

JERNKONTORETS FORSKNING

Järn- och stålframställning

Skrotbaserad processmetallurgi

Jernkontorets utbildningspaket – del 3



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

| | |
|--|----------|
| 3. ELEKTROSTÅLPROCESSEN | 1 |
| 3.1. INLEDNING | 1 |
| 3.2. ALLMÄNT | 2 |
| 3.3. LJUSBÅGSUGNEN | 4 |
| 3.4. DEN METALLURGISKA PROCESSEN | 6 |
| 3.5. INSATSMATERIAL | 7 |
| 3.6. UTVECKLINGEN AV TEKNOLOGIN | 8 |
| 3.7. NORMAL LJUSBÅGSUGN (SINGELUGN) | 11 |
| 3.8. DUBBELUGNAR | 13 |
| 3.9. SCHAKTUGNAR | 14 |
| 3.10. UGNAR MED KONTINUERLIG CHARGERING | 15 |
| 3.11. INVERKAN PÅ MILJÖN | 18 |
| 3.12. SKÄNKMETALLURGI – SEKUNDÄRMETALLURGI | 20 |
| 3.13. TILLVERKNING AV ROSTFRIA STÅL. | 22 |
| 3.13.1. <i>Råvaror</i> | 23 |
| 3.13.2. <i>Processer</i> | 23 |
| 3.13.3. <i>AOD-processen</i> | 24 |
| 3.14. ELDFASTA MATERIAL | 26 |
| 3.15. LÄSTIPS | 28 |

3. ELEKTROSTÅLPROCESSEN

3.1. Inledning

När de första konvertermetoderna utvecklades under andra delen av 1800-talet var detta ett stort teknologiskt genombrott. Flytande stål i betydligt större tonnage kunde tillverkas än vad som var möjligt med degelstålsprocesserna. Större tonnage var en förutsättning för utvecklingen av ångmaskiner, järnväg, fartyg, militär utrustning, industriell processutrustning o.s.v.

Konvertermetodernas värmebalanser medgav ej att nämnvärda kvantiteter skrot kunde smältas. Sandvikens första bessemerverk utrustades t.ex. med 12 st degelstålsugnar för att kunna ta hand om det inom verket fallande skrotet.

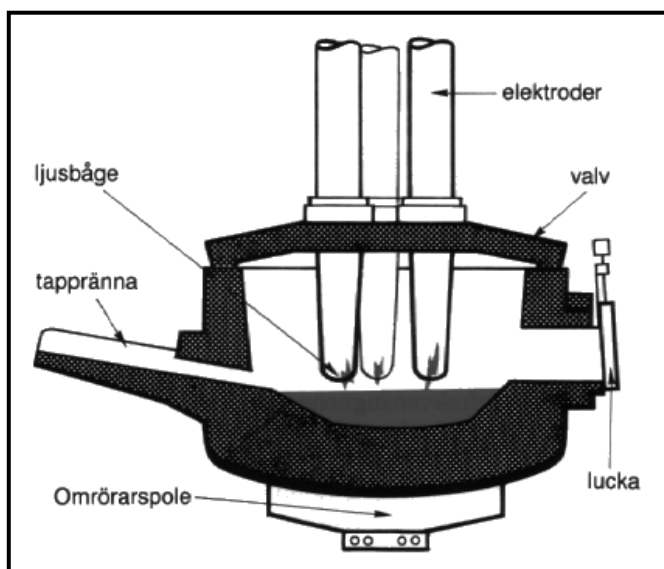
Behovet av ugnar för skrotsmältning drev därför fram utvecklingen av martinprocessen och elektrostålprocesserna varav ljusbågsugnen idag är den helt dominerande smältprocessen.

3.2. Allmänt

Försök med elektriskt värmda stålugnar påbörjades i slutet av 1800-talet men först under andra världskriget tog utvecklingen fart på grund av behovet av krigsmaterial. En bromsande faktor var tidigare priset för elektrisk kraft.

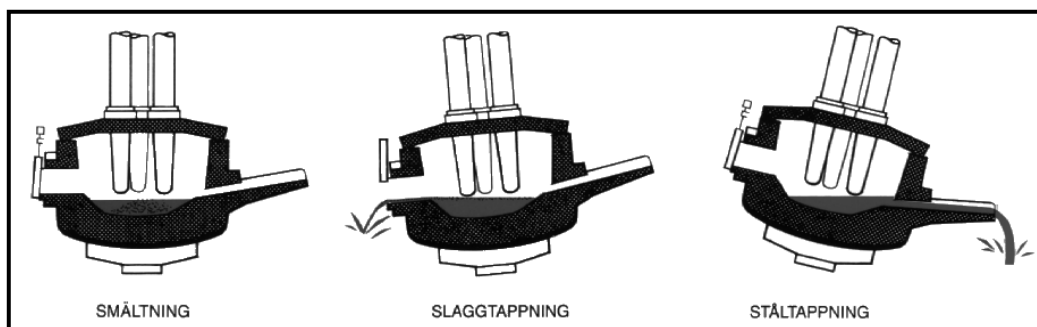
Den dominerande ugnstypen blev Héroult-ugnen vars konstruktion gjordes redan i början av seklet.

Den vanliga ljusbågsugnen, figur 1, består av ett cylindriskt ugnsrum med basisk infodrning.



Figur 1 Ljusbågsugn

Värmealstringen görs via ljusbågar mellan chargen och tre grafit Elektroder som går genom valvet. Elektrisk energi tillförs via en transformator. Ljusbågsugnen matas med tre-fas växelström. Mycket höga strömstyrkor kan förekomma. Ugnsfatet kan vickas framåt och bakåt för att möjliggöra tappning av stålet respektive avslagning, figur 2.



Figur 2 Tippbar ljusbågsugn

En del ugnar är utrustade med en induktiv omrörare under ugnsbotten för att underlätta bl.a. avslagning. Valvet med elektroder kan svängas åt sidan för att möjliggöra chargering, som sker i etapper genom att en korg med skrot sänks ned i ugn-

fatet. Tackjärn och legeringar kan ingå i beskickningen. Eftersom processen är basisk tillsätts bl.a kalk som slaggbildare med avsikt att åstadkomma fosforrening som förstärks om smältslaggen dras av. Kolfärskning sker med syrgas eller malmning. Som slutsteg i processen tillsätts kalk och slaggen reduceras med ferrokisel, aluminium eller kolpulver i avsikt att sänka halterna av svavel och syre. Under raffineringsperioden görs slutligen tillsatser av legeringar.

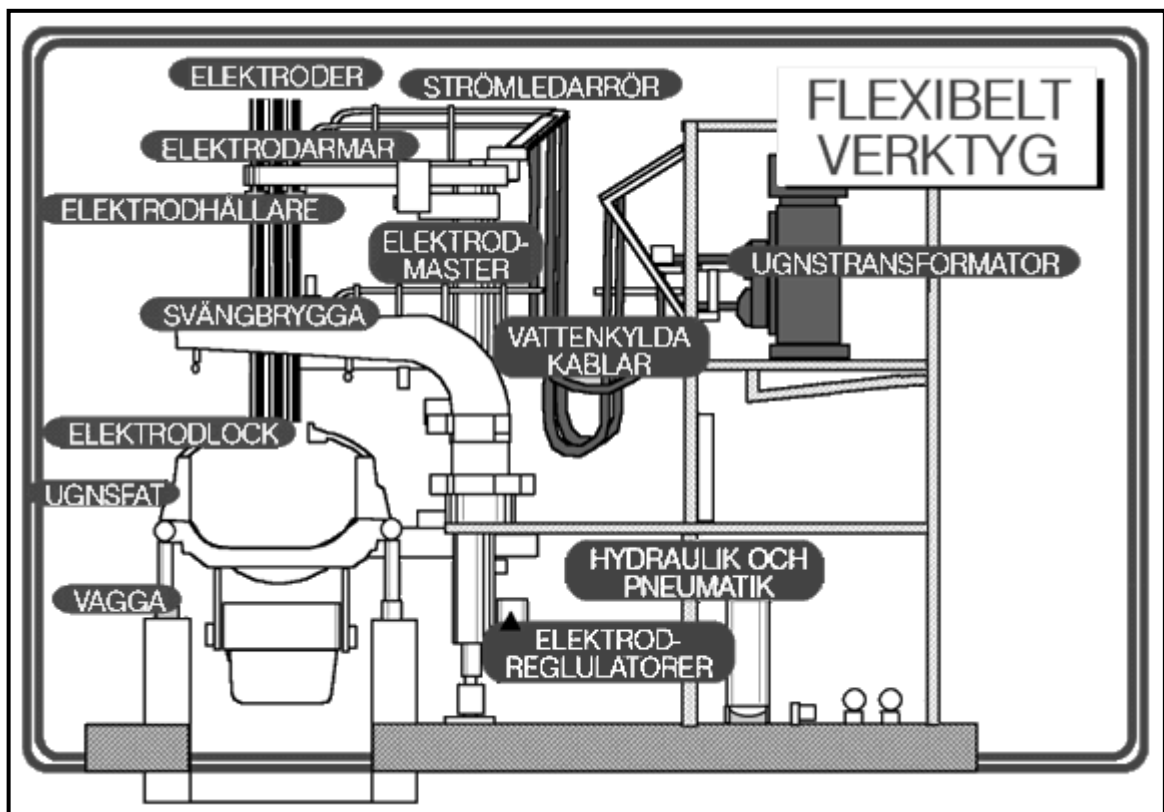
Processen har med tiden genomgått många förändringar. Införandet av sekundär metallurgi utanför stålugnen har medfört att ljusbågsugnen utnyttjas huvudsakligen som smältmaskin.

Mängden råstål som produceras i elektrisk ljusbågsugn, EAF, ökar årligen med 4-5% och förväntas uppgå till ca 400 miljoner ton år 2005 och svarar för mer än 50% av råstålproduktionen 2010. Ökningen av antalet minimills både i utvecklingsländer och den industrialiserade världen bidrar till den kraftiga ökningen tillsammans med investeringar i den befintliga stålindustrin. Investeringskostnaderna för ljusbågsugntechnik är dessutom betydligt mindre än för malmbaserad ståltillverkning.

3.3. Ljusbågsugnen

En ljusbågsugnsanläggning består av olika delar, vilka framgår av figur 3.

- Ugnstransformator
- Sekundärsystem
flexibla, vattenkylda kablar
elektrodarmar med strömledarrör
elektrodhållare
elektroder
- Elektrodmaster
- Elektrodreglerutrustning
- Ugnsfat
- Elektrodlock (ugnsvalv)
- Svängbrygga
- Hydraulisk och pneumatisk utrustning
- Instrumentering
- Vagga



Figur 3 Ljusbågsugnens olika delar

Tidigare matades ljusbågsugnen vanligen med tre-fas växelström. Denna ugnstyp benämns AC-ugn. Vid kraftverken transformeras den elektriska spänningen upp till högspänning för att minska effektförlusterna mellan producent och användare. I närheten av stålföretaget transformeras högspänningen ofta ned till 20 kV, vilket är

ugnstransformatorns primärspänning. Den transformeras ned till 265-884 V och strömstyrkan ökar till 50 kA. Ljusbågsspänningen kan regleras med en lindningsomkopplare. Vid högre spänning blir ljusbågarna längre med kraftig strålning åt sidorna som följd, vilket påskyndar nedsmältningen av skrotet. När allt är smält och ljusbågarna går mot det flytande stålbadet önskas kortare bågar som ger stark strålning mot badet för att höja temperaturen.

Vid tre-fas växelström arbetar man med tre olika effektbegrepp: skenbar effekt, reaktiv effekt och aktiv effekt. Med skenbar effekt menas den effekt som tillförs systemet, den mäts i MVA. Den reaktiva effekten utvecklas i ledningssystemet på grund av dess induktiva motstånd. Den anges i Mvar (megavoltamperereaktiv). Den aktiva effekten är den verksamma och uttrycks i kW eller MW. Förhållandet mellan den aktiva effekten och den skenbara anges som effektfaktorn, $\cos\phi$, som alltid är mindre än 1.

Den termiska verkningsgraden för en ljusbågsugn är ca 60% av tillförd effekt från transformatorn resten är förluster av olika slag.

3.4. Den metallurgiska processen

Det som utmärker traditionell ståltillverkning i ljusbågsugn är att man kan skapa både oxiderande och reducerande förhållande samt hålla ugnsatmosfären neutral. Genom malmning eller syrgasblåsning kan kolhalten sänkas varvid också en önskvärd omröring skapas. Den basiska slaggen medför att en effektiv fosforaffinering sker under oxidationsperioden, speciellt om avslagning sker. Ny slagg bereds genom tillsats av kalk, flusspat och ett reduktionsmedel för att reducera kvarvarande FeO i slaggen. Används ferrokisel som reduktionsmedel får man en s.k. ”vit slagg” som både verkar svavelraffinerande och desoxiderande. Uttaget prov på slaggen sönderfaller till ett vitt pulver när den har rätt sammansättning. Kol kan också användas som reduktionsmedel varvid en s.k. ”karbidslagge” erhålls, den är ej sönderfallande. Under desoxidationsperioden tillsätts legeringsämnen och temperaturen slutjusteras. Negativt är att viss kväve- och väteupptagning kan ske under denna period.

3.5. Insatsmaterial

Det förekommer tre olika typer av skrot nämligen: skrot som faller inom det egna verket, skrot som faller hos stålverkets kunder och slutligen s.k. köpskrot med mer eller mindre känt ursprung t.ex. skrotade bilar och hushållsmaskiner. De två första skrotsorterna har känd analys och är av känd kvalitet och benämns av flera företag som returstål. På grund av förbättrade och förfinade tillverkningsmetoder kan man förvänta sig att mängden returstål minskar något, men att mängden köpskrot kommer att öka till följd av kortare cykeltider. Detta medför tillsammans med den kraftiga utbyggnaden av skrotsmältning att prognosen pekar på en skrotbrist på ca 50 miljoner ton år 2000.

Den ökade skrotbristen är ett starkt motiv för att satsa på tillverkning av alternativa järnråvaror som substitut för skrot. Midrexprocessen för direktreduktion med naturgas är den ledande men HYL III är också en viktig variant. Samtidigt pågår utveckling av andra processer t.ex. för tillverkning järnkarbid med naturgas. För tillverkning av råjärnssubstitut sker också en intensiv utveckling. Tillverkning av direktreducerat järn uppgår till ca 40 miljoner ton/år och tillväxten är mycket stark.

Andra råvaror kan vara tackjärn, kallt eller flytande, och gjutjärn som tillför chargin önskad kolhalt. Detta kan också med fördel ske senare genom injektion av kolpulver i smältan.

För att göra skrotet lämpligt för chargering pressas skrymmande komponenter som bilar och kylskåp ihop. Vissa typer av skrot får passera en "skredder" som fragmenterar skrotet varefter en separering kan ske av oönskade ämnen och komponenter av koppar och tenn samtidigt som skrotet får lämplig storlek för chargering. I Sverige finns en överenskommelse mellan skrothandlarna och stålföretagen att skrotet skall indelas i klasser bestämda av sammansättning, form och storlek. Överenskommelsen finns dokumenterad i den så kallade Skrotboken uppdelad på en för olegerat och en för legerat stål. Dessutom finns en överenskommelse för rostfritt stålskrot. Varje skrotklass har ett bestämt pris.

Andra råvaror som behövs i det metallurgiska förfarandet är: slaggråvarorna bränd kalk, bränd dolomit (ca 56% CaO och ca 38% MgO) och flusspat. Dolomit är ett komplement till kalk och är även positivt för att minska foderslitaget. Flusspat med ca 85% CaF₂ har som huvudsakliga uppgift att göra slaggen lättfluten och reaktiv.

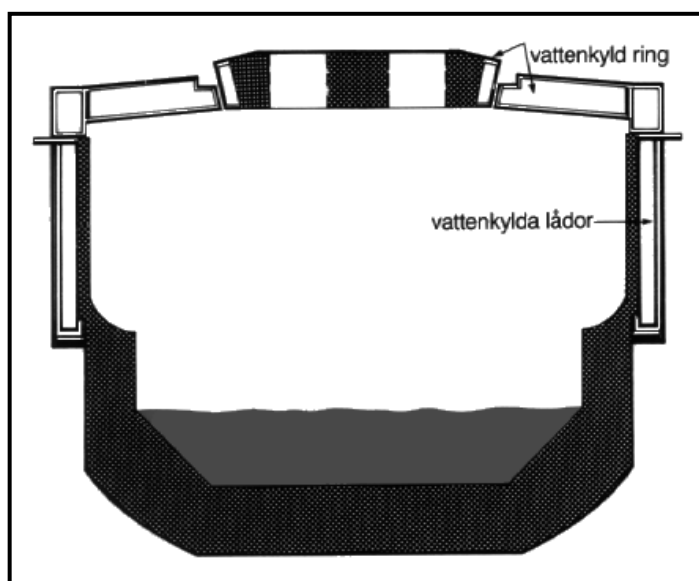
3.6. Utvecklingen av teknologin

Ljusbågsugnen och processen har genomgått åtskilliga förändringar sedan 1960-talet då en 50-tons ugn hade en transformatorcapacitet på ca 300 kVA/ton vilket kan jämföras med över 1000 kVA/ton vid slutet av seklet.

Drivkraften för att utveckla teknologin har varit:

- öka produktiviteten
- öka effektutnyttningen under processen
- minska energiförbrukningen
- minska elektroförbrukningen
- minska foderslitaget
- minska kostnaderna för arbetskraften
- krav på bättre inre och yttre miljö
- anpassning till förändrad råvarutillgång

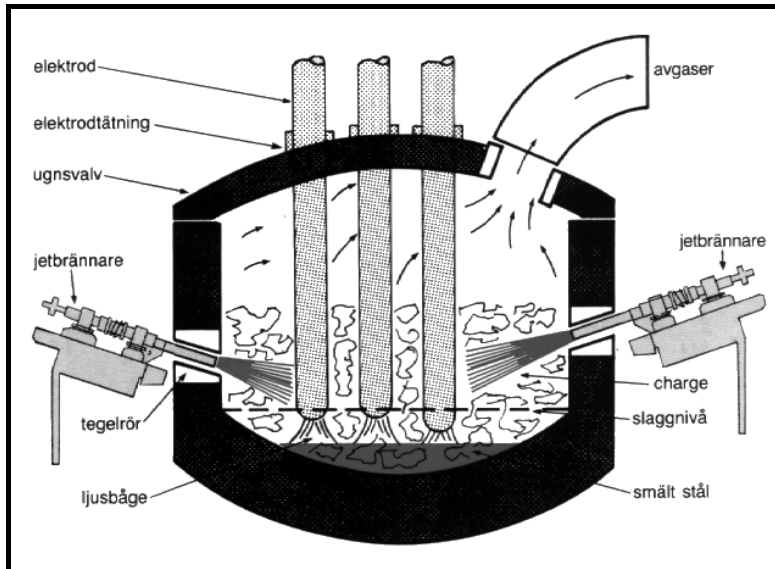
Ökad produktivitet uppnås bland annat med ökad effekt. Ugnar med hög effekt minst 0,5 MW/ton benämns UHP-ugnar (Ultra High Power), figur 4. Den höga effekten ger en hög produktivitet men den medför också att ugnens infodring blir utsatt för intensiv strålning från ljusbågarna med stort foderslitage som följd.



Figur 4 UHP-ugn

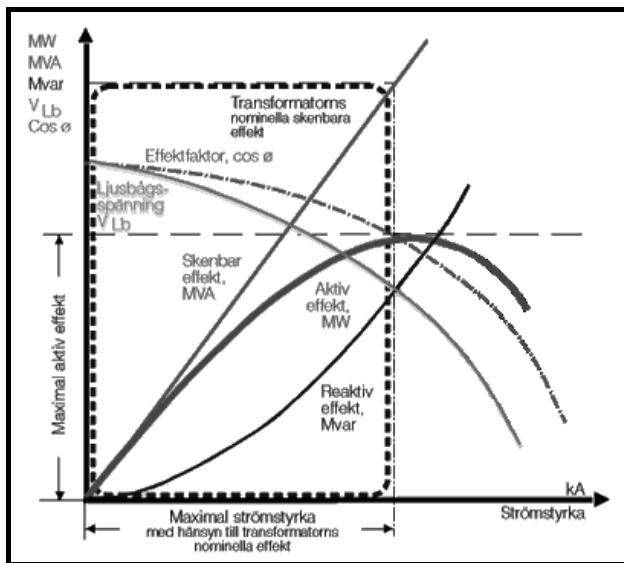
För att motverka detta har flera åtgärder vidtagits. Installation av vattenkylda paneler i ugnsväggarna har medfört sänkta kostnader för foderslitaget. Även stor del av valvet är vattenkyld. En annan åtgärd har varit att införa praxis med en skummande slagg. Genom samtidig injektion av kolpulver och syrgas åstadkommer gasutvecklingen att slaggen skummar varvid ugnsväggarna avskärmas från strålningen från ljusbågarna. För att få en bra skummande slagg krävs också att slaggen har rätt basicitet och en väl avvägd flytbarhet. Genom den ökade effekten blir skrotsmält-

ningen ojämn i ugnsrummet. De vattenkylda panelerna medverkar till denna tendens. Mitt emot elektrodernas ljusbågar uppkommer heta ytor. Där avståndet till ugnsväggen är kortast smälter skrot fortare och slitaget blir större vid dessa s.k. ”hot spots”. Mellanliggande skrot smälter långsammare och för att göra nedsmältningen jämnare installeras ofta oxy-fuel brännare i ugnsväggen och i slaggluckan, figur5.



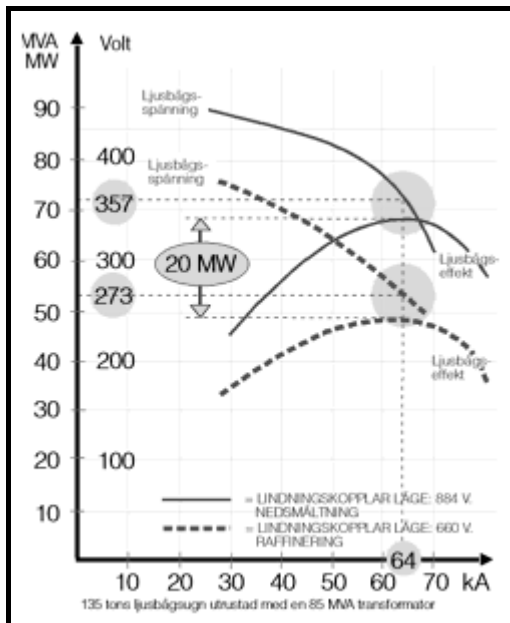
Figur 5 Ljusbågsugn med oxy-fuel brännare

Strålningen från ljusbågarna skall smälta besickningen och efter ”allt smält” höja stålets temperatur och så litet som möjligt påverka den elfasta infodringen. Därför måste effektinmatningen styras för optimalt utnyttjande. Av figur 6 framgår att maximal effekt tillförs vid en viss strömstyrka, ökas strömmen ytterligare minskar den aktiva effekten och risken för överhettning av transformatorn ökar.



Figur 6 Belastningskurvor

Ljusbåglängden måste anpassas efter förhållande i ugnen genom reglering av ljusbågsspänningen, med bibehållen effekt betyder detta också en förändring av strömstyrkan. Av figur 7 framgår att både ljusbågsspänningen och effektfaktorn sjunker med ökad strömstyrka därför är det ej alls säkert att maximal aktiv effekt alltid är bäst, ström och spänning bör i stället anpassas till förhållanden i ugnen.



Figur 7 Arbetspunkter vid nessimtning och raffinering

Beroende på skrotet sker chargeringen med 2 alternativt 3 skrotkorgar. Tillförd energi måste styras så att skrotet smälter snabbt utan att ugnsväggarna exponeras. Tillförs för lite energi får inte nästföljande skrotkorg plats med sänkt produktivitet som följd. Både effekt och energistyrning sker idag med hjälp av matematiska modeller inlagda i datorer. Metallurgiska Forskningsstationen i Luleå har utvecklat ett system MEFARC som har installerats vid flera stålverk.

I slutet av 1980-talet introducerades likströmsugnen ,DC-ugn, i industriell skala, vilket har medfört en intensiv utveckling av ljusbågsugnsprocessen. Tre olika ugns-typer har etablerats:

- Normal ljusbågsugn med toppchargering
- Dubbelugn med toppchargering
- Ugn med kontinuerlig chargering

Den tid då effekttillförseln är avstängd för chargering av råvaror och avlagning av det elffasta fodret samt är reducerad under färskning och raffinering har minskat. För en singelugn är effekttillförseln inkopplad 70-75% av tiden från tappning till tappning, motsvarande siffra för en ugn med kontinuerlig chargering är 90%. Den dominerande typen av ljusbågsugnen är fortfarande singelugnen i växelströmutförande. Likström används för alla tre ugns typerna.

3.7. Normal ljusbågsugn (singelugn)

Processen omfattar under tiden tappning till tappning följande tempon vid två-korgs charging: charging av första korgen, smältning, andra korgen, smältning, fosforaffinering, färskning, reducerande slag med svavelaffinering och tappning samt avlagning. För att utnyttja tiden för inkoppling av tillgänglig effekt kan raffinering, desoxidation och slutjustering av analys och gjuttemperatur förläggas utanför den egentliga ljusbågsugnen. Detta kallas skänketmetallurgi eller sekundärmetallurgi och kommer att behandlas i ett separat avsnitt.

En jämförelse mellan AC-ugnar och DC-ugnar visar att den senare har en elektrod-förbrukning på 1-1,5 kg/ton mot AC-ugnens 2-3 kg/ton, men även värden under 2 kg/ton förekommer för det senare alternativet. Skillnaden i kostnaden för elektrod-förbrukningen minskas dock av att AC-ugnar använder elektroder med en diameter på 600 mm, DC-ugnar använder ofta elektroder med en diameter mellan 700 och 750 mm vilka är ca 20% dyrare. Förekomsten av botten elektrod i DC-ugnarna medför högre kostnader för konstruktion och underhåll vilket till viss del kompenseras av lägre kostnader för eldfast material.

Både den inre och yttre ljudnivån runt en ljusbågsugn är mycket besvärande vid korgcharging och när effekten är inkopplad. En DC-ugn orsakar 50-60% mindre ljudnivå än en AC-ugn, men olika konstruktiva åtgärder pågår för att minska skillnaden. Personalen skyddas mot buller genom att ugnen styrs från ljudisolerade rum och det närliggande samhället avskärmas med hjälp av vallar och höga murar.

Omröring av stålbadet är viktigt för utjämning av temperatur och analys speciellt i badets perifera delar. Vid kontinuerlig charging är omröring av betydelse för att undvika flytande klumpar av osmält material. I DC-ugnar fås en elektromagnetisk omröring när strömmen passerar badet. I en AC-ugn krävs omröring med inert gas genom dysor i ugnsbotten för att badet skall bli lika homogent som i en DC-ugn. Om kolpulver och syrgas injiceras via dysor under badytan skapas en effektiv omröring. Detsamma gäller när fossila bränslen och syrgas injiceras.

En ytterligare metod att förbättra ljusbågsugnens teknologi och därigenom minska tillverkningskostnaderna är att förbränna CO med syrgas inom ugnen. Samtidigt förbränns eventuellt förekommande vätgas. Processen kan styras online genom mätning av avgasernas analys. Utvecklingen av efterförbränning är en direkt följd av införandet av skummande slag genom injektion av kolpulver och syrgas.

Många fördelar kan uppnås om ljusbågsugnen görs tät för att undvika inläckage av luft. Mängden kväve, som måste värmas, minskar, metallutbytet ökar genom minskad oxidation och energiförbrukningen för utsug av avgaser minskar. En ytterligare fördel är att både NO_x och stoftmängden sjunker.

I tabell 1 visas jämförande driftsresultat för en DC-ugn och en AC-ugn. Värdena har sammanställts från uppgifter i litteraturen. Av tabellen framgår den något högre elektrod-förbrukningen för AC-ugn. I litteraturen anges den till 1,8-3 kg/ton. Vid samma ugnspraxis är energiförbrukningen ungefär densamma för de två ugnstyperna. Om efterförbränning tillämpas kan energiförbrukningen gå under 400 kW/ton och chargetiden bli kortare än en timme. Samtidigt ökar syrgasförbrukningen till över 30 m^3/ton . Den kan uppgå till 50 m^3/ton för efterförbränning och skummande slag.

Produktionskapaciteten för moderna ugnar ligger strax under 1 miljon ton/år. Av litteraturen framgår att vid en kombination av efterförbränning och injektion av syrgas och fossila bränslen har en energibesparing gjorts på mer än 25 %. Verkligt låga värden 270 kWh/ton rapporteras från en 155 tons ugn där en viss mängd flytande tackjärn chargerades under nedsmältning av skrot och direktreducerat järn.

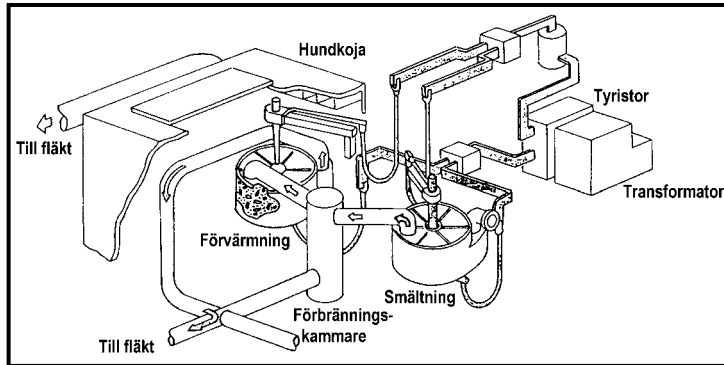
Tabell 1. Jämförelse mellan driftsdata.

| Ungstyp | DC-ugn | AC-ugn |
|--|--------|--------|
| Transformatoreffekt, MVA | 100 | 105 |
| Max. sek. spänning, V | 800 | 960 |
| % skrot i beskickningen | 100 | 100 |
| Chargevikt, ton | 120 | 115 |
| Tapp-tapp, min | 53 | 52 |
| Energiförbrukning, kWh/ton | 480 | 430 |
| Syrgasförbrukning, m ³ /ton | 20 | 25 |
| Oljeförbrukning, m ³ /ton | | 5 |
| Elektrodförbrukning, kg/ton | 1,5 | 2,1 |
| Elektroddiameter, mm | 700 | 600 |
| Produktion miljoner, ton/år | 0,75 | 0,89 |
| Produktivitet, ton/h | 130 | 112 |

3.8. Dubbelugnar

Dubbelugnen är en utveckling för att minska den tid då effekten ej är inkopplad. De första ugnarna togs i industriell drift utomlands i början av 1990-talet, figur 8.

Ugnarna är utrustade med två ugnsfat och matas från samma elektriska system. Vanligast är att ugnarna är byggda för likström men även AC-varianter förekommer.

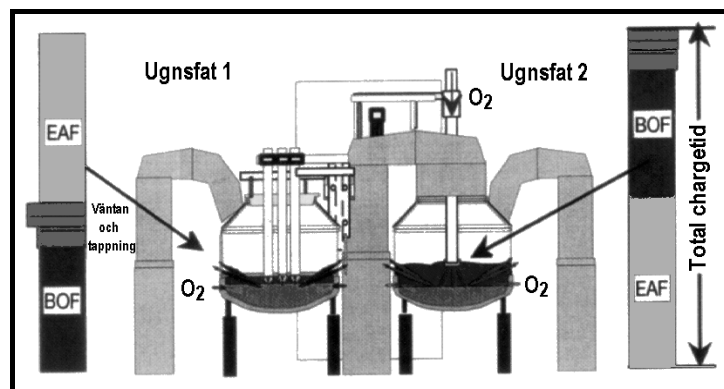


Figur 8 Dubbelugn Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)

När chargen är smält i det ena ugnen chargeras en korg med järnråvara i den andra. När den första ugnen är klar för att tappa flyttas elektroden till den andra ugnen och smältningen startas. Detta förfarande har minskat tiden när effekten ej är inkopplad med 6-10 minuter och en påtaglig ökning av produktiviteten har erhållits samtidigt med en minskad energiförbrukning till ca 400 kWh/ton.

Det finns flera varianter av dubbelugnen. Både separata och svängbara elektrodhållare förekommer. En annan variant är att leda avgaserna från den enhet som smälter till den andra ugnen för att förvärma skrotet. Även förvärmning med oljebrännare praktiseras.

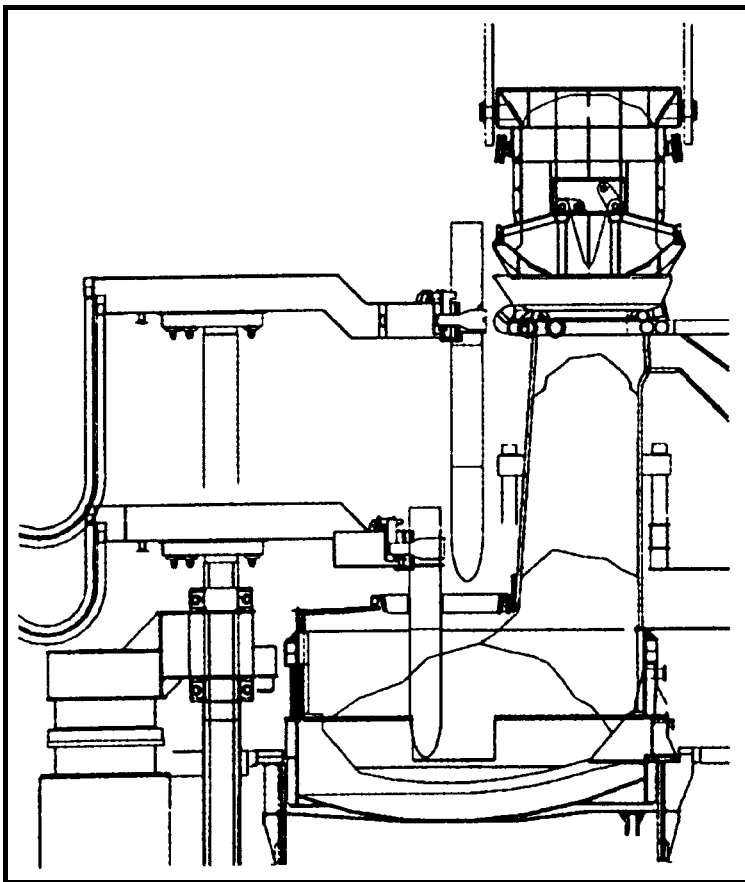
Vissa hybridvarianter förekommer, figur 9. En ugnsenhet arbetar med AC alternativt DC och chargerats med kallt eller förvämt material. Den andra fungerar som en konverter och chargerats med flytande tackjärn. Den har en vertikal topplans varigenom höga färskningshastigheter på 0,1%C/ min kan uppnås. Hybridugnarna är mycket flexibla både när det gäller råvaror och använda energislag.



Figur 9 Hybridugn Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)

3.9. Schaktugnar

I början av 1990-talet introducerade Fuchs System Inc. ljusbågsugnar antingen i DC- eller AC-utförande utrustade för förvärmning av skrotet, figur 10. Ugnarna har antingen ett eller två vattenkylda schakt där i enschaktsvarianten ca 40% av skrotet förvärms av det fysiska och kemiska värmet från ugnens avgaser. Resterande skrot chargerats direkt i ugnen före smältningens början. Oxy-fuel brännare är placerade vid schaktets botten och medverkar vid förvärmningen av skrotet. Brännarna är mycket effektiva eftersom de är omgivna av skrot en längre tid på grund av sin placering nederst i schaktet. I en ugn med dubbla schakt kan allt skrot förvärmas. Driftresultat från ett antal schaktugnar visar på en elektrisk energiförbrukning på ca 350 kWh/ton.



Figur 10 Ljusbågsugn med ett schakt enligt Fuchs System Inc
Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)

3.10. Ugnar med kontinuerlig chargering

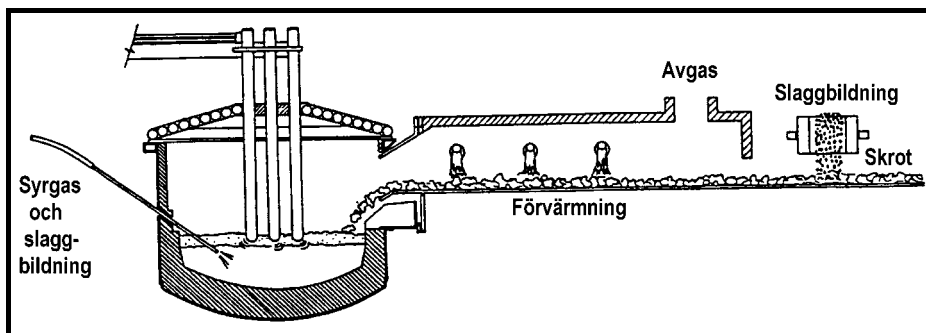
Denna nya generation av ljusbågsugnar är utrustade för kontinuerlig chargering av skrot och andra järnråvaror och ibland även slaggbildare. Olika konstruktiva lösningar för skrotets förvärmning förekommer.

Fördelarna med kontinuerlig chargering är:

- mindre energiförbrukning
- effektutnyttjning upp emot 100%
- mycket jämn elektrisk funktion
- möjlighet till kontinuerlig tillverkning

Eftersom ugnen ej behöver öppnas vid chargering och man kan förutse kontinuerlig tappning är denna ugnstyp en tänkbar framtida enhet i en löpande produktionskedja från skrot till färdig produkt.

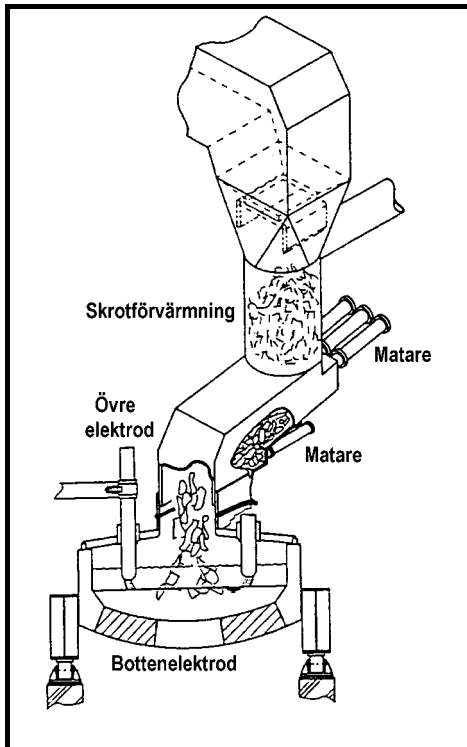
Under början av 1990-talet installerades några ugnar enligt Consteel processen, figur 11. Råvarorna chargeras via ett horisontellt transportband som går genom en förvärmningsugn utrustad med en sluss på ingångssidan.



Figur 11 Principbild för Consteel processen *Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)*

Skrotet värms till 500-600⁰C av fysiskt och kemiskt värme av avgaserna från ljusbågsugnen varefter skrotet faller ned i ugnen. Både AC- och DC-utförande förekommer. Processen har stor flexibilitet när det gäller val av råvaror. Även flytande tackjärn kan chargeras kontinuerligt. Elektrisk energiförbrukning anges vara mellan 310-390 kWh/ton, syrgasförbrukningen 30-35 m³/ton och produktiviteten för en 180 tons ugn 230 ton/h.

En variant med ett centralt vertikalt schakt för inmatning och förvärmning av skrotet samt ett ovalt ugnsfat med två vertikala elektroder har utvecklats av IHI och ABB i ett DC-utförande, figur 12. Skrotet förvärms till 800⁰C och avgaserna lämnar schaktet med en temperatur av 200⁰C. Ett system finns för inmatning av det förvärmda skrotet i utrymmet mellan elektroderna där energin från ljusbågarna är koncentrerad. Därför krävs ej vattenkylda paneler i väggarna.

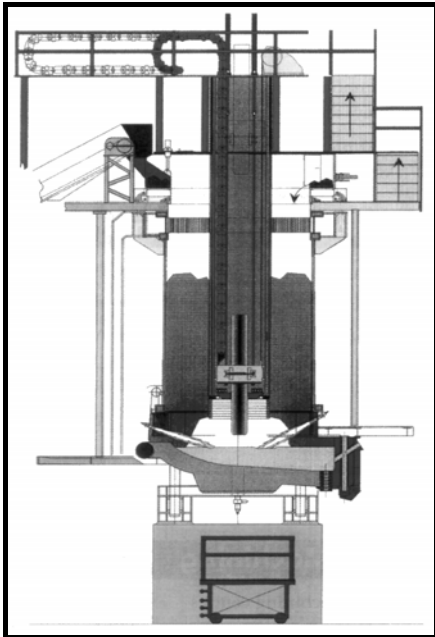


Figur 12 Ljusbågsugn med ett schakt och två elektroder enligt IHI och ABB
Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)

Fördelarna med denna lösning anges vara:

- elektrisk energiförbrukning ca 250 kWh/ton
- samtidigt med injektion av 25 kg/ton kolpulver och 33 m³/ton syrgas
- lägre ljudnivå
- ökad ljusbågsstabilitet
- minskat utsläpp av stoft

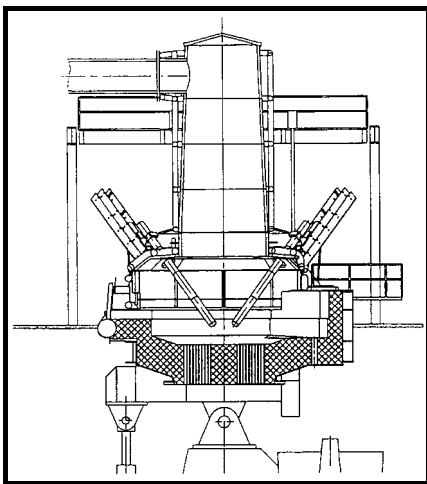
Mannesmans Demag har en variant som fått namnet Contiarc, figur 13. I prototypstadiet är det en DC-ljusbågsugn med ett vertikalt cirkulärt schakt som omger den centrala grafitelektroden.



Figur 13 Contiarc ugn enligt MHD Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)

Skrot tillförs i det cirkulära schaktet i samma takt som smältningen sker. Vid passagen genom schaktet förvärms skrotet av ugnens avgaser, som lämnar schaktet och går till gasrening. Eftersom det alltid finns skrot som skyddar ugnsväggarna kan ljusbågeffekten vara maximal utan problem för det eldfasta materialet. Ugnen är i det närmast tät vilket medför lågt inläckage av luft, den tappas via botten och effekten kan vara inkopplad nästan 100% av tiden.

Även Voest-Alpine har en variant, som har testats i pilotskala, figur 14. Den har ett vertikalt centralt schakt för skrotförvärmning ovanpå en tippbar ljusbågsugn i DC-utförande med fyra elektroder, som sitter i valvet utanför förvärmningsschaktet och lutar ca 45° mot vertikalkplanet. De riktar mot det kontinuerligt inmatade skrotet. Man planerar att sätta in syrgaslansar för efterförbränning.



Figur 14 Comelt ugn enligt VAI Brascugli, G et al. (MPT International, 1997:2)

3.11. Inverkan på miljön

I de toppchargerade ugnarna uppkommer under nedsmältningsperioden stora och oregelbundna variationer i ström och spänning på grund av kortslutningar mellan skrot och elektroder, vilket leder till hög ljudnivå och besvärande övertoner. Både personalen och omgivande samhälle måste skyddas mot detta. I en ugn med kontinuerlig inmatning av skrot är ljusbågen mer stabil till följd av den platta badytan. Erfarenheter visar att spänningsvariationerna är 30-40% mindre i de kontinuerligt chargerade ugnarna.

Avgasutsläppen från ljusbågsugnar måste följa regler uppsatta av tillståndsgivande myndigheter. Reglerna har stegvis skärpts med tiden.

Följande miljöpåverkande gaser och ämnen kan ingå i avgaserna:

- VOC, NO_x och CO
- dioxiner (polyklorerade dibenzo-p-dioxiner. PCDD)
- furaner (polyklorerade dibenzo-furaner. PCDF)
- EAF-stoft

VOC består av organiska ämnen som kommer från skrotet. Dioxiner och furaner kan bildas av olika organiska ämnen vid temperaturer mellan 200⁰C och 480⁰C. Vid hög temperatur kan ämnena tillsammans med övergångsformer oxideras till CO₂ och H₂O. Om förbränningen inte är helt fullständig måste avgaserna kylas ned mycket snabbt från 500-600⁰C till 200⁰C för att undvika bildning av nya dioxiner.

De olika ämnena i avgaserna är olika farliga för miljön och människorna. Huvudsakligen kommer de från användning av brännare, efterförbränning och skrotförvärmning. För en normal ljusbågsugn är bästa lösningen oxiderande förbränning vid 950-1000⁰C inom eller utanför ugnen följt av en snabb kylning av gasen varefter avgaserna får genomgå torr- och våtrening. CO-halten måste vara låg i avgaserna av miljöskäl. Om CO-halten är lägre än 50mg/m³ är det ett tecken på att VOC och dioxiner samt övergångsformer är effektivt förbrända.

Processvarianterna med skrotförvärmning karaktäriseras av mindre stoft i avgaserna. I Consteel som har horisontell skrotförvärmning är avgashastigheten låg, vilket leder till att stoftet avskiljs och mängden stoft blir 30% mindre än i normal ljusbågsugn. I schaktugnar fastnar stoftet på skrotet och minskningen blir ca 20%. I Contiarc med dess högre skrotdensitet har en minskning på 40% uppmätts.

Stoftet från ljusbågsugnar innehåller oxider av Zn, Pb, Cd, Fe, Si samt vid tillverkning av rostfritt också oxider av Cr och Ni och ev. Mo. Dessutom ingår i stoftet vissa mängder av slaggens beståndsdelar. Tidigare kunde företagen få rättighet att deponera stoft på ett reglerat sätt. Det ökade miljömedvetandet har lett till att metoder har utvecklats för att återföra värdefulla beståndsdelar i stoftet. Både hydrometallurgiska och smältmetallurgiska metoder förekommer. Stora företag inrättar egna återvinningsanläggningar, mindre anlitar speciella företag som betjänar flera stålverk.

De hydrometallurgiska processerna utnyttjar lakning och elektrolys. De smältmetallurgiska tillämpar plasmateknik för att driva bort flyktiga oxider varefter Cr, Ni

och Fe smälts till en ferrolegering som går tillbaka till stålverken. Slaggbildare kan användas som fyllnadsmaterial eller deponeras.

3.12. Skänkmetsallurgi – Sekundärmetsallurgi

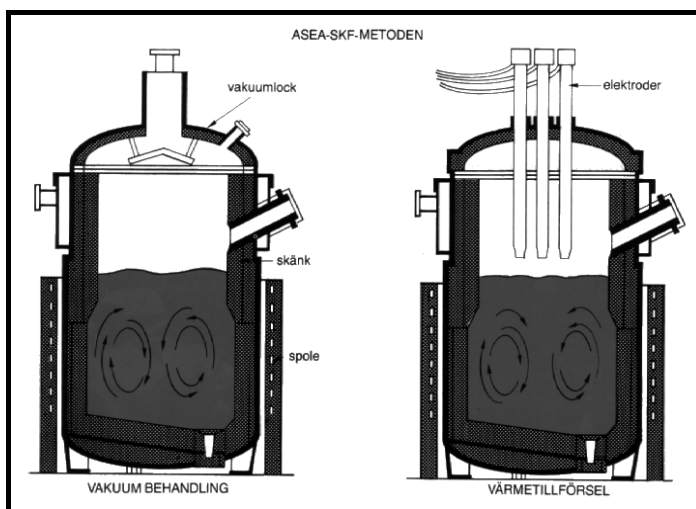
Nackdelen med ljusbågsugnen är att den maximalt installerade effekten endast utnyttjas under nedsmältningen. Under färskning, raffinering och färdigställning är effektbehovet inte så stort. När transformatoreffekten ökades med introduktionen av UHP-ugnarna accentuerades detta problem. Utveckling mot dubbelugn och kontinuerlig chargering var olika sätt att öka utnyttjningsgraden upp emot 90%.

Samtidigt pågick utveckling av s.k. skänkmetsallurgi alt. sekundärmetsallurgi med målsättningen att färdigställa stålet utanför den egentliga stålugnen och samtidigt tillverka ett stål med hög kvalitet.

Många olika behandlingsmetoder i skänk har utvecklats. En flexibel metod är skänkungnen som uppfyller många av metsallurgernas önskemål:

- stålbadet kan homogeniseras genom omröring
- föroreningar som väte och svavel kan avlägsnas
- temperaturen kan höjas via ljusbågar
- analysen kan justeras
- avskilja desoxidationsprodukter och motverka agglomerering
- undvika emulgering av slagg
- undvika oxidation från luft och eldfast material

Enligt ASEA-SKF metoden tappas stålet i en skänk av icke magnetiskt material och placeras i en induktionsspole för omröring. Skänken är infodrad med dolomit som är stabilare än chamotte och alumotegel med hög silikahalt. Omröringen utnyttjas för att homogenisera badet med avseende på både analys och temperatur samt att bidra till avskiljning av desoxidationsprodukter. Den kan förstärkas med gasomröring via lans eller bottendysa för att påskynda reaktionen mellan stålet och toppslaggen vid desoxidation och svavelraffinering, figur 15.



Figur 15 ASEA-SKF skänkung

Anläggningarna kan ha två lock dels ett vakuumtätt dels ett med elektroder för att värma stålet med ljusbågar till avsedd gjuttemperatur och möjliggöra insmältning av legeringar. Vakuumutrustningen används för att sänka vätehalten och för att undvika luftoxidation vid tillsats av desoxideringsmedel och legeringsämnen. Skänkungarna har ofta möjligheter för tvåmatning.

Skänken är utrustad med skivtärning. För att bibehålla stålets renhet bör skyddad gjutning tillämpas.

Den första skänkungarna var en ASEA-SKF som togs i drift vid SKF:s dåvarande stålverk i Hellefors 1965. Många skänkungar har sedan dess installerats med olika tekniska lösningar t.ex. med gasomröring i stället för induktiv omröring för att kringgå ASEAs patent.

3.13. Tillverkning av rostfria stål.

Mycket enkelt kan korrosionsmotståndet hos rostfria stål förklaras med förekomsten av ett transparent tunt skikt av kromoxid på stålytan ett s.k. passivskikt. Vid stigande kromhalt upp till 17-18% ökar korrosionsbeständigheten successivt genom bildning av det passiva skiktet. Dess stabilitet påverkas också av andra ämnen som molybden, nickel och kväve.

Korrosion uppdelas normalt i våtkorrosion och högtemperaturkorrosion. Med våtkorrosion menas korrosion i vätskor och fuktiga gaser upp till 300°C. Vid högtemperaturkorrosion angrips rostfria stål av olika gaser. Inom bägge områdena förekommer flera olika typer.

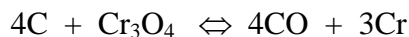
Om kol förekommer i rostfria stål bildas karbider med krom vilket lokalt sänker kromhalten och minskar korrosionsbeständigheten. När rostfria stål svalnar från hög temperatur sker karbidutfällning i stålets korngränser t.ex. efter varmbearbetning eller svetsning. De lägre kromhalterna runt karbiderna ger upphov till s.k. interkristallin korrosion. Stål med 0,08% C är mer känsliga än de med låg kolhalt d.v.s. mindre än 0,02%.

De flesta råvaror som används vid tillverkning av rostfria stål produceras genom reduktion av oxider med kol. Även rostfritt skrot kan vara förorenat med kolhaltiga ämnen som smörjmedel och skärvätskor. Huvudproblemet vid smältmetallurgisk tillverkning av rostfria stål är därför att avlägsna kol utan att oxidera krom.

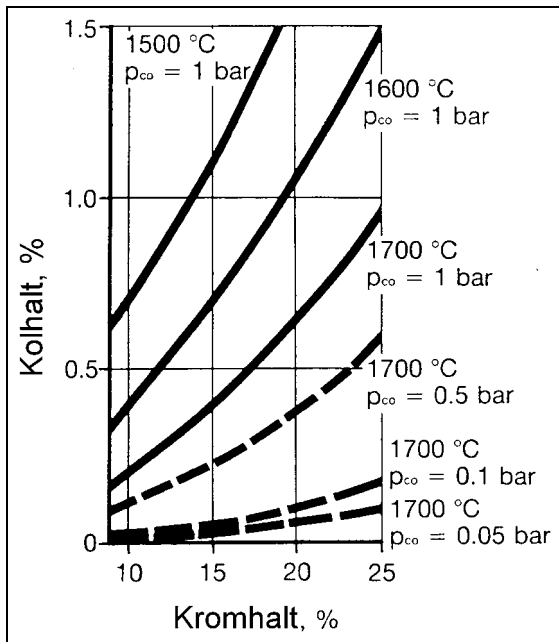
I flytande stål kan kol oxideras med syrgas men samtidigt kommer i det närmaste allt kisel och en del av mangan och krom att oxideras och övergå i slaggen. Följande två reaktioner måste beaktas:



De kan skrivas om till:



Figur 16 visar det termodynamiskt beräknade jämviktsvärdena för kol och krom vid olika temperaturer och olika CO-tryck. Av figuren framgår att koloxidation befrämjas av hög temperatur och lågt CO-tryck. När rostfritt stål tidigare tillverkades i ljusbågsugn måste man arbeta med mycket höga temperaturer för att hålla kromoxidationen låg. Detta medförde höga kostnader för slitage av det eldfasta fodret.



Figur 16 Jämviktsdiagram vid olika tryck och temperatur för system Fe-C-Cr-O

Alla moderna smältmetallurgiska processer för tillverkning av rostfritt stål arbetar med både hög temperatur och sänkt CO-tryck. Det låga trycket kan antingen uppnås med vakuüm eller genom att CO späds ut med argon eller kvävgas, som tillförs med syrgasen. Det förekommer också att syrgasen blandas med vattenånga. Det är samtidigt viktigt att ha rätt sammansättning på slaggen för att minimera kromoxidationen samt att möjliggöra återreduktion av krom från slaggen med kisel eller aluminium efter färskningsperiodens slut.

I konvertern tillförs syrgasen antingen genom dysor i botten eller via dysor i konverterväggen strax ovanför botten. Även toplans förekommer. Vid färskning i vakuüm tillförs syrgas via en toplans. Färskningshastigheten är lägst vid färskning i vakuümchammare och högst när kombinerad syrgasblåsning tillämpas i en konverter. Syrgas via toplans medför också ökad förbränning inom konvertern.

3.13.1. Råvaror

Beskickningen i ljusbågsugn vid tillverkning av rostfritt stål har ofta en stor mängd rostfritt skrot, högkolkhaltig ferrokrom, nickel, järnråvaror och ibland molybden. Med hänsyn till de dyra legeringsämnena nickel, krom och molybden fordras att inköp, lagerhållning och val av råvaror för varje charge väljs så att kostnaderna minimeras. För detta ändamål har tillverkarna datamodeller för att kunna optimera råvaruvalen. Dessutom finns modeller för beräkning av justering av slutanalysen för att uppnå önskad kvalitet till låg kostnad.

3.13.2. Processer

Normalt smälts råvarorna för rostfritt stål i ljusbågsugn och temperaturen höjs till ca 1600°C, varefter smältan förs över till en skänk som antingen placeras i en vakuüm-

kammare eller töms i en konverter. Den vanligaste konvertermetoden är AOD (argon-oxygen-decarburization) figur 17, men även CLU som utnyttjar vattenånga som spädgas används av flera tillverkare. Flera varianter av vakuutfärskning förekommer under beteckningen VOD (vacuum-oxygen-decarburization). När processen i konvertern är slutförd förekommer det att stålet slutbehandlas i skänkgugn före gjutning. I det följande beskriv endast AOD-processen.



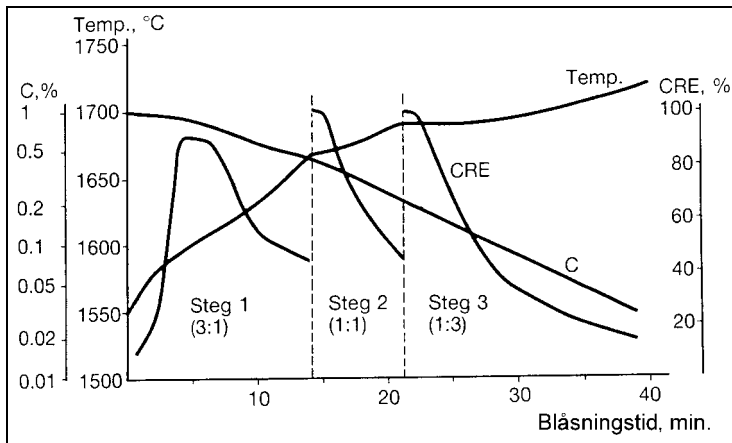
Figur 17 AOD-konverter

3.13.3. AOD-processen

Smältan som förs över till konvertern har en temperatur på ca 1600°C och en kolhalt av ca 1%. I konvertern genomför följande processteg:

- kolfärskning
- slaggreducering
- raffinering, svavelrening
- slutjustering

Kolfärskningen sker i flera steg. Under steg 1 tillförs en gasblandning syrgas/argon 3/1 under steg två är blandningen 1/1 och under steg tre 1/3. Ett ytterligare steg förekommer med ännu lägre syrgasmängd. Normalt blåser man med en gasmängd på 1Nm³/ton och min. Den ökade utspädningsgraden medför att kromoxidationen begränsas. Eftersom oxidationen av C, Si, Cr och Mn är värmeavgivande stiger temperaturen som framgår av figur 18. I figuren visas också CRE som är ett mått på den del av syrgasen som oxiderar kol mätt som procent av tillförd syrgas. Det låga CRE under början av steg 1 beror på oxidation av Si. Under färskningen förångas bly, zink och vismut, som är icke önskvärda spårämnen i rostfritt stål.



Figur 18 Färskningsförlopp i 75-tons AOD-konverter

Efter färskningsperioden innehåller slaggen kromoxid och manganoxid, dessa reduceras genom tillsats av ferrokisel under samtidig omröring med argon. Slaggens basicitet måste justeras genom tillsats av kalk.

Efter reduceringsperioden kan raffinering göras i konvertern. Under omröring med argon genomförs raffineringen med en slagg av kalk och flusspat som reduceras med ferrokisel eller aluminium.

Tiden i konvertern bestäms av hur mycket syrgas som kan tillföras per tidsenhet och hur mycket kol som skall oxideras samt på kravet lågsvavelhalt. I litteraturen anges tider från under en timme till normalt en och en halv timme.

3.14. Eldfasta material

De vanligaste eldfasta materialen indelas i silika-, chamotte-, alumo- och basiska tegel. Silikategel består av huvudsakligen av SiO_2 . De övriga materialens sammansättning framgår av figur 19. De viktigaste kraven på eldfasta material är:

- eldfasthet
- förmåga att motstå snabba temperaturväxlingar
- förmåga att motstå mekaniska påkänningar
- volymbeständighet vid användningstemperaturen
- täthet mot smält metall och slagg
- förmåga att motstå kemiska angrepp
- mått- och formnoggrannhet
- låg värmeledningsförmåga speciellt isolertegel

| | |
|-----------------|---|
| CHAMOTTE | 30-43% Al_2O_3 52-64% SiO_2 |
| ALUMO | 30-95% Al_2O_3 |
| BASISKA | |
| Magnesit, | 75-98% MgO |
| Magnesit-Krom, | 55-80% MgO 6-15% Cr_2O_3 |
| Krom-Magnesit, | 35-50% MgO 25-30% Cr_2O_3 |
| Dolomit, | 36-40% MgO 50-60% CaO |
| Fosterit, | 50-63% MgO 30-38% SiO_2 |

Figur 19 Eldfasta material

Dessutom är det viktigt att känna till materialens värmeutvidgning för att kunna dimensionera eventuella expansionsfogar.

Leverantörer och provningslaboratorier utför bestämning av egenskaperna enligt speciella metoder utvecklade för eldfasta material.

Följande tabell visar smältpunkten för de vanligaste ämnena som förekommer i eldfasta material och metallurgiska slaggar.

| <i>Förening</i> | <i>Smältpunkt °C</i> |
|--|----------------------|
| CaF ₂ , Calciumfluorid | 1360 |
| FeO, Järnoxid | 1420 |
| SiO ₂ , Kiseldioxid | 1470 |
| MnO, Manganoxid | 1650 |
| Cr ₂ O ₃ , Kromoxid | 1990 |
| Al ₂ O ₃ , Aluminiumoxid | 2050 |
| CaO, Kalciumoxid | 2580 |
| MgO, Magnesiumoxid | 2800 |

Eldfasta material i basiska processer är MgO och CaO, de har den högsta eldfastheten. De utsätts för kemiska angrepp från slaggen, vars sammansättning måste anpassas för minska dessa genom att reglera basiciteten. Därför tillsätts CaO till slaggen om SiO₂-halten stiger till följd av oxidation av kisel. För att motverka utlösning av MgO från den eldfasta infodringen tillsätts också viss mängd MgO i form av dolomit till slaggen. En lättflytande slagg är normalt mer aggressiv än en torr, men man vill ha en flytande slagg för att få en snabb och effektiv reaktion mellan stålbad och slagg vid fosforraffinering. Flusspat tillsätts för att göra slaggen lättfluten utan att påverka basiciteten. En riktig slaggföring anpassad till den eldfasta infodringen är viktigt för att minimera kostnaderna för eldfasta material. Valet av murbruk för fogarna måste också göras med hänsyn till de angrepp som kan förekomma.

Fogarna är ofta svaga partier i ett murverk och bör göras tunna. Eftersom foderslitaget är tidsberoende så minskar det vid ökad produktivitet.

När raffineringen drivs långt kan stålets syreaktivitet bli lägre än det eldfasta materialets, varvid syre går in i stålet. Detta måste beaktas vid val av eldfasta material t. ex i skänkugnar.

3.15. Lästips

Brascugli, Gustavo; Perni, Giovanni; Repetto, Eugenio. Evolution of electric arc furnace steelmaking route. Metallurgical Plant and Technology Int. 2(1997) s. 62-83.

Iron and Steel – Today, Yesterday and Tomorrow, Jernkontorets konferens juni 1997, vol.1:

Sano, Nobuo; katayama, Hiroyuki; Sasabe, Minoru; Matsuoka, Shigeki. Research activities on the removal of residul elements in scrap in Japan. s.15-26.

Klein, Karl-Heinz. Low emission high produktivity electric arc furnace operattion. s. 97- 111.

Wijk, Olle; Sundqvist, Olle. Ladle metallurgy and its influence on steel cleanliness. s. 137-148.

Sandberg, Hans. Stålet inför 2000-talet. Bergshanteringens Vänner, Årsbok 1999. s. 83- 101.

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

