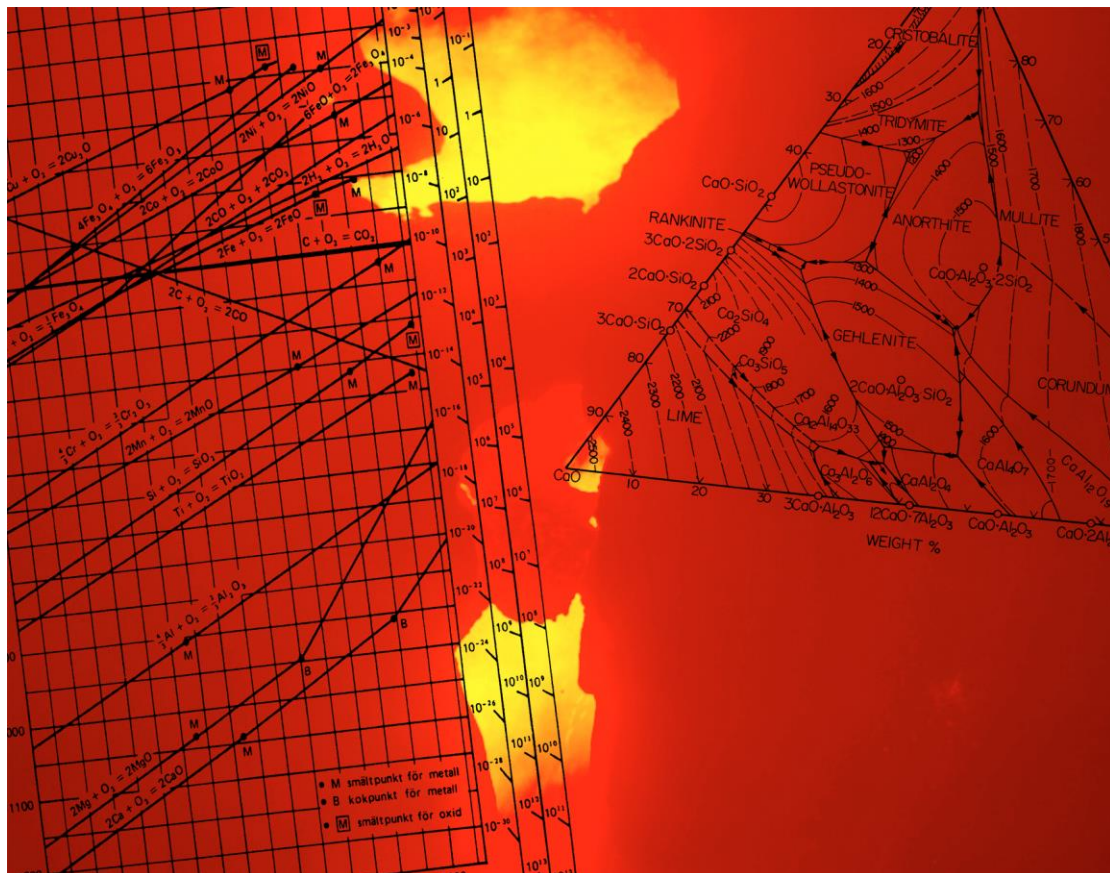


Järn- och stålframställning

Historia Grundläggande metallurgi

Jernkontorets utbildningspaket – del 1



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

1. HISTORIA, GRUNDLÄGGANDE METALLURGI	1
1.10. INLEDNING.....	1
1.11. STÅLETS DEFINITIONER OCH INDELNINGAR	1
2. HISTORIA, UTVECKLING OCH FRAMTIDSUTSIKTER.....	4
2.10. METALLURGI	4
2.11. DEN FÖRSTA JÄRNFRAMSTÄLLNINGEN	5
2.12. MASUGNEN.....	5
2.13. DEN INDUSTRIELLA REVOLUTIONEN	9
2.14. BESSEMERKONVERTERN.....	10
2.15. MARTINUGNEN	11
2.16. THOMASPROCESSEN	12
2.17. ELEKTROSTÅLUGNEN	13
2.18. LD-KONVERTERN	13
2.19. OBM-PROCESSEN.....	15
2.20. GÖTSTÅLSPROCESSERNA	16
2.21. ENERGIANVÄNDNING VID JÄRNFRAMSTÄLLNINGEN	18
2.22. STRÄNGGJUTNINGEN	19
2.23. METALLURGINS FÖRUTSÄTTNINGAR	20
2.24. STÅLETS BETYDELSE	21
2.25. STÅLETS KONKURRENSKRAFT.....	24
2.26. STÅLETS TILLVERKNINGSVÄGAR.....	25
2.27. DRIVKRAFTER OCH MÖJLIGHETER FÖR STÅLINDUSTRINS FORTSATTA UTVECKLING.....	27
3. GRUNDBEGREPP VID STÅLFRAMSTÄLLNING	28
3.10. INLEDNING.....	28
3.11. TEORETISKA GRUNDBEGREPP	28
3.11.1. <i>Jämvikter</i>	28
3.11.2. <i>Kinetik</i>	35
3.11.3. <i>Slagger</i>	38
3.12. PROCESSMETALLURGISKA GRUNDBEGREPP OCH ENHETSPROCESSER	40
3.12.1. <i>Rostning</i>	41
3.12.2. <i>Agglomerering</i>	41
3.12.3. <i>Reduktion</i>	42
3.12.4. <i>Smältning</i>	43
3.12.5. <i>Konvertering</i>	44
3.12.6. <i>Raffinering</i>	46
3.12.7. <i>Rostfri ståltillverkning</i>	46
3.12.8. <i>Gjutning</i>	49

1. HISTORIA, GRUNDLÄGGANDE METALLURGI

1.10. Inledning

I föreliggande utbildningsmaterial behandlas processmetallurgin i två kapitel. Processmetallurgin omfattar egentligen framställningen av alla metaller men i detta avsnitt behandlas så gott som enbart järnets och stålets metallurgi.

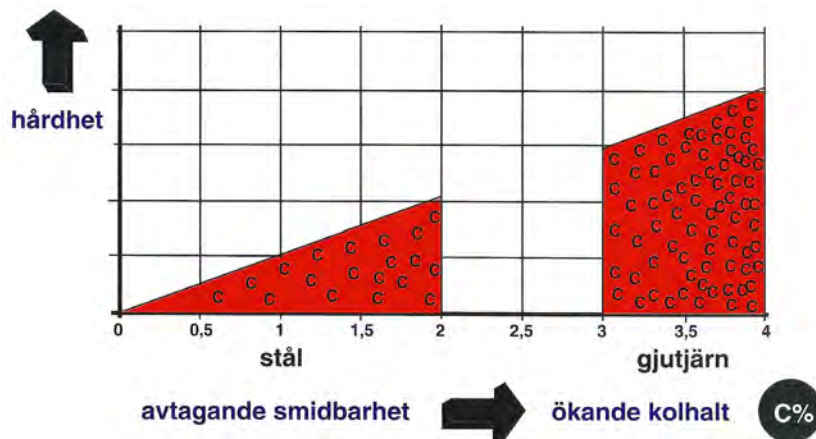
- Historia inkl. utveckling av olika stålframställningsmetoder
 - Masugn, LD-konverter
 - Ljusbågsugn, AOD/CLU-konverter
 - Skänkmetallurgi, gjutning
 - Utveckling, framtidsutsikter
- Grundläggande metallurgi
 - Teoretiska grundbegrepp
 - Processmetallurgiska grundbegrepp

Kapitel 2 ”Historia, utveckling och framtidsutsikter”, avses tjäna som en grund och beskrivning av, framför allt, järnmetallurgins utveckling genom århundradena fram till våra dagar.

Med kapitlet ”Grundläggande metallurgi” avses att mer ingående förklara skeenden och termodynamiska förutsättningar för framställning av stål. Exempel på några praktiska överväganden som görs vid stålframställning visas också.

1.11. Stålets definitioner och indelningar

Stål brukar definieras som smidbart järn. Med smidbart järn menas en järnlegering som går att bearbeta. Järn är bearbetbart om det håller under cirka 1,7 % kol. Detta gäller för olegerade stål medan gränsen kan höjas upp mot 2 % kol om även andra legeringsämnen är närvarande. Vid kolhalter mellan 3,0 och 4,5 % kallas järnmaterialet för gjutjärn och produkten användes i princip enbart i gjutet tillstånd. Dessa förhållanden visas schematiskt i figur 1.



Figur 1. Schematisk bild av stålets definitioner.

Flytande järn med en halt kring 4,5 % kol finns också som en mellanprodukt i stålframställningen efter masugnen och benämns då råjärn. En äldre beteckning för råjärn var tackjärn som härrör från att man en gång i tiden alltid göt upp masugnens produktion i tackor. Idag används också beteckningen tackjärn men då enbart för uppgjutet råjärn.

Stålets viktigaste egenskaper som exempelvis hårdhet och seghet är i stor utsträckning beroende på kolhalten. Förutom järn och kol finns i stålet legeringsämnen och föroreningsämnen. Legeringsämnena påverkar på samma sätt som kol stålets egenskaper. Typiska legeringsämnen är kisel (Si), mangan (Mn), krom (Cr), nickel (Ni), molybden (Mo), volfram (W) och vanadin (V). Vid mycket höga legeringshalter brukar gränsen för att kallas stål vara material som innehåller minst 50 % Fe. Typiska föroreningsämnen är svavel (S), fosfor (P), syre (O) och väte (H).

Beroende på mängd legeringsämnen skiljer man på kolstål, låglegerade stål och höglegerade stål.

Kolstål är stål som förutom kol innehåller relativt små mängder kisel och mangan. Typiska stål i gruppen kolstål håller 0,01–1,3 % C samt mindre än 0,3 % Si och 0,8 % Mn. Summan av dessa tre element är oftast under cirka 2,5 %. Exempel på kolstål är så kallat djuppressningsstål för exempelvis bilkarosser och badkar. En normal sammansättning för denna ståltyp är max 0,06 % C, 0,02 % Si och 0,30 % Mn.

Låglegerade stål håller förutom kol, kisel och mangan även krom, nickel, molybden m.fl. Den sammanlagda legeringshalten är under 5 %. Exempel på låglegerat stål är kullagerstål med sammansättningen 1,0 % C, 0,3 % Si, 0,3 % Mn och 1,5 % Cr.

Höglegerade stål har ett legeringsinnehåll över 5 %. Den största gruppen är rostfria stål. Det viktigaste elementet för att göra stålet rostfritt är krom. Oftast tillsätts också nickel och molybden för att få en viss struktur. De nickellegerade stålen kallas austenitiska rostfria stål. Vid halter över 2,5 % molybden kallas stålen för syrafasta. En typisk sammansättning för de senare är 0,02 % C, 22 % Cr, 12 % Ni, 2,7 % Mo, 0,3 % Si och 0,6 % Mn.

En annan indelningsgrund är specialstål och handelsstål där specialstålen är dyra stål som görs i små volymer medan handelsstål står för bulkproduktionen.

Antalet olika stålsorter är stort. Någon har räknat ut att det finns över 4000 olika standardiserade stålsorter. Många stålverk som har en bred produktpalet kan ha flera hundra olika stålsorter att erbjuda. I masugnen tillverkas i regel bara en typ av råjärn.

Sammansättningen för olika stålsorter ställs in i konvertern (i första hand kolhalten) vid malmbaserad tillverkning och genom legeringstillsatser vid efterbehandlingen i skänk eller skänkgugn. Vid skrotbaserad tillverkning väljs skrot som sammansättningsmässigt passar den stålsort som avses att tillverkas. Legeringstillsatser görs även här vid efterbehandlingen i skänk. Man bör observera att det är inte bara sammansättningen som varierar i kundbeställningarna. Kunden specificerar också typ av produkt som t.ex. band, stång, tråd eller rör samt stålets inre struktur och ytfinish. Den inre strukturen styrs förutom av sammansättningen av bearbetningsgrad och värmebehandling.

Till inre struktur kan även räknas krav från kund på en viss slagginneslutningsbild, det vill säga oxider eller sulfider från reaktioner med inlösta legeringselement eller lösgjorda partiklar från toppslaggen eller infodringen. I kundspecifikationen kan naturligtvis också ingå krav på de egenskaper som är viktiga för applikationen t.ex. hållfasthetsegenskaper eller korrosionsegenskaper.

Observera att stålindustrins tillverkningsstruktur skiljer sig från t.ex. verkstadsindustrins tillverkningsstruktur såtillvida att medan stålindustrin startar med några varianter av malmråvara och kan sluta med flera tusen varianter av slutprodukt startar en bilindustri med flera tusen komponenter som sätts ihop till en bil utförd i ett smärre antal varianter.

2. HISTORIA, UTVECKLING OCH FRAMTIDSUTSIKTER

2.10. Metallurgi

Metallurgi är läran om utvinning av metaller ur jordskorpan och bearbetning av dessa så att önskade egenskaper hos det metalliska materialet uppnås. Man brukar särskilja mellan järnets metallurgi och icke-järnmetallurgi. Metallurgins historia är lång och ska endast beröras ytligt här vad gäller icke-järnmetallurgin.

De första metallerna att utvinnas var guld, silver och koppar. Dessa element, framför allt guld, kan påträffas rena i naturen, det vill säga inte som föreningar med syre eller svavel. Även rent järn från meteoriter utvanns tidigt. Det var relativt enkelt att utvinna och använda dem eftersom de inte behövde behandlas på annat sätt än med mekanisk bearbetning. Guldbitar har hittats i grottor i Spanien och daterats till så tidigt som cirka 40 000 f.Kr. ⁽¹⁾. Silver, tenn och koppar kunde framställas genom att hetta upp malmer till höga temperaturer och därefter plocka ut droppar av smält metall ur slaggen.

Den så kallade bronsåldern startade cirka 3500–3000 f. Kr. i Främre Orienten. Den nordiska bronsålderskulturen startade långt senare, omkring 1700 f.Kr. och pågick till omkring 500 f.Kr. ⁽²⁾. Brons är relativt lätt att tillverka eftersom de ingående metallerna, koppar och tenn, var för sig kan utvinnas och blandas till en hård legering. Det troligaste framställningssättet var dock att ur vanligt förekommande tennhaltiga kopparmalmer direkt utvinna brons ⁽³⁾.

Den så kallade järnåldern kom efter bronsåldern och startade cirka 1200 f.Kr. i Europa ⁽⁴⁾. Vissa källor hänvisar till ännu tidigare framställning av järn. I Norden startade järnåldern efter bronsåldern cirka 500 f.Kr. och pågick till mitten av 1000-talet.

Järn kräver betydligt högre temperaturer än vad som krävs för tillverkning av brons. Dessutom krävs tillgång till kol för att reducera järnmalmen.

Både järn- och bronsåldrarna inföll på olika tider i olika delar av världen.

I följande kapitel behandlas järn- och ståltillverkningens utveckling i världen och i Sverige. För ytterligare läsning om framför allt utvecklingen i Sverige kan hänvisas till skrifter från Jernkontorets bergshistoriska utskott, t.ex. K. F. Lindstrand: Dokumentation av svensk järn- och stålindustri (Rapport H 60 1995) och Nils Björkenstam: Den svenska järnhanteringens tekniska utveckling (Rapport H 65 1995).

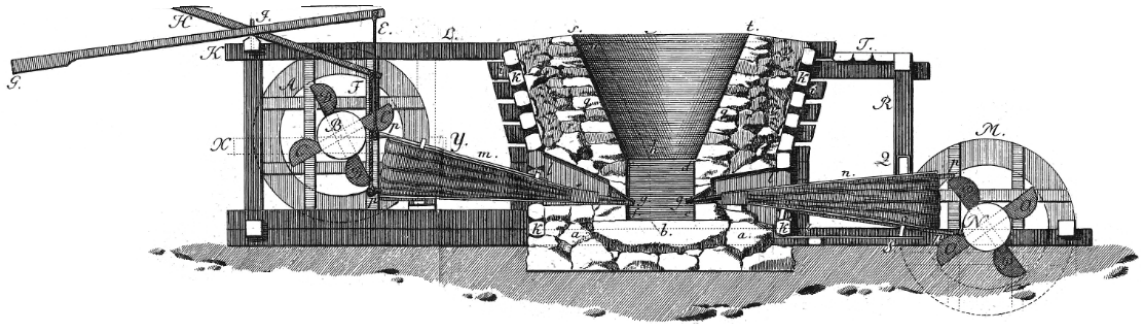
Källhänvisningar:

- (1) <http://www.gold-eagle.com/article/history-gold> (2016-03-31)
- (2) <http://www.historiska.se/upptack-historien/artikel/aldre-bronsalder/> (2016-03-31)
- (3) <https://sv.wikipedia.org/wiki/Tenn> (2016-03-31)
- (4) https://en.wikipedia.org/wiki/Iron_Age (2016-03-31)

2.11. Den första järnframställningen

Den första järnframställningsugnen kallas för blästa, figur 2, eller blästerugn. Det finns spår av sådana ugnar redan år 500 f.Kr. i Sverige.

Ugnarna beskickades troligen med myrmalm eller så kallad rödjord samt träkol. Troligen tillsattes träkol och malm satsvis i stökiometriska andelar, det vill säga passande atomära mängdförhållanden, så att man efter eldande med luft från en blåsbälg erhöll en så kallad lupp som innehöll ett järn med låg kolhalt. Man kan säga att man direktframställde stål.



Figur 2. Skiss av en blästa med vattendrivna bälgar. Källa: Carl Rinman, "Korrt underrättelse om sättet att smälta sjö- och myrmalmer uti blästerugnar", 1794.

2.12. Masugnen

Ett stort tekniksprång måste ha gjorts när man gick över att tillverka järn genom den indirekta vägen över masugnen. I masugnprocessen tillsätts järnmalm t.ex. som malm – eller som i nyare tider – sinter eller pellets, kol t.ex. som träkol eller koks samt kalk. Luft blåses genom formor i ugnens nedre del och oxiderar kolet till koloxid, CO. Beskickningen möter alltså på sin väg ner genom ugnen en ström av varm gas som reducerar järnoxiden. Det smälta järnet droppar ner till masugnens nedersta del och tappas därefter ur ugnen.

De tidigaste arkeologiska fynden som härrör från Olsbenning i Västmanland visar att redan vid 1100-talets början fanns en masugnsdrift. Man tror att ugnarna kördes under våren när vattentillgången var god för att driva blästern. Produktion beräknas till 200 kg per dygn under en månadskampanj. Ur ugnen kom ett flytande råjärn som göts upp till tackjärn. Tackjärnet var inte smidbart utan färskades i så kallade färskningshårdar i fast fas till smidbart järn. Vid färskningsen sänktes kolhalten genom att man hade ett luftöverskott i härden.

Omställningen från blästa till masugn var ett stort tekniskt utvecklingssteg. Produkten var flytande och processen kunde köras kontinuerligt. Produktiviteten ökade dramatiskt. Varifrån tekniken kom vet ingen säkert men någon måste någonstans ha startat ett medvetet experimentellt arbete med förbättring av produktiviteten som drivkraft. Resultatet var enastående. In på 2000-talet är masugnen fortfarande den dominerande tillverkningsmetoden för järn.

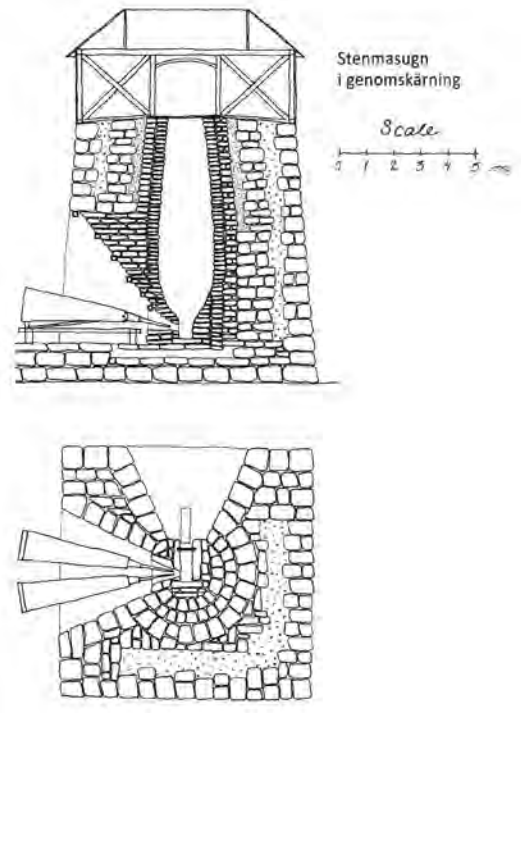
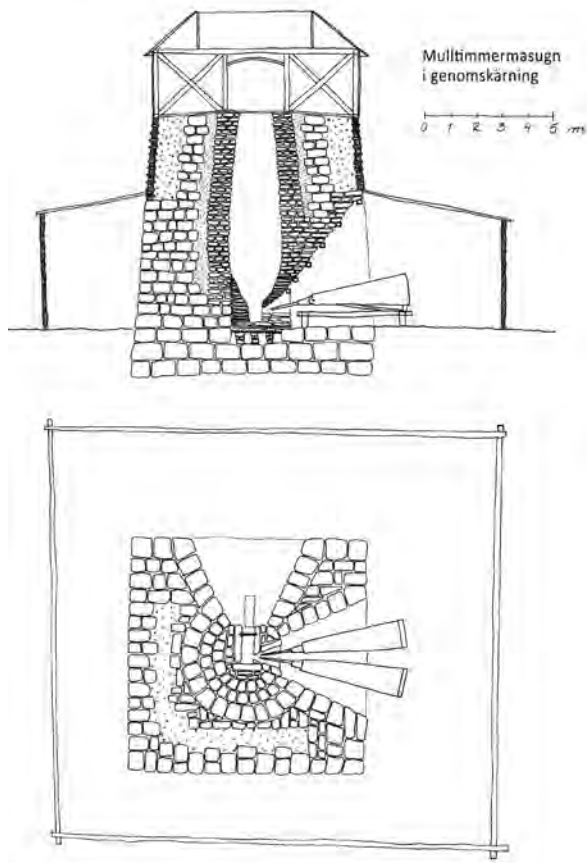
Intressant är att notera att vid detta viktiga tekniksprång gick man från en direkt till en indirekt metod, det behövdes ytterligare ett steg för att få ett smidbart järn. Denna uppdelning av processen från ett steg till två steg och ändå uppenbara rationalitetsvinster ska vi uppleva fler gånger i stålhanteringens utveckling.

Masugnen utvecklas från 1100-talet kontinuerligt utan större språng. Storleken ökar, tekniken blir bättre. Vid 1850-talet producerade en masugn som då var av typ mulltimmerhytta 3–6 ton per dygn, se figur 3a. Dessa ugnar hade tjocka naturstensväggar. Fundamentet var cirka 9 meter i fyrkant och höjden 7–8 meter. Utanför stenmurarna var schaktet klätt med timmer. Ugnen är ganska lik de första masugnarna från 1100-talet. Under 1860-talet sker ytterligare produktivitetökningar i och med att flera nya ugnar byggs för att leverera flytande tackjärn till de nya bessemerugnarna. I figur 3b visas en stenmasugn i genomskärning.

År 1861 producerades 170 000 ton i 226 masugnar i Sverige och år 1885 465 000 ton i 179 ugnar. Ny teknik innebar nedläggning av gamla ugnar och väsentligt högre produktion per masugn. Denna utveckling fortsatte och år 2015 fanns tre masugnar i Sverige som tillsammans har en årskapacitet på omkring 3,5 miljoner ton. Den största masugnen i Sverige har en dygnskapacitet på cirka 7000 ton. Utvecklingen är liknande i resten av den industrialiserade världen. I figur 4 visas en bild av en modern masugn.

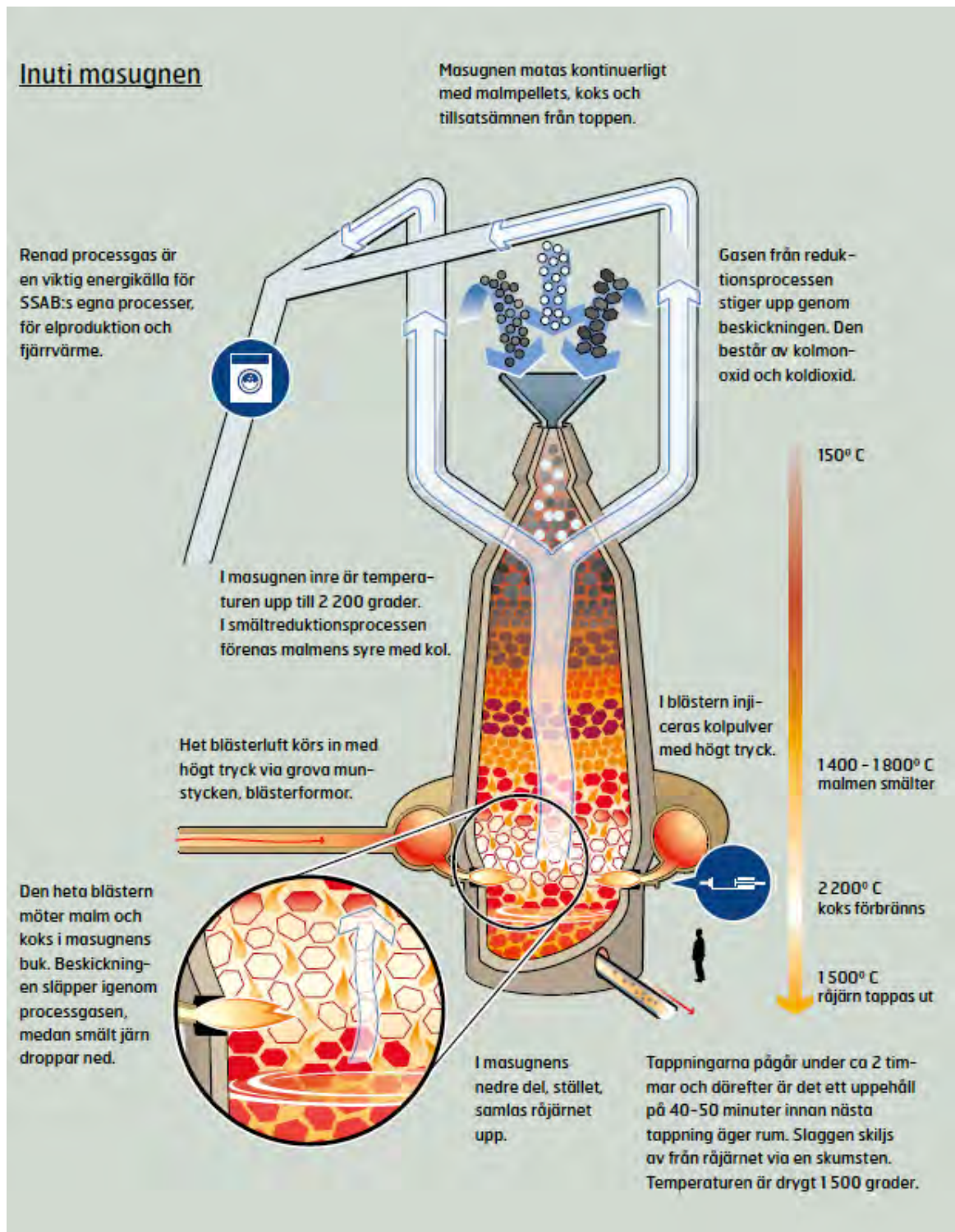
Ett betydande steg i utvecklingen av masugnsprocessen var när det blev möjligt att använda stenkol i stället för träkol. Träkol varen begränsad råvara och framställningen, via kolmilor, var dyr och omständlig. Koks från stenkol gjorde det möjligt att bygga större masugnar. Detta och utvecklingen av svavelreningstekniken i masugnen och i efterföljande processer medförde att järnframställningen tog större fart i stenkolsrika länder som England och USA.

Hela den fantastiska utvecklingen av produktiviteten har skett utan att masugnens principiella funktionssätt ändrats. Stor inverkan för att höja produktiviteten har utvecklingen av masugnens råvaror haft. Förbättringar av uppsättningsmål (hur malm och koks fördelas) och blästern (luftinblåsningen) har också bidragit till utvecklingen. Ökningen av skalan (storleken på ugnen) har troligen varit den faktor som enskilt betytt mest. Inom stålindustrin betyder skalan mycket för att öka produktiviteten. I analysen av faktorer som bidragit till masugnens utveckling måste även den metallurgiska kunskapen nämnas. Att driva en masugn har under det senaste seklet gått från att vara en konst till en vetenskap. För mindre än en generation sedan fanns ett ämne vid Kungliga Tekniska högskolan som hette metallhyttkonst. Hytta är en gammal benämning på masugn. Man kan utan överdrift våga påstå att den ökande metallurgiska kunskapen har varit minst lika viktig som andra faktorer för den totala produktivitetökningen speciellt de senaste femtio åren.



Figur 3a. Multimmermasugn igenomskärning.
(Efter Garney.)

Figur 3b. Stenmasugn i genomskärning.
(Efter Garney.)



Figur 4. Skiss av en modern masugn. Källa: "Stålboken", SSAB.

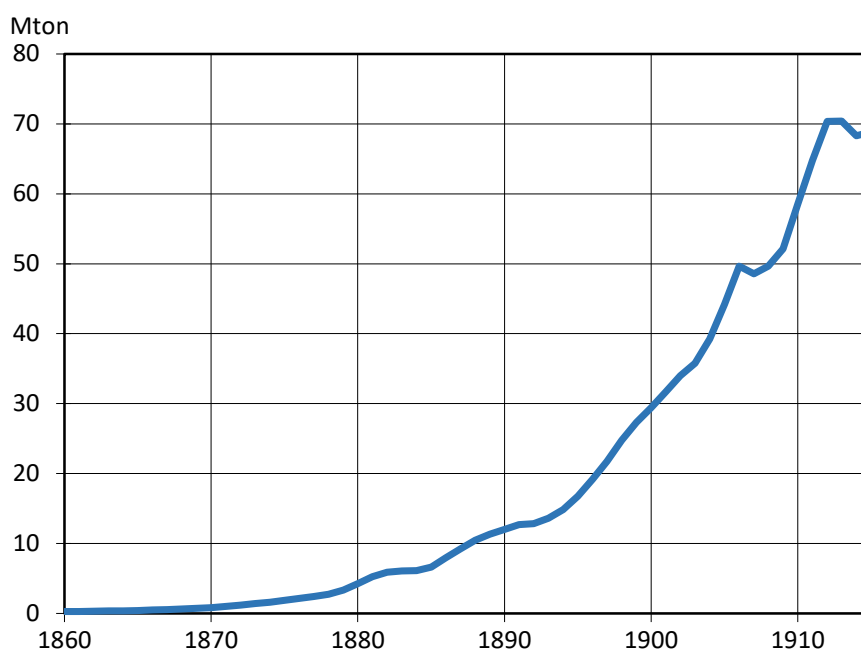
2.13. Den industriella revolutionen

I mitten av 1800-talet skedde stora förändringar av stålframställningens villkor. Figur 5 visar en mycket kraftig tillväxt av produktionen under senare delen av 1800-talet och början av 1900-talet. Andra delar av den industriella revolutionen som järnvägar, mekaniseringen av jordbruket, stål i byggnader och broar och kraftgenerering (ångmaskiner) krävde alla ökande mängder stål. I det läget gjordes flera tekniska framsteg inom ståll tillverknigen utan vilka man inte hade kunnat tillfredsställa marknadens behov. Till den viktigaste nya tekniken hörde:

- Koksmasugnen
- Bessemerkonvertern
- Martinugnen

Redan i slutet av 1700-talet kunde man ersätta träkolet med koks och koksmasugnen fick sitt genombrott i mitten av 1800-talet. Detta var viktigt för den ökande produktionsvolymen eftersom skogsråvaran var en begränsande faktor framförallt i England och på kontinenten.

I både Bessemerkonvertern och Martinugnen producerades flytande stål vilket också var en förutsättning för volymökningen.



Figur 5. Stålproduktion i världen, 1860–1915. Tre års glidande medelvärde.
Källa: World Steel Association.

2.14. Bessemerkonvertern

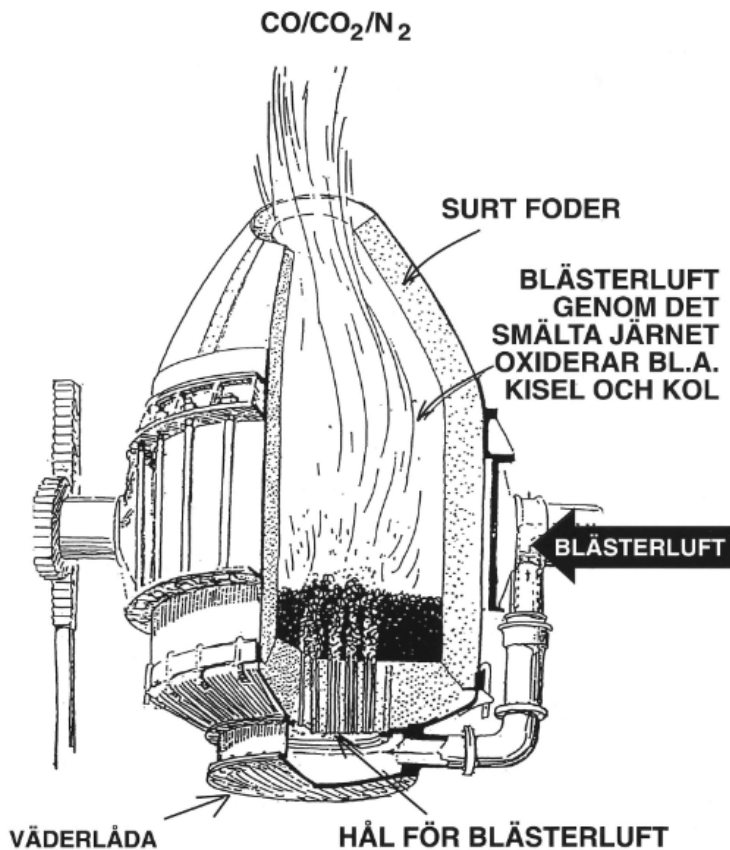
Henry Bessemer uppfann år 1856 den första processen som framställde flytande stål. Den kom att kallas Bessemerprocessen. Den första lyckade industriella blåsningen utfördes i Edsken utanför Hofors i Sverige år 1858, se figur 6.



Figur 6. Bessemerblåsning i Edsken 1858. Akvarell av Carl Fredrik August Cantzler, Jernkontorets bildsamling.

I processen färskades det flytande råjärnet som innehöll cirka 4 % kol i flytande tillstånd till ett stål med låg kolhalt. Färskning innebär att kolhalten sänks genom att syre (i luft) förbränner kol i smältan. Kolförbränningen gav tillräckligt mycket värme för den nödvändiga temperaturökningen. Luften tillsattes genom dysor (rör) i botten av ugnen. Tack vare att luften innehåller omkring 80 % kvävgas kylde dysorna tillräckligt för att inte förstöras av värmen från kolförbränningen. I figur 7 visas en Bessemerkonverter i genomskärning. Vid blåsningen skedde en häftig omröring och man fick korta processtider.

Bessemerkonverterns mycket höga produktivitet jämfört med tidigare tekniker, baseras på den förbättrade kinetiken, det vill säga färskningen utnyttjar samma jämvikter som tidigare men görs vid *högre temperatur*, i *flytande fas* och under *stark omröring*. Tillsammans innebär dessa tre faktorer en starkt ökad reaktionshastighet som direkt resulterar i den språngartade utvecklingen av produktiviteten.



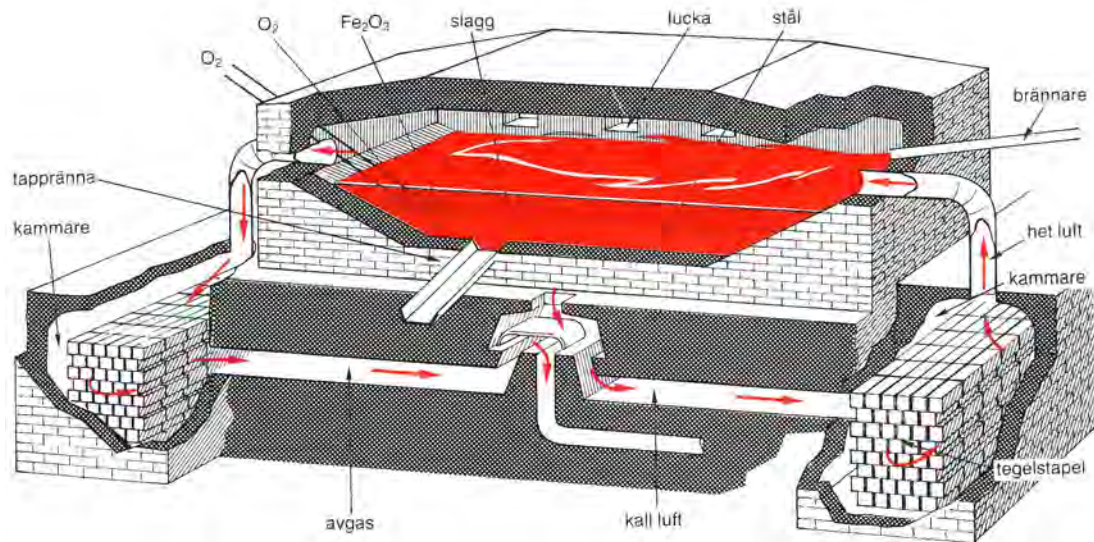
Figur 7. Bessemerkonverter i genomskärning.

2.15. Martinugnen

Martinugnen eller som den av vissa också kallas Siemens-Martin-ugnen kördes för första gången 1869 i Frankrike av Pierre Martin. I figur 8 visas en "modern" Martin-ugn från 1960-1970-tal. Behovet att finna en ugn som kunde smälta stål var stort. Vid all stålframställning uppstod skrot som var svårt att dra nytta av. Det fanns vid den tidpunkten visserligen en ugnstyp som kallades degelstålugnar. Detta var deglar av lera och grafit som värmdes utifrån. Det var dock endast möjligt att smälta stål i små volymer 30–40 kg under mycket stor energiåtgång. Problemet som man behövde lösa var att skapa en gas som vid förbränning kunde ge så hög temperatur att man kunde smälta stål. Wilhelm Siemens löste detta genom att i samverkande par av regenerators förvärma såväl luft som förbränningsgas så att nödvändig temperatur i flammen uppnåddes.

Martinugnens smältmaterial var skrot och tackjärn vilket innebär att man till del kunde styra kolhalten. Efterhand lärde man sig att färskas kolet genom den oxiderande

flamman alternativt genom tillsats av malmråvara. Vid slutet av 1940-talet inledde man praxis med färskning med ren syrgas i lans. Martinugnen var en långsam process i jämförelse med Bessemerugnen men den långa chargetiden gav också möjligheter att styra kvaliteten. Det högkvalitativa stålet, t.ex. kullagerstål, tillverkades därför alltid i Martinugnar.



Figur 8. Martinugn med kammar (värmväxlare) och oljebrännare.

Källa: Stål, utgiven av Järnbruksförbundet (nuvarande Stål- och Metallförbundet).

Martinugnar var fram till 1940-talet en produktionsprocess med låg produktivitet. Man kom upp till 2 ton per timme. Genom införande av syrgasblåsning och oljeeldning samt ökning av ugnstorleken från 30 ton till 150 ton höjdes produktiviteten till cirka 15 ton per timme vilket inte var så lågproduktivt. På samma sätt som tidigare diskuterats beträffande masugnen ökade produktiviteten genom vissa tekniska förändringar och en ökning av skalan. Det snabbt ökande metallurgiska kunnandet från 1940-talet och framåt anses också ha betytt mycket för produktivitetsutvecklingen.

2.16. Thomasprocessen

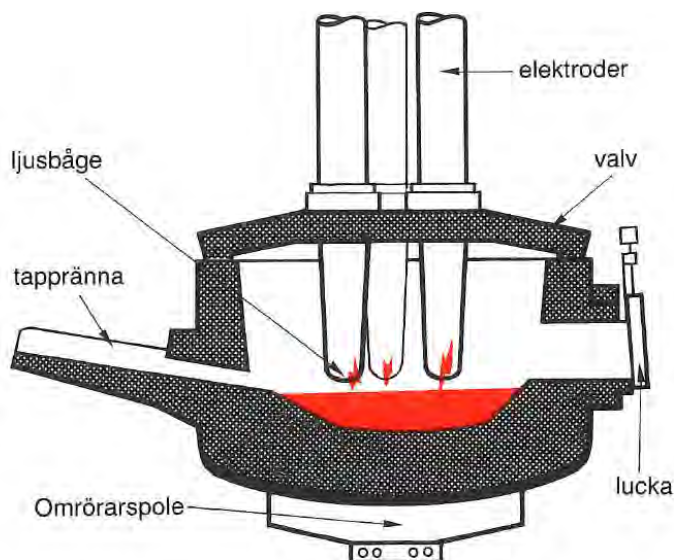
Bessemerkonvertern hade en silikatbaserad infordring, det vill säga den var sur. Detta innebar att man också måste ha en sur slagg (hög halt av kiseloxid, SiO_2) vilket i sin tur innebär att man inte kunde genomföra någon svavel- eller fosforrening. Eftersom en stor del av kontinentens järnmalm var fosforrik och därför inte kunde användas kom Bessemerprocessens utbredning att begränsas. För att kunna använda fosforrik malm utvecklades Thomasprocessen som i princip är en variant på Bessemerprocessen men ugnen hade ett basiskt foder och kördes med en basisk slagg (hög kalkhalt, CaO) som innebar en fosforreningmöjlighet.

Efterhand kom Thomasprocessen att bli mer använd än Bessemerprocessen. Detta berodde på att fosforhalten innebar ett inte oväsentligt värmetillskott genom dess oxidation vid färskningen. Dessutom kunde fosforrika slaggar säljas som gödningsmedel vilket gav ett positivt bidrag till ekonomin.

2.17. Elektrostålugnen

Experiment med elektrostålugnen inleddes redan i slutet av 1800-talet. Flera typer av elektriska ugnar prövades. Den som blev allmänt använd kom sedermera att kallas ljusbågsugn, se figur 9. Denna ugn kom dock inte i allmänt bruk förrän under 1920-talet eftersom elkraftskapaciteten inte var utbyggd tidigare. Ugnen konkurrerade med martinugnen som en skrotsmältningsugn. Konkurrensfördelen mot martinugnen var framförallt den effektivare värmeöverföringen som ljusbågarna innebar jämfört med flamman. Charging och tappning kunde också utvecklas hos ljusbågsugnen att bli mer effektiv än hos martinugnen. Chargetiden blev genom dessa förhållanden väsentligt kortare hos ljusbågsugnen än hos martinugnen.

Under 1950- och 1960-talet ökades produktiviteten ytterligare genom större ugnar, införande av syrgasblåsning med lans och kraftigare energitillförsel. Begreppet UHP (Ultra High Power) som lanserades i början av 1960-talet innebar att transformator-kapaciteten ökades från 300 kVA per ton till över 1000 kVA per ton stål. Andra viktiga teknikutvecklingssteg har varit införande av vattenkylda paneler i ugnsväggen för att minska foderslitage, införa praxis med skummande slag, utnyttjande av så kallad oxy-fuelbrännare för att öka nedsmältningshastigheten och förbränning av kolmonoxid i ugnsutrymmet med syrgas.



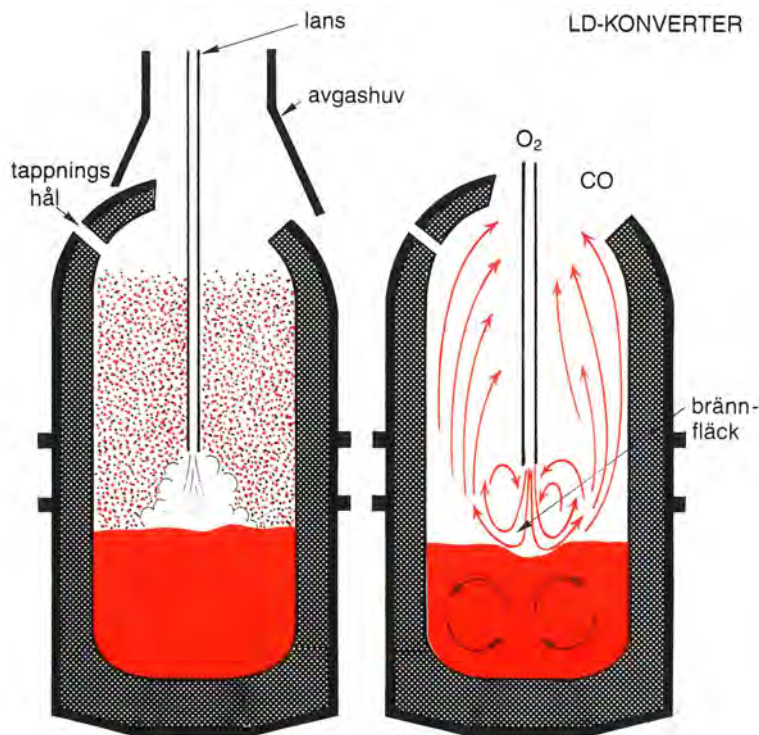
Figur 9. Ljusbågsugn i genomskärning. Källa: Stål, utgiven av Järnbruksförbundet (nuvarande Stål- och Metallförbundet).

2.18. LD-konvertern

Det fanns en stor nackdel med de tidiga konverterprocesserna, Bessemer och Thomas, nämligen att färskningsgasen var luft. Luften innehåller cirka 80 % kvävgas vilket innebär att kvävehalterna i stålet blev höga. Dessutom betydde kvävehalten i luften att man hade en stor barlast i form av kvävgas som också måste värmas. Förbränning av kol räckte egentligen inte för värmebalansen och därför krävdes t.ex. i Bessemerprocessen att råjärnet höll relativt höga halter av kisel och mangan. För Thomasprocessen gav fosfor ett välkommet energibidrag vid färskningen. Man utförde försök med syreanrikad luft, från 20 % upp till 30 %, men detta gav för stora

slitage på dysorna på grund av den högre värmeutvecklingen. Man hade således haft klart för sig att färskning med ren syrgas vore förträffligt ur kvävesynpunkt och energibalansmässigt.

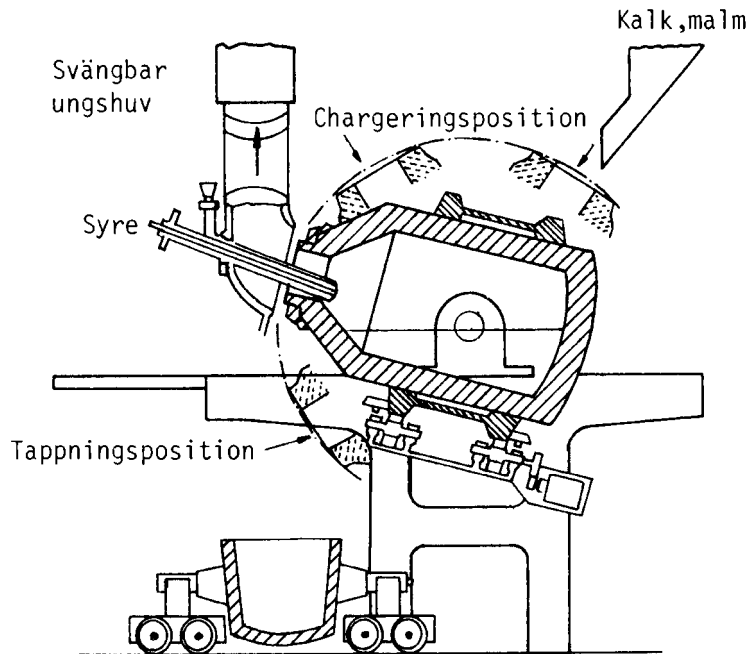
I slutet av 1940-talet fick den första syrgaskonverterprocessen sitt genombrott. Den fick namnet LD efter de två österrikiska stålverken Linz och Donawitz. I USA kom den att kallas BOF, (Basic Oxygen Furnace). Bakom genombrottet låg, förutom att man redan visste att färskning med ren syrgas var önskvärd, dels att man några år tidigare fått fram en industriell metod att framställa syrgas i stora volymer och dels att man löste problemet med den starka värmeutvecklingen i syrgasens brännfläck. I LD-konvertern blåstes syrgas ned mot råjärnsbadet genom en lans som slutade en bit ovanför badytan. Trycket i syrgasen var så stort att det i träffytan bildades en krater i vilken huvuddelen av värmeutvecklingen ägde rum. Genom att ha en lans uppifrån klarades således värmeutvecklingsproblemet men man fick också en mekaniskt enkel lösning eftersom ugnen egentligen bara bestod av ett enkelt reaktionskärn utan andra hål än där man chargerade råjärnet och tappade stålet. I figur 10 visas en principiell bild av en LD-konverter.



Figur 10. Schematisk bild av en LD-konverter. Källa: Stål, utgiven av Järnbruksförbundet (nuvarande Stål- och Metallförbundet).

Parallellt med LD-konvertern utvecklades i Sverige en konverter som kallades Kaldo (från Kalling/Domnarvet), se figur 11. Där åstadkoms en rörelse i smältan genom att hela ugnskroppen roterade runt (cirka 40 varv/minut) sin egen axel i ett liggande läge (17°). Processen fungerade metallurgiskt utmärkt framförallt på grund av den kraftiga omröringen. Processen installerades hos ett tiotal stålverk och kördes fram till 1980-talet då den helt övergavs. Rotationen innebar mekaniska problem med höga underhållskostnader och därtill kom ett relativt stort foderslitage som påverkade process-

ekonomin negativt. Det intressanta med Kaldo var att den med sin kraftiga omröring var väl lämpad för stålframställning av fosforrika råjärn. Vid 1980-talet hade dock fosforproblematiken spelat ut sin roll eftersom de europeiska verken stängde de inhemska gruvorna och köpte låg-fosforhaltig järnmalm på världsmarknaden. Kaldoprocessen lever dock vidare in på 2000-talet för framställning av bly och koppar.



Figur 11. Kaldokonverter. Källa: Jernkontorets Annaler 1957.

LD-processen hade initialt ett visst motstånd i Europa eftersom den inte kunde användas vid fosforrikt råjärn. I Benelux och Frankrike utvecklades därför varianter av LD-processen som kallades LD-AC och OLP som kunde färska fosforrikt råjärn. Detta uppnåddes framförallt genom att finkornigt kalkpulver tillsattes genom lanser med hjälp av en mekanisk pulverspruta.

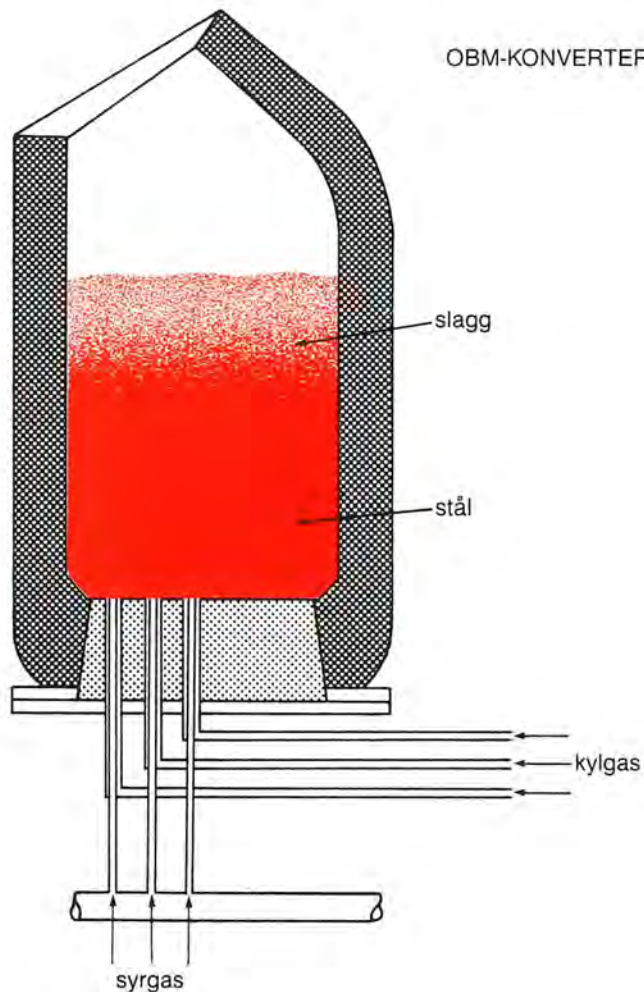
LD-processens generella svaghet har varit den begränsade omröringen. Därför har LD-processen med åren utvecklats med gasspolning från botten och även kombinationer av blåsning av syrgas från toppen och botten.

2.19. OBM-processen

Experimenten med att utveckla de bottenbläsande processerna, Bessemer och Thomas, till att använda 100 % syrgas pågick under hela 1940- och 1950-talen och först i mitten av 1960-talet hittade man den tekniska lösningen. Problemet var överhettning i dysorna på grund av att den kraftiga exoterma reaktionen inte kylades av kväve som var fallet vid blåsning med luft. Lösningen var att kyla med gasformiga kolväten eller olja i ett yttre koncentriskt rör. Energin som gick åt för att spjälka kolvätena hjälpte till att kyla dysorna.

Processen kom att heta OBM (Oxygen Boden Maxhütte) och liknade Bessemer-/Thomasprocessen, se figur 12. Processen hade en god omröring och lämpade sig

även för fosforrikt råjärn. OBM-processen kom sedermera att utvecklas till en rad varianter och ingår idag tillsammans med LD-varianterna i begreppet ”de moderna syrgasprocesserna” som står för konverteringssteget vid stålframställning från flytande råjärn.

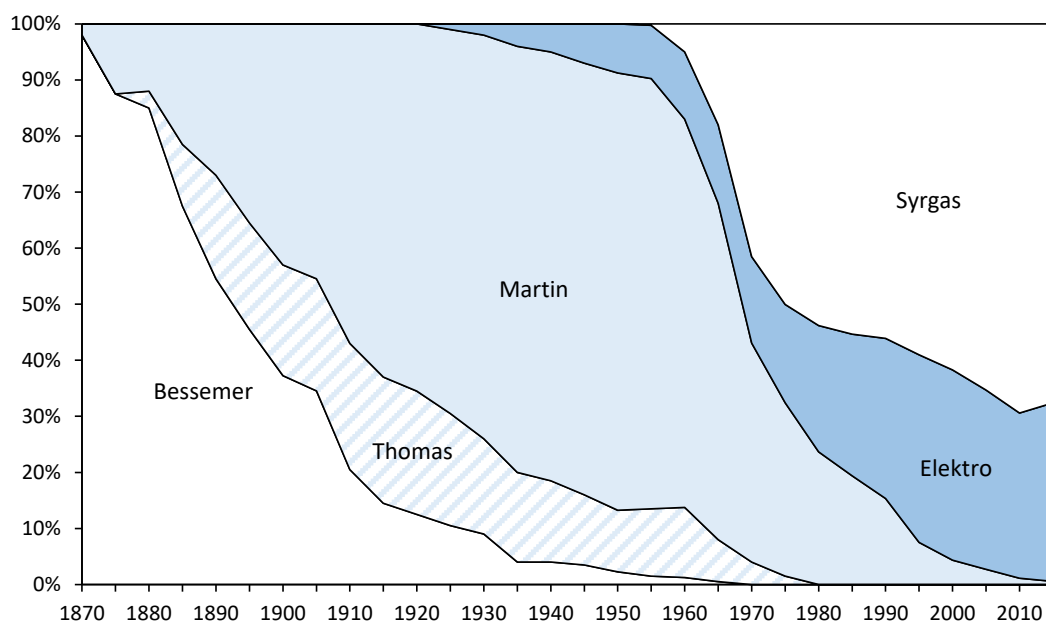


Figur 12. Schematisk bild av en OBM-konverter. Källa: Stål, utgiven av Järnbruksförbundet (nuvarande Stål- och Metallförbundet).

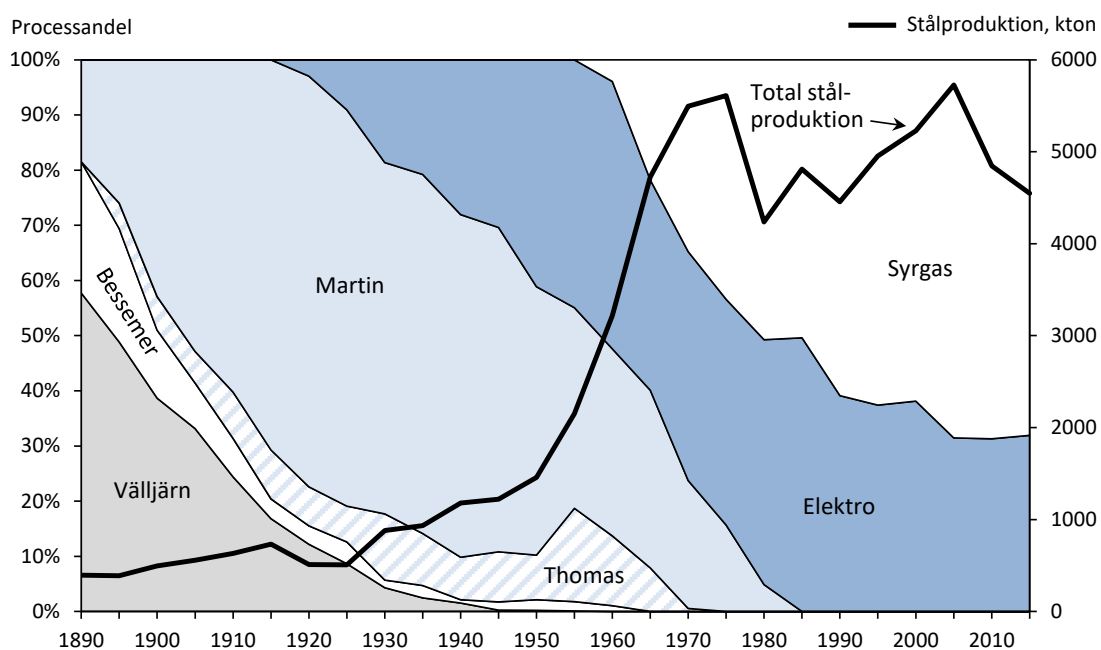
2.20. Götstålsprocesserna

De ståltillverkningsprocesser som producerar flytande stål kallas med ett gemensamt namn götstålsprocesserna till skillnad från välljärnsprocesserna där stålet färdigställs i en färskningshärd. Ett typexempel på välljärnsprocess var Lancashire-smidet vilket var känt för sin goda kvalitet. Välljärnsprocesserna passerades i producerad volym av götstålsprocesserna i slutet av 1800-talet för att sedan snabbt förlora andelar. I figur 13 visas de olika götstålsprocessernas andel av götstålsproduktionen i världen. Inledningsvis har Bessemerprocessen en stor andel varefter Martinprocessen tar andelar och blir för en lång tid dominerande götstålsprocess. Thomasprocessen blir också efter hand större än Bessemerprocessen. Martinprocessen ersätts successivt av Elektrougnen (ljusbågsugnen) medan de tidiga konverterprocesserna och Martin-

processen ersätts av de moderna syrgasprocesserna, LD och OBM. I figur 14 visas motsvarande utveckling för Sverige.



Figur 13. Processernas andelar av råstålsproduktion i världen. Exkl. degelstål och välljärn.
Källa: World Steel Association.

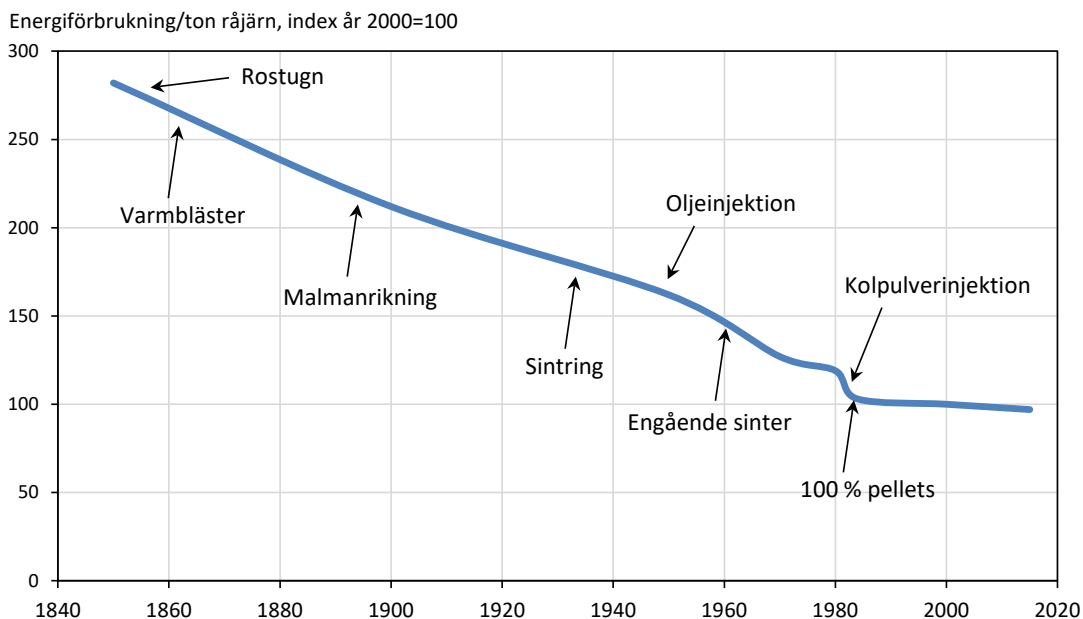


Figur 14. Processernas andelar av råstålsproduktionen samt total stålproduktion i Sverige.
Källa: Jernkontoret.

2.21. Energianvändning vid järnframställningen

Masugnen utvecklades under 1100-talet och medförde att en långt högre produktion av järn än från tidigare blästerbruk möjliggjordes. Under medeltiden och fram till 1800-talets mitt förändrades vare sig masugnarnas konstruktion eller drift nämnvärt. I och med processförbättringar mellan 1850 och 1930, som att använda varm blästerluft, rostad malm och så småningom malmanrikning och sinter förbättrade energianvändningen radikalt. Fortsatta processförändringar; engående sinter, olje- och kolinjektion i formorna samt övergång till 100 % pelletsbeskickning har ytterligare förbättrat bränsleekonomin i masugnarna. Man brukar räkna med att under perioden 1850–2000 sjönk kolförbrukningen med två tredjedelar i svenska masugnar. I figur 15 visas hur teknikutvecklingen har påverkat bränsleförbrukningen i svenska masugnar.

Övergripande mål med forskning kring masugnsdriften har varit att öka bränsleekonomin och minska koksförbrukningen och därigenom effektivisera processen. Forskningen de senaste åren har inriktats på förbättring av kokskvalitet, beskickingsteknik och ökning av kolinjektionen i formorna. Vart och ett av projekten har inneburit en sänkning av den totala relativa kolförbrukningen med 1–2 %. Bränsleanvändningen, koks och injicerat kolpulver, mätt som kg/ton råjärn, ligger för alla tre masugnar i Sverige bland de lägsta jämfört med de europeiska järnverken under 2000-talet. Detta innebär att de svenska masugnarna är mycket energieffektiva och har lägst koldioxidutsläpp i Europa.



Figur 15. Specifik energianvändning för svenska masugnar kopplat till teknikutvecklingen.
Källor: Karl Fredrik Lindstrand, "Energianvändning och miljöfrågor inom svensk stålindustri sedan 1850-talet", 1995, samt SSAB.

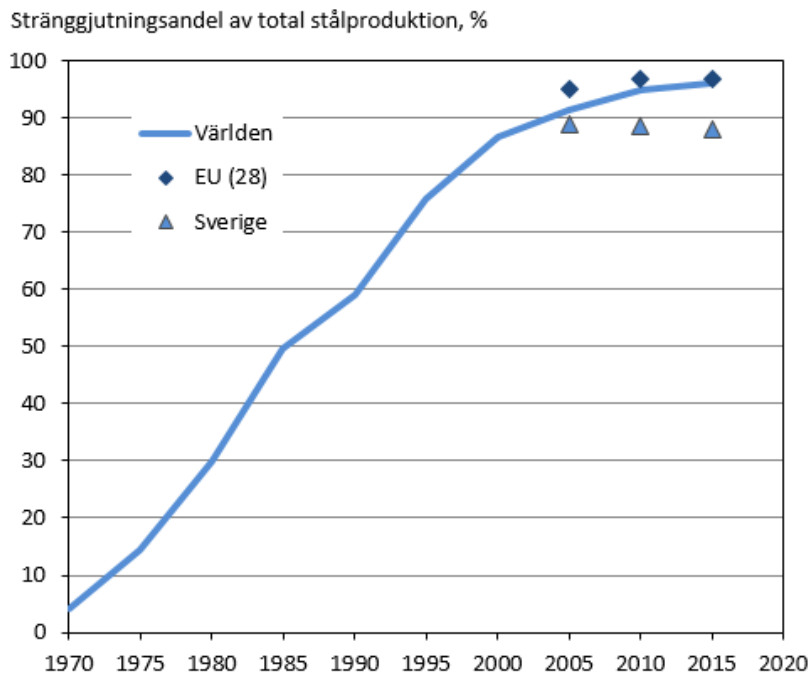
2.22. Stränggjutningen

Bessemerprocessens genombrott med start på 1850-talet innebar att man för första gången fick flytande stål i större mängder att ta hand om. Man behövde införa ett nytt processteg nämligen gjutningen. Gjutning hade förekommit i mindre skala för stål från degelugnar och för andra metaller men storskalig gjutning var nytt.

På bearbetningssidan kom också en nödvändig utveckling till stånd. Götvalsverk kom att ta över från smidestekniken vilket i sig innebar stora produktivitetsökningar. Det intressanta är att Henry Bessemer själv hade idéer om gjutningen. Han tog ut patent på att direktgjuta till färdig produkt. Han föreslog att man skulle gjuta tunna band direkt mellan stora kylande valsar. Utvecklingen skulle emellertid inte ta den riktningen. I stället utvecklades en gjutpraxis som innebär att stålet hälldes i ett kar (kokill) där det fick stelna. Den stelnade klumpen kallades göt och bearbetades i ett götverk. Göten växte i storlek och uppgick efter hand till flera tons vikt. Till stålverken kom att höra stora gjuthallar där gjutningen genomfördes. En viss utveckling skedde när man började gjuta göt genom så kallad stiggjutning. Stålet hälldes inte i uppifrån längre utan transporterades genom keramiska rör så att kokillen fylldes på underifrån vilket också gjorde det möjligt att fylla fler göt i så kallat stigplan.

Efter mer än 100 år av götgjutning kom under 1960-talet stränggjutningen att få sitt kommersiella genombrott. Vid stränggjutningen gjuts ett ämne kontinuerligt med i regel ett klenare tvärsnitt än motsvarande göt. Detaljer om detta och stiggjutning ovan presenteras i avsnittet om gjutning. Den kontinuerliga gjutningen kom att innebära kraftiga produktivitetsökningar och därmed kostnadsänkningar. Drivkraften att installera stränggjutning var stark och inom 20 år var stränggjutning den dominerande gjutningsmetoden. I figur 16 visas hur andelen av stål som stränggjuts har utvecklats.

De första experimenten med stränggjutning gjordes i Tyskland under 1930-talet men det skulle dröja 30 år innan det egentliga genombrottet. Man kan i utvecklingen inte peka på några enskilda detaljer som löstes med någon speciell uppfinningshöjd. När genombrottet för användningen kom fanns flera firmor som sålde stränggjutningsanläggningar med likartad teknik. Skälet att utvecklingen tog så lång tid sammanhänger troligen med att det var ett språng i teknikutvecklingen och att enskilda insatser inte blev tillräckligt kraftfulla för att nå helt fram. Ur tekniskt utvecklingsintresse kan konstateras att genom att de första stränggjutningsprojekten av naturliga kostnadsskäl arbetade i liten skala kom man att skapa onödiga problem. Det skulle visa sig att det var mycket svårt av värmetekniska skäl att stränggjuta klena ämnen i jämförelse med grövre mått. De tekniska genombrotten kom därför först när man vågade gå upp i skala.



Figur 16. Utveckling av andelen stränggjutet stål. Källa: World Steel Association.

Nästa steg i gjutningsutvecklingen var att gjuta tunna slabs, CSP, (Compact Strip Production). Firma SMS i Tyskland hade under 1980-talet utvecklat en variant på stränggjutning där tunna slabs kunde gjutas kontinuerligt. Eftersom dessa tunna slabs inte kunde omvärmas före varmvalsning var idén att varmvalsa direkt i linjen vilket skulle innebära stora produktivitetsvinster. Ett företag, Nucor i USA, med den mycket dynamiska ledaren Ken Iversson, antog utmaningen. Efter flera år av idogt igångkörningsarbete i början av 1990-talet lyckades projektet. Projektet blev kraftigt försenat och fördyrat men trots belackare över hela världen behöll Iversson målet. Processen blev en succé och antalet installationer ökade snabbt.

Fortfarande efter 150 år har dock Henry Bessemers dröm om direktgjutning inte uppfyllts helt. Sedan cirka 30 år har direktgjutning (near net shape casting) varit aktuellt och man har på senare år i labbskala och pilotskala visat metodens möjligheter.

2.23. Metallurgins förutsättningar

Metallurgin är läran om framställning av metaller. Man kan något förenklat påstå att metallurgin vilar på två vetenskapliga discipliner nämligen termodynamiken och kinetiken.

Termodynamik behandlar kemiska reaktionssystem det vill säga i praktiken **jämvikter** mellan olika element och produkter medan kinetiken – eller som det ibland kallas, transportfenomen – behandlar **hastigheten** med vilken reaktionerna sker. Indelning av metallurgin i **jämvikter** och **hastigheter** är ändamålsenlig. Som vi ska se nedan kan praktiskt taget varje processutvecklingssteg analyseras och förklaras i termer av jämvikt och hastighet. Även vid problem i den vardagliga driften har man alltid stor nytta av att förstå vilka jämviktsförhållanden som gäller och med vilka hastigheter reaktionerna sker.

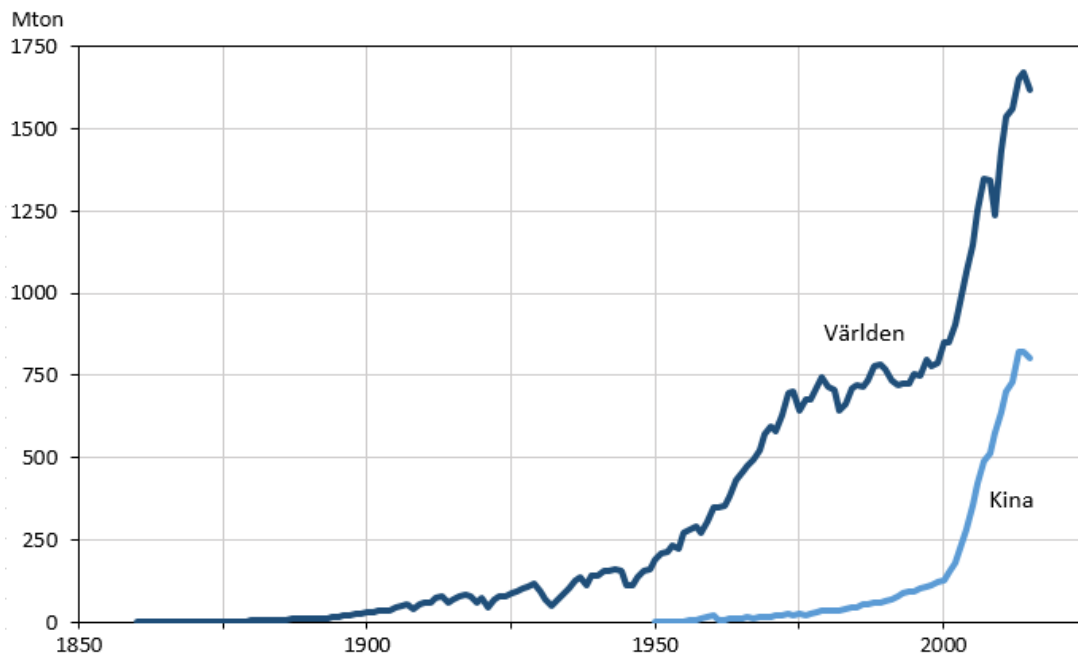
Stålintustrins produktionssystem präglas i jämförelse med annan tillverkningsindustri av en hög teoretisk kunskapsnivå. Detta beror på att processerna sker vid mycket hög temperatur vilket gör att mätdata oftast inte kan tas ut under produktionen. Detta gör att den teoretiska förståelsen av processerna och dess delmoment måste vara god såväl hos operatören som hos utvecklingsingenjören.

2.24. Stålets betydelse

Järnets och stålets betydelse för samhällsutvecklingen avspeglas redan i indelningarna stenålder, bronsålder och järnålder. Från järnåldern som startar omkring år 500 f.Kr. till dags dato har järn och stål varit dominerande vad gäller alla typer av förädlade metalliska material.

Även om järn och stål varit den dominerande metallen under lång tid, mer än tusen år, är det först i mitten av 1800-talet som volymtillväxten tar fart. Som vi senare ska diskutera mer i det historiska avsnittet är den kraftiga ökningen av tillväxten en kombination av ny produktionsteknik och ökade behov.

I figur 17 visas världsproduktionen av stål från 1850 till 2015. Tillväxten i stålproduktionen under efterkrigstiden har varit mycket stor men takten har på senare år avtagit och ligger numer på 1–2 % per år i västvärlden. Sedan millennieskiftet är det Kina som har stått för den dramatiska ökningen av stålproduktionen i världen. Världsproduktionen 2015 var drygt 1,6 miljarder ton, varav Kina stod för hälften.

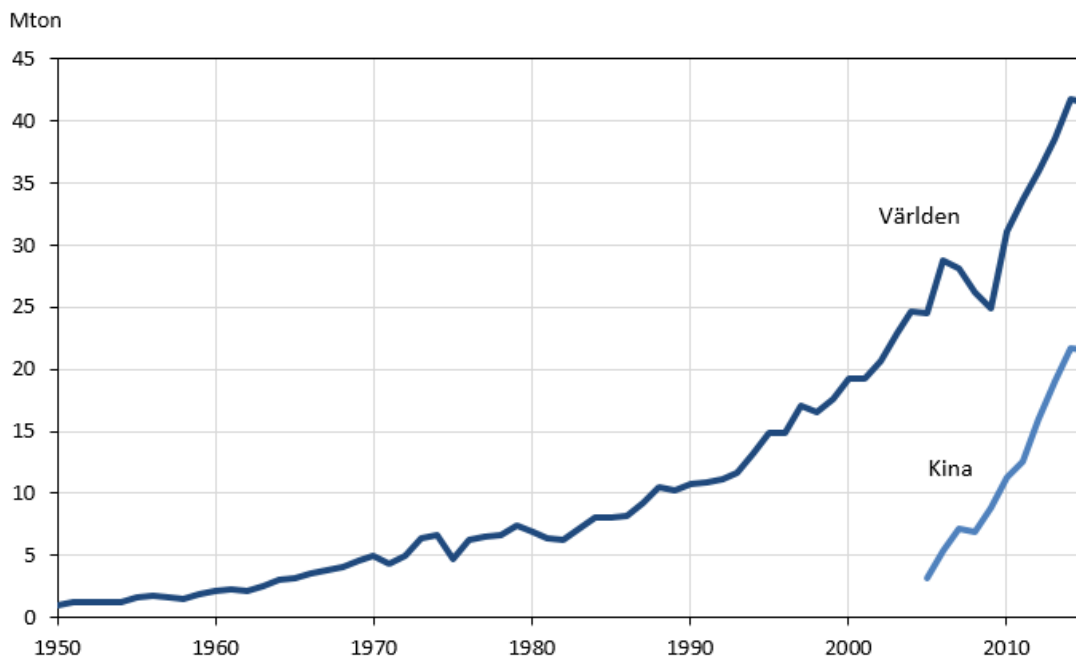


Figur 17. Världens stålproduktion 1860-2015.

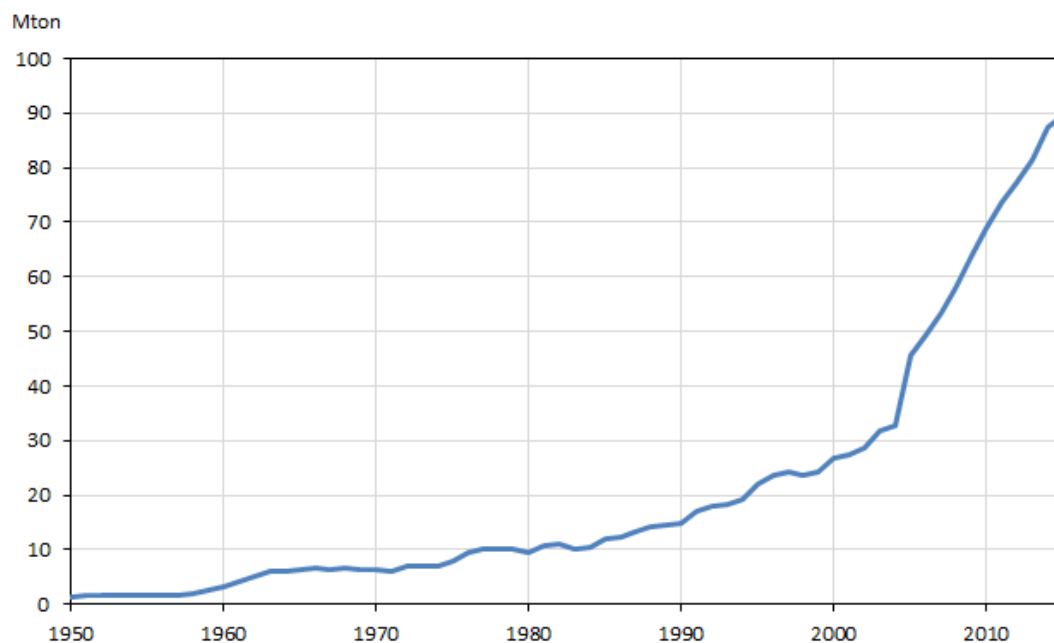
Källa: Grübler (före 1875) och World Steel Association (från 1875).

Den rostfria stålproduktionens utveckling i Kina följer i huvudsak samma utveckling som gäller för stålproduktionen i allmänhet. I figur 18 visas detta på ett tydligt sätt. Ökningen av den rostfria världensproduktionen har i många år legat kring 5–6 % årligen. Ökningen efter millennieskiftet har skett i Kina. Där tillverkades 2015 cirka hälften av allt rostfritt stål i världen.

Om välbefindelseutvecklingen fortsätter inom de så kallade utvecklingsländerna kommer per capita förbrukningen av stål att öka även i dessa länder. Detta gör att man kan förutse en fortsatt tillväxt av världens stålkonsumtion och produktion. I figur 19 syns utvecklingen av Indiens stålproduktion från 1950. Indiens stålproduktion har, liksom Kinas, växt kraftigt under 2000-talet och är år 2015 den tredje största stålproduktionen i världen. Bara Kina och Japan är större. Indiens stålproduktion förväntas växa ytterligare.

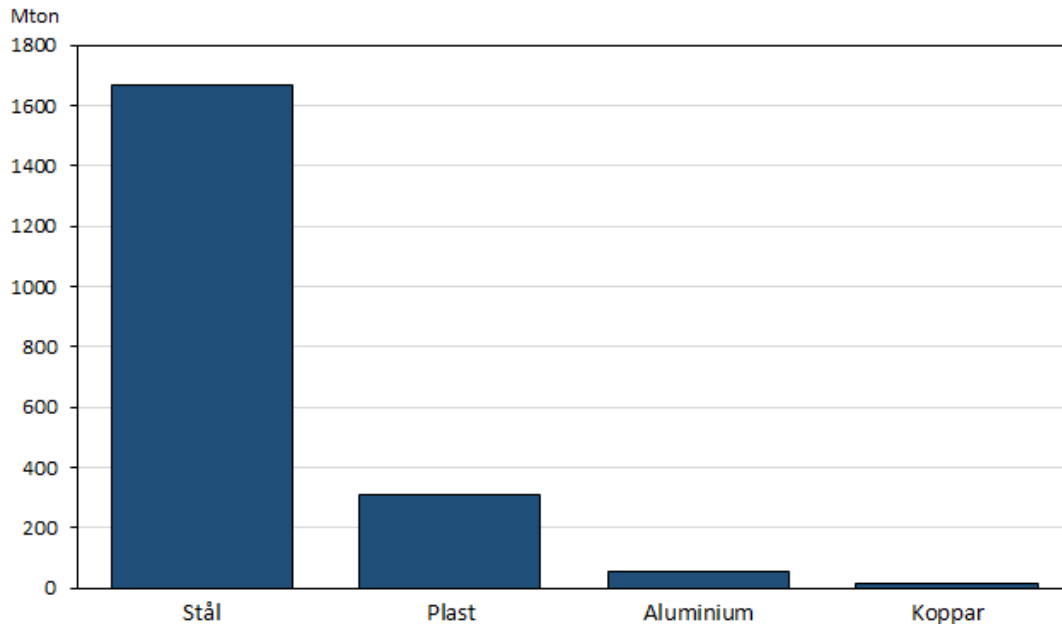


Figur 18. Världens produktion av rostfritt stål 1950-2015, samt Kinas från 2005.
Källa: World Steel Association, International Stainless Steel Forum.



Figur 19. Indiens stålproduktion 1950-2015.
Källa: World Steel Association.

Stål är jämfört med andra metaller och plast klart störst när det gäller volym men även när det gäller produktvärde. I figur 20 visas volymerna 2014 för några av världens viktigaste material.



Figur 20. Volymerna av världens produktion av olika material 2014.
 Cementproduktionen uppgick 2014 globalt till 4300 Mton.
 Källor: World Steel Association, Plastics Europe, International Aluminium Institute, International Copper Study Group och The European Cement Association

Även om flera av de övriga materialen har en högre tillväxttakt än stål kommer stålet inom överskådlig tid att vara det dominerande materialet. Det förtjänar även påpekas att det inom stålområdet finns grupper av stål som växer fortare än totalen. Exempel på detta är rostfria stål.

Skälet till stålets dominerande ställning är naturligtvis att det är ekonomiskt konkurrenskraftigt. Till detta bidrar flera faktorer:

- Stålets råvaror, järnmalm finns i god tillgänglighet.
- Stål kräver i sin framställning relativt låg energiinsats. Jämfört med aluminium är insatsen cirka en fjärdedel.
- Stålets hållfasthet är hög vilket betyder att kostnad per hållfastenhet blir låg i jämförelse med andra material.
- Stålet har flera goda bearbetningsegenskaper. Exempelvis kan stålplåt pressas till önskade former såsom diskbänkshoar och karosseridetaljer.
- Stålets svetsbarhet gör det i många applikationer överlägset som konstruktionsmaterial.
- Stål är lätt att återvinna. I Sverige recirkuleras cirka 90 % av det stålskrot som uppkommer till nytt stål.

Till detta kommer att stålets egenskaper kan mycket flexibelt optimeras för olika behov och tillämpningar. Man kan genom legeringsinnehåll, bearbetning och värmebehandling i önskad riktning styra egenskaperna.

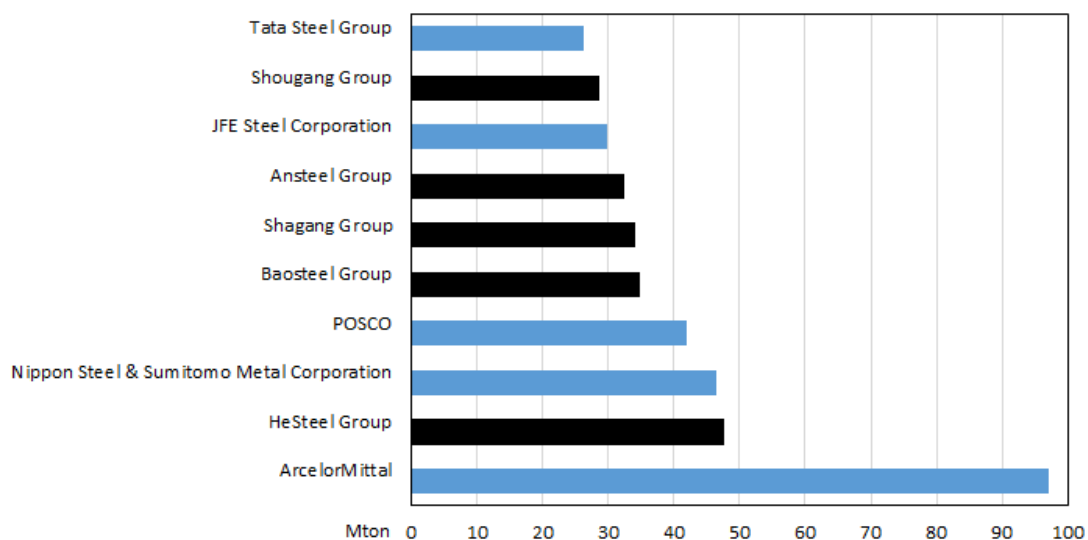
Typiska egenskaper som stålet kan optimeras mot är:

- Skärbarhet
- Hårdhet
- Elasticitet
- Duktilitet
- Nötningsbeständighet
- Sträck- och brottgräns (hållfasthet)
- Pressbarhet
- Korrosionsbeständighet
- Ytfinish

2.25. Stålets konkurrenskraft

Inom stålindustrin har alltid rått en stark konkurrens mellan de olika stålverken. Detta har lett till en kraftig effektivisering som har pågått kontinuerligt. Effektiviseringen har skett på flera plan. En viktig faktor för effektivare produktion har varit den ökade skalan på produktionen vilket lett till att små stålverk har slagits ut och att såväl processenheterna som företagen blivit allt större. I figur 21 visas storleken för de största stålkoncernerna i världen (år 2015). År 2000 var de största stålindustrierna POSCO från Sydkorea, Nippon Steel i Japan samt Usinor, Corus och Arbed från Europa. Genom företagsfusioner men framför allt genom tillväxten i Kina har kartan förändrats avsevärt de senaste åren. År 2015 är fem av de tio största företagen kinesiska.

En annan faktor som har påverkat effektiviseringen är minskningen av bemanningen. I början av 1970-talet låg de bästa stålverken i Europa på 10–15 mantimmar per producerat ton stål medan man idag är nere på 2–3 mantimmar per ton för de stora moderna verken och ner mot nivån 1,0 för ministålverken. De så kallade ministålverken beskrivs mer i detalj i nästa kapitel. Även vad gäller råvarornas åtgångstal har skett kraftiga förbättringar. Den viktigaste råvaran vid sidan om malmen är koksen. Typiska minskningar vad gäller förbrukning av koks, kol och olja de senaste årtiondena har varit från 600–700 kg per ton råjärn till 350–450 kg per ton råjärn.



Figur 22. De tio största råstålsproducerande företagen 2015. Observera att de helsvarta staplarna representerar kinesiska verk. Källa: World Steel Association.

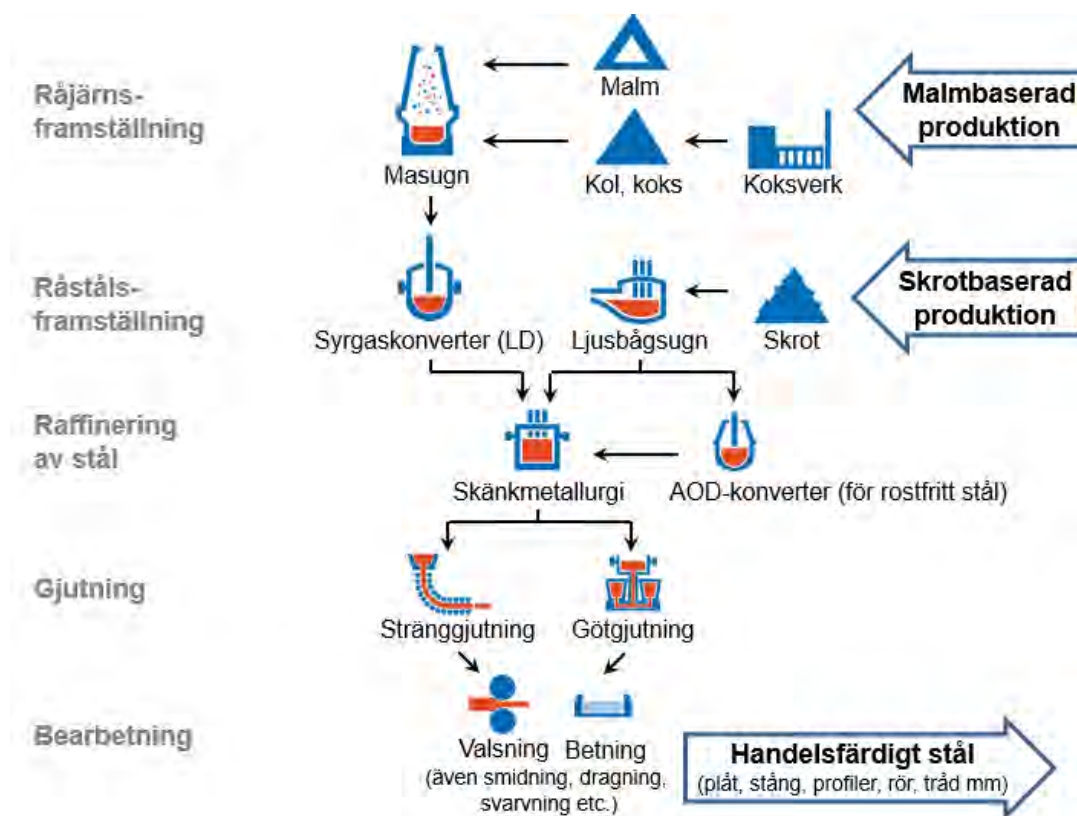
Sammantaget har effektiviseringarna inneburit att kostnaden och därmed priset för stål har sjunkit kontinuerligt. Parallellt med effektiviseringen och kostnadsänkningen har det skett en kraftig förbättring av stålets egenskaper. Det gäller såväl kvalitet som prestanda. På kvalitetssidan har exempelvis sänkningen av nivån på halter av inneslutningar och föroreningar varit betydande. Ett tydligt exempel på prestandahöjning som betytt mycket ekonomiskt är utvecklingen av höghållfasta stål. Tillsammans har detta betytt att stålet har kunnat behålla sin dominerande ställning över andra metaller och plastmaterial. Som vi ska diskutera i slutet av detta kapitel finns för de närmaste årtiondena en stor potential att ytterligare förbättra produktionsökonomi för stål, inte minst energianvändningen, samt att höja kvaliteten och olika prestanda.

2.26. Stålets tillverkningsvägar

Det finns idag i praktiken två tillverkningsvägar för stål. Dessa är

- **Den malmbaserade** med reduktion i masugn.
- **Den skrotbaserade** (inkluderande järnsvampprocessen) med smältning av skrot och skrotsubstitut

I figur 22 visas schematiskt de båda tillverkningsvägarna för stål. I den malmbaserade processvägen är utgångsmaterialet malm som reduceras i masugn till råjärn. Detta flytande råjärn förs vidare till syrgaskonvertern där stålet erhåller sin slutliga kolhalt. I regel efterbehandlas stålet i skänk eller skänkgugn. I den skrotbaserade processvägen är utgångsmaterialet skrot eller järnsvamp som smälts i ljusbågsugn varefter stålet efterbehandlas i skänk eller skänkgugn. Järnsvamp som är ett alternativ till skrot framställs från malm i särskilda direktreduktionsprocesser.



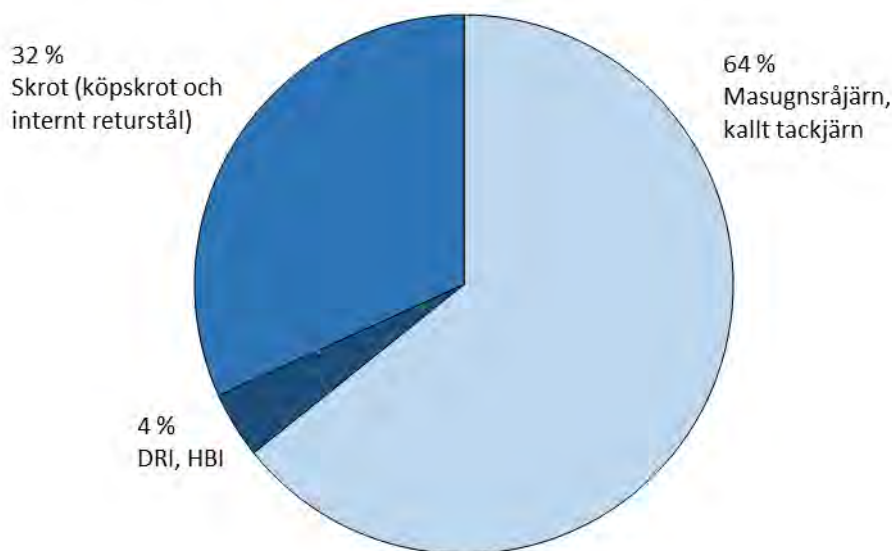
Figur 22. Malm- och skrotbaserad ståltillverkning. Källa: Jernkontoret.

Den dominerande framställningsvägen för järn är den malmbaserade över masugnsvägen. Järnsvampsprocessen har den snabbaste utvecklingen och förväntas således öka sin andel. Den mest kostnadseffektiva vägen för malmbaserad framställning är i stora delar av världen via masugnsvägen under förutsättning att tonnaget är tillräckligt stort. Effekten av skalstorleken har stark genomslagskraft på kostnadssidan. Järnsvamptillverkningen är kostnadseffektiv på de platser där tillgång till billig naturgas finns, till exempel i gulfstaterna eller i USA.

Järnsvamp – eller DRI (Direct Reduced Iron) – pressas ofta till briketter, så kallade HBI (Hot Briquetted Iron) och smälts efter tillverkning om i en ljusbågsugn. En stor anledning till att järnsvampsvägen ökar i betydelse är att de skrotbaserade verken behöver tillgång till rent järn för att motverka effekterna av eventuella föroreningar i köpskrot och övriga råvaror.

I figur 23 visas hur råvarorna för ståltillverkningen fördelar sig. Köpskrot och fallande internt skrot från stålverken används som råvara i skrotbaserade verk. Skrot används också som kylmedel under tillverkningen av stål i syrgaskonvertrar. Cirka 20 % av ståltonnaget från malmbaserad tillverkning utgörs av skrot.

Vid sidan om de stora stålverken har paradoxalt nog med tanke på skalan visats att så kallade ministålverk kan utveckla god lönsamhet. Ministålverken baseras i regel på tillverkning från skrot och skrotersättning. Idén bakom dessa verk bygger på att begränsa komplexiteten i tillverkningen genom att smälta skrot i ljusbågsugn, stränggjuta och valsa ett begränsat antal produkter. Man utnyttjar ett lokalt upptagningsområde för skrot och säljer också i regel till en lokal marknad. I strategin ingår att använda den modernaste tekniken. Ministålverken som startade i USA för ett trettiotal år sedan har i de flesta fall visat god lönsamhet och bidragit till att öka konkurrensen inom stålindustrin.



Figur 23. Järnråvaror för global ståltillverkning 2014.

Källor: Bureau of International Recycling och World Steel Association

2.27. Drivkrafter och möjligheter för stålindustrins fortsatta utveckling

Som vi konstaterat fanns vid 1800-talets mitt en stor efterfrågan på ökade stålvolym. Den språngartade utvecklingen hos stålindustrin med bland andra Bessemerprocessen, Martinprocessen och koksmasugnen gav tillsammans med ökande marknadsbehov förutsättningar för den kraftiga volymökningen. På samma sätt kan man vid 1900-talets mitt se en ansamling av produktivitetshöjande utvecklingar. Detta sker samtidigt med en kraftig volymexpansion, från 1950 och 65 år framåt åttadubblades världsproduktionen. LD-processen och stränggjutningen är de stora sprången som tillsammans med produktivetsökningar hos masugnen gör denna volymexpansion möjlig. Det förtjänar att påpekas att hela volymökningen skedde med en samtidig reduktion av arbetskraft. I Europa drogs antalet ståljobb ned med flera hundra tusen under senare hälften av århundradet. Ett annat sätt att uttrycka det hela på är att kostnaden för stål i fasta priser föll drastiskt under andra halvan av 1900-talet vilket är en förklaring till den starka volymökningen. Utvecklingen i Kina med bland annat stora infrastruktursatsningar och husbyggande i storstäderna har sedan millennieskiftet inneburit ett ytterligare språng i volymökningen.

För framtiden kan konstateras att potentialen för stålindustrin att sänka stålets kostnader genom tekniksprång och rationellare tillverkning är minst lika stor. På samma sätt som man tidigare i förväg kunde förutse framgången med smält stål, färskning med syrgas och kontinuerlig gjutning kan man idag se stora rationalitetssteg med ny teknik.

Exempel på detta är en smältreduktionsprocess där råvarorna inte behöver förbehandlas, energiråvaran är flexibel och med ett råjärn som ligger nära stålprodukternas slutsammansättning, samt direktgjutning av band och tråd till nära slutdimension. En stark effektivisering skulle dessutom uppnås om smältreduktionssteget, eventuellt färskningssteg och raffineringssteget kunde köras ihop i ett kontinuerligt flöde med direktgjutningsprocessen. Med en sådan kontinuerlig process från malm till nära slutprodukt i ett steg skulle kostnaderna för stål sänkas så att stålets dominerande ställning som användningsmaterial skulle bestå i långa tider.

Man kan fråga sig vad som behövs för att detta skulle kunna genomföras, behovet finns och lösningarna är identifierade. 1850-talets gemensamma nämnare bakom tekniksprången var industrialiseringen medan 1950-talets gemensamma nämnare var ökad teoretisk kunskap. Bland de faktorer som måste till för framtida tekniksprång är uppbringandet av stora och uthålliga resurser samt en adekvat och kompetent ledning för det nödvändiga innovativa arbetet.

3. GRUNDBEGREPP VID STÅLFAMSTÄLLNING

3.10. Inledning

I detta avsnitt ska först de teoretiska grundbegreppen gås igenom och därefter behandlas de praktiska grundbegreppen. Målet är att inför de mer specialiserade kapitlen ge en introduktion och systematisering av de teoretiska och processmetallurgiska grundbegrepp som ingår i stålframställningen.

De teoretiska grundbegreppen delas in i:

- Jämvikter (termodynamik)
- Kinetik (transportfenomen)

De processmetallurgiska grundbegreppen delas in i:

- Rostning
- Agglomerering
- Reduktion
- Smältning
- Konvertering
- Raffinering
- Gjutning

3.11. Teoretiska grundbegrepp

3.11.1. Jämvikter

Stålframställningens kärna utgörs av ett antal reaktioner där önskade omvandlingar sker. Varje reaktion har ett jämviktsläge som styr hur långt reaktionen går. Läran om jämvikter ingår i den vetenskapliga disciplinen termodynamik.

Gibbs fria energi

Varje reaktion har ett jämviktsläge som kan beskrivas i energiformer. Denna energi kallas kemisk potential eller Gibbs energi som betecknas med G . Med hjälp av termodynamikens två första grundlagar kan man visa att:

$$G = H - TS$$

Vilket betyder att Gibbs energi är lika med entalpin, H , minus temperaturen, T (absoluta temperaturen i grader kelvin), gånger entropin, S . Entalpin, H är en energiterm som redovisar värmeinnehållet och entropin, S kan sägas vara ett mått på den atomära ordningen.

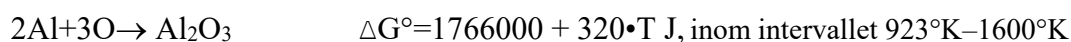
För varje reaktion kan man definiera jämviktsläget som:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

Tecknet Δ innebär förändringar och tecknet $^\circ$ innebär att man definierat ett standardtillstånd för ingående element. Att man behöver definiera ett standardtillstånd beror på att man inte har någon absolut nollpunkt i det kemiska potentialsystemet.

Jämviktskonstanten

ΔG° kan för varje komponent och varje reaktion återfinnas i metallurgiska tabellverk. Exempelvis är tabellvärdena för ΔG° för reaktionen:

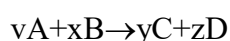


Det praktiska med, ΔG° , är att det har ett samband med jämviktskonstanten K enligt formeln:

$$\Delta G^\circ = RT \ln K$$

Där R är en konstant och T temperaturen i ° Kelvin. Sambandet gäller vid jämvikt då $\Delta G = 0$, det vill säga då Gibbs fria energi är som lägst.

För en reaktion med den principiella uppställningen



blir med definitionen ovan:

$$\text{Jämviktskonstanten } K = \frac{a_A^v \cdot a_B^x}{a_C^y \cdot a_D^z}$$

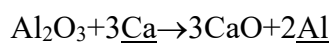
Där a står för respektive ämnes aktivitet.

Aktiviteten definieras som halten X gånger en aktivitetskoefficient, γ :

$$a = \gamma X$$

Aktivitetskoefficienten är i princip en korrektionsfaktor som är ett uttryck för atomernas inbördes påverkan. Den kan beräknas från interaktionsparametrar som brukar betecknas med ϵ och finns tabellerade

För att exemplifiera resonemanget om jämviktskonstanten kan vi analysera reaktionsformler då Ca-tillsats görs i en stålsmalta för att modifiera Al_2O_3 -inneslutningar:



Man vet att man vill ha inneslutningar med cirka 50 % vardera av CaO och Al_2O_3 därför att man får flytande inneslutningar vid detta område. Man vet också att a_{CaO} är 0,007 och $a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,05$ i det aktuella området:

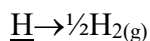
$$\text{Jämviktskonstanten } K = \frac{a_{\text{CaO}}^3 \cdot a_{\text{Al}}^2}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot a_{\text{Ca}}^3}$$

Man har ett värde på K och kan från tabellvärden för interaktionsparametrarna beräkna aktivitetskoefficienterna γ_{Ca} och γ_{Al} . Halten Al är känd vilket gör att man kan beräkna teoretisk hur mycket Ca som ska tillsättas. I praktiken måste man naturligtvis prova ut lämplig halt även empiriskt. Den teoretiska bakgrunden är dock nödvändig

för att veta vilka justeringar som ska göras från smälta till smälta beroende på t.ex. halten av andra legeringsämnen och temperaturens inflytande.

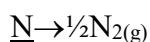
Ett annat exempel på hur man kan använda jämviktsresonemanget är när man vill sänka väte och kvävehalter vid avgasning.

Reaktionerna är:



Löst väte löser sig med ett partialtryck P_{H_2} i gasen

Samma gäller för kvävet:



Jämvikten mellan löst väte respektive löst kväve som också kallas Sieverts lag kan skrivas:

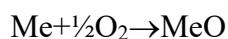
$$\% \text{H} = \frac{\sqrt{P_{\text{H}_2}}}{\gamma_{\text{H}} \cdot K_{\text{H}}} \quad \text{och} \quad \% \text{N} = \frac{\sqrt{P_{\text{N}_2}}}{\gamma_{\text{N}} \cdot K_{\text{N}}}$$

Aktivitetskoefficienten för respektive gas påverkas av legeringsämnena i smältan och som framgår av ekvationerna ovan gynnas väte- och kvävereningen av höga aktivitetskoefficienter. Reningen gynnas även av ett lågt totaltryck och högt argonflöde vilka båda sänker respektive partialtryck, det senare av kinetiska skäl.

Observera att vi vid beskrivning av reaktionsformlerna använder \rightarrow för att illustrera jämvikten. Detta är ett traditionellt vedertaget sätt att skriva formelerna men teoretiskt är det mer korrekt att skriva $=$ som tecknet för en reaktion eftersom det alltid finns en jämvikt. Man brukar skilja mellan reversibla och irreversibla reaktioner. Är reaktionen reversibel kan den gå tillbaka vid ändrade förutsättningar medan en irreversibel reaktion är definierad som en reaktion som inte kan gå tillbaka. I praktiken är de flesta reaktioner som vi möter vid stålframställning mer eller mindre reversibla.

Syrepotentialdiagrammet

Stålframställning handlar mycket om reaktioner mellan metall och metalloxid. Systemets syrepotential är viktig vid såväl reduktion, färskning och deoxidation. Generellt gäller formeln för oxidation av en metall respektive reduktion av en metalloxid:

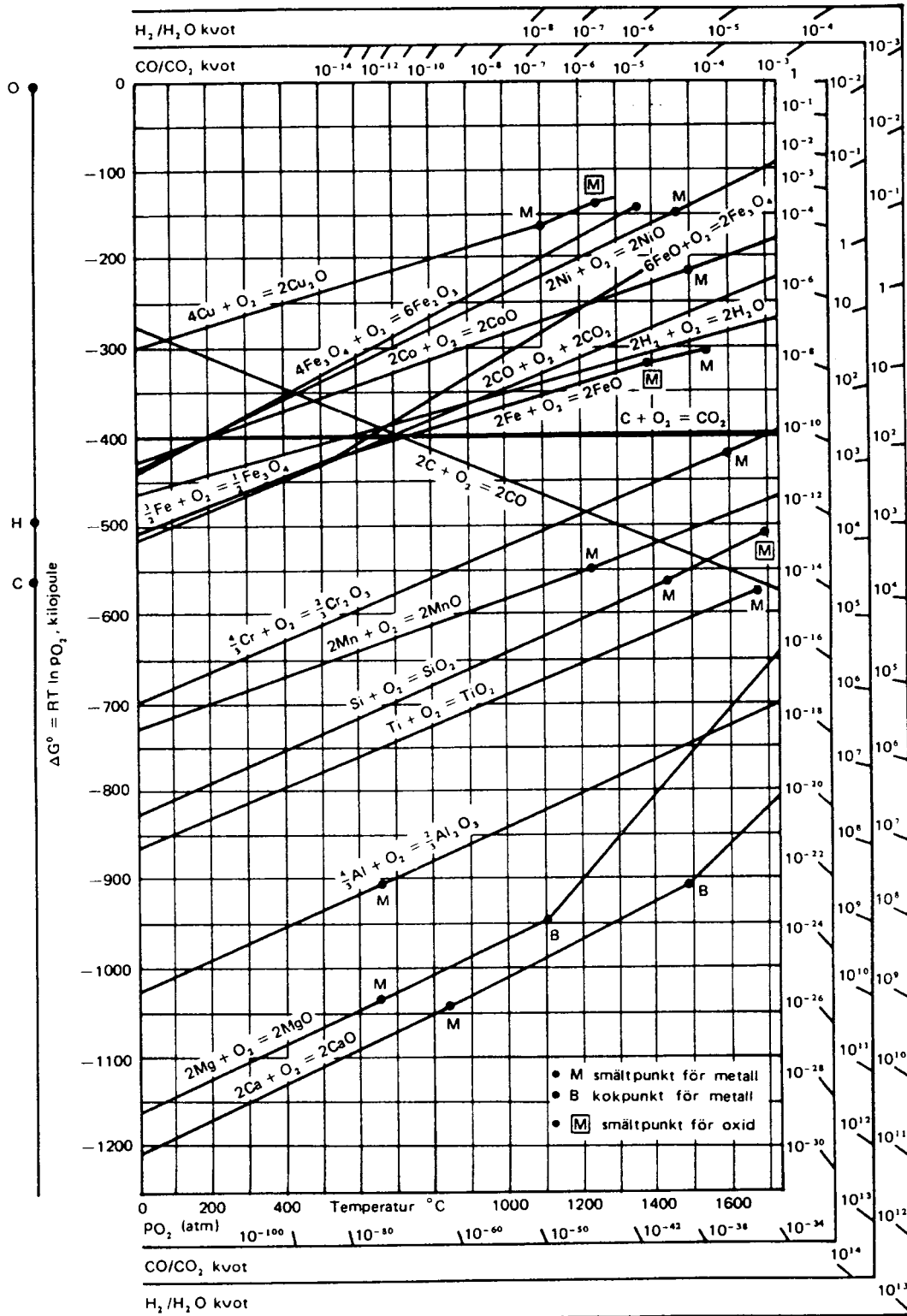


Standardtillstånden är valda så att a_{MeO} och a_{Me} blir 1 eftersom de är rena ämnen och på samma sätt blir aktivitetskoefficienten för syre också 1.

Därför blir $\Delta G^\circ = RT \ln p_{\text{O}_2}$

Om man sätter av syrepotentialen, definierad som ΔG° för respektive metall-metall-oxidjämvikt på y-axeln och absoluta temperaturen på x-axeln får man ett så kallat syrepotentialdiagram, se figur 24.

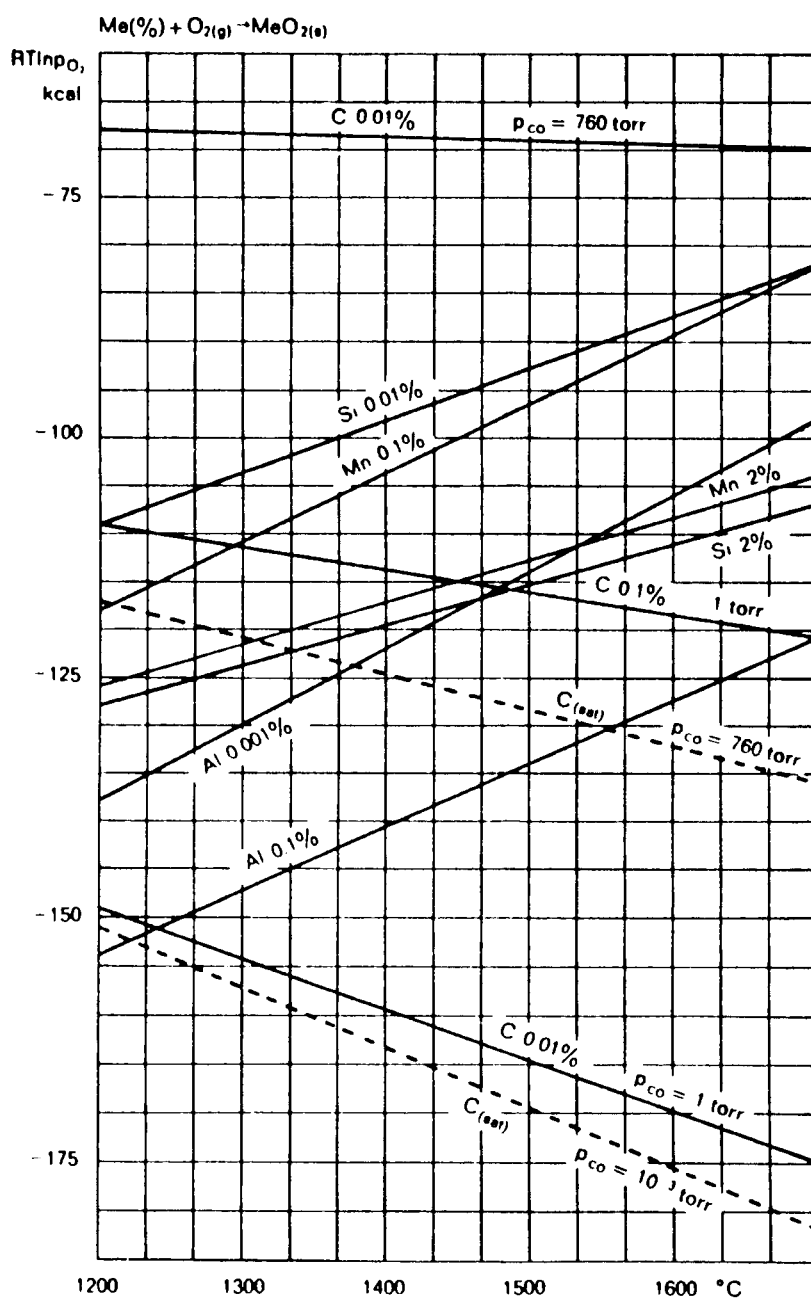
Diagrammet är mycket illustrativt och man kan lätt se olika metallers affinitet (förenklat=bindning) till syre. Ju längre ner i diagrammet ju kraftigare vill metallen binda syret. En metall längre ner i diagrammet kan genom att oxideras reducera en metall högre upp i diagrammet.



Figur 24. Syrepotentialdiagram för viktiga oxider.

Man bör observera att diagrammet redovisar jämvikter för rena ämnen. Det är emellertid relativt enkelt att beräkna linjernas lägen för olika halter. Vid sänkt halt roterar linjerna moturs kring punkten som representerar skärningen med absoluta nollpunkten i temperaturen. Om aktiviteten för oxiden sänks roterar linjen medurs, det vill säga syrepotentialen sänks. Detta är t.ex. fallet om man vid desoxidation går från ren SiO_2 som produkt till en blandoxid där a_{SiO_2} normalt är väsentligt lägre. Även linjer för reaktionen: $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}_2$ roterar kring sin skärningspunkt med absoluta nolltemperaturen beroende på CO/CO_2 förhållandet. Denna kvot kan avläsas på en sidoskala vilket även gäller för $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ förhållandet för motsvarande vätgas-vatten-jämvikt.

I figur 25 visas ett exempel på hur syrepotentialdiagrammet ser ut vid olika halter. Ur denna figur kan man utläsa förmågan att desoxidera vid olika halter kisel och olika partialtryck av CO vid olika kolhalter.



Figur 25. Syrepotentialdiagram, exempel för desoxidation.

System, fas och fasdiagram

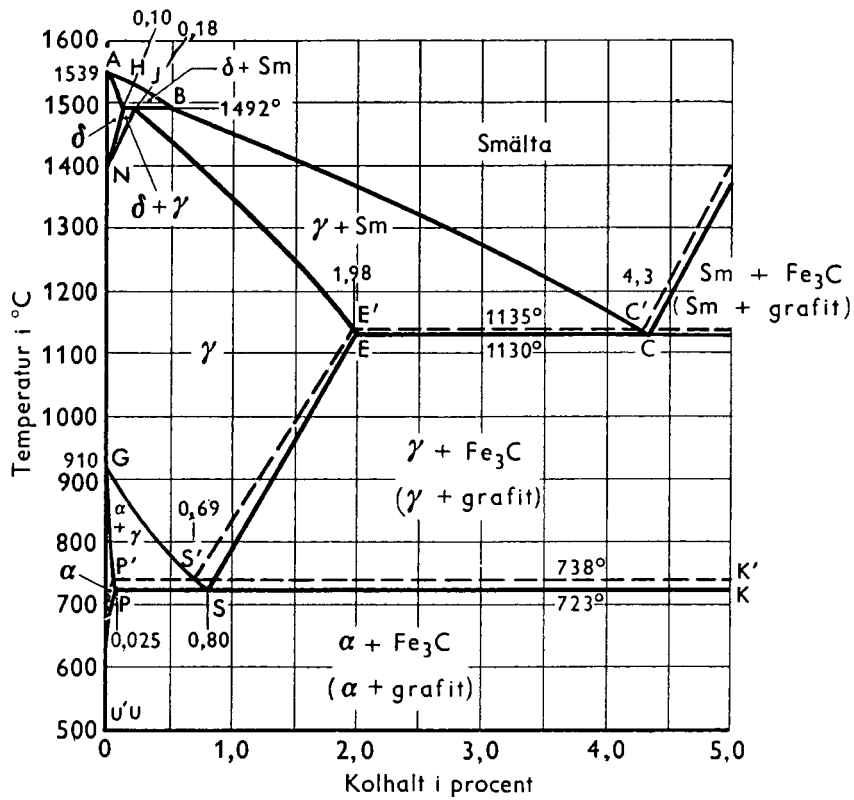
Med system menas den avgränsade del av det fysikaliska rummet som man för tillfället analyserar. Ett system kan bestå av en eller flera faser. En fas är ett område som enbart består av samma sorts atomgrupperingar i samma tillstånd. En annan definition på fas är att alla egenskaper är likartade i fasens geografiska utbredning. Ett system som består av en fas kallas homogent medan systemet kallas heterogent om flera faser ingår. Reaktionen kan ske mellan faser men också inom en fas. Reaktionen inom en fas är t.ex. gasreaktion i en gasfas. Dessa reaktioner kallas homogena i motsats till heterogena där reaktionerna sker mellan olika faser.

Fasdiagram är ett elegant sätt att beskriva jämvikter mellan olika faser. Komponenterna som ingår i ett fasdiagram kan vara rena kemiska ämnen eller föreningar.

I ett fasdiagram kan jämvikten för en eller flera komponenter redovisas tillsammans med tryck och temperatur. Normalt brukar man visa fasdiagrammen vid konstant tryck, 1 atm, för att reducera antalet variabler. Tvådimensionellt kan man antingen i ett så kallat binärt fasdiagram redovisa två komponenter och temperatur eller i ett så kallat ternärt fasdiagram redovisa tre komponenter vid konstant temperatur.

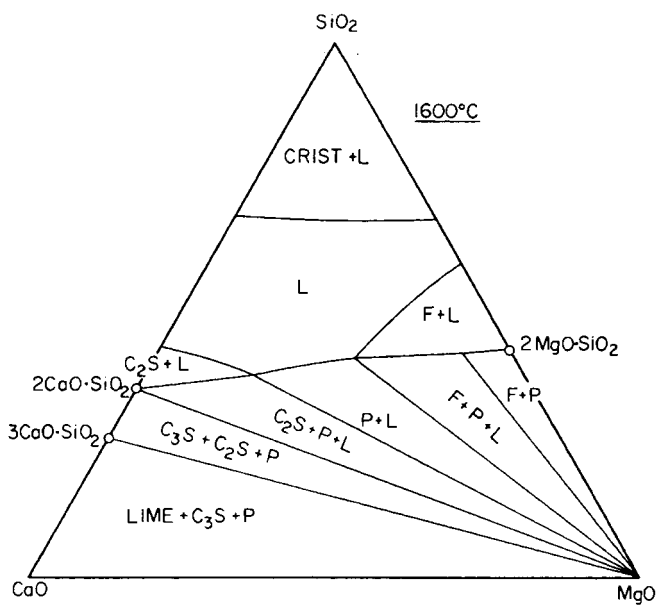
I figur 26 visas ett av de vanligaste använda binära diagrammen nämligen Fe-C-diagrammet upp till 5 %. På vänstra axeln, det vill säga rent Fe (C=0 %), kan man utläsa att järn kan finnas i tre olika former: δ -Fe (delta-järn), γ -Fe (austenit) och α -Fe (ferrit). Dessa tre faser har en viss utsträckning vid ökande kolhalt. Denna utsträckning (existensområde) redovisas i diagrammet med ytorna som är betecknade med respektive Fe-modifikation. Dessa ytor utgör enfasområden.

Figuren visar också var enfasområdet Fe-C-smälta (Sm) är stabilt. Mellan dessa områden finns tvåfasområden t.ex. γ -Sm och fasta faserna $\alpha+\gamma$ samt $\delta+Sm$. Befinner systemet i tvåfasområdet står de båda faserna i jämvikt med varandra och andelarna av respektive fas är proportionellt mot avståndet mellan sammansättningen och punkten där linjer för konstant temperatur skär motsatt fasgränslinje. Fasdiagrammet kompliceras något av att det finns ett stabilt och ett metastabilt tillstånd för kolet (grafit resp. cementit, Fe_3C).



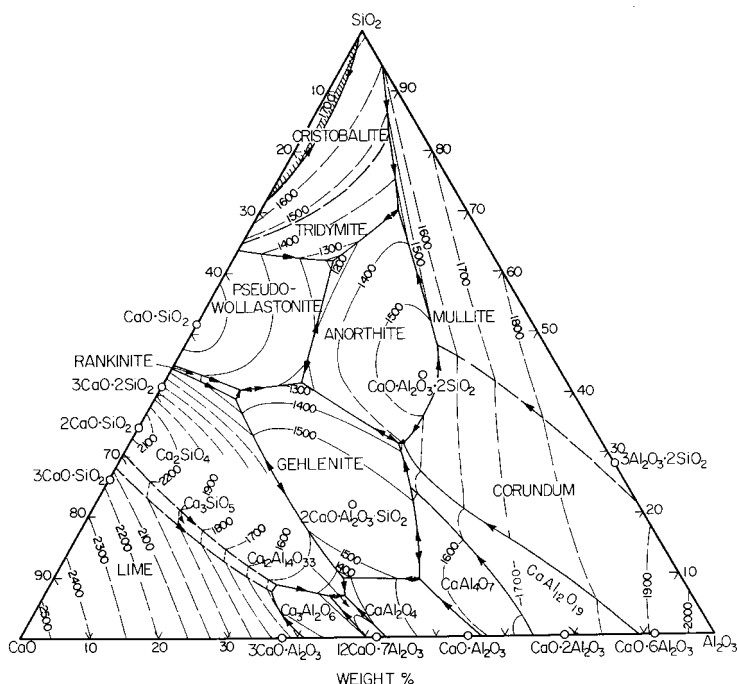
Figur 26. Fasdiagram järn-kol.

I det ternära diagrammet avsätts halterna utefter en liksidig triangel. I en enstaka punkt i diagrammet avläses halterna parallellt med den motsatta sidan för 100 % av komponenten i fråga. Det finns flera typer av ternära diagram varav de två vanligaste ska visas. I det ena är temperaturen konstant och man kan säga att man gör ett isotermt snitt (konstant temperatur) och får då ett fasdiagram som liknar det binära. Ett exempel visas i figur 27. Man kan se fasernas existensområden och hur de står i jämvikt med varandra.



Figur 27. Isotermt ternärt fasdiagram.

I den andra typen av ternärt diagram ser man den tredimensionella relationen uppifrån och noterar likvidustemperaturen likt höjdlinjer på ett kartblad. I detta fall beskriver man helt enkelt likvidusytans utbredning. Ett exempel visas i figur 28.



Figur 28. Ternärt fasdiagram för systemet $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

3.11.2. Kinetik

Vid metallurgiskt analysarbete är det minst lika viktigt att förstå med vilken hastighet en reaktion sker som till vilken jämvikt varje reaktion strävar. Läran om reaktionens hastighet kallas för kinetik. Man kan också beteckna det hela som läran om transportfenomen.

Inom stålmetallurgin sker de flesta reaktionerna mellan olika faser. Det finns en rad olika fall att analysera.

Reaktionstyper

- Gas – fast material
- Gas – flytande (smälta)
- Flytande (smälta) – fast material
- Flytande (smälta) – flytande (smälta)

Typexempel inom stålmetallurgin

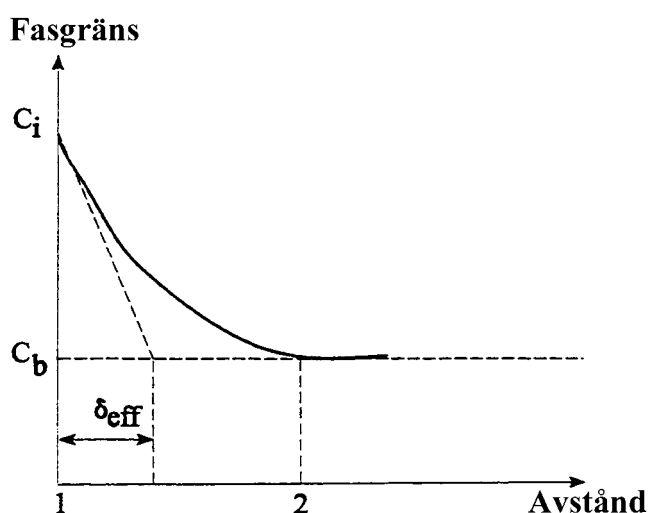
- Reaktionerna i masugnen
- Färskning gasspolning i skänk
- Desoxidation, inlegering
- Toppslag – badreaktioner

I de flesta fall av heterogena reaktioner måste man ha en materitransport för att reaktionen ska fortlöpa. Man kan i dessa fall dela in förloppet i tre steg:

1. Tillförsel av reaktanterna (ämnen som deltar i reaktionen) till fasgränsen
2. Fasgränsreaktionen
3. Bortförsl av produkterna

Det är det trögaste av dessa steg (eller som det heter, med ett akademiskt språkbruk, den med den lägsta virtuella maximala hastigheten) som bestämmer totalhastigheten hos reaktionen. Det finns exempel på hastighetsbegränsningar i alla tre fallen. Vid t.ex. reduktion är bortförseln av det utreducerade järnet mycket känslig för totalhastigheten. Ett dåligt omrört bad i LD-blåsningen kan begränsa kolfärskningshastigheten. Ofta är dock fasgränsreaktionen begränsade och i dessa fall finns en rad teoretiska modeller för analys av hastigheten. Modellerna är snarlika och vi ska här gå igenom en modell som kan användas för reaktioner mellan en flytande fas (smälta) och en annan smälta eller fast fas. Basresonemanget är att även om smältan är omrörd med turbulent strömning eller laminär strömning kommer det alltid att finnas ett gränsskikt genom vilket transporten måste ske. Vid turbulent strömning är omrörning intensiv och oregelbunden medan laminär strömning innebär att strömningen är likriktad innehåller jämna hastighetsgradienter tvärs strömningsriktningen.

I figur 29 visas principiellt koncentrationsskillnaderna i gränsskiktet. På y-axeln är koncentrationsskillnaden avsatt från fasgränsen och utåt längs x-axeln är avståndet avsatt.



Figur 29. Koncentrationsgradienter vid fasgränsytan

Flödet av det lösta ämnet (reaktanten) kan uttryckas i ekvationen:

$$\dot{n} = KA(C_b - C_i)$$

Där:

K=hastighetskonstant

A=ytan

C=koncentration

Om man vill använda ekvationen mer generellt bör man införa aktiviteter i stället för koncentration.

$$\dot{n} = KA(a_b - a_i)$$

Hastighetskonstanten beror inte bara på geometrin och omröringen utan även fysikaliska egenskaper hos smältan såsom viskositet och täthet. Man finner också vid mätningar att hastigheten är relaterad till diffusionskonstanten D för reaktanten. I ovanstående ekvation har man antagit att smältan rör sig ända in mot ytan och att överföringen fram till gränsytan sker genom hela skiktet från 1 till 2 i figur 29. Traditionellt har de flesta forskarna ansett att det finns ett stillastående gränsskikt längst in mot gränsytan med argumentationen att det inte kan existera någon diskontinuitet i hastigheten som därför måste vara 0 längst in. I så fall måste reaktanten nå ytan medelst diffusion varför ekvationen kan skrivas:

$$\dot{n} = \frac{D}{\delta} A(a_i - a_b)$$

Där D = diffusionskonstanten

och δ = tjockleken hos filmen

Man har funnit att δ kan praktiskt bestämmas till δ_{eff} genom konstruktionen i figur 29.

Riktigheten i gränsskiktsmodellen är omdiskuterad men den fungerar hyggligt bra för kvalitativa beräkningar.

Från många experimentella studier kan man approximativt ansätta $\delta_{\text{eff}} = 10^{-3}$ cm för flytande faser i de flesta fall.

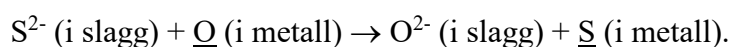
Går man över till de praktiska förhållandena och vill maximera hastigheten för en reaktion finns flera principiella faktorer att tänka på:

- Stora kontaktytor måste skapas och vidmakthållas. Totala reaktionshastigheten påverkas av kontaktytan. För fast fas gäller t.ex. att ha små kornstorlekar. Små korn ger större yta i förhållande till volymen. I flytande fas gäller att omröring ger nya och stora ytor. Vid reaktioner där uttransport ska ske genom gasfas ger ökat gasflöde utrymme för ett lägre partialtryck. Appliceras ett vakuum ovan badytan ökar reaktionshastigheten kraftigt på grund av att stor yta skapas när gasbubblorna expanderar i volym när de når stålsmältans överyta.
- Transport till och från av reaktanter och reaktionsprodukter är viktigt. Ett typexempel på detta är reduktion av järnoxidpartiklar där det är viktigt att utreducerat material inte blockerar fortsatt kontakt med reduktionsgasen.
- Drivande kraft i reaktionen
En hög jämviktskonstant, höga aktiviteter på reaktanterna och låga aktiviteter hos reaktionsprodukten ökar den drivande kraften för själva reaktionen
- Temperatur
Höjd temperatur ökar de flesta hastighetsbestämmande komponenterna

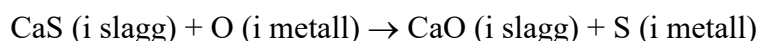
3.11.3. Slagger

Slaggers teoretiska bakgrund

Slagger inom stålhanteringen består i regel av smälta oxider. Till skillnad från metallsmältor är molekylerna laddade, man talar om att smältorna är joniserade. Att smältorna är joniserade innebär att de termodynamiska begrepp och rutiner som används vid behandling av metallsmältor inte fungerar. Man måste finna nya definitioner på ideal lösning och idealtillstånd för att man ska kunna använda aktivitetsbegreppet. Detta går att göra men skulle föra för långt om vi skulle redovisa detta här. Vad som kan vara intressant att känna till är att man i slaggen delar upp de joniserade molekylerna i anjoner, typ S^{2-} och O^{2-} respektive katjoner typ Ca^{2+} och Fe^{2+} . Ur metallurgisk synpunkt är det väsentligt att man kan ha en jämvikt som innebär utbyte av joner mellan en joniserad och icke joniserad fas. Som exempel kan anföras svavel-syre-jämvikter mellan metallbad och slagg.



Detta är en anjonjämvikt eftersom katjonerna inte deltar formellt. Detta betyder emellertid inte att katjonerna inte har någon betydelse för jämvikten. Om slaggens katjoner t.ex. utgörs av endast Ca kan man också skriva:

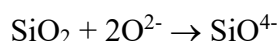


För att beskriva slaggens kemiska potential finns avancerade modeller, vilket i praktiken betyder att man kan beräkna slaggens svavelreningskapacitet.

Basicitet

I likhet med syra-bas definitionen för vattenlösningar har man för slaggen en syra-bas-definition som innebär att en bas är en laddad eller oladdad molekyl som kan avge en syrejon medan en syra kan uppta en syrejon.

SiO_2 blir t.ex. således en syra emedan den kan uppta O^{2-} -joner enligt:



Och CaO blir en bas eftersom den kan avge en O^{2-} -jon:



Basiciteten hos en silikatsmälta blir således ett mått på tendensen hos smältan att avge syrejoner. Det är inte lätt att praktiskt kvantitativt mäta basiciteten och det är inte heller lätt att definiera gränsen mellan en sur och basisk slagg.

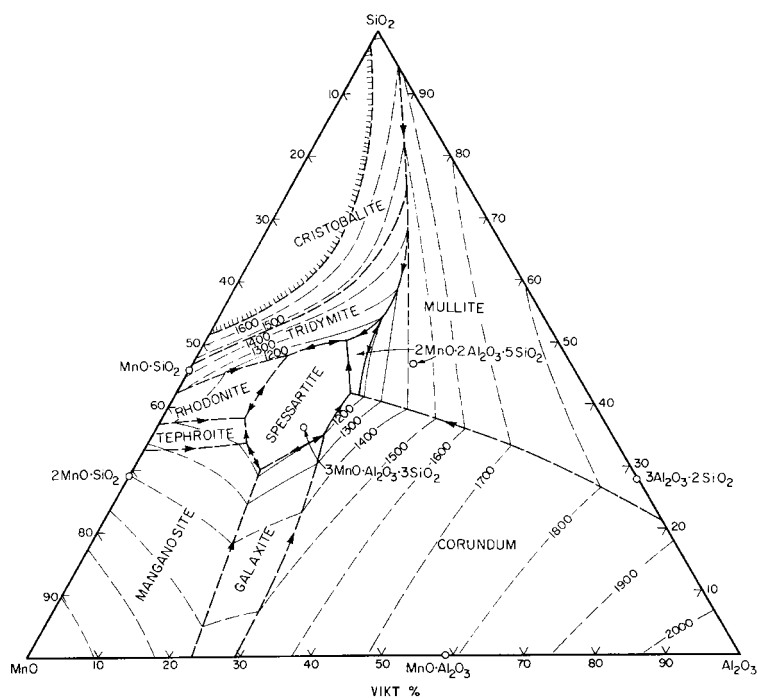
I praktiska sammanhang har man infört två handfasta basicitetsbegrepp enligt:

$$B = \frac{\text{CaO (halter)}}{\text{SiO}_2 \text{ (halter)}}$$

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO (summa halter)}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (summa halter)}}$$

En typisk slagg är ofta uppbyggd på silikater med CaO och MgO som basiska komponenter och Al₂O₃ som sur komponent utöver SiO₂.

Ett ternärt fasdiagram visas i figur 30 för systemet SiO₂ – CaO - Al₂O₃



Figur 30. Likvidustemperaturer °C i systemet MnO-Al₂O₃-SiO₂

Ur detta diagram kan man bland annat dra slutsatser om viskositeten hos slaggen vid olika temperaturer och sammansättning. Man bör dock observera att silikatsmältan ofta är glas vilket innebär att den vid sänkt temperatur inte stelnar genom att de kristalliseras vid likvidustemperaturen utan de stelnar vid den så kallade glastemperaturen, T_g, där viskositeten drastiskt höjs så att man i praktiken får ett helt stelt material.

Slaggens praktiska funktioner

Slaggen tjänar flera syften vid stålframställningen.

1. Den flyter ovanpå stålbadet och hindrar därmed stålets negativa kontakt med omgivande luft. Den minskar i samma funktion även värmestrålningen från stålsmältan.

2. Den kan fysiskt fånga upp oönskade reaktionsprodukter som t.ex. slagginneslutningar som uppkommit vid desoxidation.
3. Den tjänar som uppsamlare av föroreningselement vid vissa raffineringsteg.

Synpunkter på semantiken kring slaggar

För en processmetallurg menas med ordet slagg den slagg som flyter ovanpå stålbadet. För att förtydliga detta används därför oftast begreppet toppslag för denna typ av slagg. En materialvetare använder ofta begreppet slagg för icke metalliska inneslutningar. Man kan möjligen använda ordet slagginneslutningar men helst bör man använda begreppen oxidiska inneslutningar när man menar detta och icke metalliska inneslutningar när man vill ha ett bredare begrepp. Det förtjänar att påpekas att den oxidiska inneslutningar och toppslagger har ofta liknande sammansättningar och ur termodynamiska synvinkel är samma material.

3.12. Processmetallurgiska grundbegrepp och enhetsprocesser

Vid metallframställning används i regel flera steg där varje steg oftast utgör en process. Respektive steg definierar vi som grundbegrepp och processen vid respektive steg brukar kallas enhetsprocess.

För stål gäller följande systematisering:

Grundbegrepp	Utförs vanligen i eller genom
Rostning	Schaktugnar
Agglomerering	Bandsintring Kulsintring Pelletisering
Reduktion	Masugn Direktreduktionsugnar
Smältning (utan reduktion)	Ljusbågsugn HF-ugn
Konvertering	Konverterprocessen: LD och OBM (kolstål) AOD och CLU (rostfritt)
Raffinering	Skänk Skänkugn Vakuumprocesser
Gjutning	Gjutmaskin

Vid metallframställning används även elektrolys och hydrometallurgi men ingen av dessa två alternativ är ekonomiskt lönsamma för stålframställning.

3.12.1. Rostning

Definition av rostning är att malmen oxideras vid hög temperatur utan att den smälter eller agglomereras. Förr utfördes rostning av järnmalm för att höja malmens oxidationsgrad och avlägsna svavel i form av SO_2 ur malmen. Numera sintras (i Sverige pelletiseras) i stort sett all malm och den oxidation som där sker är tillräcklig för att nå en högre oxidationsgrad och en viss svavelrening. Den senare är inte längre lika nödvändig eftersom koksen ändå tillför huvuddelen av svavlet. I äldre tider då man hade träkolsmasugnar var svavelreningen av malmen viktig eftersom man därigenom kunde få ett tackjärn med låg svavelhalt. Skälet att man vill höja oxidationsgraden är att oxidationen i regel leder till en avsevärd höjning av reducibiliteten av malmen.

3.12.2. Agglomerering

Agglomerering är ett nödvändigt steg för att råvaran – malmen – ska erhålla den form som uppfyller de krav som det efterföljande steget reduktion ställer på den. För att nå en tillräckligt hög Fe-halt i malmen måste den anrikas vilket innebär att den sönderdelas (krossas och mals) till en finkornig produkt som kallas slig. Masugnens krav är att malmråvaran ska ha en jämn kornstorlek kring några cm, vara hållfast, inte generera för stor finandel vid hanteringen, vara porös och ha god reducerbarhet. De slaggkomponenter som medföljer i malmen ska vara begränsade i volymandelar och helst passa in i ett önskat slaggbildningsförlopp. Historiskt krossades en del malm till en kornstorlek som gjorde att malmen kunde sättas som styckemalm på masugnen. I dag agglomereras i princip all malm vid modern ståltillverkning.

Den dominerande agglomereringsmetoden i världen är sintring. Vid sintring värms material till en temperatur strax under smälttemperaturen. De små partiklarna kommer att sintra ihop till större aggregat. De mekanismer som uppträder vid sintringen är en viss begynnande lokal smältning och ytdiffusion.

Det finns i princip två sintringsmetoder, sugsintring och kulsintring. Vid sugsintring tillsätts koksgrus som bränsle och sligen läggs i en bädd som antänds varefter luft sugs genom bädden som åstadkommer en vandrande het zon. Historiskt utfördes sugsintringen satsvis i pannor och kallades pannelsinter. I dag utförs sugsintring i en kontinuerlig process som kallas bandsintring. Kulsinter framställs genom bränning av kulor som formats av slig i särskilda rullningstrummor. Bränningen sker i kontinuerliga ugnar. Bandsinter minskar kraftigt i användning till förmån för kulsinter (pellets). Skälet till minskningen är i första hand bandsinterverkens negativa miljöpåverkan genom höga emissioner. Kulsinter kan dessutom göras från en finare slig än bandsinter och har därigenom en högre utvecklingspotential.

Pelletisering är en process där magnetit (Fe_3O_4) blandas med slaggbildare, t.ex. kalk och dolomit, samt bindemedel, det vill säga bentonit, och rullas till kulor som därefter bränns ihop. Som bränsle i processen används till en stor del värmets från oxidationen av magnetit till hematit (Fe_2O_3) i stället för fossila bränslen som kol eller olja. Därigenom minskar utsläppen till atmosfären av koldioxid kraftigt jämfört med sintring av hematit. I de svenska – och finska – masugnarna används pellets som järnråvara.

3.12.3. Reduktion

Den kemiska definitionen av reduktion respektive oxidation är att ”reduktion av en atom innebär minskning av dess oxidationstal” medan ”oxidation av en atom innebär ökning av dess oxidationstal”. Eftersom grundprocessen är en elektronförskjutning måste alltid en reduktion vara sammankopplad med en oxidation.

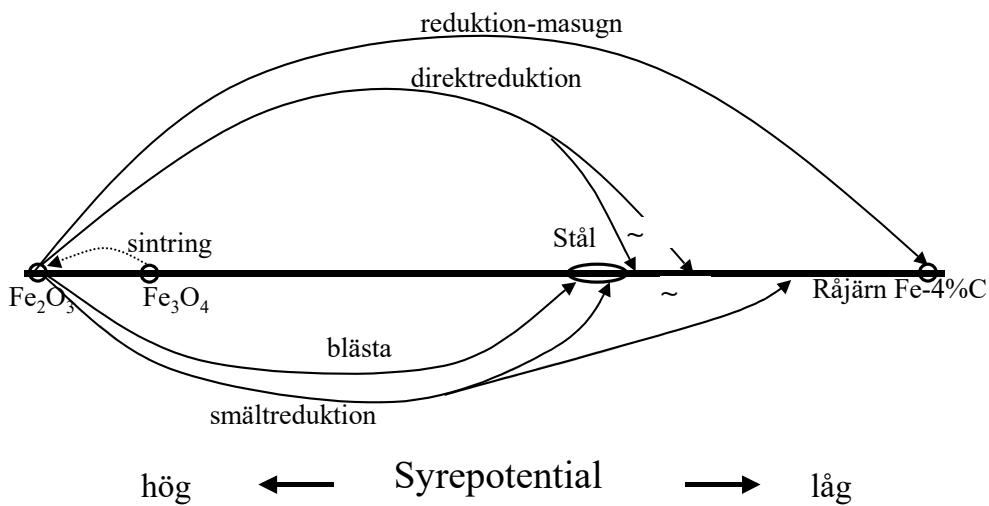
Den klart dominerande processen för reduktion av järnmalm är masugnen. Reduktionen utförs av CO gas i en gasblandning bestående av N₂, CO och CO₂. Kol används också för att generera det nödvändiga värmets för reduktionen. Reduktionen av sista steget från FeO till Fe sker med nödvändig hög andel CO i gasen och vid nödvändig hög temperatur, medan reduktion av de högre oxiderna Fe₃O₄ och Fe₂O₃ sker vid lägre temperatur och lägre halt CO i gasen. Det utreducerade järnet blir smält och kolas upp till cirka 4,5 % genom att det slutliga råjärnet står i kontakt med koksen.

Vid direktreduktion till järnsvamp utförs reduktionen i fast fas vid drygt 1000°C med reformerad gas CO-CH₄-blandning. Slutprodukten håller en låg kolhalt. I vissa processer innehåller slutprodukten en viss mindre andel oreducerat. Materialet omsmälts varvid eventuella oxidrester reduceras.

I framtiden kan man förvänta sig att reduktionen sker i en smältreduktionsprocess. I denna process smälts i princip oxiden vid cirka 1650°C varefter kol tillsätts som reducerar den smälta järnoxiden. Processen blir mycket högproduktiv räknat per processvolym och kräver ingen förbehandling av malm eller kolråvara. Kinetiken gynnas av den höga temperaturen. Styrningen kan troligen göras till en lägre kolhalt än vad fallet är vid masugnen.

Historiskt framställdes järn satsvis i en blästa. Reduktionen skedde i fast fas nära smältpunkten och utan överskott på kol så att lågkolhaltigt järn(=stål) erhöles direkt i en operation.

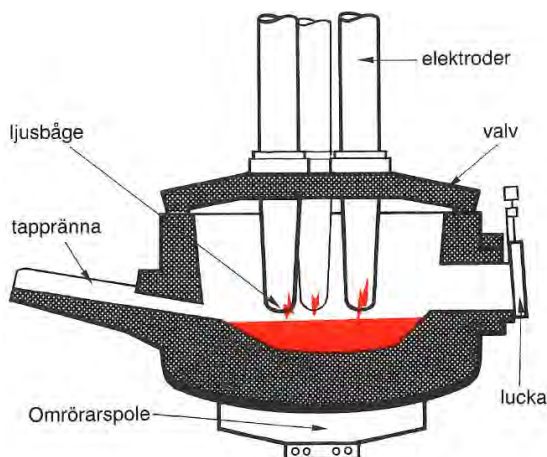
Vi har nu redogjort för fyra olika reduktionsprinciper för järnmalm och det kan vara intressant att jämföra dessa ur syrepotentialsynpunkt. Se figur 31. Man startar definitionsmässigt vid en hög syrepotential, Fe₂O₃ för att genom reduktionen drastiskt sänka den. Längst skjuter masugnen som med ett råjärn med 4,5 % kol får en mycket låg syrepotential. Direktreduktionen tar fram ett halvfabrikat där syrepotentialen kan variera. Både masugnens råjärn och direktreduktionens järnsvamp används i fortsatta processer som anpassas till den råvara de erhåller. Smältreduktionen skulle teoretiskt kunna hamna närmare en slutlig stålanalys men frågan är om det är möjligt att klara de nödvändiga styrningsfrågorna. Den forntida metoden med en blästa är den process som framstår som mest intelligent eftersom den gör stål direkt i en process.



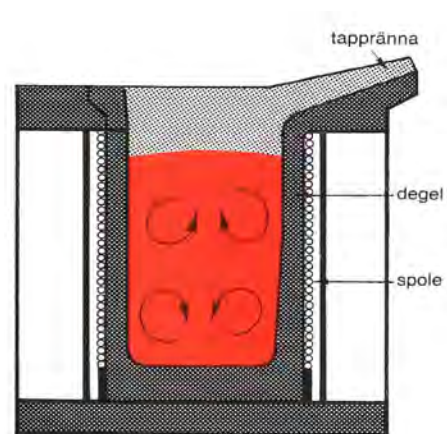
Figur 31. Schematiska språng i syrepotentialdiagrammet.

3.12.4. Smältning

Från masugnen fås ett smält råjärn som nästan uteslutande även processas vidare i smält form. En relativt stor andel, knappt 40 %, av all stålframställning görs dock genom smältning av skrot och järnsvamp. Historiskt var martinugnen den dominerande smältugnen. Det var en flamugn där värmen överfördes från en flamma till beskickningen. I modern stålframställning domineras smältningsförfarandet av elektriska ugnar. Det finns två typer, ljusbågsugn och HF-ugn (HF=högfrekvens, en induktionsugn). Ljusbågsugnen står för den stora andelen. I ljusbågsugnen överförs värmen genom strålning från de ljusbågar som uppträder mellan elektroder och skrotet i badet. Se figur 32 och figur 33.



Figur 32. Ljusbågsugn.



Figur 33. HF-ugn – induktionsugn.

Källa: Stål, utgiven av Järnbruksförbundet (nuvarande Stål- och Metallförbundet).

I takt med att raffineringsprocessen har förlagts utanför ljusbågsugnen i skänken eller skänkungnen har ljusbågsugnen kommit att utvecklas till en ”smältmaskin” med höga prestanda. Ljusbågsugnen är den klart dominerande ugnen för skrot- och järnsvampsmältning.

Vid HF-ugnen överförs värmen induktivt direkt i badet genom en induktionsslinga som omger badet. Detta är en elegant lösning men nackdelen är att man får en relativt kall vägg eftersom induktionsslingan är vattenkyld och inte kan ligga för långt utanför smältan. En annan nackdel är att den intensiva omröringen gör att det är svårt att skydda överytan mot kontakt med luften. På grund av att HF-ugnen är svår att skala upp används den i första hand för speciallegeringar med små tonnage.

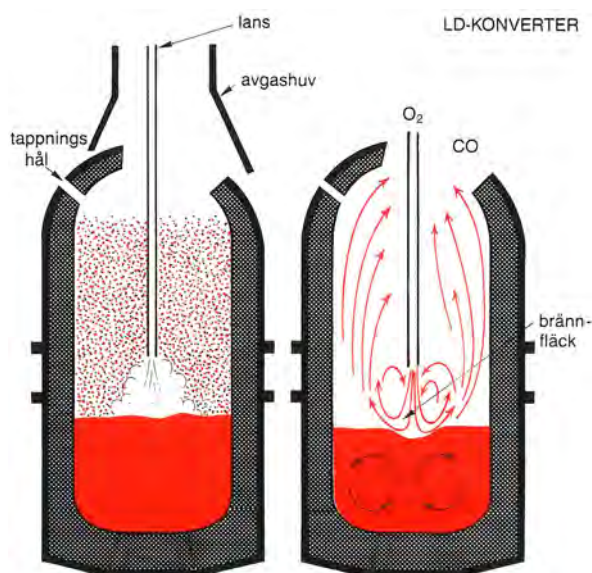
3.12.5. Konvertering

Med konvertering menas generellt en process som innebär att element i badet avlägsnas genom oxidation med gasblandningar innehållande syre. Historiskt användes oftast luft men i dagens processer används i regel ren syrgas eller en blandning av syre och argon. Vid stålframställning är det i första hand kolhalten som sänks vid konvertering. Kolhaltssänkningen kallas också färskning. Vid färskningen oxideras även andra element som Si och Mn samt vissa föroreningselement. Som syrekälla vid färskning kan även oxidiska malmer användas.

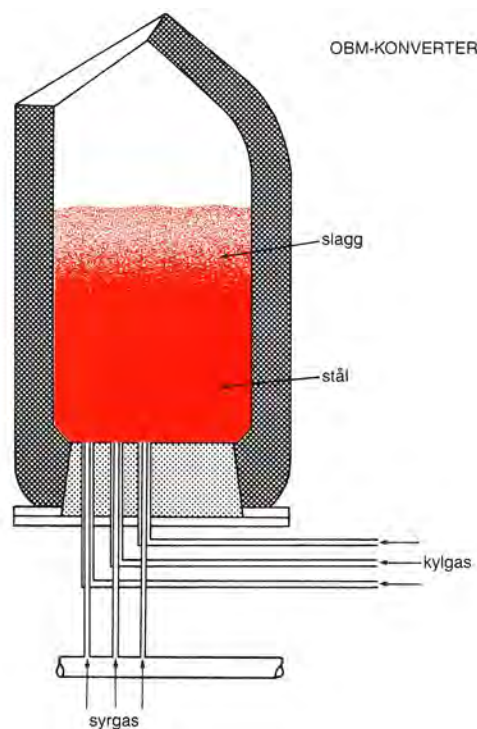
Konvertering förekommer som steget efter masugnen och vid produktion av rostfritt stål. Det flytande råjärnet från masugnen färskas ned från en nivå kring 4,5 % C. Även vid skrotbaserad kolstålstillverkning sker en viss färskning men från lägre kolhalter och semantiskt brukar man inte kalla denna färskning för konvertering även om det är samma metallurgiska förlopp. Vid tillverkning av rostfritt sker en konvertering från kolhalter kring nivån 1,0 %. Vid denna tillverkning görs smältan i regel i ljusbågsugn från skrot och legeringsämnen. Rostfri konvertering utmärks av att färskningsgasen är syre utspädd med argon eller vattenånga.

Praktiskt utförs konverteringen av det flytande råjärnet eller smältan i en konverter. Konvertern är i sig en enkel behållare, i princip ett reaktionskärl. Behållaren behöver kunna vridas för att man ska kunna beskicka den (hälla i smältan) och tappa den (hälla ur smältan). Syretillförseln sker i dagens moderna konverterar på två olika sätt.

1. Genom tillförsel med en uppifrån införd lans som mynnar ovanför badytan, se figur 34. Gashastigheten är så stor att det bildas en krater i smältan där huvuddelen av reaktionen sker. Även uppkastade slagg- och staldroppar bidrar till reaktionskinetiken.
2. Genom tillförsel i dysor som huvudsakligen sitter i botten av konvertern, se figur 35. Genom en mer utbredd kontaktyta i reaktionszonen erhålls en god omrörning.



Figur 34. LD-konverter



Figur 35. OBM-konverter

Källa: Stål, utgiven av Järnbruksförbundet (nuvarande Stål- och Metallförbundet).

Huvudreaktionen vid konvertering av råjärn är således oxidation av C till en blandning av CO och CO_2 som går bort som gas, så kallad färskning. Samtidigt kommer andra element som kisel, mangan och föroreningselement i första hand fosfor att oxideras till respektive oxider. Oxiderna bildar en slagg som flyter upp till ytan på badet. För att erhålla lämplig slagg görs tillsatser av så kallade slaggbildare. I första hand tillsätts CaO och MgO men även tillsatser som förbättrar viskositeten såsom CaF_2 (flusspat) kan göras.

Färskningsreaktionerna är exoterma, det vill säga de avger värme, vilket gör att smältans temperatur höjs. Vid råjärnskonvertering är detta nödvändigt eftersom smältans likvidustemperatur (smältpunkt) höjs från cirka 1150°C till cirka 1500°C när kolhalten sänks. Utöver temperaturhöjningen räcker energitillskottet även till för en insmältning av skrot. Insättning av stålskrot i konverten kylvlar färskningsprocessen och på så sätt kan temperaturen styras. Vanligt är att cirka 20 procent av innehållet i konvertern utgörs av smält skrot. Även vid konvertering av rostfritt finns ett utrymme att smälta in skrot.

Vid konvertering och då speciellt vid råjärnskonvertering startar man från en mycket låg syrepotential och höjer den över den nivå som man slutligen vill nå, se figur 31. Skälet att man kommer relativt högt i syrepotential är att man vid konverteringen i första hand styr mot önskad kolhalt (eller lägre) genom jämvikt med syre. Praktiskt innebär detta att de raffineringssteg som bör göras vid låg syrepotential t.ex. svavelrening lämpligen görs före konverteringen. Vidare innebär den relativt höga syrepotentialen att ett desoxidationsförfarande måste ingå i raffineringsprocessen som följer efter konverteringen.

3.12.6. Raffinering

Raffinering är det steg där målet är att minska föroreningsämnenas halter. Vid stålframställning sker huvudsakligen raffineringsteget efter konverteringen och direkt innan gjutningen. Det finns några undantag exempelvis den svavelrening som görs vid låg syrepotential före konverteringen. Vid konverteringen sker också en fosforrening och rening av andra föroreningsämnen under oxiderande förhållanden.

De raffineringsteg som utförs efter konvertering alternativt efter färskning görs i regel i skänk eller skänkgugn och kallas ibland för sekundärmetallurgi. Av speciellt intresse är desoxidationen eftersom syrepotentialen återigen sänks, se figur 31. Den syrepotential man har innan desoxidationen har bestämts av att man vid färskningen styrt till önskad kolhalt (eller lägre) genom jämvikt med syre. Detta ger en för hög syrehalt eftersom syre har låg löslighet i fast fas. Syrehalten och syrepotentialen sänks i regel genom att syre binds till starka syrebindare typ Si, Al eller Ca. Reaktionsprodukten kan vara fast eller flytande. Man kan även sänka syrepotentialen genom att utnyttja vakuum och då blir reaktionsprodukten gasformig koloxid.

Ett annat viktigt raffineringsmål är att sänka halten av lösta gaser som H och N. Detta görs genom bubbling med inert gas vanligtvis Ar varvid de lösta gaserna går bort i gasfas. Denna reningseffekt stärks kraftigt om smältans överyta samtidigt sätts under vakuum. Kinetiken förbättras genom att kontaktytan gas-smälta ökas kraftigt på grund av bubblornas expansion när de når ytan där trycket är lågt.

Andra viktiga operationer i samband med raffineringen är homogenisering av kemisk sammansättning och temperatur.

3.12.7. Rostfri ståltillverkning

Rostfritt stål består av minst 12 % krom (Cr), där det inlegerade kromet oxideras på stålytan till ett tätt skikt och därigenom försvårar vidare oxidation. Det finns flera olika typer av rostfritt stål. I tabell 1 visas de viktigaste närmare. Läs gärna vidare om rostfritt stål i del 12 av Jernkontorets utbildningspaket.

Tabell 1. Exempel på rostfria stålsorter. Sammansättning och applikationer.

<u>Rostfria stålsorter</u>	<u>Typsammansättning</u>	<u>Exempel på applikationer</u>
Martensitiska	13 % Cr; 0,2–1 % C	Knivar, saxar, rakblad och andra eggprodukter
Ferritiska (ASTM 40x)	18–20 % Cr, <0,1 % C	Allmänna ändamål, köksredskap
Austenitiska (18/8 eller 18/8 Mo) (ASTM 30x)	18 % Cr, 8 % Ni, 0,03 % C, ev. 3 % Mo, ev. 0,5 % Ti	I reducerande förhållanden, processindustri. Allmänt
Ferrit-austenitiska (duplexa)	22–32 % Cr, 4–9 % Ni, 4–5 % Mo, 0,2–0,3 % N	I närvaro av klorider, offshoreindustri
Nickelbaslegeringar	10–20 % Cr, 30–80 % Ni	Kärnkraftsändamål
”Nickelfria” austenitiska och duplexa stål (ASTM 20x)	18–20 % Cr, 0–4 % Ni, 5–15 % Mn, 0,2 % Mn	Allmänna ändamål, ersättning för t.ex. 18/8

Rostfritt stål ”uppfanns” på 1910-talet. Det fanns vid den tiden ett behov av att göra gevärspipor lättare och mer nötningsbeständiga och försök gjordes därför att legera vanligt stål med 6–15 % krom. Vid metallografiska undersökningar av materialet upptäcktes det att det motstod de syror som användes vid etsningen. Den nya legeringen kom därefter till stor användning för bland annat bestick, där det kunde ersätta silverpläterat kolstål.

Själva krområvaran framställs genom reduktion av kromhaltig malm med hjälp av kol eller kisel/aluminium. Att använda kol var billigt men det resulterade i en högkolhaltig krområvara som var svår att använda för tillverkning av lågkolhaltiga rostfria stålsorter. Fram till 1960-talet fanns, i huvudsak, två sätt att tillverka rostfritt stål. Antingen utgick man från ”rena” råvaror, det vill säga dyra aluminiumreducerade krområvaror och lågkolhaltigt järn vilket kunde smältas i t.ex. en induktionsugn eller kunde högkolhaltiga krområvaror användas och smältas tillsammans med stålskrot i en ljusbågsugn under samtidig syrgasblåsning. Syrgasen oxiderade kolet men samtidigt oxiderades också en del av kromet vilket medförde att den bildade slaggen måste reduceras med kisel, aluminium eller kiselkalcium.

Båda tillgängliga tillverkningsmetoder resulterade i ett dyrt material som bara fick användning i en begränsad mängd världen över. En viktig milstolpe för världens stålproduktion är innovationen av ett sätt att tillverka rostfritt stål i stor skala till en låg kostnad. På 1950-talet uppfanns det som kom att kallas för AOD-processen (argon oxygen decarburization), där ädelgasen argon – eller kvävgas – används för att sänka partialtrycket av syrgas i konvertern. De så kallade inertgaserna injiceras tillsammans med syrgasen i sidan eller i botten av konvertern.

Vid färskning, det vill säga syrgasblåsning, av rostfritt stål som innehåller kol förekommer två konkurrerande reaktioner: Oxidation av kol och oxidation av krom. Vad syrgasen väljer att reagera med bestäms av förhållandena i reaktionskärlet. Betrakta följande reaktioner och den jämvikt som råder under processen:



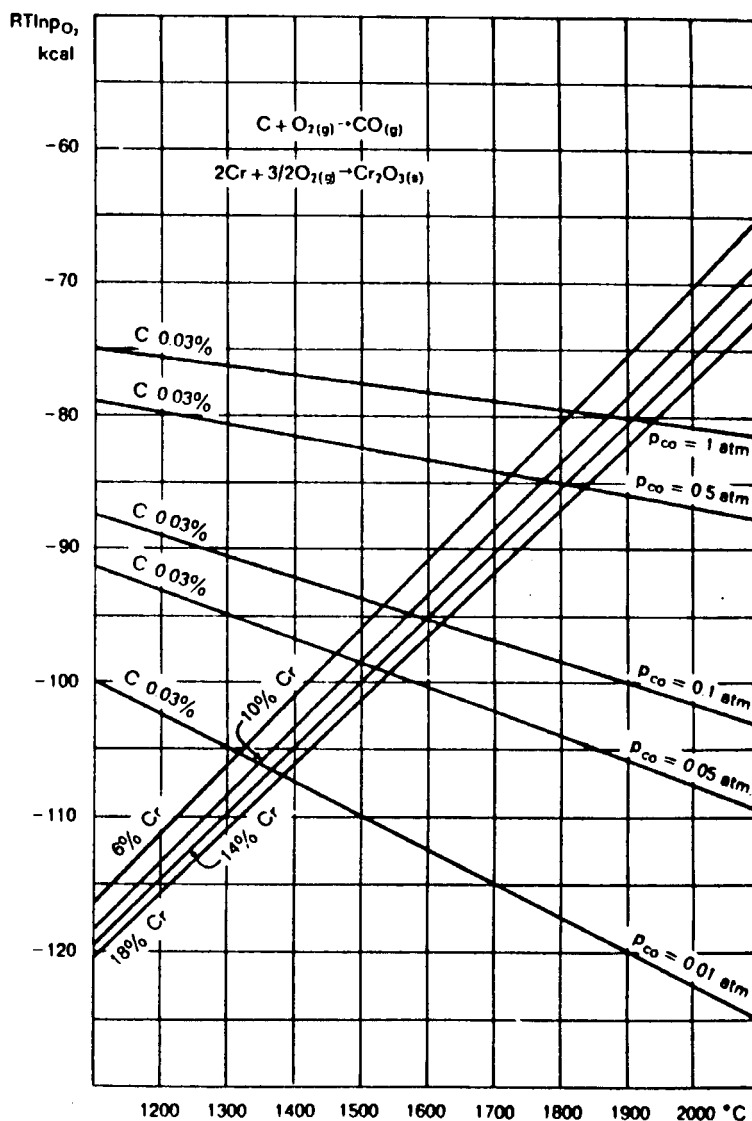
Reaktion (1) – reaktion (2) ger jämvikten (3)



Genom att spä ut den bildade koloxiden med en inert (reaktionsobenägen) gas, vanligen argon eller kvävgas, kan jämvikten (3) drivas åt höger, det vill säga oxidationen av kol till koloxid överväger och krom blir kvar inlöst i smältan. Ju lägre kolhalten sjunker, desto större andel inertgas behövs tillsammans med syrgasen för att inte kromoxidationen ska bli för kraftig. Ett normalt förfarande är att till en början, när kolhalten är hög, cirka 1 %, blåsa med t.ex. fem delar syrgas och en del inertgas. När kolhalten sjunker ändras förhållandet i steg till t.ex. 1/1, 1/3, för att slutligen hamna på 1/9.

I syrepotentialdiagrammet, figur 24 kan ses att linjerna för krom- resp. koloxidationen korsar varandra vid 1200°C. Vid högre temperaturer ökar avståndet mellan linjerna. Därav följer att oxidationen av kol gynnas vid höga temperaturer.

I figur 36 visas ett exempel på användning av syrepotentialdiagrammet. Där visas syrets benägenhet att oxidera krom relativt att oxidera kol vid några praktiska halter och partialtryck för CO.



Figur 36. Syrepotentialdiagram, exempel för rostfria stål.

Genom införandet av AOD-processen kunde användandet av billiga och högkolhaltiga råvaror kombineras med en storskalig och relativt billig process. Användningen – och produktionen – av rostfritt stål ökade därefter kraftigt vilket avspeglas i figur 18.

Under åren efter AOD-processens införande kom ytterligare varianter på processen där vakuum användes för att sänka syrgasens partialtryck, den så kallade VOD-processen (Vacuum Oxygen Decarburization) eller CLU (Creusot Loire Uddeholm),

där i den senare processen, syret i vattenångan används för att oxidera kol och den spjälkade vätgasen används som inertgas.

3.12.8. Gjutning

Som sista enhetsprocess kan man betrakta gjutningen. Ämnesområdet gjutning behandlas närmare i del 4 av Jernkontorets utbildningspaket.

Gjutningen är viktig eftersom en stor del av stålproduktens egenskaper grundläggs i gjutningen. Typiska egenskaper och fenomen som påverkas i gjutningen är:

- Jämnhet i sammansättning på makro- och mikronivå
- Ytegenskaper, frihet från ytsprickor och ojämnheter
- Inre sprickor förorsakade av stelningsspänningar
- Inneslutningsbilder (oxidiska och sulfidiska)
- Graden av ändeffekter
- Gasporer, såväl inre som i ytan
- Gjutstruktur, påverkar bland annat varmbearbetbarhet

Viktiga parametrar hos stålet inför gjutningen är:

- Rätt temperatur
- Låga halter av gaser med låg löslighet, H och N
- Låga lösta syrehalter
- Låga inneslutningsmängder (oxider)

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

