4.12 Materiaal voor stoomketels

4.12.1 Bereiding van ruwijzer uit ertsen

Voor de vervaardiging van een groot aantal onderdelen van stoomketels gebruikt men staal. Hieronder verstaat men tegenwoordig een legering van ijzer met kleine hoeveelheden van de elementen koolstof, mangaan, silicium, zwavel, fosfor en stikstof. Deze elementen worden met het ijzererts aangevoerd dan wel zijn nodig bij de bereiding van ijzer. Koolstof, mangaan en silicium hebben een gunstige, zwavel, fosfor en stikstof hebben daarentegen een ongunstige invloed op de mechanische eigenschappen van het staal. Van de drie laatst genoemde elementen, wenst men daarom het gehalte zo laag mogelijk te houden, dit geldt vooral voor fosfor.

4.12.2 IJzerertsen

IJzer komt alleen in scheikundig gebonden toestand in de natuur voor. De binding is voornamelijk met zuurstof en voorts met koolstof en water. Het gebonden ijzer is vermengd met andere stoffen zoals kwarts, silicaten, fosfaten en kalkspaat die samen het zogenoemde ganggesteente vormen. Dit mengsel van ijzerverbindingen en ganggesteente heet ijzererts en kan 30 -70 gewichtsprocenten ijzer bevatten.
De voornaamste ijzerertssoorten die voor de bereiding van ijzer in aanmerking komen zijn:

Magneetijzersteen ($Fe_3 O_4$)
Magneetijzersteen is een verbinding van ijzer met zuurstof en derhalve een oxide. Het levert ijzer van een goede kwaliteit en heeft een ijzergehalte van 60 – 68 %. De kleur van deze erts is zwart en de naam is ontleend aan de magnetische eigenschappen ervan. Deze erts is moeilijk te reduceren, dat wil zeggen van de zuurstof te ontdoen.

Roodijzersteen ($Fe_2 O_3$)
Roodijzersteen is ook een oxide met een ijzergehalte van 60 – 68 % van goede kwaliteit. In tegenstelling tot het magneetijzersteen is deze ijzererts vrij zacht. De kleur is donkerrood. Het hiermee verwante maar ijzer- arme roodkrijt wordt als verfstof gebruikt.

Spaatijzersteen ($Fe CO_3$)
Spaatijzersteen, ook wel ijzercarbonaat genoemd vanwege de koolstof in het erts, is een gemakkelijk smeltbaar erts met een ijzergehalte tot 48 %. De geelwitte of geelbruine kleur van het erts wordt bij blootstelling aan lucht donker of verweert. Het erts bevat ook mangaan dat op de sterkte van het hieruit bereide staal een positieve invloed heeft.

Bruinijzersteen ($2Fe O_3 . 3H_2O$)
Bruinijzersteen heeft een sterk uiteenlopend ijzergehalte van 28 – 35 %. Ook het voorkomen verschilt veel. Men vindt deze donkerbruin gekleurde erts als korrels, vermengd met klei en stenen. Het is verwant aan het in Nederland gevonden ijzeroer dat gedolven werd langs de rivieren en beken in de Achterhoek en daar in de talrijke ijzergieterijen op grote schaal werd gebruikt.. Dit erts bevat veel fosfor.

De waarde van het ijzererts wordt bepaald door het gehalte aan ijzer en de aard van de verontreinigingen, waarbij vooral het gehalte aan fosfor van belang is. Het is namelijk niet mogelijk de fosfor bij de bereiding van het ruwijzer te verwijderen. Ook bij de bereiding van staal is het moeilijk deze, voor de kwaliteit schadelijke stof, te verwijderen.
Uit de hier voor genoemde ertsen wordt in een hoogoven het zogenoemde ruwijzer bereid. Men spreekt van ruwijzer omdat dit materiaal niet geschikt is voor rechtstreeks gebruik maar als grondstof dient voor de vervaardiging van staal en gietijzer.

4.12.3 De hoogoven

De hoogoven heeft de vorm van twee afgeknotte kegels die met de grondvlakken tegen elkaar zijn geplaatst. Het bovenste deel, de schacht wordt naar onder toe wijder, zodat de lading gemakkelijk zakt en verstopping wordt voorkomen. Het daarop volgende deel, de rust, wordt naar onder toe nauwer zodat de lading juist blijft hangen. Met deze afnemende doorsnede wordt tevens de volume vermindering van de lading gecompenseerd. Onder de rust bevindt zich de haard. In deze ruimte wordt het gesmolten ijzer en de zogenoemde slak verzameld. Aan de bovenzijde van de oven is een sluis aangebracht, zodanig dat deze kan worden gevuld terwijl de afvoer van het hoogovengas doorgaat.
In de hoogoven stort men beurtelings hoeveelheden cokes, toeslag en erts. De cokes moet uit grote stukken bestaan en zeer hard zijn om verbrijzelen door het gewicht van de lading en het verstoppen van de gasdoortocht te voorkomen. Bovendien moet de cokes een laag zwavelgehalte hebben. De toeslag dient om de ganggesteenten, as en sintels van de cokes te verslakken. De gesteenten, die de ertsen bevatten, hebben veel hogere smelttemperaturen dan ijzer. Kalk heeft bijvoorbeeld een smelttemperatuur van 1500 ºC, kwarts wordt vloeibaar bij een temperatuur van 1650 ºC terwijl keileem pas bij 1800 ºC plastisch wordt. Het smelten hiervan vindt dan ook pas plaats in de onderste zone van de oven.

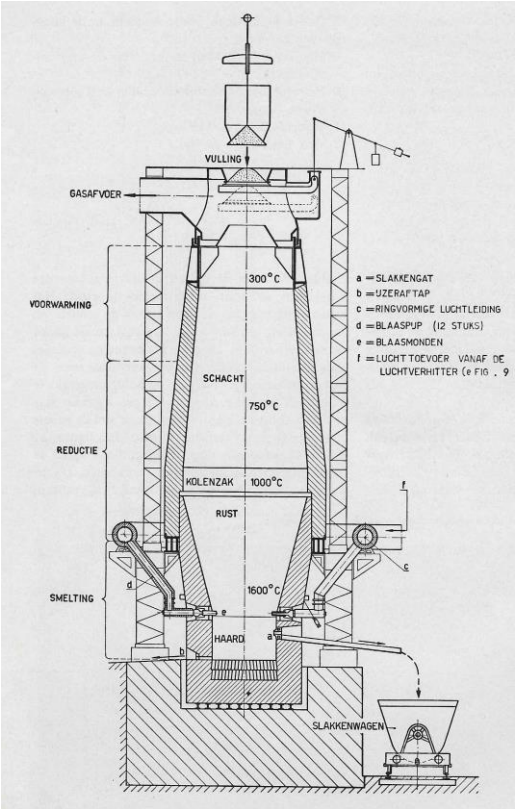
Men gebruikt een zure toeslag als het ganggesteente basisch is en omgekeerd. Als er sprake is van een zure vulling, bestaand uit hoofdzakelijk zand, dan voegt men kalksteen (Calciumcarbonaat, $CaCO_3$) toe. Bij een basische vulling, bestaand uit hoofdzakelijk Calciumoxide ofwel ongebluste kalk, voegt men kwarts (Siliciumoxide, SiO_2) toe als vulling. De reacties hiervan die zoals hiervoor is aangegeven bij hoge temperaturen plaatsvinden en die we verderop ook bij de staalbereiding nog tegenkomen, verlopen als volgt:

$$\mathrm{CaCO_3 = CaO + CO_2}$$

$$\mathrm{CaO + SiO_2 = CaSiO_3}$$

Het eindproduct is calciumsilicaat of hoogovenslak dat in vloeibare toestand wordt afgetapt en onder andere verwerkt wordt als isolatiemateriaal. In gegranuleerde (met water gebluste) vorm is het een belangrijk toeslagmateriaal bij de cementbereiding, terwijl het Thomas slakkenmeel voor bemesting bruikbaar is.

Het winnen van het ijzer uit het erts berust op het vermogen van koolstof (C) en koolmonoxide (CO) om bij hoge temperaturen de zuurstof aan de ijzer- zuurstofverbindingen te onttrekken. We noemen dit reductie, in tegenstelling tot oxidatie waarbij de zuurstof wordt gebonden. Echter het ijzer neemt zelf daarbij onvermijdelijk koolstof op met andere in de erts voorkomende bestanddelen zoals, mangaan, fosfor , silicium, zwavel en dergelijke. Juist door opneming van koolstof daalt het smeltpunt van ijzer zover dat het in de onderste laag naar beneden druppelt. De slak beschermt het gedurende het vallen en onderin de haard tegen oxidatie (verbranding) door de ingeblazen verbrandingslucht. Aangezien de gevormde kooldioxide (CO_2) bij het opstijgen in de oven telkens wordt omgezet in koolmonoxide (CO), zal het ontwijkende hoogovengas naast stikstof en de kooldioxide nog een groot deel, tot 30 %, van het brandbare CO bevatten. Het gas heeft een stookwaarde van 1000 kcal/Nm^3 en wordt gebruikt voor het stoken van de bij de hoogoven behorende luchtverhitters.



Doorsnede hoogoven

In de figuur van de doorsnede van de hoogoven zijn de verschillende zones en bij benadering de verschillende procestemperaturen aangegeven. Hierna worden achtereenvolgens van boven naar beneden in de hoogoven de verschillende veranderingen weergegeven.
In de mond van de oven worden de ertsen en de brandstof door de hier langs-strijkende gassen, waaronder koolmonoxide (CO), voorverwarmd. Bij verder dalen vindt de eerste omzetting aldus plaats:

$$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2$$

Hier wordt dus magneetijzer (Fe_3O_4) gevormd. De gevormde kooldioxide (CO_2) neemt uit de cokes koolstof (C) op en gaat volgens onderstaande reactie over in koolmonoxide.

$$CO_2 + C = 2CO$$

Verder in de reductie zone vindt met het onder in de oven gevormde koolmonoxide weer een omzetting plaats van het gevormde magneetijzer. Dit vindt plaats volgens de volgende reactie.

$$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$$

Boven in de schacht van de oven vindt de volgende reactie plaats en ontstaat zuiver ijzer en kooldioxide.

$$FeO + CO = Fe + CO_2$$

Dit zuivere ijzer neemt echter koolstof op hetgeen als volgt gebeurt:

$$3Fe + 2CO = Fe_3C + CO_2$$

Het uiteindelijke smelten heeft pas plaats in de onderste laag van de oven bij een temperatuur van 1800 ºC.

Voor het tijdperk van de hoogovens maakte men voor het produceren van ijzer gebruik van zogenaamde laagovens. Hierin vond, door verhitting van het ijzererts met houtskool, dezelfde reactie plaats, maar was het ontstane ijzer niet zo heet, dat het vloeibaar werd; het lag als een gesinterde massa in de slak en moest door verhitten en hameren verder worden bewerkt en gezuiverd.

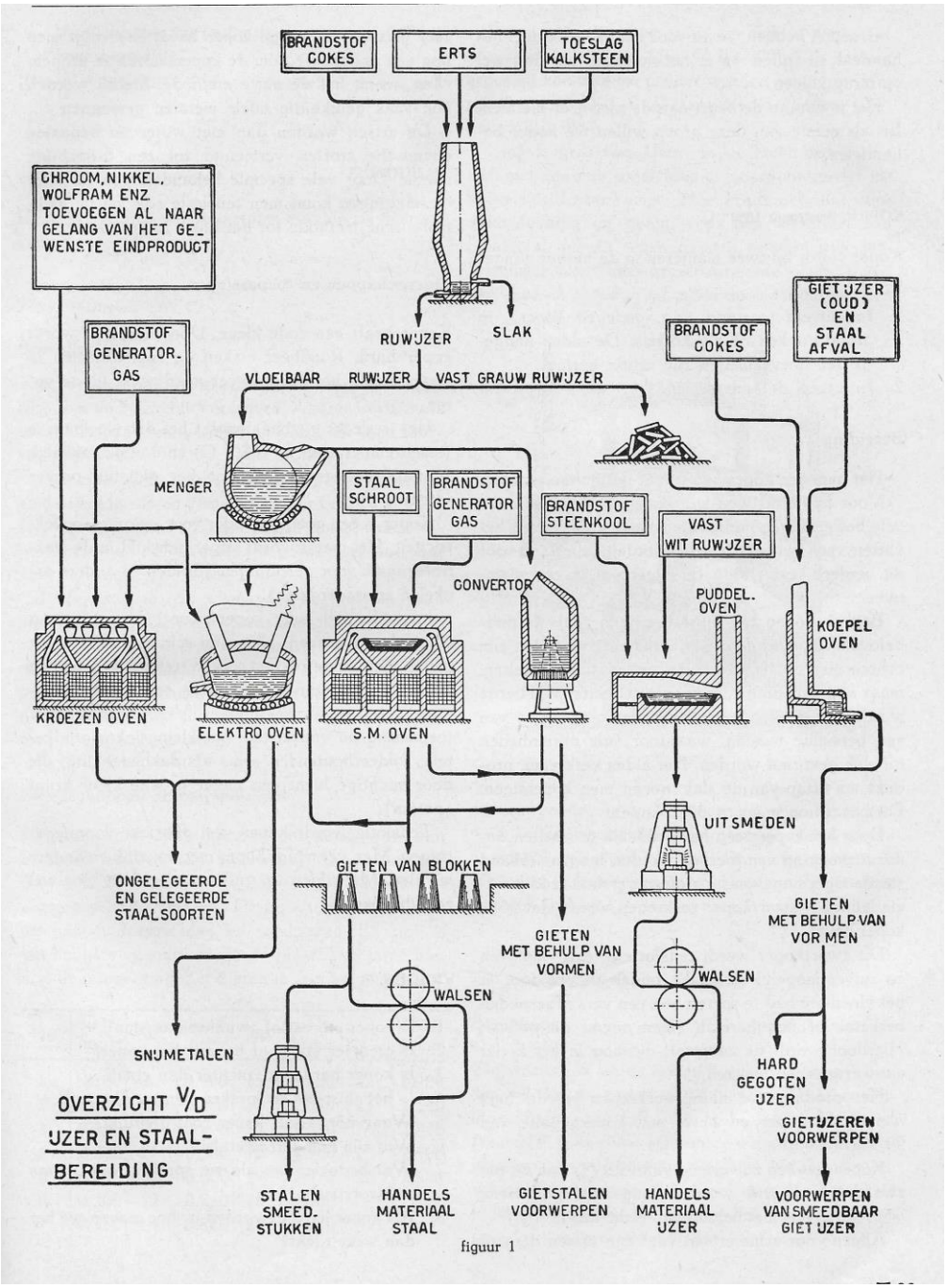
4.12.4 Het ruwe ijzer

Het door een hoogoven geproduceerde ruwijzer is zelfs met de beste zorg wisselend van samensteling. Het bevat tot ongeveer 5 procent koolstof en bovendien kleinere hoeveelheden van de reeds eerder genoemde stoffen mangaan, silicium, zwavel, fosfor en stikstof en is daarom niet direct bruikbaar. Het moet eerst, afhankelijk van de samenstelling en de beoogde toepassing, bewerkt worden.

Element	**Invloed**
Koolstof (C)	Beïnvloedt het smeltpunt, de sterkte en hardbaarheid.
Silicium (Si)	Bevordert de koolstof afscheiding in grafiet-vorm en maakt ijzer grauw op de breuk. Verhoogt de weerstand tegen scheikundige invloeden.

Mangaan (Mn)	Bevordert de opname van koolstof, vergroot de treksterkte en zorgt er voor dat de taaiheid behouden blijft. De concentraties mangaan variëren tussen de 0,4 – 14 % al naar gelang de toepassing.
Fosfor (P)	Maakt ijzer dun vloeibaar, vermindert de sterkte en maakt het ijzer broos in koude toestand. De hoogst toelaatbare concentratie is 0,02 %
Zwavel (S)	Maakt het ijzer dik vloeibaar, breekbaar en broos in warme (roodgloeiend) toestand zodat het bij 0,1% niet meer smeedbaar is.

Het ruwe ijzer dat niet direct gebruikt wordt giet men uit in een zandbed of voert men af naar een gietmachine waar er U-vormige staven, zogenoemde gietelingen, van ongeveer 50 kg van worden gemaakt. Deze gietelingen worden zowel in de ijzergieterij als voor de staalbereiding gebruikt. Moet het vloeibare ruwe ijzer direct tot staal verwerkt worden dan tapt men het ruwe ijzer af in zogenoemde pan-wagens en voert deze af naar een mengvat. In het mengvat wordt het ruwe ijzer van de verschillende hoogovens verzameld voordat het naar de staalbereiding wordt afgevoerd. Van het gietijzer en het staal, al of niet gelegeerd om de kwaliteit te verbeteren, worden vervolgens allerlei gerede producten dan wel halffabricaten gemaakt.

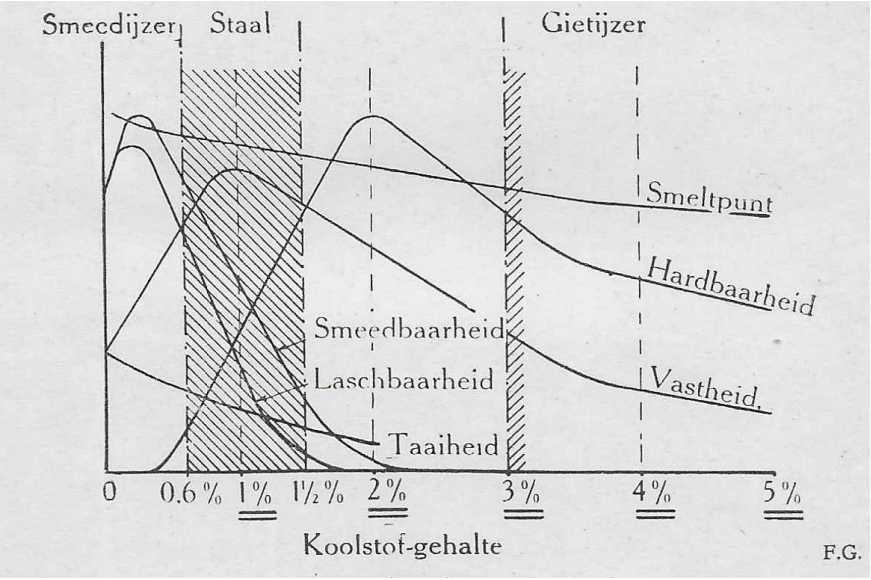


Overzicht van de ijzer- en staalbereiding

4.12.5 Bereiding van gietijzer en staal uit ruwijzer

De vroeger gebruikelijke benamingen als ruwijzer, gegoten ijzer, welijzer, smeedijzer, smeltijzer, smeedstaal, vloei-ijzer en vloeistaal zijn aanleiding tot onduidelijkheid en verwarring. Ook is een aantal benamingen in onbruik geraakt vanwege achterhaalde technieken: denk hierbij bijvoorbeeld aan puddelijzer en welijzer.

Het product uit de gieterij noemen we afhankelijk van het koolstofgehalte gietijzer of gietstaal. Het materiaal dat is vervaardigd volgens het Bessemer-, Thomas-, Siemens-Martin-proces etc. noemen we onafhankelijk van het koolstof gehalte staal. Lang hebben we onder staal verstaan hardbaar ijzer dat ten- minste 0,35% koolstof bevatte. In de grafiek hieronder zijn de hoofdeigenschappen zoals smeedbaarheid, hardbaarheid en gietbaarheid in relatie tot het koolstofgehalte weergegeven.



Hoofdeigenschappen ijzer en staal

4.12.6 Gietijzerbereiding

Het ruwijzer uit de hoogovens waarin zich een zekere hoeveelheid silicium bevindt en dat een grauwe kleur heeft wordt in hoofdzaak in het gieterijbedrijf verwerkt. Hiertoe tapt men het ruwe ijzer af en geleidt dit naar een giethal waarvan de vloer is voorzien van kanalen, elk voorzien van een groot aantal kamvormige zijtakken. De lengte van deze U-vormige goten is 60 -150 cm. Na afkoeling worden deze ruwijzer-kammen gebroken en vervoerd naar een opslagplaats van de gieterij waar vervolgens na smelting in bijvoorbeeld een koepeloven en bijmenging van oud gietijzer en staalafval, er gietproducten van worden gemaakt. We noemen deze gegoten staven ruwijzer gietelingen of piekijzer. Deze gietelingen wegen ongeveer 50 kg.

Een ander systeem voor het maken van de gietelingen is het zogeheten carrousel-gieten. Hierbij wordt de gietpan met ruwijzer geledigd in een aantal gietvormen, welke ringvormig en draaibaar bevestigd zijn onder de gietgoot van de pan. Na ongeveer driekwart van de totale omwenteling wordt de gietvorm automatisch gekanteld en valt de gevormde gieteling er uit. De vorm wordt weer in de oude positie gedraaid en opnieuw gevuld.

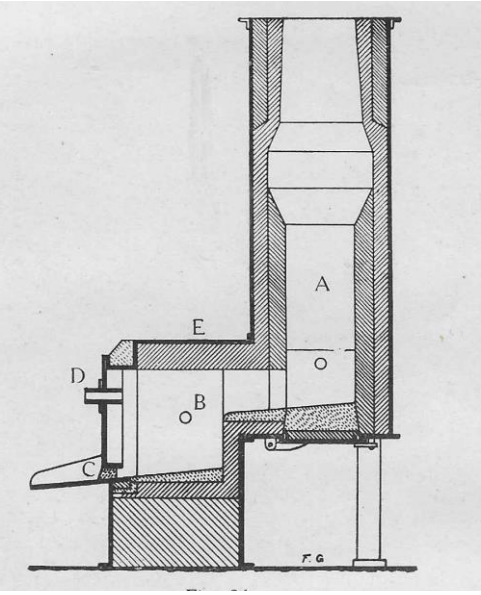
Een ander systeem is dat het ruwe ijzer in bakken wordt gegoten die op een met kettingen uitgeruste en horizontaal geplaatste transportband zijn gemonteerd. Aan het begin van de band worden de vormen gevuld, onderweg koelen zij af en aan het eind van de band, bij het omkeren van de looprichting vallen de gietelingen uit de vorm.

Koepeloven

Tot ver in de twintigste eeuw gebruikte men in gieterijen koepelovens voor de bereiding van een aantal gietijzersoorten. De koepeloven volgens het systeem Ireland, is meestal voorzien van een voorhaard volgens het systeem Krigar. Deze oven bestaat uit een plaatstalen schacht die van binnen is bekleed met vuurvaste steen of chamotte. De verbranding en het smelten vindt hoofdzakelijk plaats in de haard terwijl de schacht daarboven dient om de gietelingen, cokes en de eventuele toeslag en oud gietijzer voor te warmen. Het vloeibare ijzer en de slak stromen in de eveneens beklede voorhaard. De aftap voor het vloeibare gietijzer bevindt zich op het laagste punt aan de voorzijde van de voorhaard en wordt afgesloten met een kleiprop. De op het gietijzer drijvende slakken worden iets boven de helft van de voorhaard door het zogenoemde slakkengat afgevoerd. De oven is voorzien van een aparte luchtkast van waaruit de verbrandingslucht met overdruk (0,60 – 0,80 mwk) door een aantal openingen in de haard wordt geblazen.

De lucht wordt aangevoerd door blaaswerktuigen en kan naar behoefte geregeld worden. De uit kalksteen bestaande toeslag dient om de koolas en de onzuiverheden uit het ijzer om te zetten in een vloeibare slak. Tevens zal deze de slak die op het gietijzer drijft beschermen tegen verbranden. Men dient het verloop in de gietoven als een louteringsproces te beschouwen zodat bij het aftappen in een gietpan een zuiver product wordt verkregen. Verder kan men op de eigenschappen invloed uitoefenen door toevoeging van bepaalde ijzersoorten en metalen.

Bijvoorbeeld fosfor zal het ijzer dun vloeibaar maken, en hoe ingewikkelder een gietstuk is des te dunner vloeibaar moet het ijzer zijn om de gehele gietvorm te vullen. Fosfor maakt het ijzer broos zodat men niet voor een willekeurig gehalte kan kiezen. Het toevoegen van bijvoorbeeld afval-smeltijzer zal het koolstofgehalte verminderen en de taaiheid doen toenemen.



Ongeschikt om te gieten, dat wil zeggen om deugdelijk werk te leveren, is wanneer het basismateriaal, de gietelingen of het piekijzer een koolstofgehalte heeft lager dan 2,5 %. Het smeltpunt wordt dan te hoog voor de gebruikelijke gietoven. Het mag tevens niet minder dan 1% silicium bevatten anders heeft onvoldoende afscheiding van grafiet plaats. Als regel mag het niet meer dan 1 a 1,5 % mangaan bevatten anders wordt de krimp bij het gieten te groot. Bij meer dan 2,5 % fosfor wordt het gietwerk te broos. Zwavel dat ijzer dik vloeibaar en tevens broos maakt moet altijd vermeden worden maar meer dan 2 % mag zeker niet voorkomen.

Koepeloven

Eigenschappen gietijzer

Het gewone gietijzer kon in het midden van de vorige eeuw geleverd worden met een treksterkte tussen de 8 - 20 kg/mm² en een druksterkte van 70 kg/mm². Het is in vergelijking tot staal vrij broos en de reden dat in de oude stoomwet hiervoor beperkende voorschriften zijn aangegeven. Bij stoominstallaties is het gebruik slechts toegestaan tot een druk van 20 kg/cm² en een temperatuur van 250 ºC. Het bevat ongeveer 3,5 % koolstof (C), 1,5 - 2,5 % silicium (Si), 0,5 % Mangaan (M_n) en wat fosfor (P). Gietijzer is dun vloeibaar en daardoor goed te gieten in de meest complexe vormen. In koude toestand is het goed mechanisch te bewerken. In warme toestand is gietijzer niet te vervormen.

Bij hoge temperaturen, waaraan het bijvoorbeeld in een verbrandingsmotor wordt blootgesteld is het onderhevig aan een blijvende uitzetting. Als gevolg van dit zogenoemde groeien treden materiaalspanningen op die tot scheuren leiden. Hetzelfde doet zich ook voor bij stoomafsluiters als men ze aan de hoge temperaturen van oververhitte stoom blootstelt. Men verklaart de groei van het gietijzer door de oxidatie ervan en doordat de daarin gebonden koolstof zich voor een deel gaat afscheiden als grafiet. Bij temperaturen boven de 600 – 1000 ºC wordt het brokkelig aan de buitenkant, de kern wordt zacht, zet uit en wordt poreus. Het gevormde grafiet wordt aangetast en er treedt oxidatie van het ijzer op.

Gietijzeren roosterijzers in vuurhaarden worden door de hoge temperaturen tijdens het verbranden van de brandstof spoedig met een oxidelaag bedekt. Deze laag valt er snel weer af waarna opnieuw weer een oxidehuid wordt gevormd enz. zodat de levensduur van de roosters in hoog tempo wordt verkort. Om gietijzer tegen hoge temperaturen bestand te maken moet men het silicium gehalte laaghouden. Er wordt dan minder grafiet gevormd. In plaats daarvan zou men Mangaan (M_n) aan het gietijzer kunnen toevoegen om de koolstof gebonden te houden, echter dan wordt het materiaal weer te hard. Daarom neemt men nikkel (N_I) dat wel grafietvorming geeft echter aanzienlijk minder dan silicium. Wordt tevens chroom (C_r) toegevoegd dan krijgt men het zogenoemde chroomgietijzer (2,7 % C, 1 – 1,5 % N_I en 1,5 – 13 % C_r) dat bestand is tegen oxidatie en hoge temperatuur. De toevoeging van nikkel en chroom maken de producten gemaakt uit dit soort gietijzer relatief duur en is de reden dat men het goedkopere maar minder duurzame hard gietijzer toepast.

Hard gietijzer

Als men na het gieten de werkstukken snel laat afkoelen heeft de koolstof geen gelegenheid zich in ruime mate af te zetten als grafiet en gaat het over in witijzer wat aanmerkelijk harder is. Het hierdoor ontstane product noemt men gehard gietijzer of Hartguss en wordt onder andere toegepast bij het gieten van roosterstaven voor stoomketels. Men verkrijgt een harde buitenkant door de vormen van ijzer te maken dat de warmte snel afvoert. Men kan dit proces versnellen door de vormen met stromend water te koelen.

Smeedbaar gietijzer

De naam is misleidend, want van werkelijk smeden is geen sprake. Dunne voorwerpen kunnen na verhitting door hameren of drukken slechts iets van vorm veranderd worden. Men verkrijgt het product door de voorwerpen na het gieten in gesloten kasten te gloeien met zuurstofhoudende ertsen, bijvoorbeeld ijzererts, dat dan door middel van de zuurstof de gebonden koolstof er aan onttrekt. Men verlaagt daardoor het koolstofgehalte van het ijzer. Door ruwijzer in kroezen om te

smelten onder toevoeging van afval- smeltijzer, staal bereid in de Thomas of Bessemerpeer dus met een laag koolstof gehalte, verkrijgt men bij voorbaat een gietproduct met een matig koolstofgehalte. De gegoten werkstukken, onderdelen van werktuigen en moersleutels, worden vervolgens op de hiervoor aangegeven wijze gegloeid. In sommige gevallen kan men op deze wijze het koolstofgehalte reduceren tot 0,3 – 0,8 %. Men spreekt daarom ook wel van smeedbaar gietstaal.

Perlitisch gietijzer

Perlitisch gietijzer wordt ook wel veredeld gietijzer genoemd. Het wordt verkregen door een bepaalde wijze van smelten en een juiste samenstelling, gevolgd door een bepaalde manier van afkoelen waardoor een homogene structuur van perliet en grafiet wordt verkregen. Voor de gemiddelde samenstelling geeft men op; ijzer met 3% koolstof (C), 2 % silicium (Si), 0,7 % (Mn) en 0,08 % fosfor (P). De treksterkte bedraagt ongeveer 30 kg/mm² ,het is daarmee ongeveer anderhalf keer sterker dan gietijzer. Dit metaal is goed bestand tegen stoten, slaan, wrijving (minder slijtage) en hoge temperatuur. Het gietijzer is fijn korrelig op de breuk en uitstekend geschikt voor zowel dunne als dikwandige gietstukken. Vanwege het relatief lage koolstofgehalte moet men daarom in de smeltoven staalschroot toevoegen en is een hoge smelttemperatuur nodig. Dit gietijzer kan dikwijls gietstaal vervangen. Men past het toe in wisselende samenstelling voor cilinderdeksels en de voeringen en zuigers van zuigerstoommachines en verbrandingsmotoren, alsmede voor kleppen en klepzittingen van machines en tandwielen.

Ni-Resist gietijzer

Het tegen zuren bestendige Ni-Resist gietijzer is naast het ijzer uit de volgende metalen samengesteld: ijzer met 2,8 – 3,1 % koolstof (C), 1,5 – 2 % silicium (Si), 0,7 – 1,2 % (Mn), 14 – 16 % Nikkel (Ni), 6 – 8 % koper (Cu) tot 6 % Chroom (Cr) en hoogstens 0,3 % fosfor (P). Het wordt gesmolten in kroezen of elektro-ovens en heeft een treksterkte van 20,5 – 30,5 kg/mm². Het materiaal is even goed mechanisch te bewerken als perlitisch gietijzer. Het wordt onder andere gebruikt voor cilindervoeringen in motoren en pompwaaiers bij gemalen.

Genitreerd gietijzer

Nitreren is een oppervlakte hardingsproces dat alleen kan worden toegepast bij met aluminium en chroom gelegeerde ijzer- en staalsoorten. Men gloeit het werkstuk gedurende twee dagen bij 500 ºC in een ammoniakstroom. De ammoniak ontleedt in stikstof (N_2) en waterstof (H_2). De stikstof wordt door de oppervlaktelaag opgenomen onder de vorming van het harde aluminium- of chroomnitride. De aldus gevormde harde laag is 0,5 – 1 mm dik. Bijzonder geschikt voor het nitratie proces is gietijzer met de volgende samenstelling: ijzer met 2,75 % koolstof (C), 2,75 % silicium (Si), 0,75 % (Mn), 0,1% fosfor (P), 1,75 % aluminium (Al) en 1,75 % Chroom (Cr). Vergeleken met het gewone gietijzer bezit het genitreerde gietijzer een grotere treksterkte en elasticiteit terwijl het een zeer hard oppervlak heeft. Wil men plaatselijk een harde laag hebben dan moet men de zacht te houden vlakken van het werkstuk bedekken met een laag verf bestaande uit aluminiumpoeder en waterglas. Het genitreerde gietijzer wordt onder andere gebruikt voor cilindervoeringen en kleppen.

4.12.7 Staalbereiding

Door veredelen, verder raffineren en het toevoegen van nieuwe elementen, zijn we tegenwoordig in staat verschillende bijzondere staalsoorten te maken die nog beter zijn toegesneden op hun toepassing. Daarenboven heeft de steeds verder uitbreidende kennis van de bewerking en de bewerkingstechnieken van staal, en ook de vergrote toepassingsmogelijkheden doordat er betere gereedschappen beschikbaar zijn gekomen, enorm bijgedragen aan de verdere ontwikkeling van machines, apparaten en constructies.

Staalbereiding komt hierop neer dat het gehalte aan koolstof en andere stoffen in het ruwijzer meestal door verbranding zodanig geredigeerd wordt dat een product ontstaat dat aan een aantal te stellen eisen voldoet. Naar gelang de samenstelling van het ruwijzer en de aan het staal te stellen eisen kan men gebruik maken van de volgende hierna nader beschreven productieprocessen.

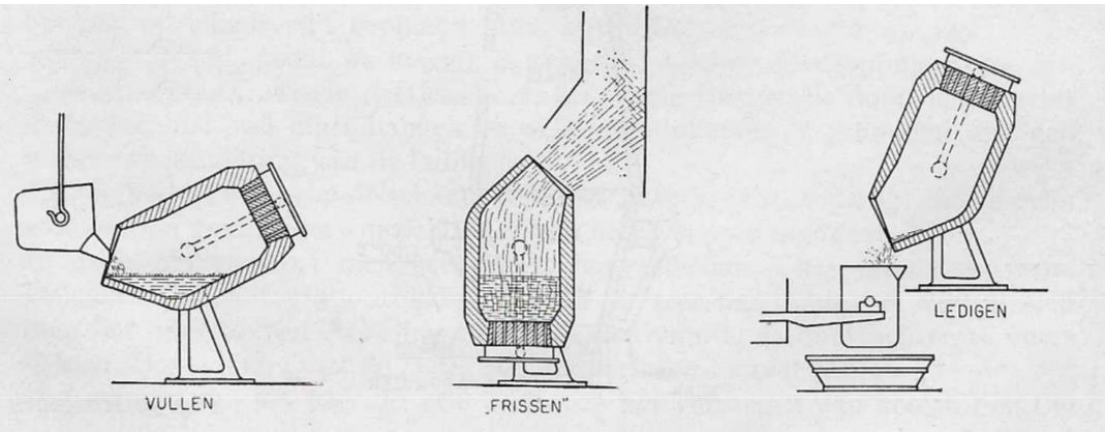
1. Het convertor-proces
   - Het Bessemerproces voor ruwijzer met weinig fosfor
   - Het Thomas-proces voor ruwijzer met veel fosfor
   - Het Oxystaalproces voor ruwijzer schroot en ijzererts

2. Het Siemens Martinproces
   - Het zure proces voor fosforarm ruwijzer en schroot
   - Het basische proces voor fosforrijk ruwijzer en schroot

3. Het elektro-oven proces
   - Het proces voor de bereiding van gelegeerde staalsoorten

Het Bessemerproces

Het Bessemerproces (patent 1855) is genoemd naar de uitvinder Sir Henry Bessemer (1813-1898). Bij dit proces wordt fosforarm vloeibaar ruwijzer in een peervormige convertor gebracht. Converteren betekent omzetten. In dit geval wordt ruwijzer in ijzer met andere en betere eigenschappen omgezet.



Staalbereiding in Bessemer converter

Na het vullen met vloeibaar ruwijzer uit de hoogoven wordt de convertor rechtop gezet. Via gaten in de bodem wordt vervolgens lucht door het vloeibare ijzer geblazen waardoor koolstof tot koolmonoxide, silicium tot siliciumdioxide, zwavel tot zwaveldioxide en fosfor tot fosforpentoxide wordt verbrand. Koolmonoxide en zwaveldioxide zijn gasvormig en verdwijnen via de mond van de peer. Het siliciumdioxide komt in de gevormde slak terecht en wordt aan het eind van het proces afgeschonken. Het fosforpentoxide wordt bij dit proces niet verwijderd. Het Bessemer proces wordt dan ook alleen toegepast bij ruwijzer met veel silicium en weinig fosfor. Bij de verbranding van silicium komt zoveel warmte vrij , dat het ijzer in de peer vloeibaar blijft.
In een Bessemer convertor kan geen kalksteen toegevoegd worden. De binnenbekleding van de convertor bestaat uit het zure siliciumoxide (SiO_2), dat door de uit het kalksteen gevormde basische calciumoxide (CaO) zou worden aangetast. De binnenbekleding van de Thomasconvertor bestaat uit het basische (gebrande) dolomiet (CaO.MgO)

Het Thomasproces

Het Thomasproses uit 1899 is genoemd naar de ontdekker van deze manier van staalbereiding Sidney Gilchrist Thomas. Het Thomasproces is een variant op het Bessemerproces en wordt toegepast wanneer het ruwijzer veel fosfor (P) bevat. Ook hier wordt van een peervormige convertor gebruik gemaakt. De tijdens het doorblazen gevormde fosforpentoxide werkt oxiderend op het ijzer en wel op de volgende manier:

$$P_2O_5 + 5Fe = 2P + 5FeO$$

Om die reden wordt bij dit proces kalksteen toegevoegd en vindt de volgende omzetting plaats:

$$CaCO_3 = CaO + CO_2$$

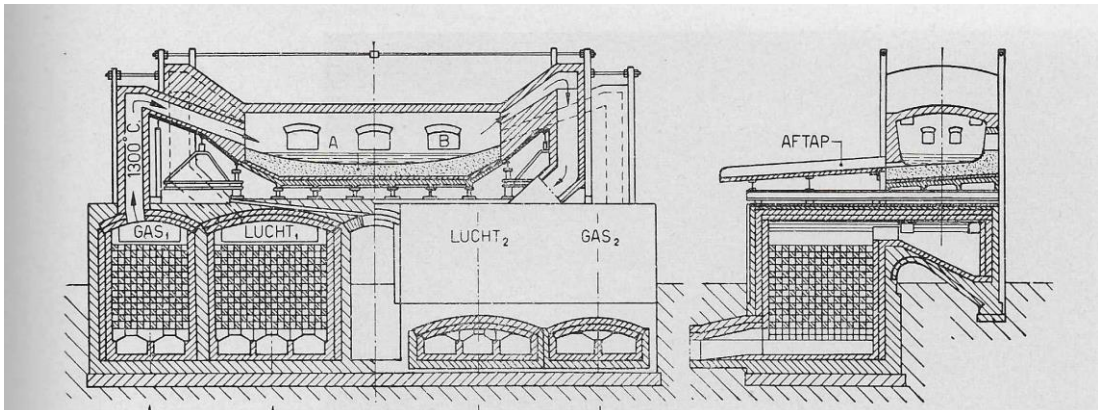
$$P_2O_5 + 3CaO = Ca_3(PO_4)_2$$

Het eindproduct van deze reactie komt in de slak terecht die in gemalen toestand een zeer goede kunstmeststof oplevert het zogenoemde thomasslakkenmeel.
De binnenbekleding van de Thomasconvertor bestaat uit het basische (gebrande)dolomiet (CaO.MgO) dat niet door de eveneens basische kalksteen wordt aangetast.

Het Siemens Martinproces

Het Siemens-Martin proces is genoemd naar de uitvinders Carl Wilhelm Siemens (1823-1883) en Pierre- Emile Martin (1824-1915). De oorspronkelijk door Siemens voor de glasindustrie ontworpen doosvormige oven of haard is door Martin gebruikt om staalafval en ruwijzer in vaste toestand te smelten. De oven bestaat in hoofdzaak uit een hoog gelegen haard waarin het materiaal wordt gesmolten en uit vier, lager, eronder of ernaast, gelegen kamers of regeneratoren waarin gas en verbrandingslucht wordt voorverwarmd. Voor het voorwarmen worden de ontwijkende hete gassen uit de oven gebruikt. De haard wordt van onderen door lucht gekoeld en is voorzien van een zure of basische bekleding al naar gelang er fosforarm of fosforrijk ruwijzer verwerkt moet worden.

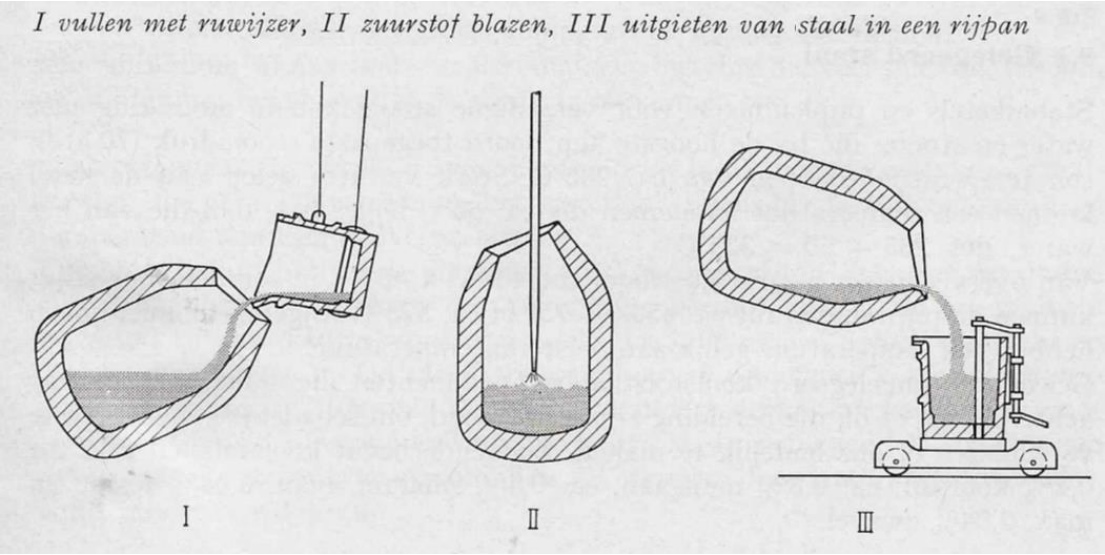
Om de bekleding van de oven in stand te houden wordt afhankelijk van de soort bekleding op gezette tijden dolomiet (CaO.MgO) of kalksteen ($CaCO_3$) in de oven gebracht. De oven wordt via openingen aan de zijkant gevuld met staalafval en/of ruwijzer.
Bij het Siemens Martin proces wordt de oxidatie van de onzuiverheden in het ruwijzer bereikt door toevoeging van sterk geoxideerd ijzer, schroot genoemd. Dit schroot levert de zuurstof die nodig is voor het verbranden van de onzuiverheden in het ruwijzer maar levert daarbij tevens zuiver ijzer. In tegenstelling tot de hier voor beschreven processen wordt gebruik gemaakt van vaste materialen en moet de oven worden verhit om het ijzer te doen smelten alvorens het ontkolingsproces op gang komt.



Het SM staal heeft door het rustige verloop van het proces een homogene samenstelling en is daardoor van zeer goede kwaliteit. Het verdiende lange tijd de voorkeur voor het vervaardigen van machine-onderdelen en werd als ketelplaat voorgeschreven door het stoomwezen voor de vervaardiging van stoomketels. Ook giet men er grote gietstalen voorwerpen van.

Het Oxystaal-proces

Het staal bij het Oxystaal-proces wordt verkregen door zuivere zuurstof op vloeibaar ijzer te blazen. Bij dit proces wordt evenals bij het Bessemer- en Thomasproces gebruik gemaakt van een peervormige oven. De peer wordt gevuld met vloeibaar ruwijzer uit de hoogoven, schroot en ijzererts. De benodigde zuurstof voor dit proces wordt in de nabijheid van de hoogoven in een speciale fabriek geproduceerd. In Nederland is dit proces, dat het Siemens Martin proces grotendeels heeft verdrongen, in 1958 voor het eerst toegepast bij de toenmalige Kon. Hoogovens en Breedband in IJmuiden.

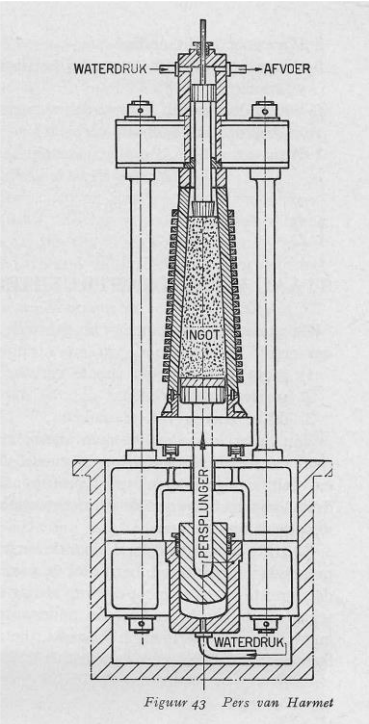


Elektro-oven proces

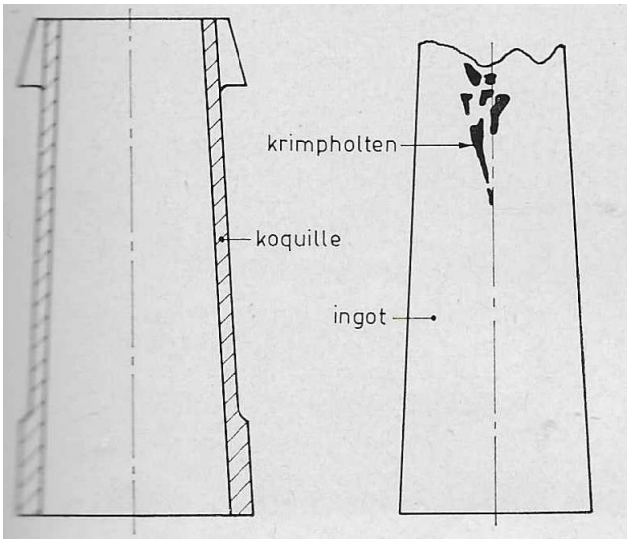
Elektrostaal is de naam voor staal dat vervaardigd is in een elektro-oven, ook wel Héroult-oven of vlamboogoven genaamd. Het proces werd in 1900 uitgevonden door Paul Héroult (1863-1914). Vanaf 1906 werd het op commerciële schaal toegepast in België en Duitsland. Vooral na 1914 nam de betekenis ervan toe. In Nederland werd elektrostaal sinds 1921 geproduceerd, en wel door Demka. Later was het Nedstaal dat het zogenoemde elektrostaal uit schroot vervaardigde.
Het belang van dit proces is dat als grondstof uitsluitend schroot kan worden gebruikt. Zodoende zijn elektrostaalfabrieken niet gebonden aan een hoogovenproces voor de productie van ruwijzer, maar kunnen ze als zelfstandige eenheden fungeren.

Ingots

Het staal verkregen volgens de hier voor beschreven methoden wordt in gietpannen afgetapt. Met deze pannen wordt het vloeibare staal naar een batterij coquilles (speciale kegelvormige gietvormen) getransporteerd waarin het materiaal wordt uitgegoten. De uiteindelijk gestolde ijzermassa noemen we een ingot. De coquilles zijn vierkant in doorsnede als de ingot (het gegoten stuk staal) bestemd is voor het walsen van stafmateriaal en rails; achtkant voor zware smeedstukken en rechthoekig voor plaatmateriaal. In de coquilles koelt het staal sterk af door de relatief koude omgevingslucht.



Figuur 43 Pers van Harmet



De ingots koelen het meest af aan de wanden van de coquilles waardoor krimpholtes ontstaan. Ook vindt er ontmenging plaats tijdens het stollen van het materiaal waardoor de onzuiverheden zich in de kern en in sterkere mate in de kop van de ingot verzamelen. Deze kop, soms een derde van de ingot, moet verwijderd en opnieuw gesmolten worden. Dit is de reden dat men in bepaalde gevallen met behulp van een bij de ingot passende pers de staalmassa onder druk laat stollen. Omdat de kern, kop en voet van de ingot ook na het wegnemen van de verloren kop verschillen in samenstelling zal men dat terugvinden in de hiervan gewalste plaat. Men neemt voor de beoordeling van ketelplaat daarom een proefstaaf uit het midden van het kopeinde (hoog gehalte aan koolstof) en uit de rand van het voeteinde (laag gehalte aan koolstof). Bij een te grote (genormeerde) afwijking wordt de plaat afgekeurd. Als de ingots bestemd zijn voor walswerken dan plaatst men ze in zogenoemde doorwarmputten in afwachting van verdere bewerking.

4.12.8 Staal voor constructie- machine- en apparatenbouw

De stalen ingots kunnen gebruikt worden om er:

1. Grote smeedstukken van te vervaardigen zoals krukassen en scheepsankers
2. Platen van te walsen voor onder andere stoomvaten
3. Dikke staven van te maken door middel van walsen voor het uiteindelijk vervaardigen van profielstaal

De ingots worden al naar gelang de toepassing bewerkt door hameren, persen en walsen. Een wals-inrichting die wordt gebruikt voor het walsen van staal bestaat uit ten minste twee boven elkaar geplaatste gietijzeren of gietstalen walsrollen waarvan de draairichtingen tegengesteld zijn. Staan er verschillende walsrollen achter elkaar dan spreken we over een walsstraat. De rollen zijn in hoogte verstelbaar en worden via grote tandwieloverbrengingen aangedreven door elektromotoren

(vroeger stoommachines). De ingot wordt in dit stadium meestal als wals blok aangeduid en wordt in withete toestand uitgewalst tot de gewenste afmetingen. Tijdens het walsen worden de rollen gekoeld door water over de bovenste rol te laten stromen. Doordat dit water ook op het staal valt wordt de vorming van het zogenoemde hamerslag (walshuid) grotendeels voorkomen.
Bij het walsen ontstaat evenals bij smeedwerk een vezelachtige structuur in de lengterichting van het staal. Bij het walsen blijft de als gevolg van ontmenging opgetreden onzuivere kern van de ingot tussen de twee zuiverder lagen aanwezig.

4.12.9 Ketelmateriaal en vervaardiging van ketels

De keuze van het materiaal voor ketels is van groot belang. Ook bij de bediening en het onderhoud en reparaties van bestaande stoomtoestellen is het van belang te weten wat de overwegingen zijn geweest voor de toepassing van een bepaald materiaal en de beperkingen ervan te kennen. Gebruikte men vroeger toen de keteldruk niet hoger ging dan ca 15 kg/cm², gewone ongelegeerde staalsoorten bereid in de Siemens Martinoven, tegenwoordig met aanmerkelijk hogere keteldrukken en stoomtemperaturen past men staalsoorten toe, welke met andere metalen gelegeerd zijn.
De aanvankelijke drukstijging tot 20 a 25 kg/cm² die gedurende en na de Eerste Wereldoorlog toegepast werd om een hoger rendement van de stoomwerktuigen te bereiken, was oorzaak van veel onverklaarbare defecten aan stoomketels. De ketelbezitters beschuldigden de fabrikanten van slechte fabricage en constructie. De fabrikanten op hun beurt haalden verhaal bij de staalleveranciers en de walserijen. In Amerika had men statistisch vastgesteld dat de meeste ketel defecten voorkwamen in streken waar voedingswater met een bepaalde chemische samenstelling werd gebruikt. De juiste conclusies hieromtrent ontbraken echter. Een meer wetenschappelijke behandeling van het vraagstuk bracht een aantal verschijnselen aan het licht die op de kwaliteit van het materiaal van invloed zijn. De belangrijkste hiervan zijn het zogenoemde verouderen en loogbrosheid ook wel caustieke brosheid genoemd.

Veroudering

Reeds in 1907 publiceerde Stromeyer een artikel, getiteld “The ageing of mild steel” oftewel het verouderen van zacht staal, waarin medegedeeld werd, dat uit buigproeven met ketelplaat was gebleken dat de eigenschappen met de tijd slechter werden. Nadere bestudering van dit verschijnsel toonde aan dat door vervorming de trekvastheid, dat wil zeggen de breukgrens en ook de vloeigrens, hogere waarden verkregen echter de taaiheid, bepaald aan de hand van de kerfslagwaarde, minder werd. De brosheid van het staal nam dus toe in de tijd.
De trekvastheid en de kerfslagwaarde worden vastgesteld met behulp van speciaal geprepareerde proefstaven en daarvoor ontworpen proefbanken. Deze inmiddels genormeerde beproevingen worden hierna nader uiteengezet.
Uit proeven bleek dat de zachte, ongelegeerde staalsoorten de verouderingsverschijnselen het sterkst vertoonden. Veroudering kan optreden door:

- het materiaal gedurende lange tijd onbelast te laten liggen
- het materiaal bij omgevingstemperatuur te vervormen en het daarna gedurende korte of lange tijd onbelast te laten liggen.

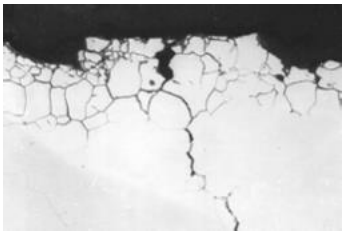
- het materiaal bij omgevingstemperatuur te vervormen en het daarna te verwarmen tot 200 a 300 ºC. de veroudering treedt hierbij spoedig op.
- het materiaal te vervormen bij een temperatuur tussen 150 en 500 ºC.

Blauwbroosheid

De onder punt 4 genoemde oorzaak leidt tot de zogenoemde blauwbroosheid en treedt onder andere op bij de fabricage van ketelfronten en het klinken onder hoge druk als het materiaal niet meer roodwarm is. Het plaatmateriaal maar ook de nagelkoppen vertonen dan haarscheurtjes en worden bros. Door uitgloeien kan het gevaar van blauwbroosheid vermeden worden. Blauwbroosheid wordt zo genoemd omdat het werkstuk na bewerking een donkerblauwe kleur vertoont.

Loogbroosheid of caustieke broosheid

Loogbroosheid is ook een vorm van veroudering van het materiaal en ontstaat als gevolg van de inwerking van stoffen met een basisch karakter of bepaalde zouten in het ketelvoedingswater. Hierdoor ontstaan fijne scheurtjes tussen de kristallen van het materiaal, terwijl de kristallen waaruit het materiaal in hoofdzaak bestaat niet worden aangetast. Voorwaarde is dat het materiaal is belast tot boven de vloeigrens. Onbelast materiaal dat aan de inwerking van loog (sterke base) wordt blootgesteld, wordt niet bros. Voor het ontstaan van de scheurtjes is hoge temperatuur en druk, zoals in een stoomketels, zeer bevorderlijk.



Interkristallijne corrosie

4.12.10 Eisen aan ketelstaal

In gelijke tred met de hogere eisen die door de toename van keteldruk en temperatuur aan ketelmaterialen werden gesteld zijn nieuwe staalsoorten ontwikkeld en is men overgegaan tot het legeren ervan met nikkel (Ni), chroom (Cr), mangaan (Mg) en Molybdeen (Mo). Ook zien we bij pijpen en leidingen staallegeringen met koper (Cu) en aluminium (Al) en voor bevestigingsmateriaal vanadium (Va) toegepast.

Behalve de hogere vloeigrens en kruipgrens geeft toepassing van de gelegeerde staalsoorten bij plaatmateriaal het voordeel van kleinere wanddiktes, wat bij rompen kan betekenen dat ze nog geklonken kunnen worden en bij pijpen dat bij gelijke uitwendige diameter de doortocht voor water en stoom substantieel groter is. het grootste oppervlak van een cilinder zit immers aan de buiten omtrek.

Het hierna afgebeelde overzicht uit omstreeks 1935 van de staalfabrikant Krupp geeft een indruk van het scala aan staalsoorten en bijbehorende toepassingsmogelijkheden hiervan. Tegelijkertijd wordt hiermee aangegeven dat als er reparaties aan een stoomketel moeten worden uitgevoerd, zoals lassen of klinken, men er nauwelijks aan ontkomt, naast een gedegen inspectie en historisch onderzoek naar de aanvankelijk toegepaste materialen, ook een metallurgisch onderzoek uit te voeren.

Toepassing	Staalsoort	Aanduiding van Krupp	Gegarandeerde vloeigrens kg/mm²					Kruipgrens kg/mm²		
			20 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	500 °C	550 °C
Trommels en stoomhouders	Vloeistaal 3	A3O	23	20	18	16	14	12	5	1,5
	Izett-staal 3	Izett 3								
	Vloeistaal 4	A4O	24	21	19	17	15	12	5	1,5
	Izett-staal 4	Izett 4								
	Nikkelstaal	Nikkelstaal F	32	27,5	23,5	20,5	17,5	16	3,5	—
	Cr-Mo-staal	FK 663	45	36	33	30	27	20	9	2
	Cr-Ni-Mo-staal	P 644	45	40,5	38,5	36,5	32	22	11	2,5
	Cu-Ni-staal	—	40/45	—	—	—	—	—	—	—
Ketelpijpen	Vloeistaal 1/2	A 2/3 O of TA 2O	20	17	15	13	10,5	12	5	1,5
	Izett-staal 1/2	Izett 1/2								
	Mo-staal	K 35	30	28	—	23	22	16	12	3
	Cu-Mo-staal	KU 33	28	28	25	23	22	16	12	3
Oververhitter-pijpen	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
	Cr-Si-Mo-staal	Ferrotherm 6 (FF 6)	36	29	27	25	23	16	8	8
	Cr-Al-Mo-staal	Ferrothermal 6 (FFP 6)	36	29	27	25	23	16	8	8
Oververhitter-kasten tot ca. 400°	Mo-staal	K 35	30	28	—	23	22	16	12	3
	Cu-Mo-staal	KU 33	28	28	25	23	22	16	12	3
	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
tot ca. 480°	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
	Cr-Ni-Mo-staal	P 644	45	40,5	38,5	36,5	32	22	11	2,5
Leidingen voor oververh. stoom	Mo-staal	K 35	30	28	—	23	22	16	12	3
	Cu-Mo-staal	KU 33	28	28	25	23	22	16	12	3
	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
Bouten voor oververhitte-stoomleidingen	Cr-Mo-Va-staal	FKM 54	95	75	68	60	50	30	8	2,5
	Cr-Ni-Mo-staal	EFK 2338	60	55	53	48	42	40	20	5

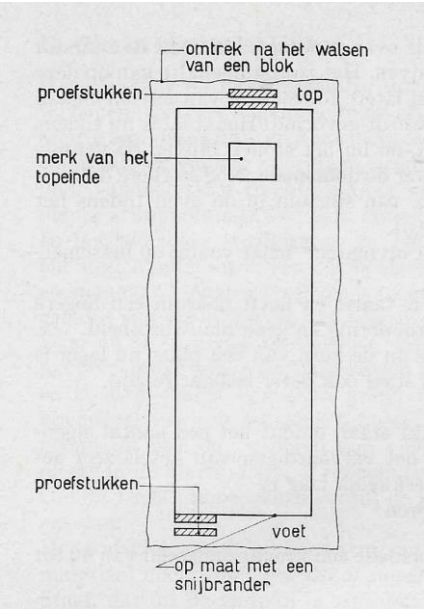
(Cr = chroom, Mo = molybdeen, Ni = nikkel, Cu = koper, Al = aluminium en Va = vanadium.)

Staalsoorten en toepassingsmogelijkheden

4.12.11 Het keuren van stoomketelmaterialen

Een stoom- of damptoestel dat in werking is gebracht, kan gevaar opleveren voor personen in de omgeving en ook schade aan eigendommen veroorzaken. De overheid heeft daarom het gebruik wettelijk geregeld en oefent toezicht uit op de vervaardiging en het gebruik van deze toestellen. De dienst die hiermee tot 1994 was belast heette het inmiddels geprivatiseerde Stoomwezen. Het stoomwezen als zodanig bestaat niet meer, echter de oude wet en regelgeving die is samengevat in de stoomwet en stoombesluit worden door de nieuwe toezichthoudende instanties bij installaties van voor 1994 nog steeds van toepassing verklaard. Materialen waarvan de oude nog bestaande stoomketels en andere stoomtoestellen in poldergemalen werden gemaakt moesten voldoen aan de eisen zoals gesteld door het stoomwezen. Bij het ontwerpen van een ketel diende de constructeur dus rekening te houden met de eigenschappen die de te toe te passen materialen moesten hebben. Deze eigenschappen zijn ook van belang bij het latere onderhoud en het gebruik van het stoomtoestel. Voor het vaststellen van die eigenschappen neemt men op een aantal plaatsen proefstukken en vervaardigt daaruit genormeerde proefstaven die vervolgens aan verschillende proeven worden onderworpen. Van ketel- platen neemt men proefstukken haaks op de walsrichting uit het midden van het kopeinde en uit de zijkant van het voeteinde of uit de afgesneden stukken die tot de bedoelde einden hebben behoord.

Voor het beoordelen van de las van de langsnaad van de romp, neemt men enige proefstaven van de speciaal hiervoor aangelaste plaatdelen. Proefstaven van gietijzer worden bij elke gieting afzonderlijk gegoten.



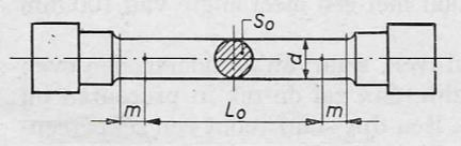
Plaats proefstukken ketelplaat

De voornaamste proeven zijn de:

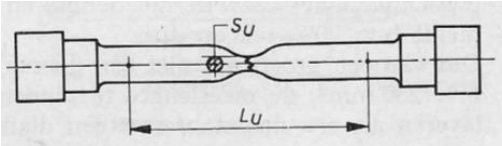
- **Trekproef**. Deze dient voor het bepalen van de treksterkte, de rek, de vloeigrens, de 0,2 % rekgrens en de insnoering.
- **Buigproef.** Deze dient voor staal voor het bepalen van de vervormbaarheid en bij gietijzer voor het vaststellen van de maximale doorbuiging en de buigsterkte.
- **Kerfslagproef**. Deze dient ter bepaling van de kerfslagwaarde, een maat voor de broosheid.

Trekproef

Bij de trekproef wordt een proefstaaf in een trektoestel onder de invloed van een toenemende kracht gelijkmatig gerekt waarbij de doorsnede over de gehele lengte in het begin weinig en daarna over een deel van de lengte sterk afneemt. Het rekken wordt voortgezet tot de staaf breekt. Het toestel geeft aan hoe groot de maximale kracht is geweest om de staaf te doen breken. De verlenging en de bijbehorende kracht worden tijdens de proef opgetekend. Uit de maximale belasting en de oorspronkelijke doorsnede van de proefstaaf wordt de treksterkte berekend. De treksterkte wordt uitgedrukt in kg/mm² met de aantekening dat ze bij kamertemperatuur is bepaald.



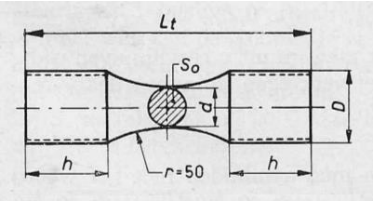
Trekproefstaaf van staal



Trekproefstaaf na beproeving

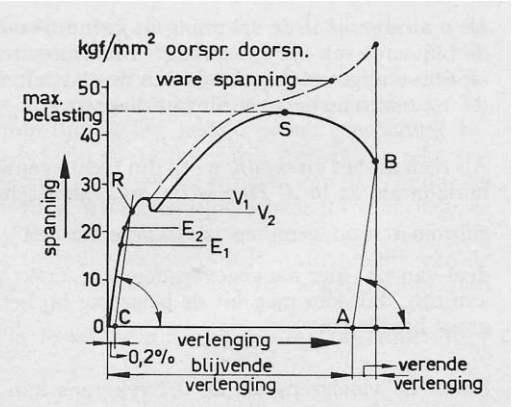
Er is reeds eerder opgemerkt dat bij het stollen van het uitgegoten materiaal in de coquille ontmenging optreedt en de samenstelling van de ingot niet overal gelijk is. Met name het koolstof gehalte in de kop, ook al is deze gesneld, is hoger dan aan het voeteind. Dit heeft als gevolg dat het plaatmateriaal aan het boveneinde een grotere treksterkte vertoont dan aan het ondereinde. Bij de sterkteberekeningen van een ketel gaat men daarom uit van de zwakste schakel dus de laagste waarde.
Bij taaie materialen ziet men voor het breken een insnoering van de proefstaaf ontstaan. Na het breken worden de breukvlakken tegen elkaar gehouden en wordt de vergroting van de afstand tussen de twee meetpunten opgemeten. De vergroting van de meetlengte bij breuk, uitgedrukt in procenten van de oorspronkelijke meetlengte, is de rek. Hoe groter de rek des te taaier is het materiaal. Een grote rek gaat gepaard met een lage treksterkte.

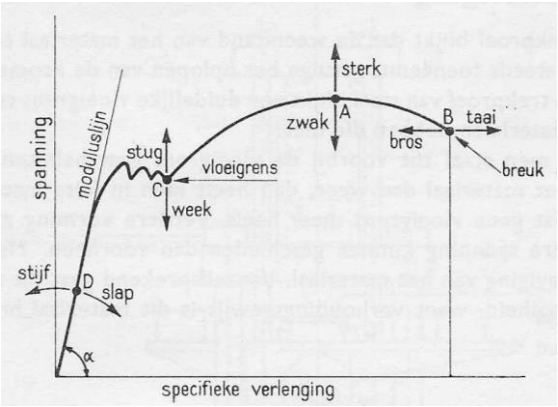
Voor het bepalen van de treksterkte van gietijzer gebruikt men een korte dikke proefstaaf die plaatselijk een kleinere doorsnede heeft zodat van te voren vast staat waar hij zal breken. De kans dat zich in die kleinste doorsnede een gietfout bevindt is daardoor zeer klein. Op deze manier bepaalt men de werkelijke materiaalsterkte en niet die van een toevallige zwakke plek. De rek van gietijzer is zo gering dat zij met een trekproef niet kan worden bepaald.



Trekproefstaaf van gietijzer

Een trekstaaf wordt meestal in een met vloeistofdruk werkend trektoestel aan een gelijkmatig toenemende belasting onderworpen tot hij breekt. De belastingtoename bedraagt circa 1kg/mm². De kracht en de verlenging worden doorlopend gemeten en door het toestel in een diagram opgetekend.





Diagrammen van trekproeven

Hier boven is op twee manieren een dergelijk diagram voor staal weergegeven. Hiermee wordt aangegeven wat er met de proefstaaf in de verschillende stadia gebeurt en wat dit in eenvoudige bewoording betekent voor de kwaliteit van het materiaal . Aanvankelijk neemt de verlenging recht

evenredig toe met de belasting zodat er een nagenoeg rechte schuin oplopende lijn ontstaat. Er komt een moment dat de rek meer dan evenredig toeneemt, de lijn buigt dan af naar rechts. Dit punt E_1 waar de rek een kleine waarde bijvoorbeeld 0,01 % meer toeneemt dan de spanning wordt de *evenredigheidsgrens* genoemd. Deze spanning wordt uitgedrukt in kg/mm² van de oorspronkelijke doorsnede. Zolang de belasting betrekkelijk laag is, zal na het wegnemen daarvan de proefstaaf naar de oorspronkelijke lengte terugkeren. De rek is dan nog verend of elastisch.

Als men de belasting telkens wegneemt en trapsgewijs groter maakt zal op een gegeven moment de staaf niet meer terugkeren naar zijn aanvankelijke lengte bijvoorbeeld in punt E_2 . Van de totale rek die bestond bij de laatst uitgeoefende kracht verdwijnt dus een deel na het wegnemen van de belasting, de verende rek. terwijl het andere deel, de blijvende of plastische rek, aanwezig blijft. Punt E_2 noemen we de *elasticiteitsgrens* die evenals de evenredigheidsgrens wordt uitgedrukt in kg/mm² van de oorspronkelijke doorsnede. De evenredigheidsgrens valt dikwijls samen met, of ligt ook wel onder de elasticiteitsgrens.

Laat men na het passeren van de elasticiteitsgrens de belasting verder toenemen dan zal bij ongelegeerde staalsoorten op een gegeven moment de lengte van de staaf vrij sterk toenemen terwijl de belasting gelijk blijft of zelfs afneemt. Men noemt dit verschijnsel vloeien en het punt waar dat gebeurt de *vloeigrens*. Ook de vloeigrens wordt uitgedrukt kg/mm² van de oorspronkelijke doorsnede waarbij de belasting voor het eerst niet toeneemt. Dit punt wordt in de grafiek bij V_1 aangegeven.

Van ongelegeerde staalsoorten wordt de vloeigrens bij 20 ºC op 5/9 van de treksterkte bij die temperatuur gehouden, tenzij uit proeven een hogere waarde is gebleken. Staalsoorten met treksterkten boven de 60 kg/mm² hebben geen duidelijk waarneembare vloeigrens. Voor die staalsoorten maar ook voor zacht staal is het gebruikelijk de 0,2 % rekgrens te bepalen. De 0,2% rekgrens is de spanning in kg/mm² oorspronkelijke doorsnede waarbij de blijvende rek 0,2 % bedraagt. Deze meer technische grens kiest men omdat deze makkelijker is te bepalen, dan wel bij benadering op de volgende manier grafisch uit het diagram is af te leiden.

Als men uit het breekpunt B een lijn evenwijdig aan OE_1 trekt dan snijdt deze lijn de basis in A, dan is OA op schaal de blijvende rek die aan de gebroken staaf gemeten is. Is deze bijvoorbeeld 24 % dan vertegenwoordigt 0,2 % rekgrens 0,2/24 = 1/120 deel van het lijnstuk OA aangegeven bij punt C. Trekt men door dit punt een lijn evenwijdig aan OE_1 dan snijdt deze de grafiek in R en kan op de verticale as de belasting worden afgelezen. Zowel de vloeigrens als 0,2 % rekgrens worden aangeduid met rekgrens.

Na het passeren van de vloeigrens neemt de weerstand tegen vervorming minder sterk toe en buigt de trekkromme steeds meer naar rechts totdat een bijna horizontaal deel wordt beschreven. Het hoogste punt S vertegenwoordigt de maximale belasting aan de hand waarvan de treksterkte wordt berekend. Aanvankelijk wordt de staaf over de volle lengte dunner, echter bij de maximale belasting concentreert deze contractie zich op een punt en vindt insnoering plaats en rekt de staaf zelfs bij een verminderde belasting. Het diagram geeft dus niet de werkelijke spanning in het materiaal weer

omdat de belasting steeds gedeeld wordt door de originele doorsnede. Tenslotte breekt de staaf bij punt B. De werkelijke spanning in het materiaal, hier weergegeven door de stippellijn, is te berekenen door de spanning te delen door de bijbehorende kleinste doorsnede.

Invloed temperatuur

De treksterkte van ongelegeerd staal neemt bij een temperatuurverhoging van 20º tot ongeveer 200 eerst toe, Bij een verdere verhoging in temperatuur neemt zij af. Bij sterkteberekeningen brengt men daarom bij een metaal temperatuur tot 214 ºC de minimumwaarde van de treksterkte bepaald bij 20 ºC in rekening. Bij een metaal temperatuur tº boven de 214 ºC moet de treksterkte met de uitkomst van onder- staande formule worden vermenigvuldigd.

$$1.2\left\{1-\left(\frac{t}{525}\right)^2\right\}$$

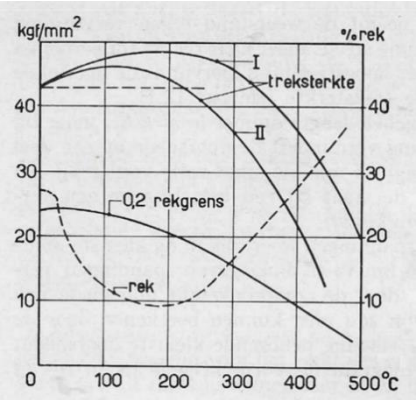
Dat wil zeggen dat bij 250, 300 en 350 ºC moet met respectievelijk 93, 81,en 66% van de treksterkte bepaald bij 20 ºC gerekend worden.

Bij de temperatuur, die een ketel of vat tijdens het bedrijf aanneemt is de rekgrens altijd lager dan tijdens de trekproef bij 20 ºC. Deze rekgrens die als maatstaf voor de sterkte berekeningen geldt wordt gewoonlijk berekend aan de hand van de onderstaande formule. De metaaltemperatuur wordt geacht afhankelijk van de mate van verhitting 25 ºC tot 75 ºC hoger te zijn dan van het water of de stoom waarmee het in contact is. Is de rekgrens ($S_{v)}$ bij 20 ºC, dan is de rekgrens bij tº (S_{vt}) te berekenen met:

$$S_{vt} = S_v \cdot \left\{1-\left(\frac{t}{525}\right)^2\right\}$$

Bij 200, 300, 400 ºC is de rekgrens nog respectievelijk 85, 67, en 41% van die bij 20 ºC.

In de hier na volgende grafiek is de invloed van de materiaal temperatuur op de treksterkte en de rek weergegeven van koolstofstaal. Bij I is het beproefde verloop weergegeven. Bij II stelt die het verloop voor op basis van de berekende grondslagen.



Invloed temperatuur op rek en treksterkte

Uit de beschrijving en het weergegeven verloop kan het volgende worden geconcludeerd.

- Dat de treksterkte eerst toe- en daarna afneemt
- Dat de rekgrens aanvankelijk langzaam, bij hoge temperaturen snel afneemt
- Dat de bij 20 ºC bepaalde rekcijfers maar weinig zeggen over de belangrijke eigenschappen van staal bij bedrijfstemperatuur

Kruip

De besproken trekproef wordt bij een temperatuur van ca 20 ºC genomen en duurt slechts een paar minuten. De toelaatbare spanning en de rek- of vloeigrens worden dus bepaald uit waarnemingen, die slechts op een zeer korte tijdsduur betrekking hebben. Als staal bij een temperatuur hoger dan 350 ºC wordt belast, moet men echter rekening houden met de duur van de belasting. Bij een duurbelasting bestaat de mogelijkheid dat het staal, ook al wordt het belast onder de rekgrens, zal blijven rekken, waardoor ongewenste vervorming en zelfs breuk kan optreden. Dit voortgaande rekken onder constante belasting noemen we het kruipen van het materiaal. Met het oog op deze verschijnselen heeft men het begrip kruipgrens ingevoerd. Men kan hieronder verstaan de spanning waarbij de gemiddelde reksnelheid gedurende een zeker tijdsverloop een bepaald bedrag niet overschrijdt. Hiervoor wordt een reksnelheid van 0,0015 % van de gemiddelde meetlengte per uur gehanteerd die is waargenomen tussen het 25^{e} en 35^{e} uur van de beproeving.

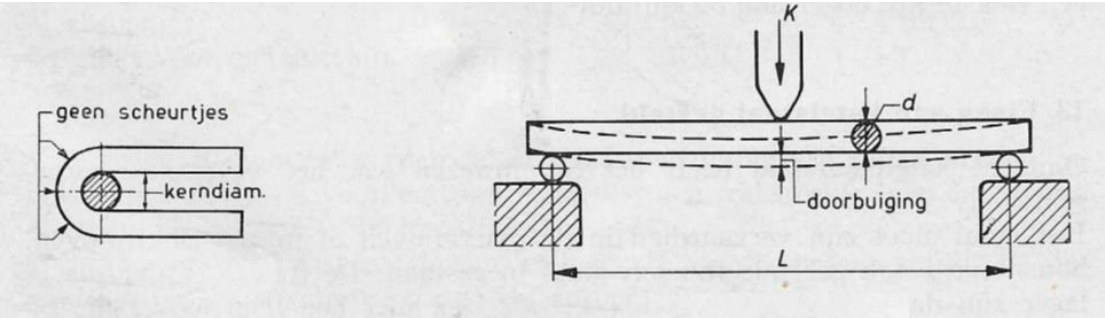
Indien verwacht kan worden dat het materiaal onder bedrijfsomstandigheden zal kruipen, berekent men de dikte van het plaatmateriaal met de laagste van de volgende waarden.

- De gemiddelde spanning die een verlenging van 1% veroorzaakt na 100.000 uur;
- 4/5 van de minimum spanning, die breuk veroorzaakt na 100.000 uur;
- 2/3 van de gemiddelde spanning, die breuk veroorzaakt na 100.000 uur.

Buigproef

Een buigproef dient om de vervormbaarheid van staal in koude toestand te leren kennen. Hiertoe wordt een glad bewerkte proefstaaf met een rechthoekige doorsnede genomen uit de dwarsrichting van de plaat, dus haaks op de draad van het staal. Deze buigt men koud om een ronde kern tot de einden evenwijdig aan elkaar staan. De middellijn van deze kern is recht evenredig met de dikte van de proefstaaf en kleiner naarmate de treksterkte van de staaf kleiner is. Zo is bijvoorbeeld voor een proefstaaf met een treksterkte tussen de 35 - 42 kg/mm² de diameter van de kern de helft van de proefstaaf dikte. Bij een treksterkte tussen de 41 - 50 kg/mm² is de kern even dik, terwijl bij een treksterkte tussen de 46 - 54 kg/mm² een kerndiameter van anderhalf keer de dikte van de proefstaaf wordt voorgeschreven.

Na afloop van de proef mogen er aan de buitenzijde van de proefstaaf met het blote oog geen scheurtjes te zien zijn.

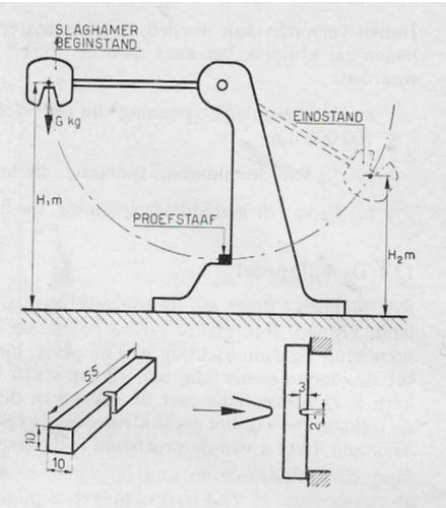


Buigproef voor staal **Buigproef voor gietijzer**

Van gietijzer neemt men een in de einden ondersteunde ronde proefstaaf die door een in het midden aangrijpende kracht, wordt gebogen tot deze breekt. Daarbij worden de kracht en de doorbuiging gemeten. De grootste doorbuiging is een maat voor de taaiheid. Uit de kracht nodig voor het breken kan men de spanning berekenen die in de buitenste vezel heeft geheerst op het moment van breken. Deze spanning is voor het onderling kunnen vergelijken van de verschillende gietijzersoorten in relatie tot hun toepassing. Hierbij moet gedacht worden aan bijvoorbeeld de zuigerveren van de stoommachine.

Kerfslagproef

Met de kerfslagproef tracht men inzicht te krijgen in het gedrag van het materiaal onder schokkende belasting. Hierbij gebruikt men een vierkant proefstaafje met een doorsnede van 10 x 10 mm, in het midden voorzien van een kerf met een voorgeschreven afmeting. Het proefstaafje wordt bij de proef met de zogenoemde Charpy-hamer ondersteund in twee punten. Daarna wordt het stukgeslagen met deze slaghamer. De arbeid verricht voor het breken van de proefstaaf wordt uitgedrukt in kgm/cm² doorsnede ter plaatse van de kern. Dit noemt men de kerfslagwaarde. Men vindt deze waarde uit:



Kerfslagproeftoestel

Gewicht hamer x (H1 – H2) kg.m/cm²

Van ketelstaal is de kerfslagwaarde hoger naarmate de treksterkte lager is of anders uitgedrukt de rek groter is en het materiaal taaier of minder broos. Deze proef waaraan men thans meer waarde hecht dan aan de buigproef wordt vooral toegepast bij de beoordeling van laswerk en gelegeerde staalsoorten met een treksterkte groter dan 50 kg/mm².

Ketelstaal eisen

Omtrent onder andere ketelplaat schreef het toenmalige stoomwezen in het midden van de vorige eeuw bepaalde eisen voor. Deze eisen zijn gebaseerd op voortschrijdend inzicht, ervaring en technologische ontwikkelingen met name met betrekking tot de staalbereiding en de fabricage

technieken van stoomtoestellen in de loop der tijd, zoals de overstap van geklonken naar gelaste ketels. In voorkomende gevallen, bijvoorbeeld bij een reparatie aan oude stoomketels, is het dan ook raadzaam om de geldende regelgeving uit de tijd van de fabricage van het stoomtoestel in acht te nemen.

Het staal moet zijn vervaardigd in de Siemens Martens-oven of in een elektro-oven. Ook het gebruik van het zogenoemde oxystaal is toegestaan. De treksterkte mag echter in alle gevallen niet lager zijn dan 35 kg/mm² en in het algemeen niet hoger dan 56 kg/mm². Het verschil tussen de hoogste en de laagste treksterkte mag bij eenzelfde plaat ten hoogste bedragen:

Verschil in treksterkte in kgf/mm²	Bij een lengte van de plaat in m
5	≤5
6	5...10
7	≥10

Verschil hoogste en laagste treksterkte

De vereiste rek, bepaald met een genormeerde dp5 proefstaaf en de kerfslagwaarde zijn afhankelijk gesteld volgens de hierna volgende tabel.

Treksterkte in kgf/mm²	35 — 42	41 — 50	46 — 54
Rek in % op dp_5	32 — 28	28 — 24	24 — 21
Kerfslagwaarde in kgfm/cm²	8 — 6,5	7 — 5	5,5 — 4,5

Treksterkte versus rek en kerfslagwaarde

Een aantal beproevingseisen, van het toenmalige stoomwezen uit de zestiger jaren van de vorige eeuw, voor genormaliseerde dat wil zeggen gegloeide soorten gewalst staal voor stoomtoestellen zijn aangegeven in de volgende tabel. Voor delen die moeten worden gelast en niet spanningsvrij kunnen worden gegloeid, zoals bijvoorbeeld bij reparaties geeft men de voorkeur aan staal met een treksterkte niet hoger dan 45 kg/mm². Gebruik van staal met een hogere treksterkte wordt toegestaan mits na het lassen het geheel spanningsvrij wordt gegloeid.

	Ongelegeerd staal		Laag gelegeerd staal
Treksterkte in kgf/mm²	35 tot 42	41 tot 50	46 tot 54
Rek in % op dp_5	32 tot 28	28 tot 24	24 tot 21
Rekgrens (minimaal) in kgf/mm²	19	23	26 en $5/9 \times S_B$
Kerndiam. bij buigproef	0,5*a*	*a*	1,5*a*
Kerfslagwaarde in kgfm/cm²	8 tot 6,5	6,5 tot 5	5,5 tot 4,5
% koolstof	~0,12	~0,18	0,18 tot 0,21
% mangaan	0,80	0,80	0,9
% silicium	0,40	0,40	0,15 tot 0,30
% fosfor max.	0,04	0,04	0,04
% zwavel max.	0,04	0,04	0,05
% molybdeen	—	—	0,4 tot 1,0
% chroom	—	—	1 tot 2,5
Geschikt voor metaaltemp.	375°C	375°C	500°C

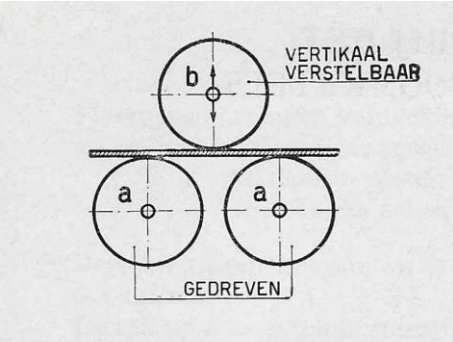
Beproevingseisen Stoomwezen genormaliseerd staal

4.12.12 Bewerkingen van ketelplaat

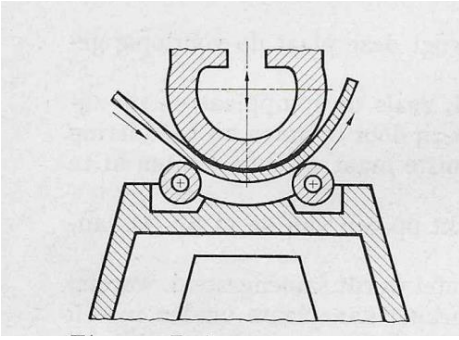
Rompen

Door middel van walsen ontstaat er uit het walsblok een plaat van enigszins onregelmatige rechthoekige vorm. Door middel van knippen, snijbranden, tegenwoordig plasma snijden, krijgt de plaat de voorlopige gewenste afmeting voor het betreffende ketel onderdeel. Platen die niet hoeven te worden geflenst, zoals de romp of de vlamkast van een Schotse ketel, brengt men op de juiste maat door middel van schaven. Daar waar klinknaden gekookt moeten worden om ze waterdicht te krijgen, wordt de plaatkant meteen onder de juiste hoek geschaafd. Plaatkanten die men wil lassen worden bewerkt op één van de later in dit hoofdstuk aangegeven wijzen.

De platen waaruit een romp wordt samengesteld worden koud gebogen. Hierbij maakt men gebruik van een wals die bestaat uit drie rollen. Van de drie rollen worden de onderste twee zo dicht mogelijk bij elkaar in vaste stoelen ondersteund en met behulp van tandwielen op de assen door een stoommachine of tegenwoordig een elektromotor aangedreven. De bovenste rol is in hoogte verstelbaar en oefent een zekere druk uit, die de plaat, terwijl ze wordt voortbewogen, gelijkmatig buigt.



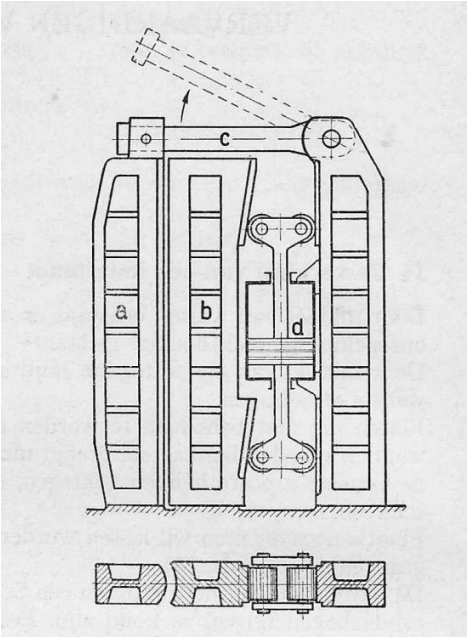
Schema platenbuigmachine



Schema buigmachine grote rompen

Afhankelijk van de gewenste kromming wordt de plaat een of meerdere keren doorgevoerd. De bovenrol kan worden gelicht waarna het uit een stuk bestaande wals deel zijdelings verwijderd kan worden. Het begin en het eind van de plaat krijgen op deze manier niet de juiste kromming en worden daarom met een pers, voordat met het walsen wordt begonnen, in de juiste vorm gebracht. De pers bestaat uit een door waterdruk bewogen stempel en een holle matrijs. Men gebruikt hier water in plaats van het hydraulische systeem omdat eventueel gemorste olie de plaat zou vervuilen. Olie belemmert de warmtedoorgang en kan bij de eenmaal in bedrijf zijnde ketel tot plaatselijke oververhitting en daardoor schade leiden. Ook bij de verspanende bewerkingen van de ketel is het gebruik van olie niet toegestaan.

Een andere manier van het vormen van de romp is die met behulp van de hieronder afgebeelde buigmachine. Deze buigmachine, die voornamelijk wordt ingezet bij de vervaardiging van dikwandige ketelrompen, bestaat uit een vaste(a) en een losse balk(b) waarvan de naar elkaar toegekeerde zijden respectievelijk hol en bol zijn. De te vormen romp staat verticaal op in de grond geplaatste rollen. Door het toelaten van water onder hoge druk onder de zuiger (d) gaat deze omhoog. De losse balk (b) wordt dan door de aan de zuigerstang bevestigde rollen opzij gedrukt. Het gedeelte van de plaat dat zich tussen de balken bevindt wordt zodoende gebogen. De aanvankelijk vlakke plaat wordt na elke buigsessie een balkbreedte opgeschoven totdat de gewenste ronding is verkregen.Met een dergelijke pers kunnen ook de einden van de platen worden gebogen en de strippen voor de klinkverbinding in de juiste vorm gebracht. Anders dan bij walsen zal bij deze bewerkingsmethode de romp facetten vertonen. Een uit één plaat gevormde rompring kan na het opklappen van het juk aan bovenzijde uit de buigmachine worden genomen.

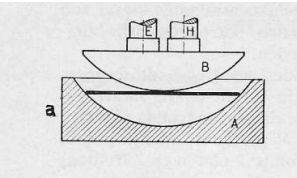


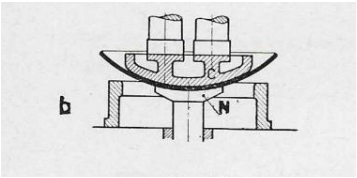
Buigmachine voor zware rompen

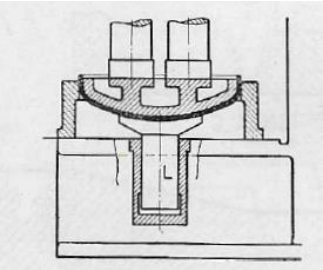
Met een dergelijke pers kunnen ook de einden van de platen worden gebogen en de strippen voor de klinkverbinding in de juiste vorm worden gebracht. Anders dan bij walsen zal bij deze bewerkingsmethode de romp facetten vertonen. Een uit één plaat gevormde rompring kan na het opklappen van het juk(c) aan de bovenzijde uit de buigmachine worden genomen.

Fronten

Bolle of halfbolle fronten van een stoomketel kunnen worden vervaardigd door middel van persen. Men gebruikt hiervoor hydraulisch bewogen stempels en een aantal verschillende matrijzen.



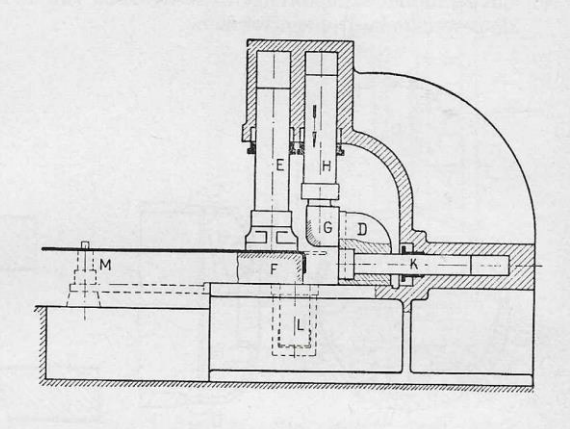




Persen ketelfronten

Een rond gesneden plaat waarvan de doorsnede iets groter is dan de ontwikkelde middellijn van het front wordt verhit tot circa 900 ºC . Vervolgens wordt deze in een bolvormige matrijs gelegd en met het bijbehorende stempel in de juiste vorm gedrukt. Hierbij rekt het materiaal in het midden en neemt de dikte iets af. Na deze vervorming wordt de plaat opnieuw verhit en vervolgens tussen twee stempels geklemd en door een ringvormige matrijs gedrukt. Bij deze behandeling wordt de flens gevormd. Bij grote wanddikten geeft men de flens de gewenste buitendiameter door het front door steeds kleinere ringen te persen.

Vlakke fronten zoals toegepast bij Schotse ketels worden gemaakt met behulp van een zogenoemde flensmachine. Van te voren wordt een cirkelvormige plaat in zijn geheel of bij grote afmetingen gedeeltelijk op gloeihitte gebracht en op het zogenoemde zadel van de pers gelegd. In het midden van de plaat is een gat geboord waarmee deze op de pers wordt gecentreerd. De plunjer boven het zadel houdt de plaat tijdens het flenzen in positie. De plaat wordt in een rondgaande beweging om de centerpen stukje bij beetje door de verticale cilinder gebogen en uiteindelijk door de horizontale cilinder haaks tegen het zadel gedrukt Het plaatmateriaal wordt bij deze bewerking gestuikt.



Flensmachine

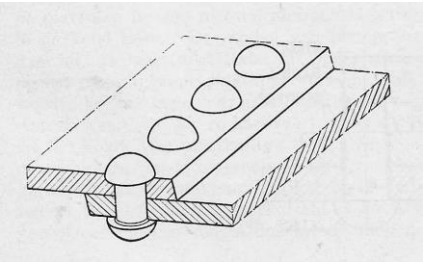
De te vormen plaat wordt telkens voor een deel verhit. Ten gevolge van plaatselijke afkoeling en door de vervorming ontstaan er spanningen in het materiaal, die na afloop van de bewerking worden opgeheven door de plaat zorgvuldig uit te gloeien. Dit uitgloeien wordt behandeld bij het onderdeel gelaste ketelconstructies.

4.12.13 Plaatverbindingen

De verbindingen van de platen van een stoomketel moeten in de eerste plaats sterk genoeg zijn om de optredende krachten op te kunnen nemen. Klinkverbindingen moeten bovendien stoom en waterdicht zijn, ook bij vormveranderingen die tijdens het opstoken of bedrijf van een ketel ontstaan. Een plaatverbinding, veelal naad genoemd, kan men tot stand brengen met klinknagels en sinds de tweede helft van de vorige eeuw door middel van lassen.

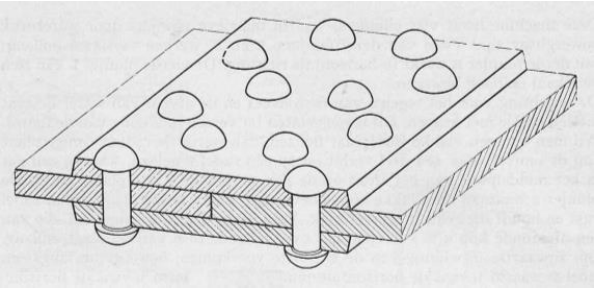
Klinknaadsoorten

De klinknaden die bij een stoomketel voorkomen worden onderscheiden in lapnaden en stripnaden met de verbijzondering dat in de apparatenbouw bij stripnaden altijd aan beide zijden een strip wordt aangebracht en we dan spreken van een dubbele stripnaad. Bij een lapnaad liggen de plaateinden een stukje over elkaar. De over elkaar liggende plaatdelen noemt men de lappen. In deze lappen worden de nagelgaten geboord en op de hierna beschreven wijze vervolgens de klinknagels aangebracht.



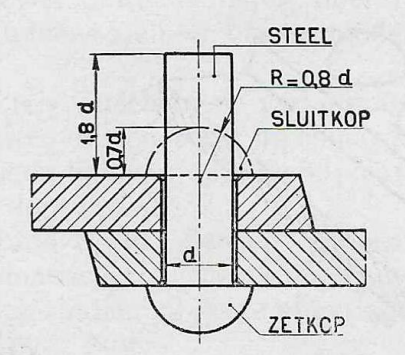
Lapnaad

Bij stripnaden worden de plaateinden stuik tegen elkaar aangebracht. Vervolgens wordt aan elke zijde een strip aangebracht. Bij de langsnaden van stoomketels worden altijd dubbele stripnaden toegepast. Dit is om te voorkomen dat bij belasting de verbinding zich strekt en de nagels, voornamelijk de nagelkoppen, op trek worden belast en breken. Door de plaat en de strippen worden in een bepaald patroon de nagelgaten geboord en op de hierna beschreven wijze de klinknagels aangebracht. Nadat de bewerkte platen en de bijbehorende strippen in de juiste vorm en positie zijn gebracht en men het geheel met bouten en ketelklemmen in een aantal iets te klein geboorde nagelgaten heeft vastgezet wordt de rest van de eerder afgetekende nagelgaten voorgeboord. Met hecht-bouten in de te klein voorgeboorde gaten worden de te maken verbindingen verder stevig op elkaar geklemd. Hierna worden één voor één de gaten geruimd of nageboord zodat zuiver cilindrische nagelgaten worden verkregen die recht tegenover elkaar liggen, waarna een verbinding tot stand wordt gebracht door telkens het uitstekende deel van een gloeiend ingebrachte klinknagel door middel van hameren of persen tot een kop om te vormen.



4.12.14 Klinken

Een klinknagel is een kort rond staafje waar aan één zijde fabrieksmatig een kop is gesmeed. Deze kop heet de zetkop. De kop die bij het tot stand brengen van de klinkverbinding door hameren of persen wordt gevormd, noemen we de sluitkop. In principe wordt de klinknagel alleen op afschuiven belast, echter na het klinken maar ook tijdens bedrijf zal de nagel als gevolg van het uitzetten en krimpen van het plaatmateriaal en de nagel zelf, ook op trek worden belast. Dit is nodig omdat de plaatdelen een drukdichte verbinding moeten vormen. De nagelkop wordt hierdoor continu in lengterichting op afschuiven belast. Het volume van beide koppen moet dan ook zodanig zijn dat ze deze kracht kunnen opnemen. Voor het maken van een bolle sluitkop is een volume nodig van ongeveer 1,8 keer de diameter van de nagelsteel.



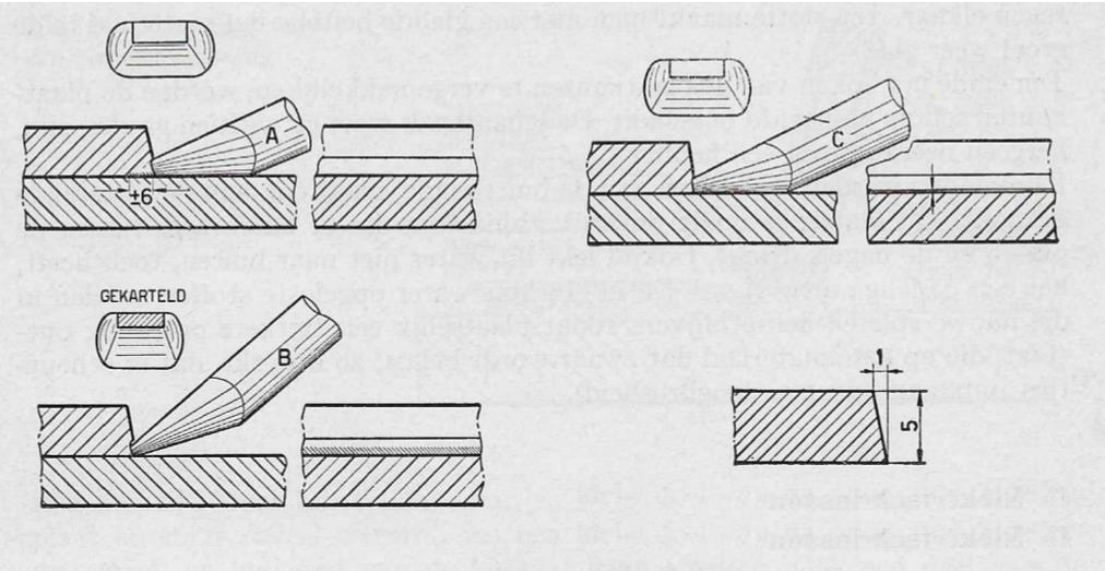
Maatvoering klinkverbinding

Bij het handmatig warmklinken worden de nagelstelen of schachten met behulp van een op een smidsvuur geplaatste nagelplaat of nagelbeugel witgloeiend gemaakt en met de nageltang in het gat gestoken. De kop van de nagel wordt tijdens het klinken met een handklinkdolly of met een dompdolly of tegenhouder tegengehouden. Vlug wordt dan met een zware hamer of voorhamer de kop gestuikt en vervolgens met de snapper en de voorhamer afgewerkt tot een snap- of zetkop. Deze kop moet, wil hij voldoen, aan de rand goed vol zijn, aansluiten op de plaat, een kleine braam hebben, en na het klinken, in het donker nog waarneembaar gloeien. Verkeerd is het de nagel zolang te klinken dat deze blauw en als gevolg daarvan hard en broos wordt. De zetkop kan dan geen of onvoldoende afschuifkracht opnemen en springt er af. Genoemd verschijnsel heet blauwbroosheid en treedt ook op bij andere bewerkingen zoals het maken van een vlak ketelfront.

Koken van naden

De klinknaden van een ketel blijken ook bij zorgvuldig bewerken van de platen en flenzen niet geheel water- en stoomdicht te zijn. De randen van platen en strippen worden daarom met een speciale beitel iets opgestuikt, zodat dit opgestuikte materiaal een grote druk uitoefent op het onderliggende plaatoppervlak en zodoende de spleet afdicht. Deze bewerking noemen we “koken”, afgeleid van het Engelse werkwoord ”to caulk”(= waterdicht maken). Bij het koken van plaatkanten drijft men met een gladde beitel, waarvan de onderkant iets is afgerond, een groef in de bovenplaat of strip. Hierdoor wordt het materiaal van de kookrand sterk tegen de onderliggende plaat gedrukt. Met een tweede iets dunnere beitel met een gekartelde snede verdiept men vervolgens de groeven. Tenslotte maakt met men met een gladde beitel de groeven weer glad. Teneinde het koken te vergemakkelijken worden de plaatkanten schuin geschaafd of gehakt. De hoek moet ongeveer vijftien graden zijn, wat neerkomt op een helling van 1 : 5. Klinknaden worden zowel aan de buiten-

als de binnenzijde gekookt. Dit laatste is nodig om te voorkomen dat er ketelwater en de eventueel daarin opgeloste stoffen tussen de plaat en de nagels dringt zodat een sterkere oplossing ontstaat die het ketelmateriaal aantast. Er ontstaan dan minuscule kleine scheurtjes in het ketelmateriaal. Dit verschijnsel staat bekend onder de naam loogbroosheid en is moeilijk waarneembaar.



Koken van plaatkanten

4.12.15 Lassen

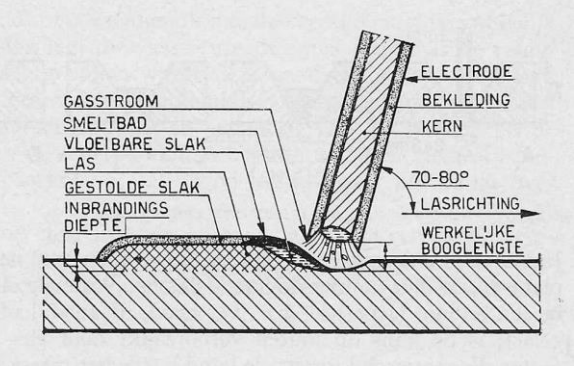
Lassen gebeurt uitsluitend door middel van het versmelten van een zogenoemde elektrode met behulp van een elektrische vlamboog. Deze techniek wordt toegepast vanaf de Tweede Wereldoorlog en mag slechts worden toegepast als er gebruik wordt gemaakt van hoogwaardige staalsoorten waarvan de samenstelling nauwkeurig bekend is. Verder is een uitgebreide voorbehandeling van de lasnaad nodig en moeten de constructies na het lassen in bijna alle gevallen spanningsvrij worden gegloeid. Het eindresultaat is, anders dan bij klinkverbindingen, een absoluut drukdichte constructie.

Bij het lassen uit de hand, met een vlamboog, worden zowel het werkstuk als de lasstaaf, die de lasser in de tang houdt, met een elektrische kabel verbonden met een lastransformator. Als de lasser de elektrode in contact brengt met het werkstuk wordt de stroomkring gesloten. Verbreekt hij vervolgens het contact door de elektrode enkele millimeters op te lichten dan ontstaat tussen de elektrode en het werkstuk een vlamboog waarin een temperatuur heerst van circa 6000 ºC.

Voor booglassen met beklede elektrodes kan men alleen gelijk- en voor blanke lasdraad gelijk- en wisselstroom gebruiken. In verband met de veiligheid van de lassers wordt de netspanning met behulp van een transformator dan wel omvormer omgezet naar een spanning van 25-30 Volt bij gelijkstroom en 35-42 Volt bij wisselstroom. De stroomsterkte is in het algemeen vrij hoog en varieert tussen de 100 tot 500 Ampère. Zij moet hoger zijn naarmate de elektrode en de verbinding dikker zijn en er dus meer energie nodig is om het las- en moedermateriaal te versmelten. Door het trekken van een vlamboog tussen een lasstaaf en bijvoorbeeld de te lassen ketelplaat komt zoveel warmte vrij dat een klein deel van de plaat – het moedermateriaal- en het eind van de lasstaaf gaan smelten.

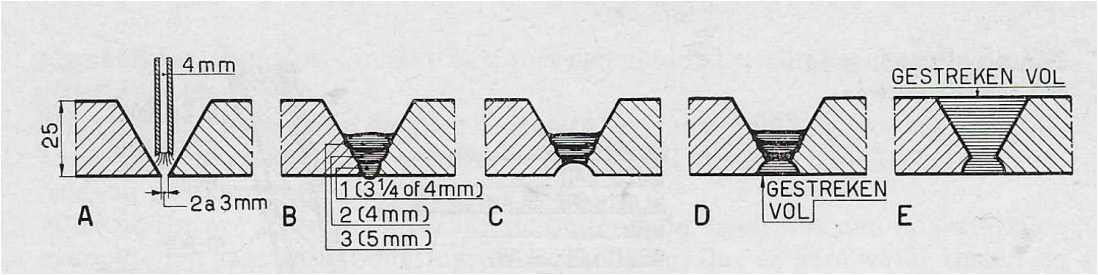
Ook een deel van de bekleding smelt en verdampt zelfs. Het gevormde gas stroomt uit de kelk en verhindert evenals de gevormde slak dat het gevormde smeltbad aan de omgevingslucht wordt blootgesteld.

Door aanraking met lucht vormen zich uit ijzer en zuurstof oxiden en uit koolstof en zuurstof het overbekende kooldioxide die samen met stikstof gasholtes in de las kunnen doen ontstaan. Bovendien ontstaan onder invloed van zuurstof uit ijzer en stikstof nitriden, die zeer hard zijn en de rek van het lasmateriaal verminderen.
Om een lasnaad te maken moet de lasstaaf onder een hoek van 70 – 80 º met het werkstuk in de lasrichting worden bewogen. Door de schuine stand wordt het gesmolten materiaal naar één zijde gestuwd en wordt onder de elektrode het moedermateriaal vloeibaar gemaakt zodat de gewenste inbranding wordt bereikt. Om een las van enige breedte te vormen kan men de elektrode haaks op de las heen en weer bewegen-zweien- of de las in verkante lagen aanbrengen. Nadat een laag (lasrups) is aangebracht moet de slak met een bikhamer en een staalborstel worden verwijderd. Eerst daarna kan een nieuwe lasrups worden gelegd.



Schema las met beklede elektrode

Voorzover mogelijk moet men een naad in horizontale stand en onder de hand lassen. De kans op lasfouten zoals gas- en slakinsluitingen is dan het kleinst. Bij moderne en complex samengestelde ketelinstallaties is dat niet mogelijk. Ook bij later uit te voeren reparaties wijkt men dan uit naar andere lasposities zoals het verticaal, zijdelings of zelfs boven het hoofd lassen. Bij het lassen uit die posities maakt men gebruik van aangepaste -traag vloeiende- elektrodes.

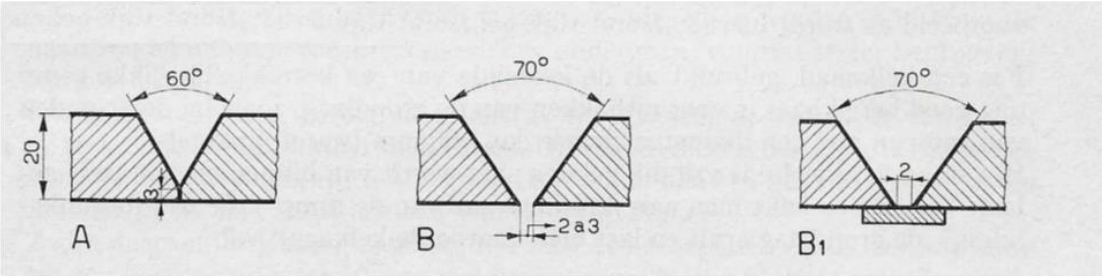


Volgorde vullen lasnaad

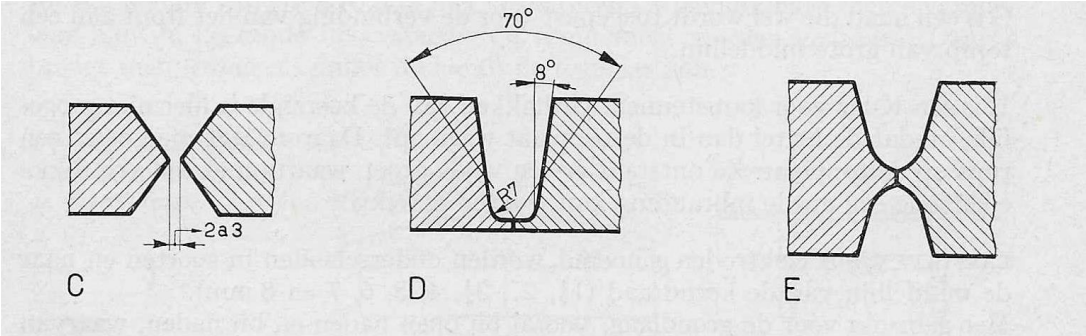
De eerste rups die in een naad wordt gelegd, de grondlaag, smelt niet altijd goed samen met het moeder- materiaal en wordt daarom uitgehakt als daarvoor de ruimte is of voorzien van een tegenlas. Bij grote plaatdiktes moet men bij de toepassing van een eenvoudige V-naad veel lasmateriaal versmelten. Ook zullen de onvermijdelijke krimpspanningen zich bij dit type lasgroef aan een zijde ophopen en het werkstuk asymmetrisch vervormen.

Dit is de reden dat er in de loop der tijd een aantal lasgroeven zijn ontwikkeld waarbij het uithakken en het tegen- of doorlassen beter mogelijk is dan wel achterwege kan worden gelaten en asymmetrische krimp wordt voorkomen dan wel wordt tegen gegaan.

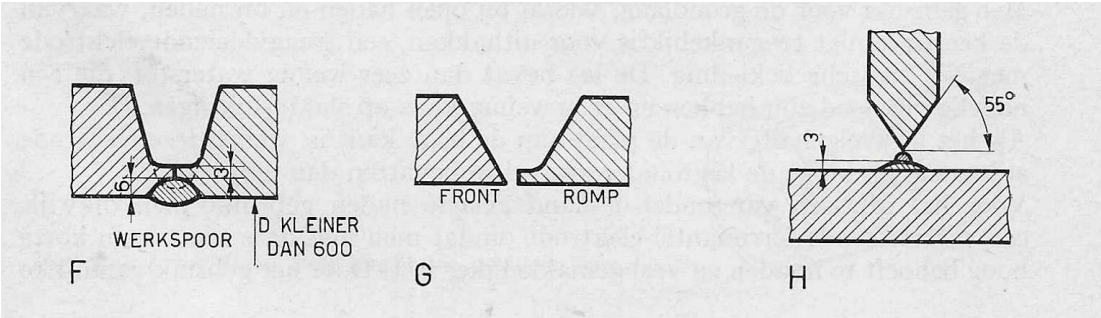
Hieronder wordt een aantal gebruikelijke lasnaad vormen weergegeven.



Gesloten V-naad **Open V-naad** **Open V-naad (doorlasstrip)**



Open X-naad **Gesloten U-naad** **Tweezijdige gesloten U-naad**

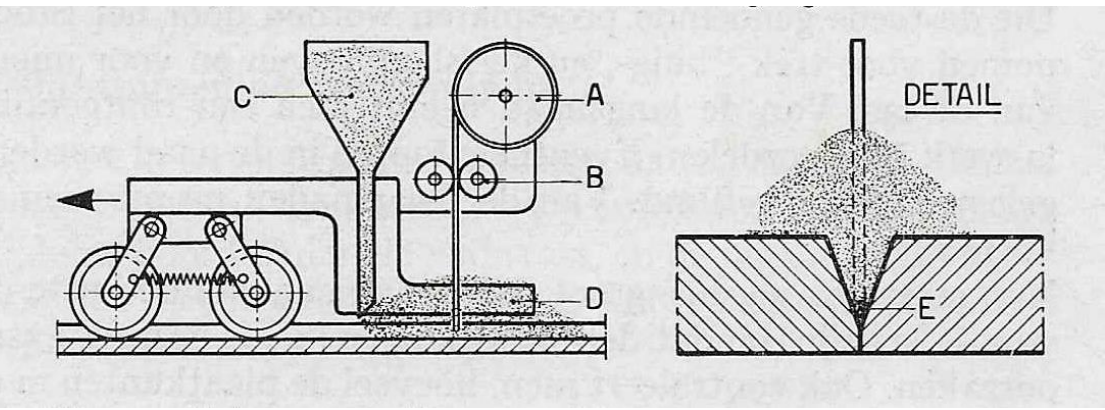


Ongelijke U-naad **Open V/U-naad combinatie** **Gesloten K-naad**

Lassen met een bedekte vlamboog

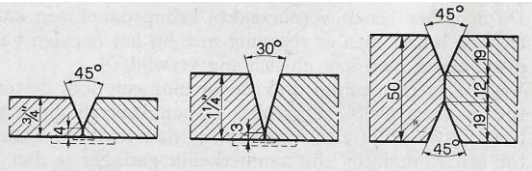
Naast het uit de hand lassen met een beklede elektrode zijn er ook al dan niet geautomatiseerde lassystemen ontwikkeld waar bij met een blanke draad of strip de bekleding in de vorm van poeder of door middel van een beschermend gas wordt gevormd.

Bij deze methode wordt de toevoer van de lasdraad op mechanische wijze tot stand gebracht. Bij een geautomatiseerd systeem is ook de voortgaande beweging gemechaniseerd.
Met het hier onder afgebeelde poederdek lassysteem kan alleen onder de hand worden gelast. Bij het lassen van een langsnaad in een romp rijdt over de naad in langsrichting een wagentje met de daarop bevestigde rijdende lasinrichting; deze wordt geleid door op de rompplaat bevestigde rails. Voor het lassen van de dwarsnaden draait de op rollen bevestigde romp onder de lasinrichting door.



Poederdek lassysteem

Door het gebruik van zeer hoge stroomsterkte (500–2000 Ampère), wordt er zeer veel warmte ontwikkeld. De toegevoerde lasdraad smelt hierdoor zo snel af en van de plaatkanten wordt zo'n groot gedeelte vloeibaar, dat de lasgroef ook bij een dikke plaat in twee keren moet worden gevuld. De inbranding is daarbij zo diep dat uithakken aan de keerzijde niet nodig is, zelfs niet bij X-naden.

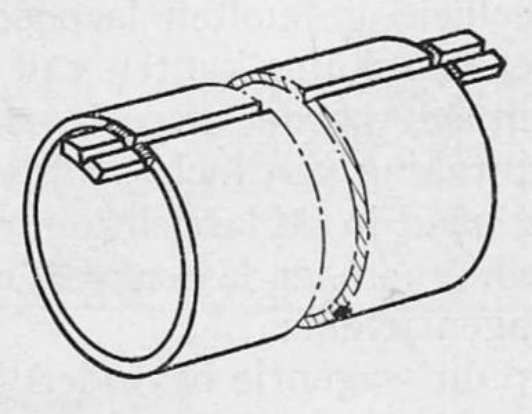


Lasnaad vormen bij poederdek-lassen

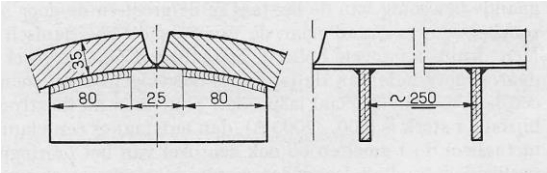
Lassen van een romp

Om een naad van een romp te kunnen lassen moet men de plaatranden die stuik tegen elkaar komen te liggen zo afschaven dan wel afbranden dat zij de vereiste lasgroef vormen. Dit geldt voor zowel de langsnaad als de rondnaad van de rompringen. Dit gebeurt vóór de rompdelen en of de fronten worden gewalst. Men stelt de lasranden zuiver tegenover elkaar door aan de binnenzijde hechtplaten aan te brengen. Aan het eind van de langsnaad hecht men vlakke stukken plaat die van hetzelfde materiaal zijn gemaakt als de romp en met dezelfde lasopening en vorm als die van de te lassen naad. Proefstukken worden op dezelfde manier gelast en gegloeid als de romp zelf voordat ze ter beproeving worden aangeboden. Uit deze proefstukken worden de proefstaven voor het bepalen van de treksterkte enz. gehaald.
De onderhavige rompring wordt op twee rollen geplaatst waarmee het onder de hand lassen en eventueel uithakken van de grondnaad mogelijk wordt gemaakt. Om het vervormen van de romp naar binnen toe gedurende het leggen van de las in de hand te kunnen houden wordt hij ter plaatse

van de naad, met behulp van vijzels in de cirkelvorm gedrukt. Na elke las worden de vijzels iets ingedraaid zodanig dat na het lassen van de sluitlaag de romp de juiste cirkelvorm heeft.

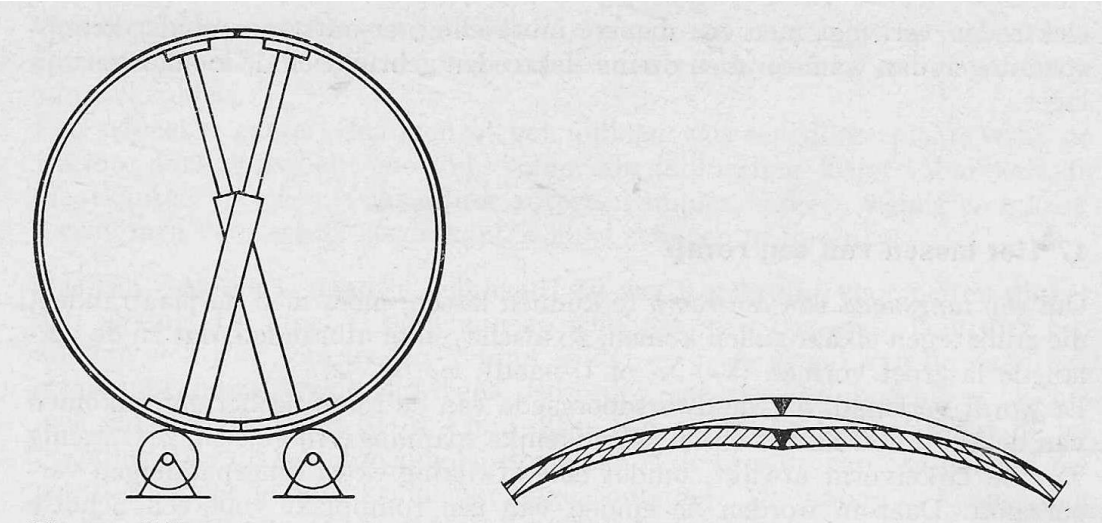


Romp met aangelaste proefstroken



Tijdelijke lassteunen

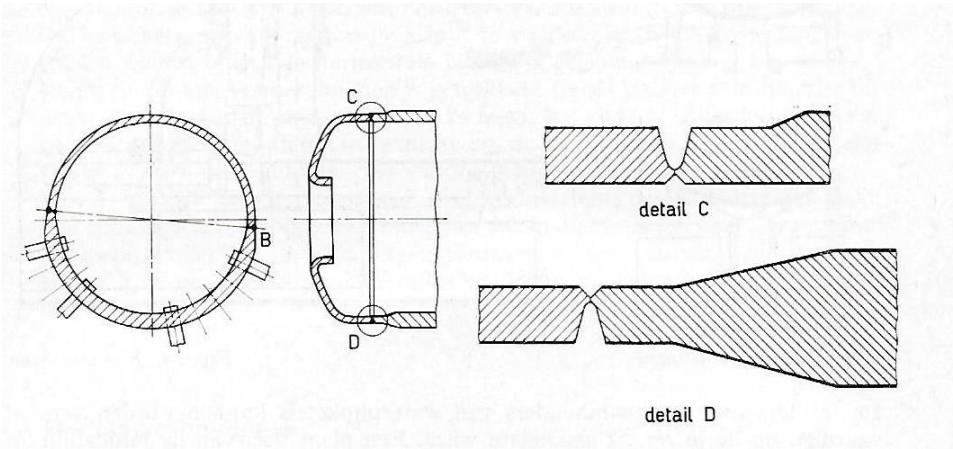
Bij een grote plaatdikte en vooral wanneer bij een hoog koolstofgehalte hiervan hardings-verschijnselen kunnen optreden wordt voor het lassen een brede strook langs de naad met behulp van een warmstook-gasbrander tot 200 ºC verwarmd en gedurende het lassen op die temperatuur gehouden.



Vijzels ter voorkoming vervorming romp tijdens lassen

Lassen van een front

Om een naad van een front te kunnen lassen moet men de plaatranden die stuik tegen elkaar komen te liggen zo afschaven dan wel afbranden dat zij de vereiste lasgroef vormen. Dit gebeurt voordat de rompdelen en de fronten gewalst, geflenst of geperst worden.

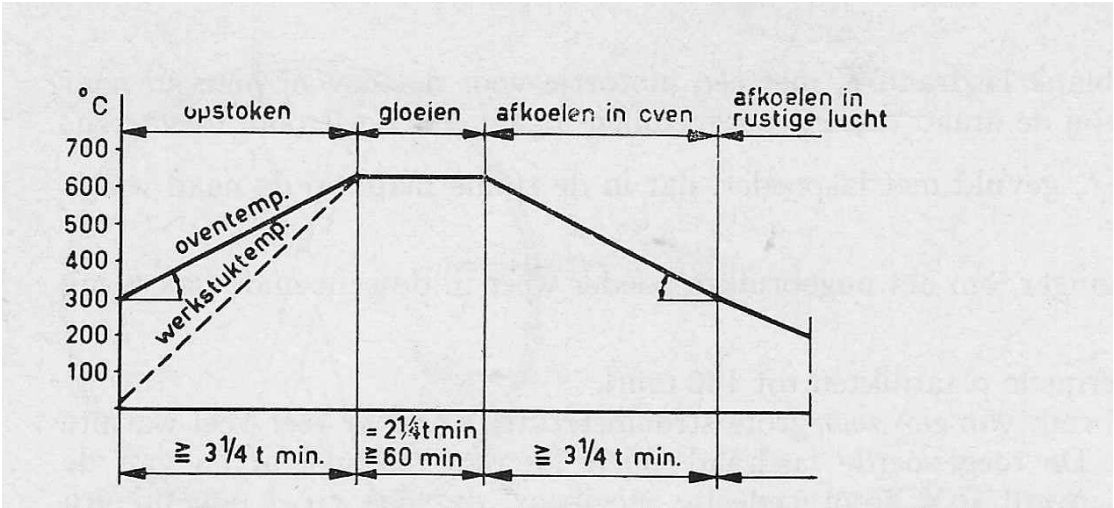


Gelaste frontverbindingen met lasnaad-details

De desbetreffende fronten worden op een aantal plaatsen aan de rompring gehecht en vervolgens op twee rollen geplaatst waarmee het onder de hand lassen en eventueel uithakken van de grondnaad mogelijk wordt gemaakt. Evenals bij de langsnaad wordt bij de rondnaad soms gebruik gemaakt van tijdelijke steunen. Ook hier wordt bij een grote plaatdikte en een hoog koolstofgehalte hiervan, vóór het lassen een brede strook langs de naad, met behulp van een warmstook-gasbrander tot 200 ºC verwarmd en gedurende het lassen op die temperatuur gehouden.

Spanningsvrij gloeien

Door een aantal bewerkingen ontstaan spanningen in het ketelmateriaal. Deze veelal door buigen en krimp ontstane spanningen leggen voor een deel beslag op de sterkte die nodig is voor de constructie zelf en kunnen, als deze niet dan wel onvoldoende worden weggenomen tot het bezwijken hiervan leiden. Een probate methode om materiaalspanningen weg te nemen is om na fabricage, dus nadat alle vervormingen en laswerkzaamheden hebben plaats gevonden, de ketel in zijn geheel in een grote oven spanningsvrij te gloeien.



Tijdstraject spanningsvrij-gloeien

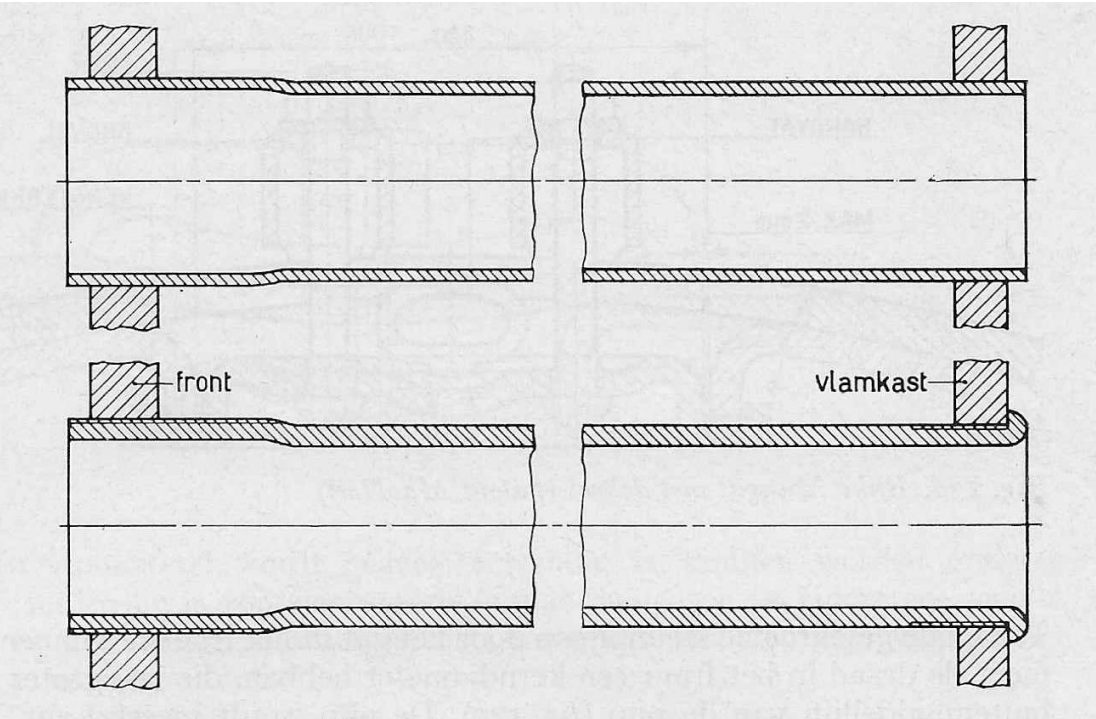
Bij het spanningsvrij-gloeien gaat men gewoonlijk als volgt te werk. Nadat de oven een temperatuur heeft bereikt van niet hoger dan 300 ºC wordt het werkstuk er ingebracht. Vervolgens wordt de oven opgewarmd met een snelheid van 100/t ºC/min. met een maximum van 4 ºC/min. Hierbij is t de wandikte in mm van de ketel. Na het bereiken van de gloeitemperatuur (625-650 ºC) wordt deze voor een periode van 2,5 t minuten gehandhaafd met een minimum van 60 minuten. Vervolgens laat men de oventemperatuur langzaam tot een temperatuur van 300 ºC zakken in eenzelfde tijdsduur als de temperatuursverhoging van 300 ºC naar 625 ºC heeft plaatsgevonden. Tenslotte kan het werkstuk uit de oven worden genomen en in rustige lucht verder afkoelen tot de omgevingstemperatuur en is dan vrij van alle spanningen. De tijdsduur voor het spanningsvrij gloeien is zoals hiervoor is aangegeven afhankelijk van de materiaaldikte en kan weken duren. Als voorbeeld: het uitgloeien van een gelaste Schotse ketel met een wanddikte van 35 mm duurt ongeveer 14 dagen.

Met na het gloeien uitgevoerde bewerkingen aan de ketel waarbij warmte wordt toegevoerd dan wel vervormingen plaats vinden zal het effect van spanningsvrij-gloeien geheel of gedeeltelijk verloren gaan. Het spreekt dan ook voor zich dat later uit te voeren lasreparaties met de grootst mogelijke zorgvuldigheid uitgevoerd dienen te worden.

4.12.16 Bevestigen van pijpen

De vlam- en waterpijpen bij stoomketels worden gerold. Bij het rollen wordt de pijp met behulp van een pijpenroller bij kamertemperatuur zodanig vervormd dat ze klem in de pijpplaat komt te zitten en stoom- en of waterdicht afdicht. De pijpen neemt men zo lang dat ze aan beide einden 5 -10 mm buiten de desbetreffende pijpplaat steken. De gaten in het front waar de pijpen naar binnen worden gebracht boort of kottert men 2 - 3 mm groter om de pijpen eenvoudiger te kunnen aanbrengen. De pijpdiameter wordt voor ze wordt aangebracht aan één zijde verwijd en zodoende in overeenstemming gebracht met de vergrote diameter in de pijpplaat. Nadat de gaten in de pijpplaten zijn schoongemaakt en de pijpeinden zijn uitgegloeid en blank geschuurd wordt een pijp met een pijpenroller verwijd totdat zij krachtig tegen de wand van het gat wordt aangedrukt. Een blank geschuurde pijp komt vaster te zitten dan wanneer hierop de oxide laag of andere ongerechtigheden nog aanwezig zijn. Ook de warmte overdracht van een gladgeschuurde pijp op de pijpplaat is beter waardoor de verbinding dicht blijft.
Na het uitrollen bestaat er tussen de plaat, de wand van het gat en de pijp een contact dat te vergelijken is met een krimpverbinding. Om de pijp bevindt zich in de plaat een elastisch vervormde ringvormige zone, waarin trekspanningen optreden, terwijl er in de pijp zelf voornamelijk drukspanningen zijn ontstaan als gevolg van het uitrollen. Voor het verkrijgen van een goede verbinding worden de pijpuiteinden daarom van tevoren uitgegloeid.
De bevestiging verkregen door het uitrollen is bij kamertemperatuur niet alleen drukdicht, maar kan ook grote krachten opnemen in de lengterichting van de pijp. Bij de hoge temperatuur, die het uiteinde van bij- voorbeeld een vlampijp in de vlamkastpijpplaat kan bereiken, wordt de inklemming minder. Daarom wordt het boorgat in de pijpplaat van een groef voorzien zodat zich bij het uitrollen op de pijp een opstaande rand vormt, die de afdichting verbetert.

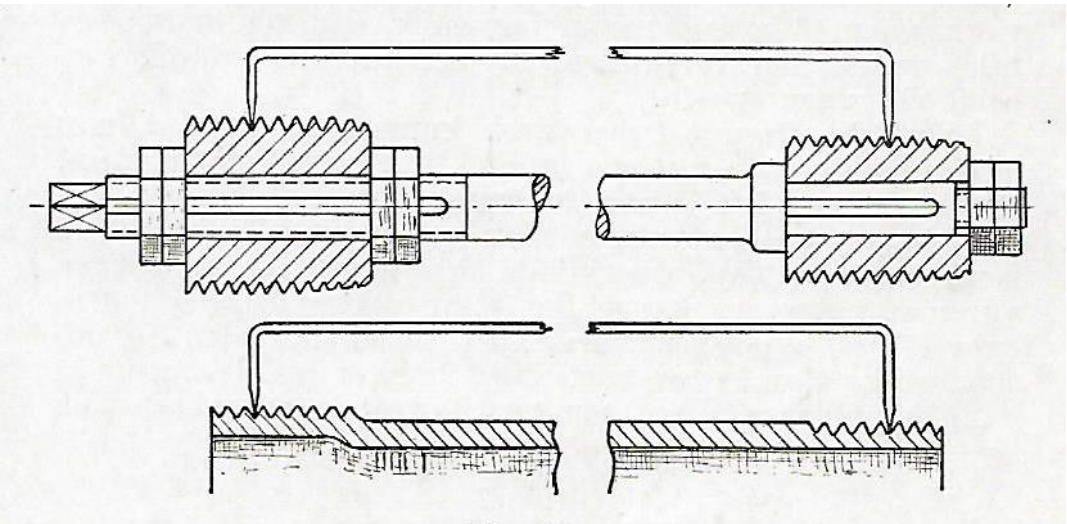
Verder worden om de stromingsweerstand te verminderen de pijpen aan het uiteinde omgezet of getrompt.



Gerolde en geschroefde steunpijpen

Vlakke pijpplaten in een vlampijpketel hebben, ten gevolge van de stoomdruk, de neiging bol te gaan staan. Dit vervormen wordt tegengegaan met massieve langs steunen en door zogenoemde steunpijpen. Deze steunpijpen worden bevestigd door middel van schroefdraad en door lassen. De vlampijpen hebben een wanddikte van 2,95 en 3,25 mm en een uitwendige diameter van 3”.
Steunpijpen hebben een wanddikte van 6 tot 8 mm. Bij geschroefde verbindingen zijn de pijpplaten en de einden van de pijpen van schroefdraad voorzien. Ook hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in pijpdiameter om de pijp überhaupt in de pijpplaten te kunnen schroeven. De toegepaste schroefdraad met een draad diepte van 1,5 mm heeft 9 a 11 gangen per 1”

De moeilijkheid bij deze constructie is dat de spoed van de schroefdraad in zowel de beide pijpplaten als die op de pijpeinden met elkaar in overeenstemming moeten zijn, dat wil zeggen dat de gangen niet mogen verscherven. Men maakt hierbij gebruik van een verstelbare draadtap die men instelt met een draadmal waarvan de onderlinge afstand van de schroefgangen overeenkomt met die van de te monteren vlampijp . Bij een eventuele vervanging van een steunpijp dient men in omgekeerde volgorde te werk te gaan en zal de schroefdraad op de pijp aan die van de reeds aanwezige draad in de pijpplaten moeten worden aangepast. Na het inschroeven van de pijp wordt deze gerold om een drukdichte afsluiting te krijgen.



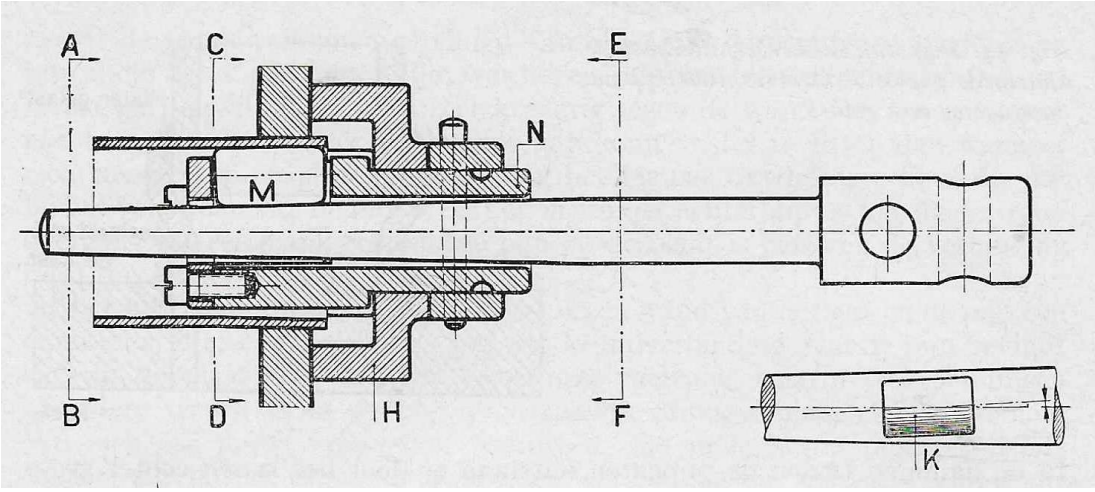
Verstelbare tappen

Als later, bijvoorbeeld in verband met reparaties, de pijpen met een snijbrander worden verwijderd en nieuwe pijpen worden ingelast, ontstaan nieuwe krimpspanningen die dan niet door uitgloeien kunnen worden opgeheven en dus scheuren in de dammen kunnen veroorzaken. Om dit te beperken wordt ongeveer twee derde van de vlampijpen gerold. Ook bij lassen, worden om een goede aansluiting van de pijp en de pijpplaat te krijgen, de vlampijpen na het lassen gerold. Bij waterpijpketels staat er druk in de ruimte waarin de pijpen uitmonden zodat in de dammen tussen de ingerolde pijpen trekspanningen optreden, niet alleen vanwege het uitrollen maar bovendien door de druk in de stoomketel.

Pijpenroller

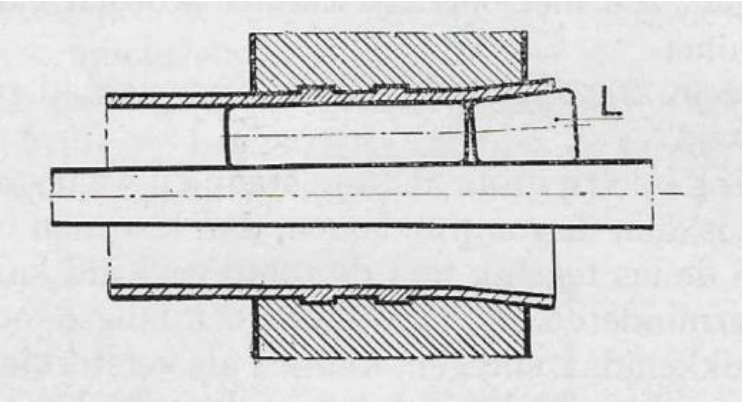
Niet zelden komt het voor dat een gerolde vlam- stoom- of waterpijp vervangen moet worden. Ook de pijpen van oppervlakte condensors zijn meestal aan een zijde gerold. In het kader van onderhoud dan wel het beoordelen van uit te voeren reparaties is het dan ook goed kennis te hebben van het rollen.

De pijpenroller bestaat in de eerste plaats uit een bus ,waarin drie gleuven zijn aangebracht voor de rollen. Deze rollen zijn gemaakt van gehard staal en hebben enige speling in radiale zin. In het midden van deze drie rollen wordt een tapse pen of doorn gestoken die aan het einde is voorzien van een verdikking met twee gaten waarin een ronde pen kan worden gestoken om de doorn te draaien. Plaatst men de pijpenroller in de pijp, dan zorgen de voetjes van de ovale aanslag ervoor dat de rollen op de juiste plaats ten opzichte van de pijpplaat komen te zitten. Door nu de tapse pen aan te drukken en vervolgens rechtsom rond te draaien brengt men de rollen in een linksom ronddraaiende beweging ten opzichte van de eigen assen. Van de drie rollen is er een die niet evenwijdig aan de hartlijn van de doorn is opgesteld. Deze iets schuin opgestelde rol zorgt ervoor dat de doorn volgens een schroeflijn de roller wordt ingetrokken.



Pijpenroller

De doorn, onder de rol M, hoeft dus niet aangedrukt te worden en zorgt er zelf voor dat de rollen met grote kracht tegen de pijpwand aan worden gedrukt en deze uitrolt. Direct voor en achter de pijpplaat ontstaat een rand waardoor de pijp zeer vast in het boorgat komt te zitten en verschuiving in de lengterichting afdoende wordt belet. Voor het trompen van de pijpen om de stromingsweerstand van de gassen te verminderen worden pijpenrollers gebruikt met een dubbel stel rollen. De korte rollen voor het
trompen zijn taps. Alleen de einden van de vlampijpen in de stromingsrichting van de rookgassen worden getrompt of gekraald.



Pijpenroller met tromprollen

4.12.17 Materiaalspanningen

Om voor bepaalde omstandigheden de dikte van een ketelromp te kunnen berekenen is het nodig vast te stellen welke krachten er in de ketelromp optreden en welke materiaalspanningen daarvan het gevolg zijn in een langs- en dwarsdoorsnede. Tevens geeft het inzicht in de wijze waarop een ketel is samengesteld, bijvoorbeeld waarom een langsnaad anders wordt uitgevoerd dan een rondnaad.

Spanning in langsdoorsnede

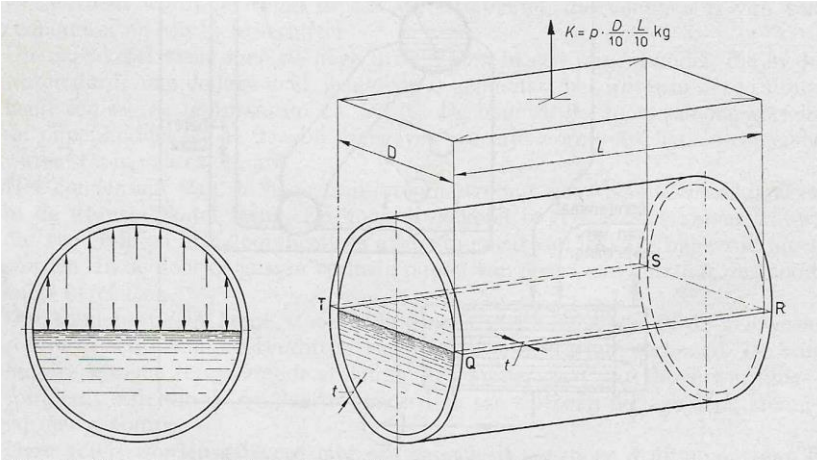
Van een romp, voor de helft gevuld met water, waarboven een druk heerst van p kg/cm² is de resultante van de verticaal gerichte krachten:

kracht (kg) = druk (kg/cm²) x oppervlakte waterspiegel (cm²)

$$K = p.F_l \ [kg]$$

$$F_l = \frac{D}{10}.\frac{L}{10} \ [cm^2]$$

$$K = p.\frac{D}{10}.\frac{L}{10} \ [kg]$$



Spanning in de langsdoorsnede van een romp

Er is evenwicht van de omhoog en omlaag gerichte krachten welke op hun beurt weer in evenwicht zijn met de som der materiaal spanningen in de beschouwde en in onderstaande figuur aangegeven langsdoorsnede.

Bij een rompdikte van t mm is het oppervlak van deze materiaal doorsnede:

$$F_l = 2.L.t \ [mm^2]$$

Noemen we de kracht opgenomen per mm² van deze doorsnede de trekspanning S_l dan is:

kracht (kg) = Belaste doorsnede (mm²) x trekspanning (kg/mm²)

$$p \,.\, \frac{D}{10} \,.\, \frac{L}{10} \;=\; 2 \,.\, L \,.\, t \,.\, S_l$$

Waaruit afgeleid de trekspanning in langsrichting:

$$S_l = \frac{p.D.L}{200.t.L} \;\; [kg/mm^2]$$

Of:

$$S_l = \frac{p.D}{200.t.} \;\; [kg/mm^2]$$

Wij zien dat bij een bepaalde wanddikte en druk de optredende trekspanning in de langsdoorsnede recht evenredig is met de inwendige middellijn en de stoomdruk. De fronten van een ketelromp verminderen de spanning in het nabijgelegen deel van de langsdoorsnede. In de hiervoor afgeleide formule is daarmee geen rekening gehouden.

Spanning in dwarsdoorsnede

In de richting van de hartlijn werkt op elk front een kracht gelijk aan:

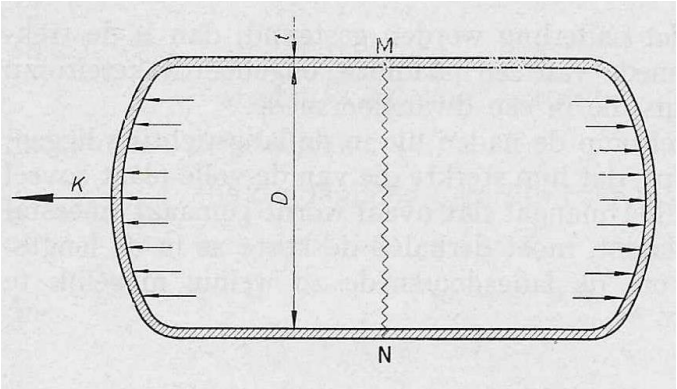
kracht (kg) = druk (kg/cm²) x geprojecteerde oppervlak van het front (cm²)

Of in formule vorm:

$$K = p \,.\, \frac{\pi}{4} \,.\, \left(\frac{D}{10}\right)^2 \;\; [kg]$$

Deze kracht moet in een romp waarvan de einden niet worden ondersteund, worden opgenomen door een ringvormige materiaaldoorsnede waarvan, bij een wanddikte die zeer klein is vergeleken met de diameter, het oppervlak kan worden berekend met:

$$F_l = \pi \, D \,.\, t \;\; [mm^2]$$



Noemen we de kracht opgenomen per mm² van deze doorsnede de trekspanning S_d dan is:

kracht (kg) = belaste doorsnede (mm²) x trekspanning (kg/mm²)

$$K = \pi\, D\,.\,t\,.\; S_d \;\; [\mathrm{kg}]$$

Of:

$$\pi\, D\,.\,t\,.\; S_d \;\; = p\,.\frac{\pi}{4}.\left(\frac{D}{10}\right)^2 \;\; [\mathrm{kg}]$$

Waaruit afgeleid de trekspanning in de dwarsdoorsnede:

$$S_d \;\; = \frac{p\,.\frac{\pi}{4}.\left(\frac{D}{10}\right)^2}{\pi\, D\,.\,t} = \frac{p.D^2}{400\; D.t} \; [\mathrm{kg/mm^2}]$$

$$S_d \;\; = \frac{p.D}{400\,.\,t} \; [\mathrm{kg/mm^2}]$$

Vergelijken wij de formule voor het bepalen van de spanning in de langsrichting met die van de dwarsrichting dan zien we dat de spanning in de langsdoorsnede twee keer zo groot is als die in de dwarsdoorsnede

$$S_l \;\; = 2\, S_d$$

Hieruit volgt dat bij een ketelromp de naden, in de langsrichting, zo moeten worden uitgevoerd dat die de sterkte van de volle plaat zoveel mogelijk benaderen. Dwarsnaden hoeven slechts half zo sterk te zijn. Het ovale mangat, meestal 300 x 400 mm, plaatst men om deze reden met de korte as in de lengterichting van de romp. Als gevolg van het hier voor aangegeven verschil in spanning ziet men bij schades aan stoomketels of leidingen als gevolg van drukoverschrijding de scheur meestal in de lengterichting lopen.

4.12.18 Sterkte van een klinknaad

De sterkte van een plaat ter plaatse van een klinknaad is door het boren van de nagelgaten kleiner dan die van de ongeboorde plaat. Daarenboven moeten er in een klinkverbinding voldoende klinknagels aanwezig zijn om de krachten die op de plaatdelen worden uitgeoefend over te brengen. Verder moet de verbinding water danwel stoomdicht zijn. Een bijzonder lastige opgave gezien de verschillende en eerder aangegeven eigenschappen van het toe te passen staal.

Sterkte percentage plaat

Werken er in een plaat, verbonden door een rij nagels, gelijk verdeelde krachten dan worden de plaatdoorsneden tussen de nagels op de in de figuur aangegeven wijze op trek belast. We beschouwen van de plaat slechts een strook ter breedte van één steek.
De doorsnede, die deze strook heeft is:

steek x plaatdikte = a x t mm²

Door het boren van de nagelgaten blijft een doorsnede over van:

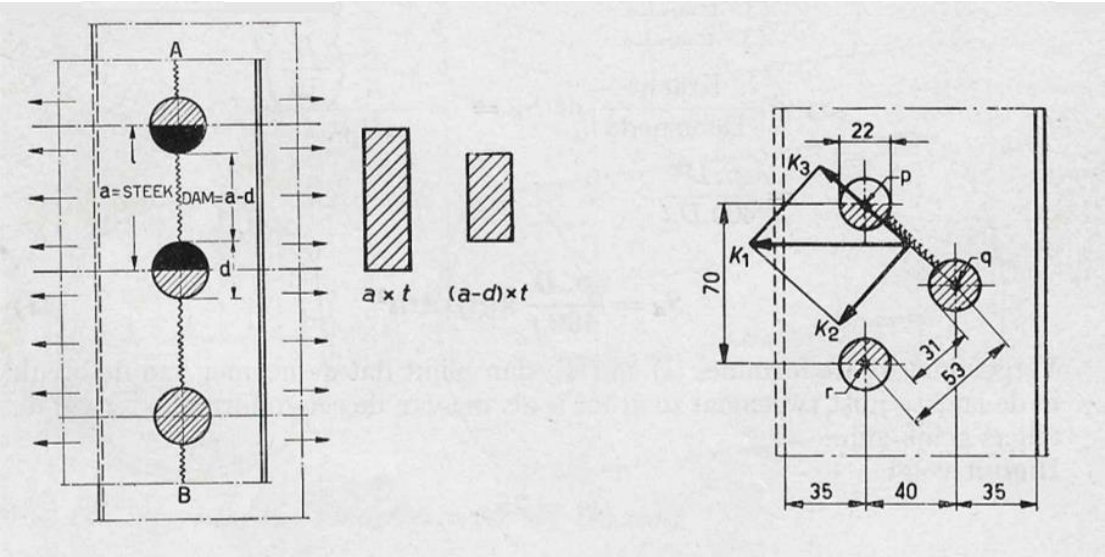
dam x plaatdikte = (a – d) x t mm²

De sterkte van de dammen wordt uitgedrukt in procenten van de sterkte van de plaat en het plaat of sterktepercentage genoemd. Het sterktepercentage van de plaat wordt in de formule aangegeven met de letter z.

$$z = \frac{(a-d).t}{a.t}.100 = \frac{a-d}{a}100$$

Het sterktepercentage van de hierna afgebeelde enkel geklonken lapnaad in de onderstaande linker figuur met een nagelsteek van 70 mm een plaatdikte van 11 mm en een nagel diameter van 22 mm is:

$$z = \frac{70-22}{70}.100 = 68{,}6\ \%$$



Maataanduiding klinkverbinding

Het plaat- of sterktepercentage van de dammen in de doorsnede a-b van de dubbel geklonken lapnaad in de rechterfiguur vinden wij op dezelfde manier als hiervoor:

$$z = \frac{70 - 22}{70} . 100 = 68{,}6\ \%$$

Behalve in de lijn a-b kunnen de dammen echter ook bezwijken volgens de lijn p-q in de bovenstaande figuur. Voor het berekenen moet dan rekening gehouden worden met de scheve stand van de doorsneden. Van de kracht die per steek op de naad wordt uitgeoefend moet dan de helft (K_1) worden genomen. Van K_1 werkt de ontbonden kracht (K_2) loodrecht op deze doorsnede. Dit is niet de enige kracht omdat ook de andere ontbondene (K_3) de doorsnede op afschuiven belast, terwijl de invloed hiervan weer wordt verminderd door de aanwezigheid van de nagels in de voorste rij van het klinkverband. Dit maakt een eenvoudige berekening van het plaatpercentage onmogelijk. Op grond van proeven kent men een waarde toe van 5/6 van die van rechte dammen van dezelfde afmetingen. Voor het plaatpercentage, in dit voorbeeld van de twee schuine dammen per steek, vinden wij derhalve:

$$z = \frac{2 . 31 . \frac{5}{6}}{70} . 100 = 73{,}7\ \%$$

Op min of meer overeenkomstige wijze is het plaatpercentage van verschillende plaat- verbindingen te berekenen. Het sterktepercentage van de naden van stoomketels is voor de hierna aangegeven plaatverbindingen gewoonlijk niet hoger dan

Soort klinkverbinding	**Sterkte percentage**
enkel geklonken lapnaad	52 %

dubbel zig-zag geklonken lap naad	65 %
drievoudig zig-zag geklonken lapnaad	72 %
drievoudig zig-zag geklonken dubbele stripnaad enkel gedund	85 %

Omdat de trekspanning in de langsdoorsnede van een romp het grootst is moet de langsnaad een hoog sterktepercentage hebben. Dwarsnaden die niet door langssteunen ontlast zijn, moeten een sterkte- percentage hebben dat ten minste de helft is van dat van de langsnaad. Om lekkage te vermijden als gevolg van doorbuigen van bijvoorbeeld de ketelfronten bij een Schotse ketel worden dwarsnaden altijd tweevoudig geklonken. Ook de uitzetting van de vuurgang in lengterichting maakt, voor een goede afdichting, een dubbele rij nagels noodzakelijk.

Sterktepercentage plaat

Men kan ook de sterkte van de klinknagels uitdrukken in procenten van de volle plaat dan wel van een gegeven klinknaadverbinding nagaan of het per steek gezamenlijk op afschuiven belaste oppervlak van de nagels voldoende is om de kracht op te nemen die per steek wordt uitgeoefend.

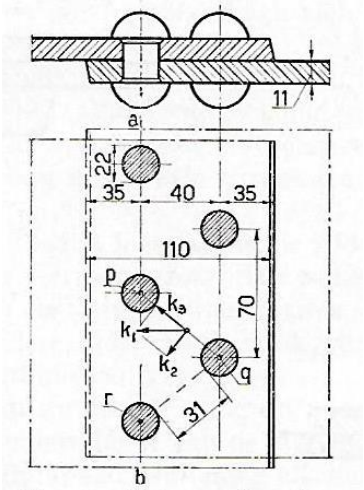
De sterkte van staal is bij belasting op afschuiven kleiner dan bij belasting op trek. Verder is de schuifspanning in elk deel van de nageldoorsnede niet even groot. Voor de sterkte bij afschuiven wordt bij berekeningen daarom 0.8 keer de treksterkte van het nagelstaal genomen. Het nagelgat wordt daarbij massief gevuld gedacht en aangenomen dat in de nagels alleen schuifspanning optreedt. Stellen we de treksterkte van de plaat gelijk aan Sp en die van het nagelmateriaal op Sn, en de sterkte van n nagels op afschuiven belaste nageldoorsneden op y % van de volle plaat dan kunnen we schrijven:

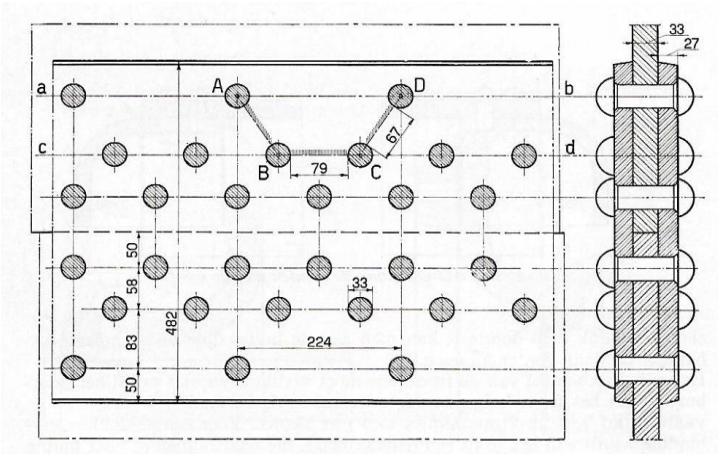
$$y = \frac{n \,.\, \frac{\pi}{4}\, d^2 .\, 0{,}8 \,.\; Sn}{a \,.\, t \,.\; Sp} .\, 100$$

Dit percentage noemen we, in analogie aan het plaatpercentage, het nagelpercentage. Klinknagelstaal is meestal zachter dan het plaatstaal waar de ketel van wordt gemaakt omdat het sterk vervormd moet kunnen worden. Het nagelmateriaal bezit daarom een lagere treksterkte.

In onderstaande figuur is een tweevoudig zigzag geklonken lapnaad getekend met een nagelsteek van 70 mm, een plaatdikte van 11 mm en een nageldiameter van 22 mm. In een steek bevinden zich hier twee nageldoorsneden terwijl de treksterkte voor de plaat 40 kg/mm² en die van het nagelmateriaal 37 kg/mm² bedraagt . Het nagelpercentage voor deze naad is:

$$y = \frac{2 \,.\, \frac{\pi}{4}\, 22^2 .\, 0{,}8 \,.\; 37}{70 \,.\, 11 \,.\; 40} .\, 100 = 73\,\%$$





Tweevoudig geklonken zig-zag lapnaad **Drievoudig geklonken dubbele stripnaad (enkel gedund)**

Van de in de bovenstaande figuur getekende drievoudig geklonken enkel gedunde dubbele stripnaad met 5 nagels per steek en met dezelfde treksterktes als uit voorgaand voorbeeld, bedraagt het nagelpercentage:

$$y = \frac{5\,.\,2\,.\frac{\pi}{4}\,33^2.\,0{,}8\,.\;37}{224\,.\,33\,.\;40}.\,100 = 85{,}6\,\%$$

Omdat hier sprake is van een dubbele stripnaad wordt gerekend dat elke nagel twee keer op afschuiving wordt belast.

Ook hier geldt dat de ketting breekt bij de zwakste schakel en is de reden dat bij het bepalen van de toegestane werkdruk rekening wordt gehouden met de verbinding met het laagste nagelpercentage.

Nagelformules

Met de zogenoemde nagelformules wordt de vereiste nageldoorsnede per steek berekend. Eerder is aangegeven dat de langskrachten twee keer zo groot zijn als de dwarskrachten. Dit aspect komt ook terug in de navolgende nagelformules.

Langsnaad

Als p de werkdruk in kg/ cm², D de diameter en a de steek in cm van de nagelverbinding van de ketel is dan geldt:

$$\frac{\mathrm{p}}{2}.\frac{\mathrm{D}}{10}.\frac{\mathrm{a}}{10} = \frac{p\,.\,D.\,a}{200}\ [\mathrm{kg}]$$

De gemiddelde schuifspanning die wordt toegelaten, is slechts een gedeelte van de sterkte op afschuiving die eerder in deze leidraad op de 0,8 van de treksterkte is gesteld.

De veiligheidsfactor x die hierbij in acht wordt genomen geeft aan welk deel daarvan als schuifspanning wordt toegelaten.

Soort klinkverbinding	**Veiligheidsfactor**
Langsnaad uitgevoerd als dubbele stripnaad	4
Langsnaad uitgevoerd als lapnaad	5

Stellen we nu n het aantal op afschuiven belaste nageldoorsneden dan is:

$$\frac{p\,.\,D.\,a}{200} = n\,.\frac{\pi}{4}\,d^2.\frac{0{,}8\,.\;Sn}{x}$$

Stelt men nu het gezamenlijk op afschuiven belaste oppervlak op O mm² dan is:

$$O = n\,.\frac{\pi}{4}\,d^2\;[mm^2]$$

en

$$\frac{p\,.\,D.\,a}{200} = O\,.\frac{0{,}8\,.\;Sn}{x}$$

Zodat de totale per steek in de langsdoorsnede aanwezige nageldoorsnede moet zijn:

$$O \geq \frac{p\,.\,D\,.\;a\,.\,x}{160\;Sn}\;[mm^2]$$

<u>Dwarsnaad</u>

Als p de werkdruk in kg/ cm², D de diameter en a de steek in cm van de nagelverbinding van de ketel is dan geldt voor de kracht op het front:

$$\frac{\pi}{4}\cdot\left(\frac{D}{10}\right)^2\cdot\;p\;\;[kg]$$

Als de steek a is dan is het aantal steken in de omtrek:

$$\frac{\pi\,.\,D}{a}$$

Wanneer ook hier de op afschuiving belaste doorsnede op O wordt gesteld dan is de optredende schuifspanning:

$$\frac{\frac{\pi}{4}\cdot\left(\frac{D}{10}\right)^2\cdot\;p}{\frac{\pi\,.\,D}{a}\;.\;O} = \frac{p\,.\,D\,.\;a}{400\,.\,O}\;[kg/mm^2]$$

Deze schuifspanning mag niet groter zijn dan die van de hiervoor aangeven langsnaadspanning zodat:

$$\frac{0{,}8\,.\ Sn}{x} \geq \frac{p\,.\,D\,.\ a}{400\,.\,O}\ [kg/mm^2]$$

Zodat de totale per steek in de dwarsdoorsnede aanwezige nageldoorsnede moet zijn:

$$O \geq \frac{p\,.\,D\,.\ a\,.\,x}{320\ Sn}\ [mm^2]$$

4.12.19 Plaatdikte van een geklonken romp

Hier voor hebben we van bestaande ketels de sterkte van de klinknaden ten opzichte van de plaatdikte van de romp berekend. Bij het ontwerpen maar ook later tijdens gebruik, als er sprake is van aantasting van het ketelmateriaal, moet men ook de plaatdikte kunnen berekenen dan wel de gevolgen van de aantasting voor de sterkte kunnen vaststellen. Door de stoomketeldruk te verlagen, dus de maximale materiaal- spanningen te verlagen, kan men het afkeuren van een aangetast toestel uitstellen. De eerder afgeleide formule voor de gemiddelde trekspanning S_l in de langsdoorsnede van een naadloze romp luidt:

$$S_l = \frac{p.\,D}{200.\,t.}\ [kg/mm^2]$$

De plaatdikte volgt uit:

$$t = \frac{p\,.\,D}{200.\,S_l}\ [mm]$$

Voor de gemiddelde treksterkte S_l in de langsdoorsnede kunnen we als we de eerdergenoemde veiligheidsfactor in achtnemen:
Voor de plaatdikte kunnen we dan schrijven:

$$t = \frac{p\,.\,D.\ x}{200.\,S_B}\ [mm]$$

Als men een klinknaad gaat toepassen dan weet men dat er z %, het plaatpercentage, overblijft voor het opnemen van de langskrachten. De hiervoor afgeleide formule voor de plaatdikte moet dus hiermee als volgt worden gecorrigeerd:

$$t = \frac{p\,.\,D.\ x}{200.\,S_B\,.\,\frac{z}{100}}\ [mm]$$

Dit geeft:

$$t = \frac{p\,.\,D.\ x}{2.\,S_B\,.\,z}\ [mm]$$

4.12.20 Plaatdikte van een gelaste romp

Bij geklonken ketels waar de werkdruk maximaal 20 kg/cm2 is, heeft de romp een temperatuur die niet hoger is dan 210 ºC. De treksterkte van staal wordt bepaald bij 20 ºC en is tussen 20 en 210 ºC wel hoger maar niet lager dan bij 20 ºC.

Er werd in het verleden weinig rekening gehouden met de vermindering van de vloeigrens die bij verhoging van de temperatuur plaats vindt en bij 210 ºC reeds 14 % bedraagt. Men berekende de dikte van een rompplaat met een toelaatbare spanning die slechts een bepaald deel van de trekspanning was. Zo ontstond voor geklonken ketels de hiervoor afgeleide formule die nog mag worden gebruikt als de metaal temperatuur niet hoger is dan 214 ºC.
Men wenst tegenwoordig echter niet alleen het risico van breuk, maar ook het risico van vervorming te voorkomen. Daarom neemt men thans voor naadloze en gelaste rompen als basis voor de sterkte- berekening de 0,2 % rek- of warmvloeigrens, bepaalt bij de bedrijfstemperatuur.
De warmvloeigrens S_{vt} bij de bedrijfstemperatuur kan op de volgende manier berekend worden uit de treksterkte bij 20 ºC met:

$$S_{vt} = \frac{5}{9} \cdot \left\{1 - \left(\frac{t}{525}\right)^2\right\} . S_{B20} \; [kg/mm^2]$$

Is de vloeigrens of rekgrens bij 20 ºC bekend dan berekent men de warmvloeigrens bij de bedrijfstemperatuur met:

$$S_{vt} = \left\{1 - \left(\frac{t}{525}\right)^2\right\} . \; S_{v20} \; [kg/mm^2]$$

Soms wordt voor de maximaal optredende spanningen in een langsdoorsnede een waarde S_{toel} toegevoegd die 2/3 is van de warmvloeigrens, met andere woorden de veiligheidsfactor x bij de bedrijfstemperatuur is 1: 2/3 = 1,5.
Zo ontstaat uit de eerder afgeleide formule voor de plaatdikte van een naadloze stalen romp:

$$t = \frac{p \, . \, D.}{200 . S_{toel}} \; [mm]$$

Voor een romp met een naad of een aantal pijpgaten in de langsdoorsnede is de plaatdikte:

$$t = \frac{p \, . \, D}{200 . S_{toel} \cdot \frac{z}{100}} = \frac{p \, . \, D}{2 . S_{toel} \, . \, z} \; [mm]$$

omdat:

$$S_{toel} = \frac{S_{vt}}{x} \; [kg/mm^2]$$

wordt:

$$t = \frac{p \, . \, D}{2 \, . \frac{S_{vt}}{x}_{toel} \, . \, z} = \frac{p \, . \, D \, . \, x}{2 \, . \, S_{vt} \, . \, z} \; [mm]$$

Vervolgens moet het plaatpercentage z worden verminderd met een bedrag c voor de spanningen die in het materiaal aanwezig kunnen zijn, waardoor de formule overgaat in:

$$t = \frac{p \,.\, D \,.\, x}{2 \,.\, S_{vt} \,.\, (z - c)} \; [mm]$$

Tot nu toe hebben we aangenomen dat de trekspanning op elk punt van de dikte even groot is. In werkelijkheid is de trekspanning aan de binnenzijde van de ketelromp p kg/cm² dan wel p/100 kg mm² groter dan aan de buitenzijde. Voert men dit in de voorgaande formule in dan moet de noemer met een bedrag van p . x verminderd worden zodat de formule overgaat in:

$$t = \frac{p \,.\, D \,.\, x}{2 \,.\, S_{vt} \,.\, (z - c) - p \,.\, x} \; [mm]$$

Voor smeltlassen die vakkundig zijn gelegd en waarvan de aangelaste proefplaten mechanisch onderzocht zijn geldt:

1. z = 100 als de gehele lasnaad geröntgend is:
2. z = 80 als de langsnaad niet is geröntgend:
3. z = (a – d) / a x 100 bij rijen pijpen waarbij a de steek en d de uitwendige pijpdiameter in de langsdoorsnede voorstelt:
4. z = 60 als de langsnaad niet is geröntgend en niet mechanisch onderzocht is:

Mechanisch onderzoek van in het verlengde aangelaste proefplaten is altijd voorgeschreven. De waarde z, het plaatpercentage, wordt in de formule voor het bepalen van de plaatdikte nog verminderd met een grootheid c indien:

1. Tengevolge van het achterwege blijven van het spanningsvrij gloeien er nog krimpspanningen aanwezig zijn:
2. Door ongelijke verhitting tijdens het bedrijf, warmtespanningen optreden:
3. De spanningstoestand in de dammen tussen de pijpgaten door uitrollen daartoe aanleiding geeft.

De grootheid c wordt ontleend aan de volgende tabel:

	Toestellen waarbij de warmtespanningen zijn te verwaarlozen (stoomvaten)	**Toestellen waarbij de warmtespanningen niet zijn te verwaarlozen** (stoomketels)
Soort constructie	c	c
Naadloze rompen	0	5
Gelaste rompen, gegloeid	0	5
Gelaste rompen niet gegloeid	10	15
Bij pijpgaten met ingewalste pijpen	0	5

In stoom- en waterhouders worden aan de einden meestal een aantal wijde pijpen geplaatst. Deze zogenoemde valpijpen voorzien de headers waarin de hellend opgestelde waterpijpen zijn bevestigd van water voor de stoomvorming. De betrekkelijk kleine dammen die in de rondgaande richting overblijven, moeten een sterkte percentage hebben dat tenminste gelijk is aan:

$$z = \frac{p\,.\,(D+6)\,.\,x}{4\,.\,t\,.\,S_{vt}} + c$$

Voorbeeld

De romp van een Schotse ketel wordt gelast, niet gegloeid in verband met de grote afmeting, maar wel worden de lasnaden geröntgend. De gegevens van de ketel zijn: D = 4200 mm, p = 14 kg/cm², verzadigde stoomtemperatuur danwel ketelwatertemperatuur 198 ºC, S_{B20} = 42 kg/mm², z = 100, x = 1,5 en c = 15. De vraag is de plaatdikte van de romp te berekenen.

De romp neemt de verzadigde stoomtemperatuur aan. De treksterkte S_{vt} bij deze temperatuur is:

$$S_{vt} = \frac{5}{9}\,.\,\left\{1 - \left(\frac{t}{525}\right)^2\right\}.S_{B20} = \frac{5}{9}\,.\,\left\{1 - \left(\frac{198}{525}\right)^2\right\}.42 = 20\ \mathrm{kg/mm^2}$$

De plaatdikte volgt dan uit:

$$t = \frac{p\,.\,D\,.\,x}{2\,.\,S_{vt}\,.\,(z-c) - p\,.\,x} = \frac{14\,.\,4200\,.\,1{,}5}{2\,.\,20\,.\,(100-15) - 14\,.\,1{,}5} = \frac{14\,.\,4200\,.\,1{,}5}{3400-21} = 26\ \mathrm{mm}$$

Opgemerkt wordt dat in de noemer de vermindering van 3400 met 21, de correctie op de spanning in de doorsnede van de plaat, nauwelijks van invloed is op de berekende plaatdikte.

Als de romp inplaats van gelast geklonken zou worden met een dubbele stripnaad, x = 4, dan volgt de plaatdikte bij een plaatpercentage van z = 85 % uit:

$$t = \frac{p\,.\,D.\ x}{2.\,S_B\,.\,z} = \frac{14\,.4200.\ 4}{2\,.\,42\,.\,85} = 33\ \mathrm{mm}\quad [\mathrm{mm}]$$

Uit de berekende plaatdiktes voor gelaste en geklonken verbindingen mag worden opgemaakt dat door middel van lassen ongeveer 20 % kan worden bespaard op materiaal en voor zover dat van belang is op gewicht.