kylning av maskinfundamenten

#### 4.18.3. Olika typer av stränggjutningsmaskiner och olika ämnestyper

Ursprungligen var stränggjutningsmaskinerna vertikala som visas i två exempel i fig. 21. Antingen klipptes ämnena vertikalt eller böjdes de och riktades innan dom klipptes horisontellt. Det förra var vanligt för grövre tvärsnitt och det senare vanligt för klenare tvärsnitt. För att hålla produktiviteten uppe måste man hålla så hög hastighet som möjligt vilket innebar långa längder innan ämnet kunde klippas. Vid vertikala maskiner tenderade bygghöjderna att bli mycket höga. Därför infördes maskiner med böjda ämnen redan från utträdet ur kokillen. Konceptet utvecklades vidare så att även kokillen utfördes med en böj enligt exemplet i fig. 21. Man uppnådde målet med gjutmaskiner med låg bygghöjd vilket är en stor fördel ur investeringssynpunkt. En nackdel var att böjda strängar accentuerade problemet med anrikning av oxidiska

inneslutningar i ett centrumplan. Detta problem kan minskas med omrörare som diskuteras i ett kommande avsnitt.

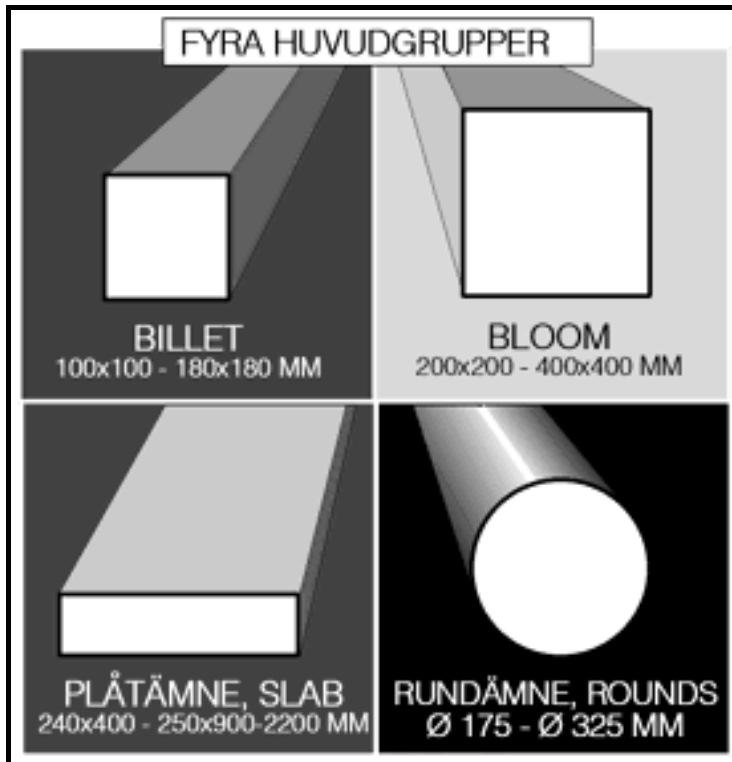


Figur 21 Olika typer av stränggjutningsmaskiner

När det gäller ämnen kan man urskilja fyra huvudtyper (se fig.22):

- Billets: fyrkantämnena från 100x100 mm till 180x180 mm
- Bloms: kraftigare fyrkantämnena som kräver en påvalsning i götvalsverk, dimensioner 200x200 mm till 400x400 mm
- Plåtämnen eller slabs: används för plåt och band, vanliga dimensioner 200x400 mm till 250x900-2000 mm eller
- Rundämnen eller rounds: typiska diametrar från 175 mm till 325 mm runt

Trenden är att gjuta allt klenare slabs för att minska behovet av varmbearbetning. Av samma skäl har man också börjat gjuta i tvärsnittsformer som ligger nära slutlig balk eller profilform.



Figur 22 Olika ämnestyper

#### 4.18.4. Kvalitetsförbättrande utrustning

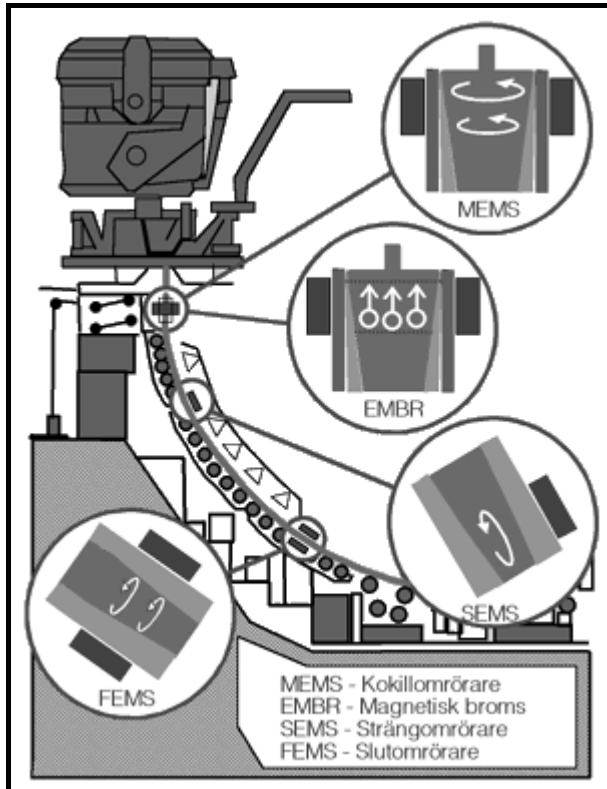
Det har skett en snabb utveckling mot att applicera induktiva omrörare (EMS= elektromagnetisk stirring) av det flytande stålet vid stränggjutningen. Som figur 23 visar kan de placeras på olika ställen och man kan skilja på tre olika typer:

- Kokillomrörare (MEMS)
- Strängomrörare (SEMS)
- Slutomrörare (FEMS)

Till detta kommer att man också kan använda en elektromagnetisk broms(EMBR). Den fungerar genom att bromsa i inkommande gjutstråle så att man får ett bromsat flöde ner i kokillen och vidare ner i sumpen. Man uppnår härigenom en bättre avskiljning av inneslutningar, jämnare skaltillväxt och färre ytslag.

Omröraren bidrar genom ett kontrollerat flöde av stålet i kokillen och sumpen till en gynnsammare struktur, minskade centrumsegringar och centrumporositeter samt en jämnare slagginneslutningsfördelning.

En annan kvalitetshöjande ny teknik är att införa ett påvalsningssteg (soft reduction) genom att ämnet trycks ihop i ett valspar strax före att strängen är helt stelnad. Effekten blir lik den som eftersträvas med omröring nämligen bättre struktur mindre utpräglade segringar och en mindre anrikning av slagginneslutningar.



Figur 23 Olika omrörare vid stränggjutning

#### 4.18.5. Stränggjutning jämfört med göt gjutning

När stränggjutningen kom på 1960 talet stod det redan från början klart att den var mycket konkurrenskraftig jämfört med göt gjutningen. Stränggjutningens införande var ett stort tekniksprång. De ekonomiska fördelarna var:

- Bättre utbyten, 10-20% högre
- Lägre energiförbrukning
- Kortare produktionsväg. Valsning av göt till ämnen utgick
- Lägre driftskostnader, från styckehantering till kontinuerlig produktion

Till detta kom avsevärda kvalitetsförbättringar

- Lägre halter makroslag bl.a. p.g.a. färre exogena källor
- Bättre ytor
- Jämnare struktur och analys och därmed jämnare egenskaper

Den enda begränsningen var att vissa stålsorter som hade stor tendens till seg-ring(stora stelningsintervall) inte kunde stränggjutas initialt. Efterhand har man lärt sig att stränggjuta även de flesta av dessa stålsorter.



#### 4.18.6. Drift av stränggjutningen

En rad faktorer som har inverkan på det gjutna ämnets kvalitet måste styras:

- Ståltemperatur när stålet lämnar gjutlådan
- Kokillens konicitet (slitage)
- Kokillens rörelse, slaglängd och frekvens
- Kylvattenflöden
- Nivåer i gjutlåda och kokill
- Gjuthastighet

Temperaturen i gjutlådan skall helst ligga kring 30°C över stålets likvidustemperatur. I början av gjutningen är smältan kall eftersom det först ihållda stålet måste värma gjutlådan. Därefter stiger temperaturen snabbt till en topp för att mot slutet sjunka till ett minimum. Genom god förvärmning av gjutlådan och ansträngningar att minska temperaturförlusterna från gjutlådan och skänk kan man begränsa temperaturvariationerna.

Kokillens konicitet har betydelse för den primära kylningen från kokillväggen. Om det stelade skalet ligger an mot kokillväggen blir kylningen mycket effektiv. I början kan skalets krympning kompenseras av att ferrostatiska trycket pressar tillbaka skalet mot kopparkokillen men efterhand blir skalet så starkt att krympningen tar överhanden. För att minska benägenheten att skalet lämnar kokillväggen görs kokillen konisk. När stålskalet lämnar kokillväggen och det bildas en luftspalt går stelningshastigheten ner kraftigt. Det är därför viktigt att koniciteten bibehålls och inte slits bort genom nötning.

Kylvattenflöden är viktiga att de är jämna annars kan man erhålla ojämn tillväxt av skalet. Detta gäller både den primära kylningen i kokillen och den sekundära som sker mot ytan med vatten från spraydysor.

Nivån i gjutlådan reglerar tillsammans med tärningsdiametern i gjutlådan stålfödets ner i kokillen. Detta måste samköras med drivverket dvs gjuthastigheten så att rätt nivå upprätthålls i kokillen.

Pipe uppkommer även vid stränggjutning men bara i den sista delen när gjutningen avbryts. Framförallt vid billets gjutning kan pipen bli avsevärd och kan endast i mindre utsträckning begränsas genom parameterval. Ett sätt att minska den ekonomiska kostnaden för pipen är att köra många sekvenser, dvs gjuta flera skänkar i rad utan stopp.

En annan störning som inte är ovanlig är att tärningen i gjutlådan sätter igen. Fenomenet beror på att fasta inneslutningar fastnar på tärningsväggen och efterhand byggs ett nätverk av inneslutningar som förhindrar stålfödets. Små tärningsdiametrar är känsligare än större. Vanligast inneslutningstyp vid igensättning är aluminiumoxid. Ett sätt att åtgärda problemet är att tillsätta kisel-kalcium för att modifiera inneslutningarna till att bli flytande. En annan åtgärd som begränsar problemet är att se till att man får en mycket bra avskiljning av  $Al_2O_3$ -clustren innan gjutningens start.

#### 4.18.7. *Kvalitetsfrågor vid stränggjutning*

Utöver de kvalitetsfrågor som berörts tidigare skall här två viktiga områden belysas ur stränggjutningsperspektiv nämligen inneslutningar och sprickor.

##### *Inneslutningar*

Inneslutningsbilden hos ett stränggjutet ämne är väsentligt bättre än hos ett göt. Framförallt är mängden makroinneslutningar väsentligt reducerade eftersom antalet källor för exogena inneslutningar är få vid stränggjutning jämfört med götgjutning. En källa för makroslag kan vara gjutpulvret som kan dras in i stålet vid oförsiktig hantering.

Även om man haft en god avskiljning av primärt utskiljda oxider i skänk är det väsentligt att optimera avskiljningen i gjutlåda och kokill. Gjutlådan är ett utmärkt instrument för att avskilja inneslutningar. Faktorer som verkar positivt är en stor gjutlåda och lång uppehållstid. Det finns dock begränsningar för storleken och uppehållstiden vill man hålla inom 4 á 5 minuter. Omröring är också positivt och det kan hjälpa att sätta in bafflar i gjutlådan så att vägen från ihållningspunkten till tärningen förlängs. Viktigt är också att täckmedel och gjutpulver på ytan har sådana egenskaper att uppflytande slag fastnar och löser in sig.

För att optimera avskiljningen av inneslutningar ur kokillen måste man undvika att inneslutningarna förs med stålstrålen från gjutlådan långt ner i sumpen där de lätt fastnar. I möjligaste mån bör man begränsa fallhöjden från gjutlådan. Utöver detta finns det framförallt två metoder att bromsa strålens nedträngning. Den ena är att använda elektromagnetisk broms (EMBR) som helt enkelt bromsar flödet och den andra är att utforma gjutröret så att stålet inte går rakt ner utan flyter ut åt sidorna.

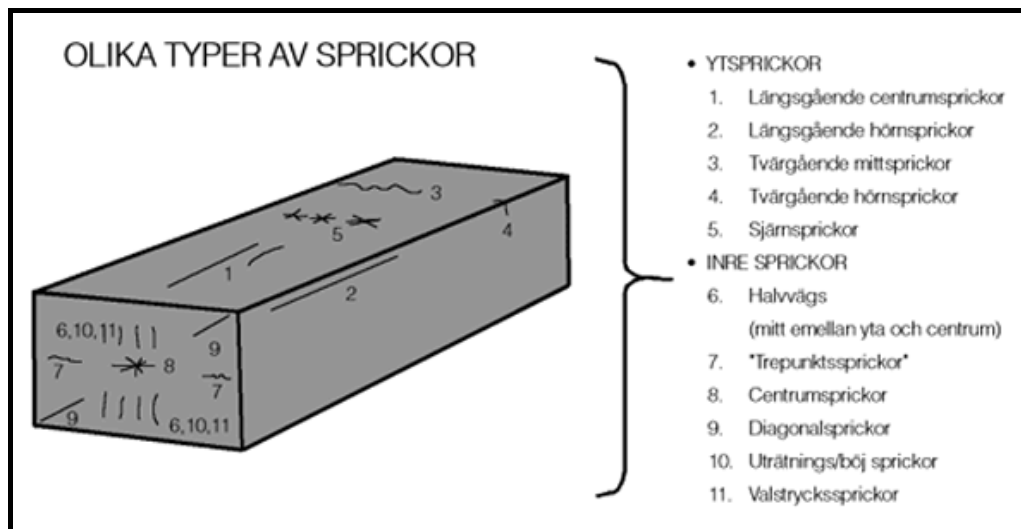
Ett annat fenomen man vill undvika är att oxidiska primärt utskilda inneslutningar anrikas till centrum eller till ena sidan av strängen speciellt vid en böjd sträng. Detta kan som på samma sätt som beskrivits ovan påverkas positivt med elektromagnetisk broms (EMBR) och genom att i gjutröret inte mynnar nedåt utan enbart åt sidorna. Andra åtgärder som syftar till att fördela inneslutningarna jämnare är induktiva omrörare och en påvalsning (soft reduktion).

Förutom att minska mängden inneslutningar är det minst lika viktigt att dels förhindra att stålet utsätts för luft så att nya oxider kan bildas genom reoxidation. Man kan begränsa reoxidationen väsentligt genom att ha gjutrör vid transporten av stålet och ordentligt med täckmedel för att skydda överytorna i skänk, gjutlåda och kokill. Vid kläna tvärsnitt hos ämnena är det inte möjligt att använda gjutrör. Vid en del maskiner används i dessa fall ridåer av inertgas medan andra tillsätter rapsolja till kokillen varvid förbränningsgaserna från rapsoljan till viss del håller borta luften.

##### *Sprickor*

Ytorna är naturligtvis viktiga för kvaliteten hos produkten och alla typer av sprickor eller andra avvikelser är negativa. I fig.24 visas exempel på spricktyper. Såväl yt-sprickor som inre sprickor kan förekomma. I princip beror sprickor på att stora lokala spänningar byggs upp som överskrider stålets hållfasthet vid aktuell temperatur. När man erhåller sprickor i produktionen kan det vara svårt att veta om det primärt beror på en försämring i hållfastheten eller om man lokalt har ökat spänningarna. Vi har i

tidigare avsnitt diskuterat olika faktorerers inverkan på varmhållfastheten och nedan skall vi därför koncentrera oss på de ogynnsamma spänningskoncentrationerna som är specifika på för stränggjutningen.



**Figur 24 Olika typer av sprickor vid stränggjutning**

Det är viktigt att undvika att skapa spänningar i ämnet som beror på designen (formen) hos ämnet eller vissa konstruktionslösningar i maskinen. Dylka spänningar kan nämligen samverka med lokala spänningar till att bilda sprickor. Genom rätt design och konstruktion ökas marginalen mot sprickbildning. Exempel på detta är hörnens utformning hos ämnet. Rundade hörn ger naturligtvis bättre möjligheter än skarpa kanter att undvika att spänningar uppstår p.g.a. lokalt snabbare svalning i hörnen. Ett exempel på lämplig maskinkonstruktion är att man bör undvika alltför skarp uppriktning av en böjd sträng så att spänningar från riktningen kan samverka med lokalt uppkomna spänningar till tvärsprickor.

Spänningsvariationerna som leder till yttre sprickor kan uppkomma såväl vid primärkylningen i kokillen som vid sekundärkylningen. På båda ställena är kylningen kraftig och svalningshastigheten hög. I kokillen bildas ett skal mycket snabbt vilket också svalnar snabbt. Som tidigare diskuterats lämnar skalet kokillen när det blivit tillräckligt tjockt för att motstå det ferrostatiska trycket. Ett ökat luftgap försämrar värmeledningen och temperaturen stiger i ytan på skalet. Det uppstår lätt variationer i skalets tillväxthastighet som kommer att ge olika temperaturer i ytterytan som i sin tur leder till termospänningar. Detta innebär lokala spänningar som kan leda till sprickbildning. Variation i tillväxthastigheten kan ske i både längsled och tvärsled vilket förklarar att sprickor kan återfinnas i båda ledderna. Exempel på faktorer som kan leda till störningar i skaltillväxten i kokillen är:

- För stora variationer av stålnivån i kokillen, sliten kokill, felaktig konicitet
- Olämpligt gjutpulver, varierande filmtjockled, störda strömningsförhållanden i kokillen
- Felaktig oscillationsrörelse

Termospänningar kan också uppstå i sekundärkylningen om man lokalt får för stora skillnader i kylningen. Centrumsprickor uppstår då skalet vuxit in mot centrum, dvs i nedre delen av sumpen. Temperaturen i sumpen som tidigare endast fallit långsamt faller i detta läge snabbt. Detta medför termospänningar i strängens inre vilket medför en risk för centrumsprickor. Kylningen mot ytan bör ökas kraftigt vid sumpspetsen så att skillnaden mellan svalningshastigheten i ytan och centrum minskar. Samma positiva effekt på centrumsprickor uppnås i de verk som har en påvalsning (soft reduktion) av tvärsnittet vid sumpspetsen.

#### 4.19. Framtida utveckling av stränggjutningen

Vid sidan av tendensen att gjuta klenare dimensioner finns flera intressanta utvecklingstrender för stränggjutningen.

**Värmd gjutlåda:** Att införa värmeförsel till stålet i gjutlådan skulle medge längre uppehållstider och en effektivare slaggavskiljning. Detta skulle också medföra att man kunde gjuta vid en konstant temperatur. Hittills har man inte hittat en tillräckligt praktisk attraktiv metod att värma stålet i gjutlådan.

**Filter:** Experiment har gjorts med keramiska filter som kan avskilja inneslutningar mycket effektivt. En utveckling av de keramiska materialen är nödvändig om filter skall komma att användas kommersiellt.

**Elektromagnetisk broms(EMBR):** Tekniken finns idag installerad vid ett mindre antal anläggningar och förväntas få en ökande användning. Applikationen av tekniken kan troligen utvecklas ytterligare. Detsamma gäller för induktiva omrörare(EMS).

**Stålpulverinjektion i kokill:** För att radikalt förbättra segringsbilden och strukturen har man försökt med att blåsa in järnpulver i kokillen för att snabbt sänka temperaturen. Man får en stor likaxlig zon med stor jämnhet. Det är också troligt att hastigheten kan höjas avsevärt vid tillsats av ett kallt stålpulver. Tillämpning av tekniken är troligen begränsad till speciella stålsorter.

**Viktig mätutrustning** för stränggjutningen som troligen snart blir använd är att kunna mäta stelningsgrad samt temperaturmätning kontinuerligt i skänk och gjutlåda.

**Generella trender** är som på alla metallurgiska processer: mer mätutrustning, bättre matematiska modeller, mer datorstödd styrning, ökad automatisering, ökad jämnhet på insatssidan och färdigsidan.

#### 4.20. Direktgjutning

Direktgjutning till klenta dimensioner (near net shape casting) har alltsedan stränggjutningar slog igenom på 1970-talet varit aktuellt som nästa steg i utvecklingen. Drivkraften för att direktgjuta är framförallt att rationalisera tillverkningen genom att hoppa över varmbearbetningssteget. En kortare tillverkningskedja innebär besparingar på såväl investeringar som bemanning. Till detta kommer energibesparingar och miljövinster. Stora utvecklingsinsatser har gjorts från de stora stålkoncernerna att utveckla framförallt direktgjutning av tunna band. Beslut om att dra igång en fullstor kommersiell anläggning ser dock ut att dröja. Generellt kan man säga att direktgjutningen har två inbyggda svårigheter som måste lösas.

Produktiviteten riskerar att bli låg eftersom tvärsnittet per definition är mycket mindre än vid slabsgjutning. Det är därför nödvändigt att gjuta med mycket högre hastigheter än stränggjutning. Eftersom man inte har någon varmbearbetning måste man dessutom ha bra ytor och inre struktur som inte kräver en hög reduktionsgrad för att nå rätt egenskaper.

En framgångsrik utveckling av stränggjutningen till att stränggjuta tunna slabs i sk CSP-anläggningar (compact strip production) har genomförts av firma Nucor i USA. Nucor köpte en teknik från SMS i Tyskland och fick den att fungera i full skala i början av 1990-talet. Tillväxten av CSP-anläggningar är nu stor i hela världen. Tekniken går ut på att gjuta tunna slabs, 60-120 mm i tjocklek och varmvalsa i linjen. Hastigheten är högre i CSP än vid stränggjutning varför produktiviteten blir i stort densamma. Det tunna slabset klipps ej utan det går in i en temperaturutjämningsugn som hålls vid 1100°C för att därefter direkt gå in i ett varmvalsningsverk. Tekniken har de senaste åren utvecklats med en induktiv broms (EMBR) för bättre slagkontroll och en påvalsning (soft reduktion) innan allt är ställt för minskning av segringar. Tack vare detta kan numer allt fler stålsorter gjutas.

En annan utveckling av stränggjutningen har varit att gjuta klenta tvärsnitt som exempelvis, runt diameter 12 mm. Detta görs med fördel horisontellt varför metoden ofta kallas horisontell gjutning. Som kokill används inte vattenkylda kopparkokiller utan dysor av bornitrid. Nackdelen med metoden är att den blir dyr pga den låga produktiviteten och kostnaden för bornitriden. Man får också en kvalitetsnackdel genom att oscillationsmärkena i ytan inte kan varmvalsas bort. Metoden har därför enbart användning i mycket speciella fall.

## **DEN SVENSKA STÅLINDUSTRINS BRANSCHORGANISATION**

Jernkontoret grundades 1747 och ägs sedan dess av de svenska stålföretagen. Jernkontoret företräder stålindustrin i frågor som berör handelspolitik, forskning och utbildning, standardisering, energi och miljö samt skatter och avgifter. Jernkontoret leder den gemensamma nordiska stålforskningen. Dessutom utarbetar Jernkontoret branschstatistik och bedriver bergshistorisk forskning.

# **JERNKONTORET**

Box 1721, 111 87 Stockholm · Kungsträdgårdsgatan 10  
Telefon 08-679 17 00 · Fax 08-611 20 89  
E-post [office@jernkontoret.se](mailto:office@jernkontoret.se) · [www.jernkontoret.se](http://www.jernkontoret.se)

