

JERNKONTORETS FORSKNING

Järn- och stålframställning

Malmbaserad processmetallurgi

Jernkontorets utbildningspaket – del 2



Förord

Jernkontorets utbildningspaket är ett läromedel i tolv delar som täcker hela produktionskedjan vid stålframställning.

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

Läromedlet är författat av experter inom nordisk stålindustri.

Delar av paketet har reviderats.

Utbildningspaketet omfattar följande områden:

Del	Titel	Senaste utgåva
1	Historia, grundläggande metallurgi	2016
2	Malmbaserad processmetallurgi	2000
3	Skrotbaserad processmetallurgi	2000
4	Skänkmetallurgi och gjutning	2000
5	Underhåll och driftsekonomi	2001
6	Analytisk kemi	1996
7	Energi och ugnsteknik	1997
8	Bearbetning av långa produkter	2015
9	Bearbetning av platta produkter	2015
10	Oförstörande provning	2007
11	Olegerade och låglegerade stål	1996
12	Rostfritt stål	2015

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

2. MASUGN, LD-KONVERTER	1
2.10.1. <i>Inledning</i>	1
2.10.2. <i>Schematiska flöden</i>	1
2.10.3. <i>Masugnens betydelse</i>	2
2.10.4. <i>Masugnens konstruktion och semantik</i>	2
2.11. FUNKTIONSSÄTT HOS MASUGNEN	5
2.11.1. <i>Motströmsprinciper</i>	6
2.12. MASUGNENS DRIFT	7
2.13. MASUGNENS RÅVAROR	8
2.13.1. <i>Allmänt</i>	8
2.13.2. <i>Malmråvaran</i>	10
2.13.3. <i>Koks</i>	12
2.14. METALLURGISKA REAKTIONER I MASUGNEN	14
2.15. KRAV PÅ RÅJÄRNET	17
2.16. MASUGNENS UTVECKLING	18
2.16.1. <i>Allmänt</i>	18
2.16.2. <i>Utvecklingstrender</i>	18
2.17. ALTERNATIVA PROCESSVÄGAR FÖR JÄRNFRAMSTÄLLNING	19
2.17.1. <i>Allmänt</i>	19
2.17.2. <i>Direktreduktion</i>	19
2.17.3. <i>Smältreduktion</i>	20
2.18. SVAVELRENING	21
2.19. STÅLFRAMSTÄLLNINGSTEGET – FÄRSKNINGEN	22
2.19.1. <i>Allmänt</i>	22
2.20. LD-PROCESSEN	22
2.20.1. <i>Syften och mål</i>	22
2.21. PROCESSBESKRIVNING	23
2.21.1. <i>Beskrivning och chargeförlopp</i>	23
2.21.2. <i>Energibalansen</i>	24
2.22. METALLURGISKA REAKTIONERNA I KONVERTERN	26
2.22.1. <i>Slaggbildningen</i>	27
2.22.2. <i>Analysförändringar i metall och slagg under blåsningen</i>	27
2.22.3. <i>Körningssätt</i>	28
2.23. BOTTENBLÅSANDE KONVERTAR	29
2.23.1. <i>OBM-processens metallurgi</i>	29
2.23.2. <i>Kombinerad blåsning</i>	30
2.23.3. <i>Tapping och legering</i>	31
2.24. ELDFASTA MATERIAL	32

2. MASUGN, LD-KONVERTER

2.10.1. Inledning

I detta kapitel skall den malmbaserade ståltillverkningen beskrivas. Man brukar skilja på malmbaserad ståltillverkning från skrotbaserad ståltillverkning. I den malmbaserade ståltillverkningen är den dominerande tillverkningsvägen att malm reduceras och smälts i masugnen till flytande råjärn varefter detta färskas till stål i LD-konverter. Den skrotbaserade ståltillverkningen baseras i huvudsak på skrotomsmältning i ljusbågsugn. En tredje väg som egentligen är malmbaserad men liknar skrotbaserad är att genom direktreduktion i fast fas framställa s k järnsvamp från malmråvara som sedan smälts i ljusbågsugn.

2.10.2. Schematiska flöden

I fig 1 visas det schematiska flödet för malmbaserad ståltillverkning. De dominerande råvarorna är malm och koks. Malmen anrikas och sintras medan kolet måste omvandlas till koks i ett koksverk. Masugnens produkt är flytande råjärn som efter förbehandling går vidare till en konverter (vanligtvis en LD-ugn) där järnet färskas till stål. Därefter går i regel stålet till en skänkbehandling innan det flytande stålet gjuts till ämnen i en stränggjutningsmaskin.



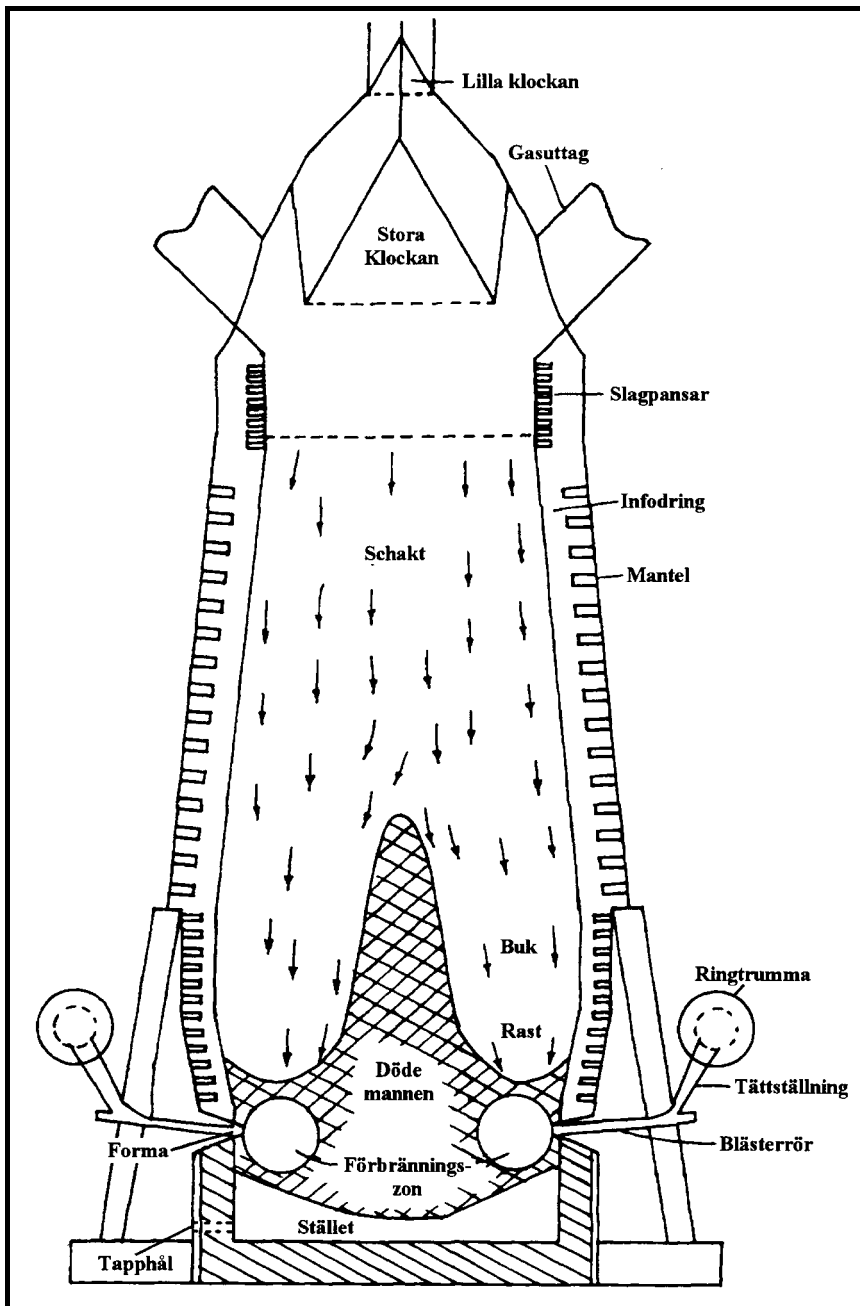
Figur 1 Schematiska flöden för malmbaserad ståltillverkning

2.10.3. *Masugnens betydelse*

Masugnen torde vara en av världens ekonomiskt mest betydelsefulla enskilda processer. Totalt produceras ca 550 milj ton råjärn i världens masugnar under ett år och med ett avrundat värde på 1000 kr per ton råjärn motsvara detta en årlig omsättning på 550 miljarder kronor. Antalet masugnar är ca 600 st i världen och trenden är att antalet minskar trots ökad produktion, eftersom nya större ugnar ersätter äldre med lägre kapacitet. Masugnen står för mer än 95 % av all malmbaserad stålproduktion. Resterande del utgörs i huvudsak av direktreduktion (järnsvampsprocesser). Anmärkningsvärt är att masugnen förutom att vara ett av världens ekonomiskt största processkoncept också torde vara den äldsta storskaliga industriella processen i världen. Senare forskning hävdar att masugnskonceptet använts i ca 1000 år. Det har naturligtvis utvecklats kontinuerligt under hela tiden och utvecklingsinsatserna för att öka produktiviteten är idag, som vi skall diskutera mer nedan, fortfarande mycket intressanta och omfattande.

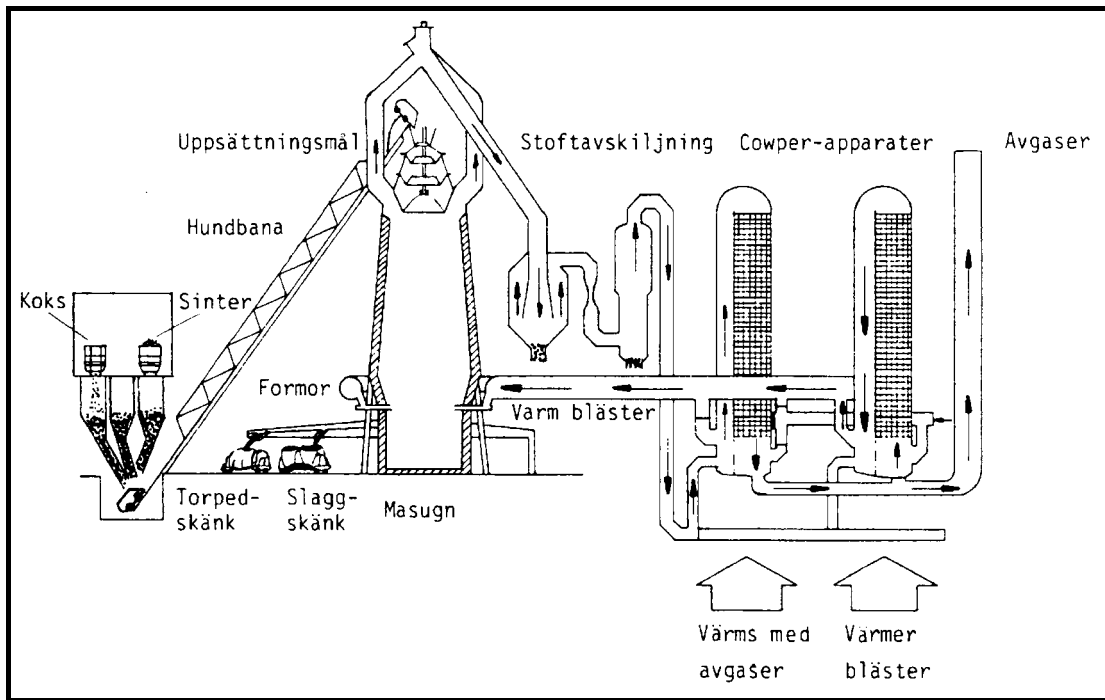
2.10.4. *Masugnens konstruktion och semantik*

I figur 2 visas en genomskärning av en masugn och de traditionella benämningarna på masugnens delar. Malm o koks sätt på masugnen genom *lilla klockan* och *stora klockan*. Delar av beskickningen studsar mot *slagpansaret* på insidan av ugnen. *Infodringen* sitter innanför *manteln* som till större delen är *vattenkyld*. I *schaktet* transporteras beskickningen nedåt genom *buken* och *rasten* och gasen går uppåt och ut ur ugnen genom stora *gasuttag*. Blästerluften går i en *ringtrumma* och vidare i *tättställningen* och *blästerröret* för att slutligen blåsas in i ugnen genom *formorna*. Inne i ugnen bildas en förbränningszon samt en pelare av koks som man kallar ”*döde mannen*”. Längst ner samlas råjärnet i *stället*. Råjärn och slag tappas genom ett eller flera tapphål.



Figur 2 Schematisk bild av masugn

Vid råjärnsframställning krävs som visas i figur 3, stora utrymmen för hantering av råvaror och gas. Från lagerfickor för koks och sinter förs råvaror på en *hundbana* upp till toppen av masugnen där den beskickas i ett *uppsättningsmål* som fördelar råvarorna över tvärsnittet. Gasen lämnar ugnen på toppen och går efter *softavskiljning* till s.k. *Cowperapparater*. Här sker en värmeväxling så att blästern förvärmis. Råjärnet går i regel till en *torpedskänk* medan slaggen går till en *slaggskänk*



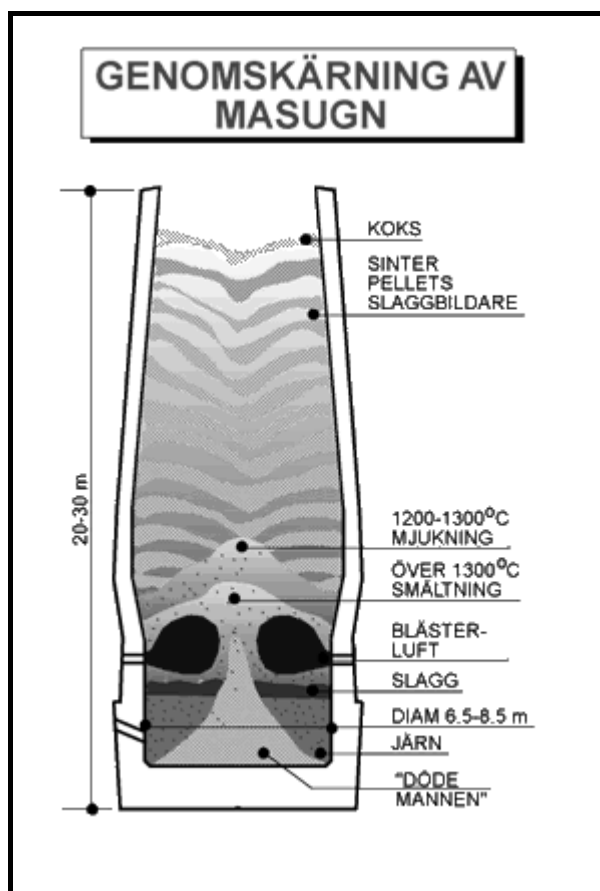
Figur 3 Masugnsanläggning - principschema

2.11. Funktionssätt hos masugnen

Utmärkande för masugnen är att det är en motströms värmeväxlare samtidigt som det är en kemisk (metallurgisk) reaktor. Även den kemiska reaktorn utnyttjar på ett raffinerat sätt en motströmsprincip.

I fig 4, "Genomskärning av masugn" framgår huvuddragen för funktionen. De fasta materialen koks, malmråvara och slaggbildare tillsätts på toppen och läggs i lager. I moderna masugnar finns avancerade metoder att exakt lägga lagren på plats och samtidigt behålla ett övertryck i toppen där gaserna lämnar ugnen. Alltefter järnmalmen reduceras och smälter sjunker lagren ner genom masugnen. Detta tar flera timmar (6-8 tim) i anspråk medan den uppåtgående gasen endast behöver 30 sekunder till någon minut för att stiga upp genom ugnen. Detta betyder också att gasvolymerna är väsentligt större än volymen fast gods som passerar masugnen. Gasen, dvs blästerluften, tillsätts i s k formor i nedre tredjedelen av ugnen. Den utgående gasen som består av kväve (N_2) och en blandning av koloxid och koldioxid ($CO-CO_2$) tas ut i toppen av ugnen. Gasen tas om hand och resterande mängd CO i gasen förbränns för att utnyttja hela värmeinnehållet. Oftast används värmen för att förvärma blästerluften i s k cowperapparater.

Längst ner i ugnen samlas det flytande råjärnet som med jämna mellanrum töms (tappas). Ovanpå råjärnet flyter en slagg som också töms intermittent. Råjärnet står i kontakt med en pelare av koks som kallas "den döde mannen". Namnet kommer sig av att kokspelaren spelar en inaktiv roll.



Figur 4 Genomskärning av masugn

2.11.1. *Motströmsprinciper*

Den förvärmade blästerluften (900-1300 °C) blåses in med en hög hastighet, 150-300 m/s, i förbränningszonen (race way). Huvudreaktionen är att blästerluftens syre reagerar med CO till CO₂ som i sin tur reagerar med C till att bilda en ökande gasmängd i form av CO. Flamtemperaturen ligger oftast mellan 1800 och 2500 °C. Det är nödvändigt att ha en hög temperatur i denna nivå av masugnen eftersom den slutliga smältningen av järnet och slaggen sker här. På vägen upp genom masugnen kyls gasen av mötande kall beskickning (fasta tillsatserna), så att den vid toppen inte har högre temperatur än 75-250 °C. Genom att på detta sätt använda motströmsprincipen blir värmeutnyttjandegraden så hög som 85-90%.

Motströmsprincipen är alltså viktig för värmebalansen, men den är också viktig för de kemiska reaktionerna. För att i nedre delen av masugnen genomföra det sista reduktionssteget från FeO (wüstit) till Fe måste reduktionsgasen vara rik dvs ha en hög andel CO. Detta är också fallet just i den nedre delen av masugnen där temperaturen är hög och CO/CO₂ blandningen står i jämvikt med rent kol. Högre upp i masugnen har gasen en lägre potential för reduktion, andelen CO är lägre, men ett reduktionsarbete genomförs ändå eftersom de högre oxiderna Fe₂O₃ och Fe₃O₄ kräver en relativt låg CO-andel för att reduceras till FeO (wüstit). Reduktionsjämvikterna kommer att diskuteras mer i detalj senare. Här är meningen med ovanstående beskrivning att understryka att masugnen utöver att fungera som en motströmsvärmväxlare även kan betraktas som en kemisk motströmsreaktor och att motströmsprincipen ger ett optimalt utnyttjande av gasernas reduktionspotential.

2.12. Masugnens drift

Som tidigare påpekats representerar materialflödet genom masugnen stora ekonomiska värden. Det finns därför stor anledning att optimera den dagliga driften. Karakteristiskt för många metallurgiska processer och i synnerhet masugnen är att det är tekniskt svårt att mäta processparametrar eftersom det är höga temperaturer i slutna rum och kontinuerliga flöden. Man kommer helt enkelt inte åt att mäta de centrala förloppen. Man får i stället styra bl a efter slutresultatet, dvs temperatur och kemisk analys hos råjärnet. Eftersom det tar många timmar för godset att gå genom ugnen blir reaktionstiderna långa om man vill ändra på slutresultatet genom att ändra någon ingående parameter. Målet för driften av ugnen blir därför att hålla alla ingående parametrar så konstanta som möjligt och därigenom få en konstant gång med ett minimum av fluktuationer som behöver korrigeras.

Viktiga ingående parametrar är råvarornas egenskaper vilka man naturligtvis försöker hålla så konstanta som möjligt. Produktionen kan bl a styras av blästervolym, blästerns förvärmning och blästerns fukthalt. Man påverkar även driften genom sättet hur ugnen beskickas, dvs hur råvarorna tillförs. Ett viktigt delmål är att få en god permeabilitet, dvs gasgenomsläpplighet, genom godspelaren. Man brukar tala om att man eftersträvar en god aerodynamik. Permeabiliteten påverkas av hur ugnen beskickas och därför läggs koks, malmråvara och slaggtillsatser i välplanerade sekvenser så att olika lager av material bildas. Man styr även fördelningen i radiell led. Genom att mäta tryckfallet i masugnen fås en information om permeabilitet.

En annan typ av mätdata som används vid styrningen är att mäta gassammansättningen och gastemperaturen över tvärsnittet när gasen lämnar beskickningen. Genom denna information kan man relativt snabbt se om ugnen går ojämnt. Ett exempel på detta är bildandet av gaskanaler, där gasen utnyttjas sämre. Ett annat exempel på problem man vill undvika är skullningar som är ihopklumpningar av material som kladdar fast på väggen och växer inåt. Skullningarna stör såväl gasflödet uppåt som materialflödet neråt. Skullningar i nedre delen av masugnen beror ofta på att slaggen får för hög viskositet och fastnar på den kallare väggen. Högre upp kan skullningar bero på för höga alkalihalter. Förloppet är här att alkali främst Na och K kommer in med järnbärarna i form av oxider. Långt nere i masugnen reduceras dessa och gasformig Na och K stiger upp i de kallare delarna där de oxideras och fälls ut på väggarna med skullningar som följd. Man får i värsta fall en cirkulation av alkali och med tillkommande alkali en ökande mängd. Lösningen är att transportera ut mer alkali, och då genom slaggen, än vad som tillkommer genom ingående komponenter. En sänkt basicitet på slaggen och ökad mängd slagg per ton råjärn förbättrar uttransporten men sänkt basicitet sker på bekostnad av sämre svavelrening och ökad mängd slagg betyder ökad koksförbrukning.

Andra negativa fenomen är hängningar eller släppningar. Hängningar betecknar ett läge där godset lokalt inte rör sig nedåt. Detta kan bero på skullningar eller att permeabiliteten blivit för låg som i sin tur kan bero på en för stor finandel eller att slagg eller nedrinnande järn blockerar uppåtgående gas. Gastrycket kan då bli så stort att beskickningen "hänger sig". Släppningar sker när hängningar och skullningar släpper och är naturligtvis mycket negativa för att nå en stabil och optimal gång.

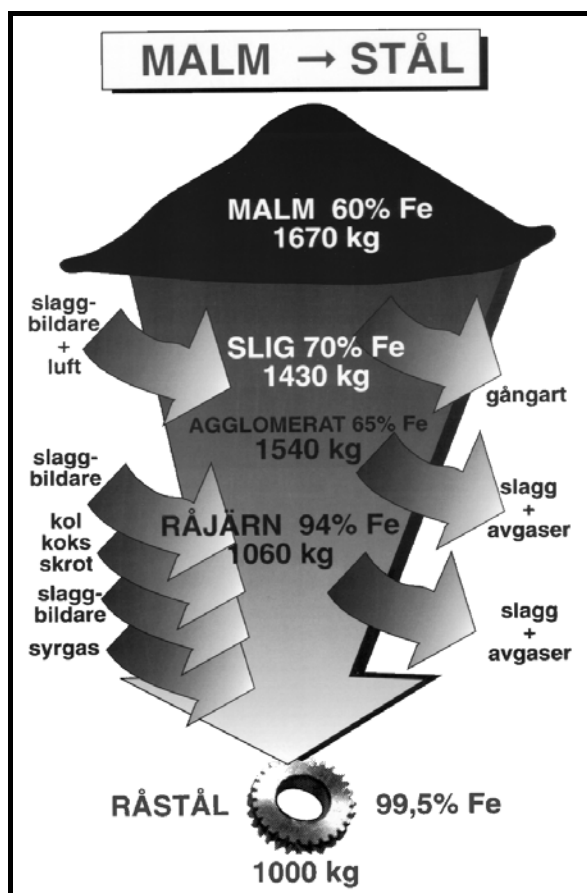
2.13. Masugnens råvaror

2.13.1. Allmänt

De två stora råvarorna fysiskt, men även ekonomiskt, är malmråvara och koks. Egenskaperna hos dessa har mycket stor genomslagskraft på masugnens produktivitet. Vid modern masugnsdrift genomgår koksen och i synnerhet malmen en långt driven förädling som ett led i optimeringen av masugnsdriften. Innan vi diskuterar varje råvara för sig skall vi i nästa stycke visa en förenklad materialbalans för vägen "Malm till stål".

Materialbalans för "Malm till stål"

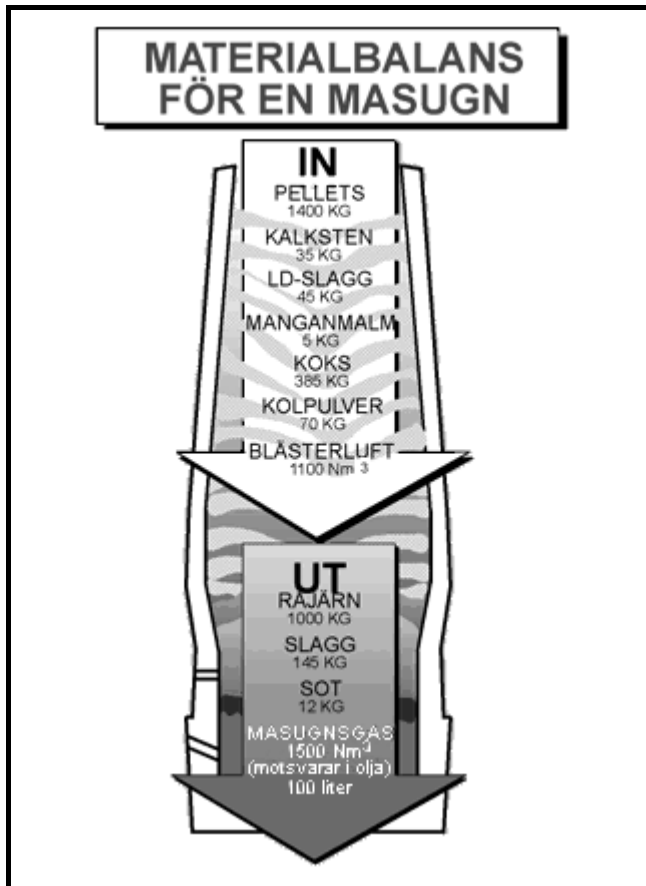
En övergripande materialbalans visas i fig 5. För att framställa 1000 kg färdigt stål där 99,5% är järnatomer (Fe) åtgår 1670 kg malm. Efter anrikning av malmen till ca 70% Fe (rest i huvudsak syre), återstår 1430 kg slig (anrikad malm). Denna slig agglomereras i sin tur till sinter eller kulsinter. I det aktuella exemplet tillsätts slaggbildare, varför åtgången av agglomerat är 1540 kg för 1000 kg färdigt stål. Till detta kommer en insats på ca 450 kg koks plus olja för att masugnen skall producera 1060 kg råjärn med en Fe-halt på ca 94%. Denna råjärns mängd sätts in i LD-konvertern där även slaggbildare och syrgas tillförs för att erhålla 1000 kg färdigt råstål.



Figur 5 Materialbalans Malm-stål

Materialbalans för masugnen

En detaljerad materialbalans för enbart masugnen visas i fig 6. Här har ett exempel valts med 100% beskickning med pellets. För att producera 1000 kg råjärn sätts på masugnen 1400 kg pellets, 35 kg kalksten, 45 kg LD slagg och 5 kg manganmalm. Bränsle i form av 385 kg koks sätts från toppen och 70 kg kolpulver tillsätts i bläster-nivån. Blästerluften utgör 1100 Nm^3 . Förutom 1000 kg råjärn kommer ut ur masugnen 145 kg slagg, 12 kg sot och 1500 Nm^3 masugns gas som motsvarar ca 100 liter olja.



Figur 6 Materialbalans för en masugn

Masugnens värmebalans

Masugnen omsätter mycket värme och det är viktigt att ha en uppfattning om värmebalansen för att förstå masugnens karaktär. Huvudbränslet är koks och den kol och olja som blåses in för att komplettera koksen. Den förvärmade blästern ger också ett positivt bidrag liksom exoterma reaktioner vid slaggbildningen.

Koks utnyttjas utöver direkt värmeproduktion till reduktion av malm, men också till att lösa in kol i råjärn.

För 1 ton råjärn ges i tabell nedan ett exempel på värmebalans för masugnen. (Se även materialbalansen i fig 6).

Tabell: Värmebalans för produktion av 1 ton råjärn i Mega Joule

Ingående			Utgående		
koks	14.9 MJ	78,3 %	koks för reduktion och smältning	9,9 MJ	52,0 %
kol + olja	1.8 MJ	9,6 %	värmvärde i gasen	7,8 MJ	40,3 %
bläster	2,1 MJ	10,8 %	Förluster	1,3 MJ	7,7 %
slaggbildare	0,25 MJ	1,3 %			

2.13.2. Malmråvaran

Typ av järnmalm

Det finns huvudsakligen två typer av järnmalm: hematit med formeln Fe_2O_3 och magnetit med formeln Fe_3O_4 . Förutom järnoxid finns i malmen så k gångart som i huvudsak är SiO_2 och Al_2O_3 samt i mindre omfattning CaO och MgO . Dessutom finns i olika utsträckning små mängder av en rad element som i regel betraktas som föroreningselement exempelvis alkalioxider (NaO och K_2O) samt fosforoxid (P_2O_5). Typiska Fe-halter ligger i malmen på 60-70% Fe. (Observera att ca 30% är syre i malmen).

Krav på Fe-råvaran

En rad egenskaper hos Fe-råvaran är viktiga för masugnsdriften:

1. Reducerbarhet
2. Storleksfördelning
3. Hållfasthet
4. Temperaturintervall för mjukning och smältning
5. Järn- och föroreningshalter
6. Medföljande slaggkomponenter
7. Jämnhet i egenskaperna

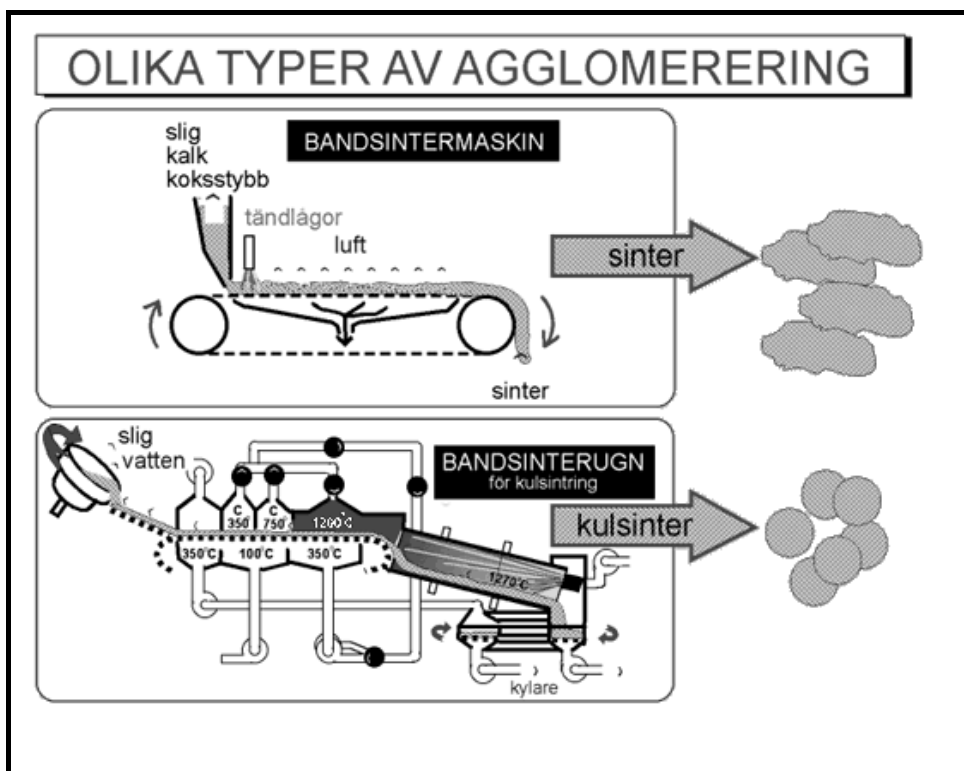
Reducerbarheten som direkt påverkar koksförbrukningen skall vara hög och på en jämn nivå. Storleksfördelen (siktcurvan) har stor betydelse för permeabiliteten i masugnen. Man bör framför allt undvika finandelar för att hålla upp permeabiliteten. Av samma skäl är en god hållfasthet mot sönderfall viktig så att en god storleksfördelning kan upprätthållas. Även mjukningstemperaturen påverkar permeabiliteten. Man eftersträvar ett smalt temperaturintervall från begynnande mjukning till smält järn. Vanligtvis mjuknar pann- eller kulsinter från 1200 °C till 1400 °C. En hög temperaturnivå på mjukningsintervallet är önskemålet. Framförallt får slaggsfasen inte mjukna före att reduktionen i fast fas är klar. En alltför hög smälttemperatur för

slaggfasen kan dock vara ett problem eftersom man vill skapa en flytande slagg i slutskedet. Helst bör sintern innehålla slaggkomponenter så att man utan ytterligare tillsatser erhåller önskad slagg i masugnen. Ett dylikt förhållande minimerar energiförbrukningen. Utöver de enskilda egenskaperna är ett mycket viktigt krav på malmråvaran att den håller en jämnhet i analysen och i varje enskild egenskap. Jämnheten hos de ingående insatsvarorna är en nyckelfråga för en god optimering av masugnsdriften.

Malmberedningen

I gruvan sker inledande en grovkrossning av malmen till stycken som är mindre än 100-150 cm. I sovringsverket sker en ytterligare krossning och frilagd gångart separeras från malmen. Historiskt sattes malmen på masugnen som styckemalm. Styckemalmen höll i regel stora halter gångart (oxider) eftersom man inte kunde anrika så långt. Därigenom erhöles stora slaggmängder i masugnen. Optimal analys på slaggen skapades genom att använda en blandning av malm från olika gruvor. I modern masugnsdrift går man snabbt mot att inte använda styckemalm trots att det är den billigaste Fe-råvaran. Större delen av gruvans produktion går därför vidare till ett anrikningsverk där malmen krossas ytterligare till under ca 0,1 mm varvid den kallas slig. Den magnetiska malmen magnetit anrikas magnetiskt medan hematit genomgår en flotationsanrikning. Genom att välja grad av nedmalning kan andel gångart och föroreningshalter av viktiga element kontrolleras. Ursprunglig renhet hos malmen spelar naturligtvis också en stor roll för slutliga renheten.

För att kunna utnyttja sligen i masugnen måste den anrikas vilket kan ske enligt två principer: sugsintring och kulsintring (pelletisering), se fig 7.



Figur 7 Olika typer av agglomerering

Sugsintringen sker vanligen genom att sligen blandas med kolstybb och slaggtillsatser varefter den bränns genom att ett undertryck av luft läggs på en kontinuerligt löpande bädd (bandsintring). Härvid erhålles en sur eller basisk sinter som krossas upp i lämplig styckstorlek. Bandsintring sker alltid i närheten till stålverket p g a att bandsinter inte låter sig transporteras särskilt väl. Bandsintringen innebär stora stoftutsläpp och därför går man av miljöskäl successivt över till pellets vid de flesta moderna verk. Kulsintringen som i regel utförs vid gruvan innebär att sligen pelletiseras genom att man efter en tillsats av bindemedlet bentonit rullar kulor i en trumma eller tallrik. Detta görs vid en bestämd fukthalt så att vattnets kapillärkrafter skapar en kula, s k råkula. Dessa kulor bränns i en temperatur upp till 1250-1300 °C, varvid sligen i kulorna agglomereras genom sintring. Det är en stor fördel att kulsintra magnetit jämfört med hematit, eftersom magnetit genomgår en oxidationsreaktion till hematit och denna är exoterm (bidrar med energi). Den därvid nybildade hematiten är också mer reaktiv än magnetiten. Kulsinter görs i regel från en finare slig än bandsinter, varför man får en bättre kontroll på slaggsammansättning och lägre halter av föroreningsämnen i pellets. Kulsintern har historiskt gjorts med en sur silikatslagg eftersom silikat är den vanligaste oxidkomponenten i gångarten efter anrikning. Utvecklingen går dock snabbt mot att även göra basisk kulsinter. Ett problem med att göra basisk pellets är att malmen måste ha låga SiO₂-halter vilket inte alla gruvor klarar. Vid höga SiO₂-halter måste alltför höga tillsatser av basiska komponenter göras för att få en basisk pellets. Problemet accentueras av trenden att köra med låga totala slaggmängder i masugnen för att spara energi.

Ett viktigt skäl med sintring är att skapa en porös lättreducerad produkt. Kulsinter har i detta avseende en mer porös struktur än bandsinter.

I en jämförelse mellan bandsinter och pellets har som beskrivits ovan pellets flera fördelar. Att pellets trots detta inte erövrat marknaden snabbare beror på att den är något dyrare, och att stålverken blir hårdare upplåsta till malmleverantören. Avgörande för att pellets nu successivt ersätter bandsinter är dock i första hand miljöskäl hos stålverken, samt förbättringar av pelletsens produktgenskaper som framgångsrikt utvecklingsarbete har skapat.

2.13.3. *Koks*

Koksens uppgift i masugnen är flerfaldig. Huvuduppgifterna är reduktion av malmen och värmning av beskickningen och smältning av järnet. Till detta kommer att koksen uppkolar det smälta järnet till tackjärn med hög kolhalt. Koksen har även vid hög temperatur en god fysisk hållfasthet som hjälper till att hålla uppe permeabiliteten när övriga material börjar mjukna. För en god permeabilitet bör koksen utöver att ha god hållfasthet även ha en låg finandel. Reduktion av malmen högt upp i masugnen bör ske indirekt genom gasfasen och inte direkt med koksen, och därför bör koksen inte reagera förrän den har kommit långt ner. Därför måste koksens reaktivitet hållas nere. Den önskvärda låga reaktiviteten kan åstadkommas genom att hålla en grov kornstorlek hos koksen. Koksen bör naturligtvis innehålla så få föroreningar som möjligt. I första hand gäller det svavel som dock är svår att undvika i råvaran.

Råvara för koks är stenkol. Den kemiska sammansättningen i praktiskt användbara stenkol är 83-91% C, 4,5-5,5 H₂O och 3-9% O₂. För att få bort de flyktiga ämnena upphettas kolet utan lufttillträde i det s k koksverket. Kol blandas i ugnar som är in-

fodrade med silikattegel. Arbetstemperaturen för ugnarna är 1000-1400 °C. Koksningstiden varierar mellan 16-24 timmar. Under koksningen förångas vattnet, rent kol blir kvar och bildar agglomerat av koks. Kolväten avgår i gasform, de obrännbara mineralerna blir kvar i koksen (aska) samt en viss del av svavlet avgår. Efter koksningen körs den bildade kokskakan till ett släckningstorn där den släcks med vatten och sedan får ånga av under 20 minuter innan siktning.

2.14. Metallurgiska reaktioner i masugnen

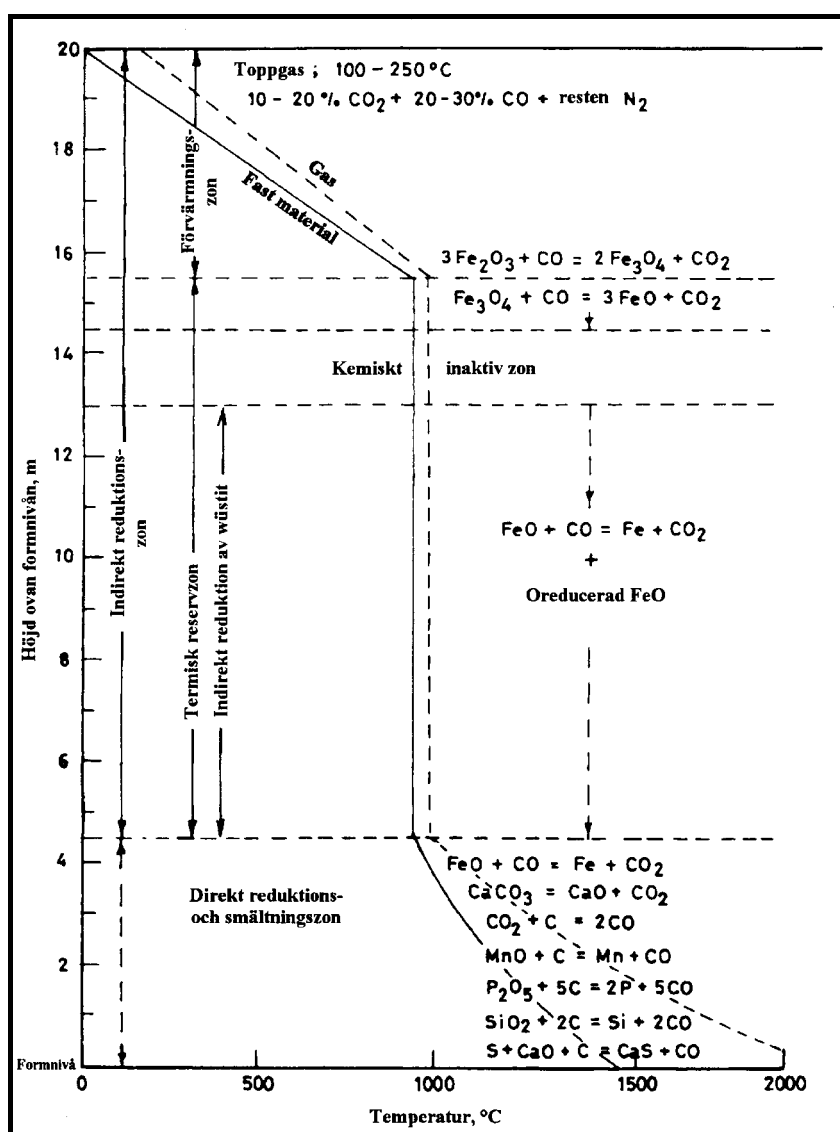
Man kan ur metallurgisk synpunkt dela in masugnen i tre zoner, se fig 8.

Lägre zonen: smältzon och direktreduktionszon

Mittzonen: termisk reservzon och indirekt reduktionszon

Övre zonen: förvärmningszonen och indirekt reduktionszon

Det bör påpekas att indelningen enbart är schematisk och zonerna inte är distinkta. De varierar mellan olika masugnar och driftsbetingelser. En kemisk inaktiv zon kan t ex förekomma mellan mittzonen och övre zonen. Dessutom körs i regel medvetet en högre temperatur i mittaxeln relativt periferin.

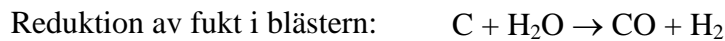
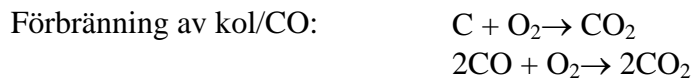


Figur 8 Typreaktioner i masugnen

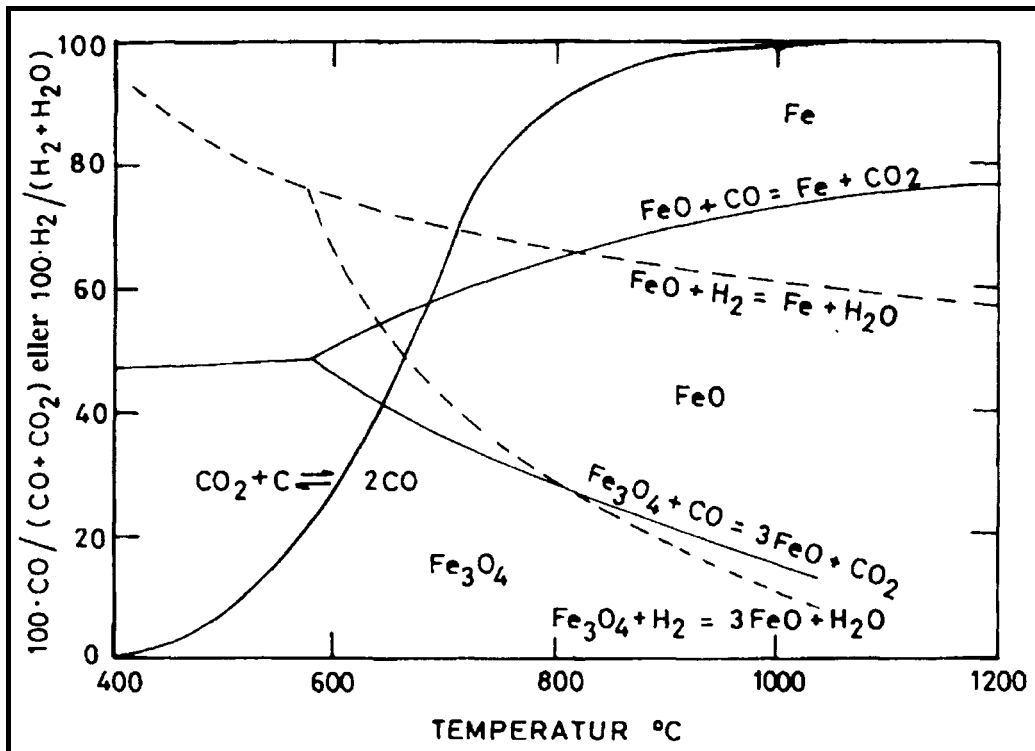
I fig 8 visas reaktionerna i de olika zonerna. I den lägre zonen, som sträcker sig 3-5 meter ovan formnivån, når temperaturen 1400-1450 °C hos det beskickade materialet. Gastemperaturen går från över 2000 °C i "race-way" till ca 1000 °C när gasen går in i mittzonen. Malmråvaran smälter och bildar två faser, ett kolhaltigt smält råjärn och en smält slagg. Slaggen tar upp tillsatt kalk och koksaska. Man önskar att slaggen skall vara lättfluten så att man får ut den ur ugnen och därför styrs sammansättningen så att likvidustemperaturen ligger mellan 1400 °C och 1450 °C. De viktigaste reaktionerna som uppträder i denna zon är:



Direktreduktion av SiO_2 , MnO , P_2O_5 och andra oxider.

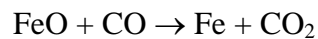


Alla dessa reaktioner utom förbränning av C och CO är endoterma (de konsumerar värme). Reaktionen $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ som också kallas Boudouard-reaktionen, innebär att det finns en jämvikt mellan C och en gasblandning av olika delar av CO och CO_2 , som beror på temperaturen. I fig 9 visas denna jämviktskurva som ett liggande S. I fig 9 har också järnoxidernas jämvikter lagts in som funktion av CO- CO_2 blandningen. Längst ner återfinns Fe_2O_3 som ett streck utefter x-axeln, vilket visar att den är lättreducerad. Vid ökad temperatur kommer gasblandningen att innehålla alltmer CO relativt CO_2 när gasen står i jämvikt med rent C. Man ser att även Fe_3O_4 reduceras relativt lätt innan det krävs en högre temperatur för att producera en gas som reducerar FeO. Man bör observera att figuren visar teoretiska jämvikter och att i praktiken Boudouard-jämvikten är förskjuten något åt höger. Jämviktsdiagrammet visar hur genialt masugnen fungerar genom att vid hög temperatur reducera FeO med en rik gas (hög CO-halt) medan Fe_2O_3 och Fe_3O_4 reduceras med en fattigare gas vid lägre temperatur. I figur 9 har även H_2 - H_2O blandningens reduktionspotential lagts in. Även H_2 deltar i reduktionen på i princip samma sätt som CO. Mängden H_2 -gas är dock liten i förhållande till mängden CO-gas.



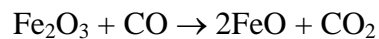
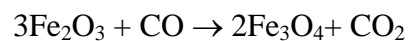
Figur 9 Boudouard-jämvikten samt Fe-oxidernas jämvikter som funktion av CO-CO₂ blandningen alternativt H₂-H₂O blandningen.

I mittzonen "termiska reservzonen" har gas- och godstemperaturer närmast sig varandra (800-1000 °C) och värmeutbytet är lågt. I denna zon sker en indirekt reduktion av FeO:



Det är positivt att FeO reduceras indirekt på detta sätt och därför eftersträvar man att få en stor mittzon. I ideala fall kan den vara 50-60% av masugnsvolymen.

I den övre zonen "Förvärmningszonen" sjunker snabbt temperaturen hos den uppåtgående gasen ned till 100-250 °C medan godset ökar från rumstemperatur till ca 800 °C. De viktigaste reaktionerna är här indirekt reduktion av hematit och magnetit till lägre oxider:



2.15. Krav på råjärnet

Kraven som ställs på råjärnet när det levereras till konverterverket kan delas upp i fysiska egenskaper, temperatur och analys. Ett viktigt fysiskt krav är att med råstålet inte följer slagg från tidigare operationer. Angiven vikt måste vara korrekt. För att rätt kunna optimera driften är korrekt vägning av ingående mängder generellt mycket viktig. Man bör undvika variation i temperatur och angiven temperatur skall vara korrekt. Ur analysynpunkt måste naturligtvis svavel- och fosforhalter klara uppställda mål. Det viktigaste är för övrigt jämnheten i analysen. I praktiken är Si-halten det ämne som kan variera beroende på driften av masugnen. Variationer kan störa driften av konverten så att man inte träffar rätt kolanalys vid blåsningen. I dessa fall måste en omblåsning göras vilket försämrar driftsekonomin avsevärt.

2.16. Masugnens utveckling

2.16.1. Allmänt

I inledningen konstaterades att masugnen troligen är världens äldsta industriella process och att den även värdeomsättningsmässigt kan tävla om de främsta platserna. Även som utvecklingsobjekt är masugnen troligen en av de främsta. Få industriella processer torde idag få så stora forskningsresurser allokerade som masugnprocessen. I Sverige har nyligen en ren forskningsmasugn färdigställts som kostat ca 110 milj kr och där en dags försökskörning kostar ca 200.000 kr. De forskningspengar som lagts ner på masugnen har också betalat sig väl. De senare åren har masugnens produktivitet och prestanda höjts kraftigt. Exempel på förbättringar med stor betydelse de senaste åren är ökad kolinjektion i formnivån och förbättrade pelletsprodukter.

2.16.2. Utvecklingstrender

Det finns fortfarande stora potentialer att förbättra masugnens produktivitet och kostnadsläge. Ett intressant område är styrningen. Den ökade möjligheten att behandla stora datamängder har ökat förhoppningen att kunna styra masugnen efter funktionsmodeller. Detta har dock ännu inte funnit någon större praktisk tillämpning. Däremot har styrning efter historiska erfarenhetsvärden i sk neurala nätverk fått en viss spridning.

Ett exempel på en praktisk åtgärd för bättre ekonomi är att öka syrgasandelen i blästerluften, kanske t o m ända till 100%. Kvävehalten uppfyller dock i dagens masugn en funktion för värmetransporterna och vid 100% O₂ kan man förvänta sig en för snabbt avkyld gas. Detta behöver i så fall lösas med någon form av cirkulation av toppgasen. En annan intressant trend är att öka pelletsens järnhalt till nära ren järnoxid, dvs i det närmaste helt ta bort slaggandelen. Slaggsammansättningen kan i det fallet optimeras ur enbart slaggbildningssynpunkt och man kan utnyttja fördelen att hela slaggtillsatsen (i praktiken LD-slagg) kan tillföras i formnivån. Båda dessa åtgärder skulle bidra till att förbättra en av svagheterna hos masugnen nämligen dess relativt låga produktivitet per volymsenhet.

2.17. Alternativa processvägar för järnframställning

2.17.1. Allmänt

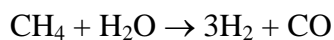
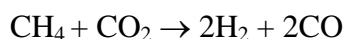
Masugnen har en dominerande ställning som järnframställningsprocess. Av världens årliga totala råjärnsproduktion på ca 550 milj ton står masugnen för ca 95%. Restande 5% produceras i direktreduktionsprocesser. Stora förhoppningar har funnits att direktreduktionsprocesserna skulle byggas ut snabbt för att ersätta skrot vid skrotbaserad stålframställning och därigenom ta stora andelar från masugnen. Det sker visserligen en hygglig årlig tillväxt av direktreduktionskapacitet men det tycks svårt att hota masugnens dominerande ställning. En annan typ av ny reduktionsprocess är smältreduktion. Den har också spått en möjlighet att konkurrera ut masugnen men ännu har ingen dylik process etablerats industriellt.

2.17.2. Direktreduktion

Vid direktreduktion framhålls järnsvamp eller som det också kallas DRI (Direct Reduced Iron). Definitionen av DRI är en järnprodukt som nått minst en 80%-ig metalliseringsgrad.

Produkten är avsedd att komplettera eller ersätta skrot i de processvägar som startar med skrot. I praktiken innebär detta att DRI-produkterna sätts in i ljusbågsugn som råvara för stålframställningen.

Den totala DRI-produktionen på ca 35 milj ton per år görs huvudsakligen i två processer kallade Midrex och Hyl III. Båda processerna arbetar efter följande principer. Malmen består i regel av pellets med hög halt Fe. Styckemalm är ett alternativ men används enbart i liten utsträckning. Reduktionen sker i ett schakt där godset transporteras nedåt och möter reduktionsgasen. Reduktionsgasens ursprung är naturgas som reformerats så att den huvudsakligen består av H₂ och CO enligt formlerna nedan.



Reduktionen sker i fast fas, dvs järnet smälter ej, vid temperaturer kring 900 °C - 1000 °C.

Fördelar med metoderna är att man kan använda naturgas. Lokaliseringen av DRI-verk blir därför till platser där man har tillgång till billig naturgas. En annan drivkraft för nya DRI-verk är att skalan kan göras mindre än vid investering i en ny masugn. Produkten kan också användas direkt in i ljusbågsugnen som ett alternativ till skrot.

När processerna introducerades i slutet av 1970-talet spåddes en snabb tillväxt av kapaciteten som dock har uteblivit. Metodernas nackdelar ligger i att man måste ha en mycket bra råvara, pellets med hög Fe-halt, vilket ofta innebär långa transporter. Rent tekniskt måste man ta hänsyn till att det alltid finns en risk att materialet när det reducerats till Fe genom sintring klibbar ihop. En annan teknisk problematik är att

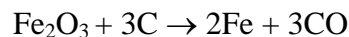
det färdiga materialet p g a sin stora yta kan återoxideras vilket kan få katastrofala följder.

Vid relativt små årsvolymer upp till en miljon ton är investeringskostnaden lägre för järnsvampsprocesserna än för investering i en ny masugn. Vid stora årsvolymer över 3 à 4 miljoner ton är masugnens investeringskostnad lägre. Driftkostnaderna för järnsvampproduktionen blir högre än jämfört med masugnen vilket i huvudsak beror på att man arbetar i mindre skala. DRI-verken byggs därför idag där man har ett lokalt begränsat behov av råvara för ”skrotbaserad” ståltillverkning och där gaspriserna är låga.

2.17.3. *Smältreduktion*

Där målet har varit att ersätta masugnen har de flesta processidéer som kommit fram, vid sidan om järnsvampprocesserna, varit olika typer av smältreduktion. Gemensamt för smältreduktions-processer är att reduktionen av järnmalmen sker i smält fas. Finkornig slig och finkornigt kol läggs på eller blandas ner i en Fe-smälta. Den höga temperaturen över 1500 °C och fina kornstorlekar borgar för en snabb reaktion och därmed en mycket produktiv process. Till detta kommer att malmen inte behöver agglomereras och sintras. Att direkt använda finkornig slig är mycket kostnadsbesparande. Även kolråvaran blir väsentligt billigare, eftersom icke koksande kol, olja eller biobränsle kan användas.

Det metallurgiska förloppet vid smältreduktion är enkelt:



Teoretiskt krävs 322 kg kol per ton Fe samt 1989 kWh/ton Fe vid 1600 °C. Reaktionen är således endoterm (kräver värme). I detta ligger ett hittills ej praktiskt överkomligt problem. Mycket värme måste tillföras. Teoretiskt kunde man erhålla denna värme om den frigjorda CO-gasen förbrändes med syre. Det är emellertid svårt att lösa hur denna värme skall kunna återvinnas till badet. Man har inte klarat de infodringsproblem som uppstår och man förbränner CO-gasen direkt ovan badet, vilket vore det enklaste. Man har utan framgång provat olika ytterligheter som att förbränna i en skummande slagg eller att omvandla värmen i CO-gasen till elenergi och föra tillbaka elenergin induktivt eller som plasma till smältan.

Den smältreduktionsprocess som har kommit längst är Corex där kol och syre tillförs i en lans ovan badytan. CO-gasen omvandlas till el-energi eller används på annat sätt. I Corex-processen är en stor andel av malmråvaran agglomererad. Med högre bränsleförbrukning, högre driftkostnader och högre investeringskostnader per ton än masugnen har Corex svårt att konkurrera ut masugnen. Slutsatsen är att man i praktiken idag inte har någon process som i stor skala kan ersätta masugnen. Kvar står dock att masugnens akilleshälar med höga förbehandlingskrav på råvarorna, malm och kol, samt den låga produktiviteten per volymsenhet borde innebära ett utrymme för en smältreduktionsprocess.

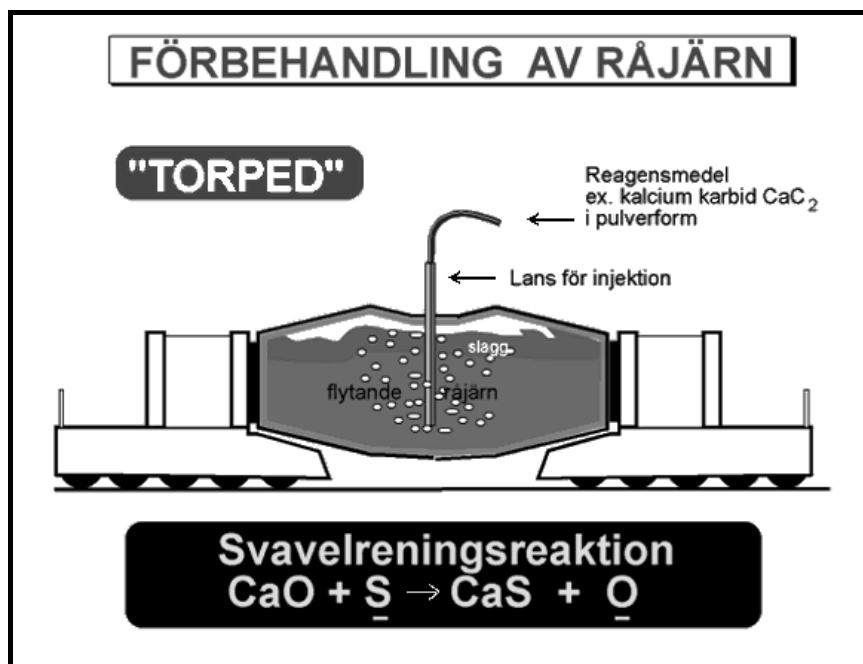
2.18. Svavelrening

Svavel kommer in i råjärnet genom koksen. Eftersom svavel är mycket negativt för stålets egenskaper måste halterna hållas låga.

I masugnen fördelas svavlet mellan råjärnet och slaggen. Om slaggens basicitet är hög ökar svavelkapaciteten hos slaggen. Masugnsslaggens basicitet måste dock begränsas för att inte minska slaggens möjligheter att ta upp alkali (Na + K). När slaggens volym dessutom bör minimeras av energiskäl innebär detta att svavelupptagningen i masugnsslaggen inte räcker för att nå erforderliga nivåer utan en separat svavelrening måste göras.

Den teoretiska bakgrunden för svavelrening beskrivs i relationsformeln

$\underline{S} + \text{MeO} \rightarrow \text{MeS} + \underline{\text{O}}$. Detta är en sk utbytesreaktion som bestämmer svavelfördelningen mellan en flytande oxidisk slagg och ett svavelhaltigt järnbad. MeO står för någon metalloxid i slaggen och MeS för någon metallsulfid i badet medan \underline{S} och $\underline{\text{O}}$ står för löst svavel och löst syre i slagg respektive bad. För att nå maximal svavelfördelning, dvs få reaktionen att gå åt höger, krävs i första hand en låg syrepotential i järnbadet och en stark bindning av svavel till metallen. Ett kolmättat råjärn ger låga syrepotentialer och därför är svavelrening lämplig att utföra på råjärnet efter tappning från masugnen. Starka svavelbindare är Ce, Ca, Mg och Na. De tre sista används praktiskt vid svavelrening. Vanligast är bränd kalk CaO. Svavelrening med kalk är billig och ger goda resultat om den utförs vid låg syreaktivitet, dvs reducerande förhållanden. Även soda (Na_2CO_3) används för svavelrening. Den är dock dyrare än kalk men det är möjligt att nå låga svavelhalter med soda även vid relativt höga syreaktiviteter. Andra vanliga medel är kalciumkarbid (CaC_2) och magnesium (Mg). Båda är dyra men effektivare än kalk och soda. Dominerande praktisk metod är idag injektion genom lans i torpedo eller skänk. Eftersom detta processteg kommer före färskningen i LD-ugn kallas det ofta för förbehandling av råjärn, se fig 10.



Figur 10 Förbehandling av råjärn

2.19. Stålfremställningssteget – färskningen

2.19.1. Allmänt

Efter masugnen följer ett ståltillverkningssteg där huvuduppgiften är att förändra och anpassa råjärnets analys till det slutliga stålets specifikation. Det är i huvudsak en fråga om att sänka kolhalten vilket görs genom att kolet reagerar med syre till koloxid. Detta kallas för kolfärskning eller helt enkelt färskning. I de moderna syrgasprocesserna används som reaktionskärl (ugn) en konverter och ibland används begreppet konvertering för stålfremställningssteget.

Den historiska bakgrunden till de moderna syrgasprocesserna har tidigare redovisats i del 1. I framställningen nedan beskrivs metallurgin och driften för LD-ugnen och OBM-ugnen. Översiktligt berörs även de varianter som utvecklats kring dessa två huvudkoncept av syrgasprocesserna.

2.20. LD-processen

2.20.1. Syften och mål

Konverteringen från råjärn till stål har förutom att sänka kolhalten till föreskriven nivå en rad andra viktiga syften. Fosforhalten som helst inte bör överstiga 0,15% P i råjärnet sänks till nivån omkring 0,015%. (Speciella varianter av LD-processen finns för råjärn som överstiger 0,15% P). Svavel har i regel raffinerats före LD-steget. Man vill ändå oftast sänka halten från nivån runt 0,05% till ca 0,02% för att vid behov ytterligare raffinera svavel i efterföljande skänkbehandlingen.

Temperaturen som i råjärnet ligger inom intervallet 1250-1400 °C måste höjas, dels p g a att smälttemperaturen (Likvidus) höjs väsentligt vid sänkningen av kolhalten, och dels behövs en övertemperatur för att täcka temperaturförluster vid tappning, legering och transport. Temperaturen efter kolfärskningen är därför oftast mellan 1650-1750 °C.

Ur kvalitetssynpunkt finns även krav på låga kväve- och vätehalter. Ett annat mer praktiskt kvalitetsmått är att undvika att få med ugnsslagg vid tappningen. Detta är viktigt för att underlätta efterföljande skänkbehandlingssteg.

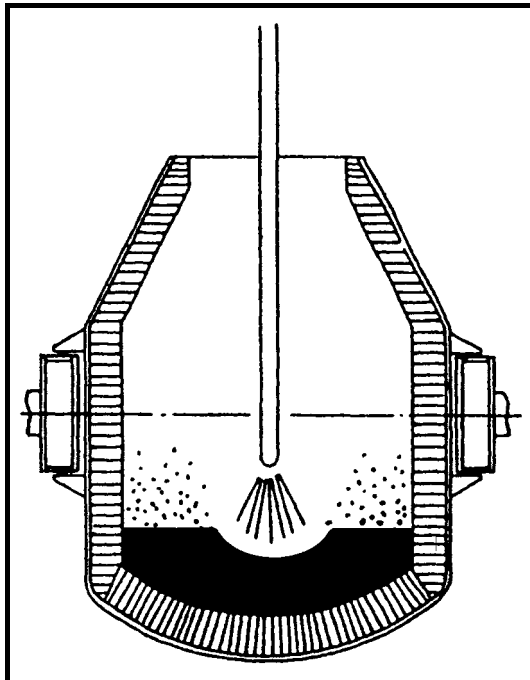
För att optimera produktionsekonomin är de viktigaste målen:

1. hålla en hög träffsäkerhet på analysen
2. hög produktionstakt, korta "tap to tap" tider
3. hålla ett högt utbyte och låga förbrukningstal
4. en maximal skrotsmältningskapacitet

2.21. Processbeskrivning

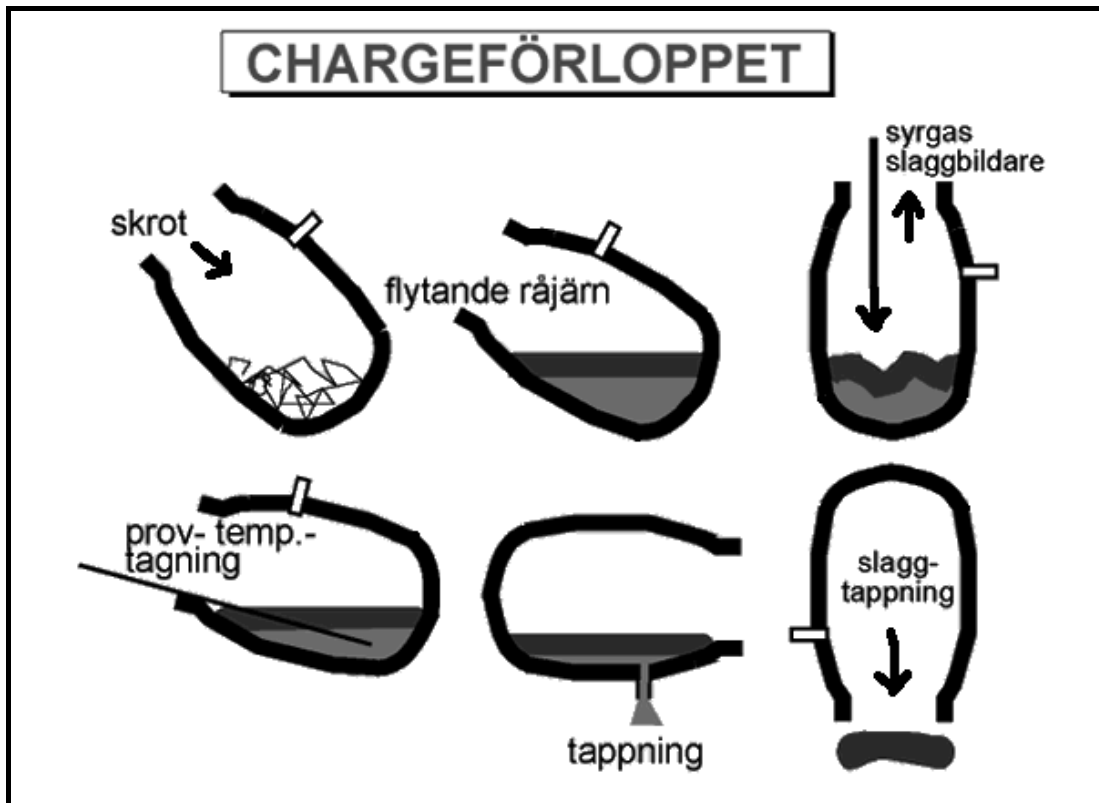
2.21.1. Beskrivning och chargeförlopp

I figur 11 nedan visas en principiell bild av LD-processen.



Figur 11 Principiell bild av LD-ugnen

Utrustningen är mycket enkel. Konvertern består av ett upprättstående kärl. Syrgaslansen förs in lodrätt ned mot badytan. Vid blåsningen sätts en stor avgashuv över öppningen. Konvertern kan vridas kring en axel för att fungera vid de olika momenten i chargeförloppet som visas i figur 12 nedan.



Figur 12 Chargeförloppet i LD-ugnen

Chargeförloppet i ett LD-stålverk följer i regel ordningen:

- skrot chargerar
- råjärn chargerar
- konverteren tippas i vertikalt läge
- syrgaslansen sänks ned i konverteren
- syrgasblåsningen börjar, under blåsningens gång tillsätts slaggbildare.
- blåsningen slut, provtagning och temperaturmätning
- eventuell omblåsning om föreskrivna värden ej uppnåtts
- tappning
- legeringstillsats i skänk under tappningens gång
- slaggtappning

Chargetiden är ca 35-40 minuter varav blåsningen pågår 15-20 min. Den totala tiden mellan två charger, den s k "tap to tap" tiden är i regel 50-55 min.

2.21.2. Energibalansen

Om man betraktar konverteringsprocessen ur energisynpunkt skall man finna hur genialt det är att den produkt, råjärnet som masugnen levererar i sig inkluderar bränslet för nästa processteg. Ugnen kan göras väldigt enkel utan komplicerade värmeförselelansordningar. Själva LD-ugnen (konverteren) är i princip endast ett keramikinfodrat reaktionskärl. Att bränslet finns i badet gör att värmeöverföringen kan göras effektiv vilket gynnar produktiviteten.

I tabellen nedan visas energitillskott vid förbränning med syrgas

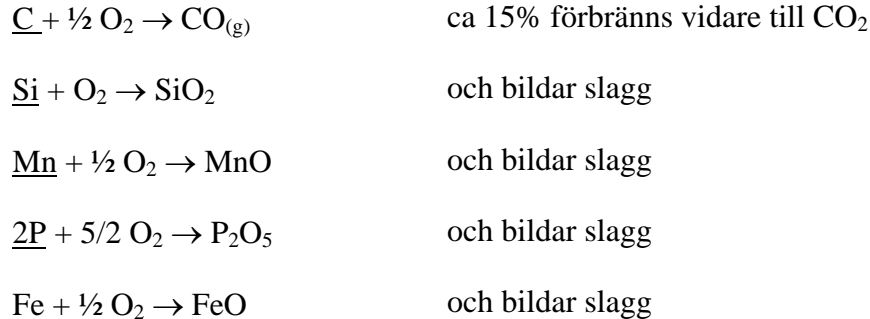
1 kg kol till koloxid (CO)	2,6 kWh
1 kg kol till koldioxid (CO ₂)	9,1 kWh
1 kg kisel till kiseldioxid (SiO ₂)	8,7 kWh
1 kg mangan till manganoxid (MnO)	1,7 kWh
1 kg fosfor till fosforpentoxid (P ₂ O ₅)	9,3 kWh
1 kg järn till järnoxid (FeO)	1,1 kWh

Observera att man i slutfasen önskar ha bränt så lite Fe som möjligt ur utbytessynpunkt. Vid en normal konvertering utvecklas per ton råjärn ca 200 kWh. Denna energi skall täcka en höjning av badets temperatur med ca 300 °C, smältning av skrot och slaggbildare samt värmeförluster.

För att styra processen mot rätt sluttemperatur kan antingen kylmedel eller bränsle tillsättas när som helst under blåsningen. Som kylmedel används oftast styckemalm eller sinterpellets och som bränsle tillsätts någon Si-bärare som t ex FeSi.

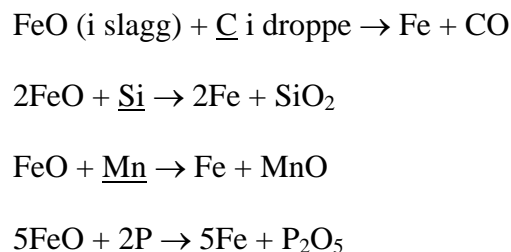
2.22. Metallurgiska reaktionerna i konvertern

Ett viktigt karakteristika för LD-processen är att syrgasen blåses med mycket hög hastighet, högre än Mach 2 (1600 meter i sekunden), så att syrgasjeten bildar en krater i metallbadet. I denna krater i den sk brännfläcken sker oxidationsreaktionen. Syret reagerar direkt med badet enligt:



Formlerna skall tolkas så att kol löst i badet reagerar med syre och bildar CO-gas, att kisel, mangan och fosfor reagerar med syre och bildar oxider och att järn oxideras av syre till järnoxid. De bildade oxiderna förenas i en slaggfas.

Mängdmässigt kommer av kinetiska skäl huvudsakligen Fe att oxideras. (Fe är det mest förekommande elementet i badet). Syrgasjetens impuls kommer att orsaka att droppar av metall och metalloxid (slagg) stänker upp i den bildade slaggen. Därför kommer det även att ske viktiga reaktioner i slaggfasen. Kol och metall oxideras av den FeO som hamnat i slaggen enligt



Utöver brännfläcken och slaggfasen sker reaktioner även i badet. Mekanismen är i huvudsak att FeO droppar blandas ner i badet. FeO producerar tillsammans med kolet i badet CO-gas. Eftersom det är svårt att kärnbilda en gasbubbla direkt i badet genom sk homogen kärnbildning, sker gasproduktionen i första hand utmed vägarna där sk heterogen kärnbildning är möjlig. Denna koloxidation bildar på ett positivt sätt till omröringen av smältan då bubblorna stiger upp genom badet. I takt med att kolfärskningen avtar i slutet av blåsningen avtar också omröringen. Detta innebär att reduktionen av FeO kommer att avta mot slutet och man erhåller en kraftig ökning av FeO-halten i slaggen. Detta är ett av de viktigaste kännetecknen för LD-processen.

Ett annat kännetecken för LD-processen är den skummande slaggen. I LD-processförloppet är gasutvecklingen så stor att tillsammans med kraften från syrgasjeten bildas det en sk skummande slagg. Skumningen är positiv då den skapar stora reaktionsytor. Är man inte försiktig kan dock slaggen flöda över konvertermyningen

och man får ett skottkok, vilket naturligtvis bör undvikas då det medför en rad komplikationer.

Ca 15% av den bildade CO-gasen omvandlas till CO₂. Denna reaktion är exoterm och mängden CO₂ påverkar därför skrotsmältningskapaciteten. Den ligger normalt i storleksordningen 25%.

2.22.1. Slaggbildningen

Slaggen spelar en viktig och aktiv roll i syrgasprocessernas metallurgi. Det är därför viktigt att hålla en god kontroll att den bildas snabbt och blir tillräckligt reaktiv. Totalt tillsätts mellan 40-50 kg CaO ofta kompletterad med dolomit (CaO/MgO) per ton stål. Tillsammans med bildade oxider ger detta en total slaggmängd på ca 80-100 kg per ton stål. Lite förenklat brukar man tala om tre skeden i LD-processens förlopp och detta gäller inte minst slaggförloppet.

Period I Inledningskedet (första 4-5 minuterna)

Kolfärskningen kommer inledningsvis inte i gång så starkt. Däremot oxideras stora mängder Fe, Si och Mn. Dessa oxider kommer att utgöra en första mycket lättflytande och lågsmältande slagg. FeO och MnO verkar som flussmedel på den tillsatta kalken. Kalken löses upp snabbt vilket också påskyndas av den omrörningen och temperaturhöjningen. Slaggens konsistens kan ytterligare påverkas genom tillsättning av flusspat, CaF₂, eller annan komponent med låg smältpunkt. Under denna period löser ca 30-40% av kalktillsatsen upp sig och bildar slagg, varför den ofta kallas slaggbildningsperioden.

Period 2 Kolfärskningskedet (varar 10-11 minuter)

Kolfärskningen tilltar vilket beror på att större delen av kiset har förslagats och en temperaturstegring har ägt rum, vilket gynnar kolfärskningsreaktionen. Genom att bildad FeO reduceras av kol och den totala aktiva slaggmängden ökar kommer FeO-halten att minska i slaggen. När slaggens FeO-halt minskar reduceras slaggens flytbarhet kraftigt genom att svårsmälta dikalciumsilikater kommer att bildas. Därigenom försämras kalkupplösningen under denna period.

Period 3 (sista 2-3 minuterna)

Kolhalten i badet har nu sjunkit till några tiondels % , vilket gör att kolets intensitet minskar och omrörningen avtar. Kolfärskningshastigheten avtar på grund av kinetiska skäl och i stället ökar återigen järnoxidationen och FeO-halten i slaggen. Detta leder i sin tur till snabbare kalkupplösning, varför den sista periodens slagg ökar i CaO och FeO-halt.

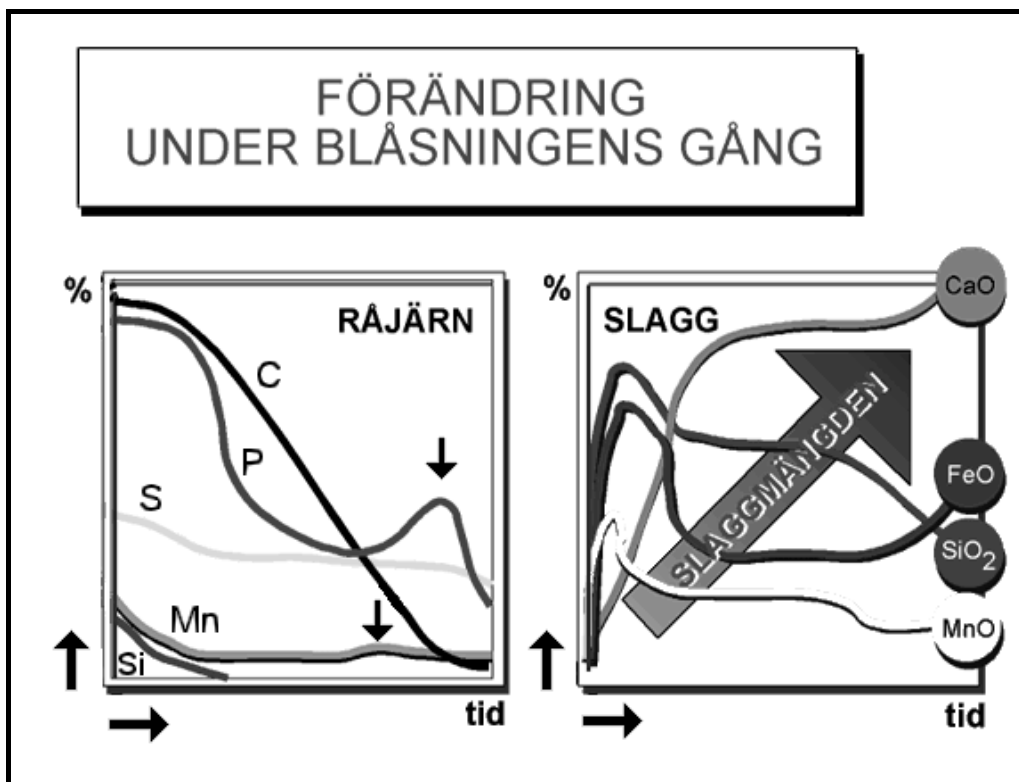
2.22.2. Analysförändringar i metall och slagg under blåsningen

Fig 13 visar hur slagg och bad förändras i sin sammansättning under blåsningen.

1. Kolfärskningen går långsamt de första 4-5 minuterna på grund av låg temperatur och konkurrens av kisel. När kisel minskar och temperaturen ökar går kol-

färskningen upp på en hög och jämn nivå till slutperioden då kolfärskningstakten avtar p g a låg kolhalt och dålig omröring.

- Si färskas bort vilket tar ca 4-5 minuter. Si har hög affinitet till syre och drivkraften gynnas av låg temperatur.
- Svavelraffineringen går snabbast i början och slutet av blåsningen. Att S-reningen är dålig i mittperioden beror på att kalkupplösningen är för långsam där. Generellt är svavelreningen dålig i konvertern eftersom syrepotentialen är hög.
- Fosforreningen går också bäst i slutet och början av blåsningen. I början gynnar den låga temperaturen och höga FeO-halten fosfors oxidation. I mittperioden kan till och med fosfor stiga p g a lägre FeO och höjd temperatur. Detta kallas för fosforpuckeln. I slutperioden ökar både FeO-halt och CaO-halt, dvs såväl syreaktivitet och basicitet ökar i slaggen vilket gynnar fosforreningen så att halten sjunker rejält.
- Mangan oxideras nästan lika snabbt som kisel. Även mangan kan återreduceras i mittperioden p g a stigande temperatur.



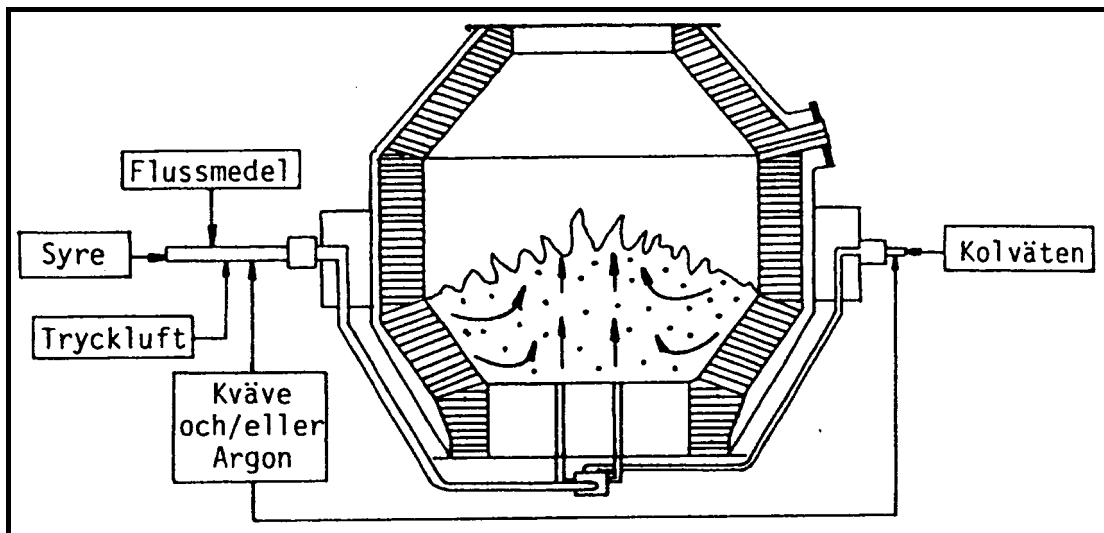
Figur 13 Förändringar under blåsningens gång

2.22.3. Körningssätt

De generella förhållanden som beskrivits ovan kan naturligtvis modifieras i olika riktningar, t ex genom olika körningssätt. Ett exempel på detta är inställningar av lanshöjden. Stort avstånd lans-bad ger en "mjuk blåsning", dvs en högre FeO-halt i slaggen. Detta kan utnyttjas för en extra god fosforrening. Denna metod kan emellertid inte utnyttjas vid låga kolhalter.

2.23. Bottenblåsande konverter

När syre blåses in i en järnsmälta uppstår lokalt mycket värme och man kan få infodningsproblem. LD-processen löste detta genom att blåsa en syrejet uppifrån ner i smältan, så att en krater bildades. Vid Maxhütte i Tyskland lyckades man i slutet av 60-talet att färskas med syrgas i en bottenblåsande konverter. Den kallades OBM (Oxygen-Boden-Maxhütte). För att skydda dysor och infodring från den starka värmeutvecklingen från syrgasförbränningen utvecklades en speciell dysa som består av två koncentriska rör. I det inre röret spolats syrgas och i det yttre utrymmet ett skyddsmedium av kolväten (propan naturgas eller eldningsolja). Kolväteföreningarna spaltas i dysmynningen och detta kräver så mycket värme att en skyddsmängd på ett par procent av syrgasmängden är tillräcklig för att åstadkomma tillräckligt låg temperatur. Tillsammans med syrgasen i det inre röret kan även pulverformig kalk injiceras. Kalken bidrar till ett lugnt blåsningsförlopp och utgör en bas för den nödvändiga slaggbildningen. Liknande processer utvecklades i andra delar av världen och man möter namn som LSW i Frankrike och Q-BOP (Quick Basic Oxygen Process) i USA som båda är snarlika OBM-processen i arbetssätt. I figur 14 nedan visas en principiell bild av en OBM-konverter.



Figur 14 Principiell bild av en OBM-konverter

2.23.1. OBM-processens metallurgi

Samma produktkrav som ställs på LD-processen ställs på OBM-processen. De metallurgiska reaktionerna är i huvudsak lika. Den mest påfallande skillnaden är den mer intensiva badrörelsen hos OBM. Detta innebär bl a att blåstiden kan förminskas till 10-12 minuter och jämvikten uppnås mer effektivt. Bättre jämviktsförhållanden innebär att FeO-halten generellt kan hållas lägre i OBM än LD, vilket innebär bl a ett bättre järnutbyte. Framför allt i slutfasen när kolhalten är låg kan fördelarna med OBM:s bättre omröring utnyttjas. Man kan t ex i OBM nå kolhalter på 0,01% medan LD har en begränsning till ca 0,04%. En nackdel med OBM är att vätehalten efter blåsning ofta är högre än de ca 2 ppm som LD når och som man helst inte vill överstiga. Detta kan åtgärdas genom att argon spolats genom smältan in en kort tid i slutet av konverteringen.

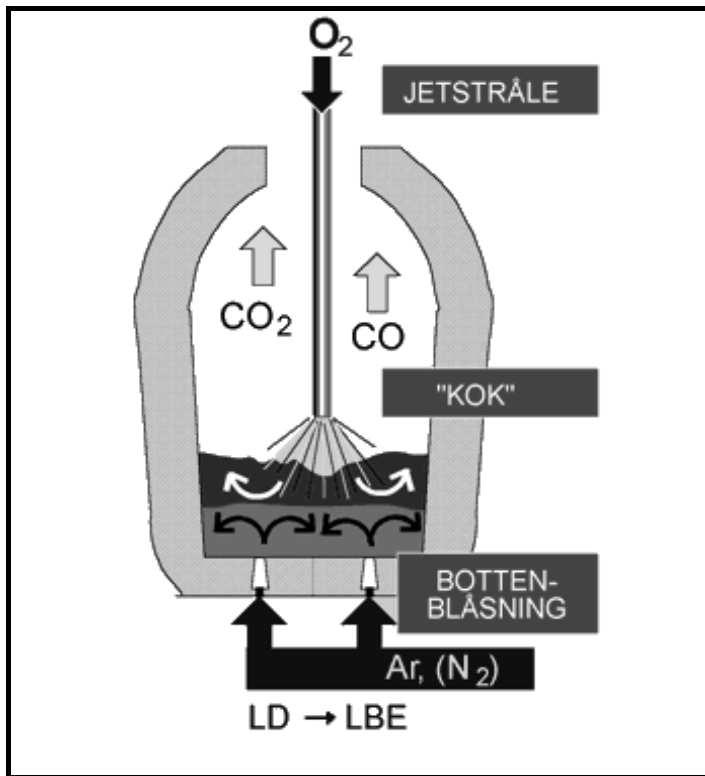
Trots en något högre driftskostnad har OBM så stora fördelar att den borde ha ersatt LD i ett snabbt tempo, om det inte vore för att LD genom förbättringar reducerat sina akilleshälar. En väsentlig sådan förbättring är införandet av kombinerad blåsing.

2.23.2. *Kombinerad blåsing*

Eftersom LD och OBM processerna båda har sina fördelar har man funnit att det skulle kunna vara intressant att både kunna blåsa från lans och från botten i samma konverter. Detta kallas för kombinerad blåsing och kan göras på många sätt. En förenklad uppdelning kan göras enligt följande:

- Alt 1: Syrgas genom lans från toppen samt tillsats av inert gas genom porösa stenar eller dysor i konverterbotten. Bottenflödet är lågt. Denna variant kallas hybridprocess och är vanlig eftersom det krävs enbart en relativt enkel ombyggnad av LD-verket. En känd variant kallas LBE (Lance-Bubbling Equilibrium) se fig 15.
- Alt 2: Syrgas genom lans från toppen samt tillsats av luft koldioxid eller syrgas genom OBM-dysor. Bottenflödet är måttligt.
- Alt 3: Syrgas från toppen genom lans eller dysor i konverterväggen, samt tillsats av syrgas genom OBM-dysor i botten. Bottenflödet är högt, ca 30% av syrgasen tillförs från botten.

Den stora fördelen med kombinerad blåsing jämfört med LD är naturligtvis den bättre omrörningen särskilt i slutet av konverteringen, när CO-koket är litet. Man uppnår genom bättre omrörning lägre FeO-halter, vilket i sin tur leder till bättre utbyten och lägre foderslitage. Lägre lösta syrehalter i stålet innebär ökade legeringsutbyten. Dessutom erhålls bättre svavelrening och ökade Mn-halt i badet. Jämfört med ren OBM når man högre skrotsmältningskapacitet och en bättre fosforreningsförmåga vid höga kolhalter.



Figur 15 Principiell bild av LBE-konceptet

2.23.3. Tappning och legering

När blåsningen är klar tappas konvertern genom att den vickas i tappningsposition. Stålet tappas nedåt och slaggen flyter ovanpå. Det är viktigt att avbryta tappningen i rätt tid för att undvika att slaggen följer med stålet. Om slaggen följer med riskerar man att nå låga utbyten på efterföljande legeringstillsetser p g a oxidation av desamma. Dessutom finns en risk för återreduktion av skadliga ämnen som exempelvis fosfor.

Stålet har efter blåsningen en hög halt av löst syre, ca 500-800 ppm. Denna halt måste nedbringas eftersom den höga halten kan oxidera legeringstillsetser men framför allt p g a att det fasta stålet har en mycket låg löslighet (nära 0) för syre. Stålet måste desoxideras vilket görs med tillsatser av vanligtvis Si, SiMn eller Al. Förutom desoxidationstillsetser görs ofta tillsatser av legeringsämnen vid tappningen eller direkt efter desoxitillsatserna.

2.24. Eldfasta material

Med eldfasta material menas de keramiska material som klär in de behållare som innesluter järn- och stålsmältorna i respektive ugnar och skänkar. Även stakar och dysor utgörs i regel av keramiska material. Kraven på de keramiska materialen är höga på grund av de höga temperaturerna hos både stål och slagg. Helst skulle man vilja välja material som var inerta, dvs inte kunde reagera med stålet eller slaggen. De enda material som är billiga nog och klarar temperaturkraven är oxidiska material som tyvärr inte är inerta mot slaggsfasen. Man måste i princip ha ett eldfast material som har högre smältpunkt än slaggen.

Nedan visas smältpunkten för några komponenter som ingår i slagger och eldfasta material.

		Smältpunkt °C
CaF ₂	Kalciumfluorid, "flusspat"	1360
FeO	Järnoxid	1420
SiO ₂	Kiseldioxid	1470
MnO	Manganoxid	1650
Cr ₂ O ₃	Kromoxid	1990
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid "alumo"	2050
CaO	Kalciumoxid	2580
MgO	Magnesiumoxid, "magnesit"	2800

Det eldfasta materialet måste anpassas till existerande slagg. Ofta kan motstridiga intressen uppkomma. I regel vill man ha en lättfluten slagg, vilket i princip åstadkommes genom tillsatser, exempelvis flusspat som sänker smältpunkten hos slaggen. En dylik slagg har dock den nackdelen att fodret också vill bilda lågsmältande föreningar med de smältpunktsnedsättande ämnena, vilket i praktiken betyder risk för kraftigt ökat foderslitage. Komponenter som bidrar till en lättfluten slagg är flusspat, SiO₂ och FeO är också kända som stora riskfaktorer i foderslitaget.

De eldfasta materialen kan delas in i tre grupper, se fig 16:

1. Chamotte (surt)
Basen är SiO₂ med tillsats av bl a Al₂O₃
2. Alumo (neutralt)
Basen är Al₂O₃ med tillsatser av bl a SiO₂
3. Basiska (basiskt)
Basen är MgO och CaO

Det är en markant skillnad mellan surt och neutralt å ena sidan och basiskt å andra sidan. Basiska komponenter bildar tillsammans med sura och neutrala komponenter

lättsmälta föreningar. Därför är det viktigt att en sur slagg måste ha ett surt foder och motsvarande gäller för det basiska.

DE ELDFASTA MATERIALENS TRE TYPER				
CHAMOTTE	30-43%	Al_2O_3	bra med sura slaggar	känslig för temp. växling nej
	52-64%	SiO_2		
ALUMO	30-95%	Al_2O_3		nej
BASISKA			basi- ska slaggar	ökar med MgO halten
Magnesit,	75-98%	MgO		
Magnesit-Krom,	55-80%	MgO		
	6-15%	Cr_2O_3		
Krom-Magnesit,	35-50%	MgO		
	25-30%	Cr_2O_3		
Dolomit,	36-40%	MgO		
	50-60%	CaO		
Fosterit,	50-63%	MgO		
	30-38%	SiO_2		

Figur 16 De eldfasta materialens tre typer

Källor

Del	Titel	Författat av	Revidering av
1	Historia, grundläggande metallurgi...	Jan Ugglå	Sven Ekerot (2000) Robert Vikman, Jernkontorets TO 21, 23 och 24 (2016)
2	Malmbaserad processmetallurgi.....	Jan Ugglå	Sven Ekerot
3	Skrotbaserad processmetallurgi	Jan Ugglå	Henrik Widmark
4	Skänkmållurgi och gjutning	Jan Ugglå	Sven Ekerot
5	Underhåll och driftsekonomi	Hans Gillberg och Niklas Brodd, ABB	
6	Analytisk kemi	Carl Bavrell	
7	Energi och ugnsteknik.....	Jan Fors och Martti Köhli	
8	Bearbetning av långa produkter	Magnus Jarl, Håkan Lundbäck, Jan-Olov Perå och Åke Sjöström	Rachel Pettersson, Jernkontorets TO 32
9	Bearbetning av platta produkter	Nils-Göran Jonsson, Jan Levén Åke Sjöström och Olof Wiklund	Rachel Pettersson, Jernkontorets TO 31
10	Oförstörande provning	Jan-Erik Bohman, Bernt Hedlund, Bengt Moberg, Bert Pettersson och Björn Zetterberg	Författarna
11	Olegerade och låglegerade stål.....	Bengt Lilljekvist	
12	Rostfritt stål.....	Staffan Hertzman och Hans Nordberg	Rachel Pettersson, Jernkontorets TO 43

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

Bilderna i den första utgåvan av delarna 1–4 producerades av Jenö Debröczy.
Några av dessa bilder återfinns i den omarbetade utgåvan.

Bilderna i den första utgåvan av delarna 6–12 producerades av Databild AB.

Bilderna i den reviderade utgåvan av delarna 8, 9 och 12 har omarbetats av Rachel Pettersson.

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 transportfrågor. 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 · www.jernkontoret.se

