

Materiaalkeuze uit het oogpunt van corrosie en kostenoverwegingen.

Ir W.M.M. Huijbregts, KEMA Nederland B.V.

Voorlichtingsbijeenkomst "Corrosie; voorkomen is beter dan genezen" , gehouden in het kader van het landelijk project "Kennisoverdracht Materiaaltechnologie" , Ministerie van Economische Zaken, Innovatie centrum, Bond voor Materialenkennis. (29 November, 1994)

Inleiding

Een belangrijke tak in de machine en apparatenbouw is de ketelbouw voor de stoom en /of elektriciteit productie. De investeringen zijn in deze sector hoog en corrosieschades kunnen aanzienlijk zijn. Men zou bij de aanschaf moeten berekenen wat de totale kosten (investering, afschrijving, onderhoud, vervangingen en boeteclausules voor het niet leveren van elektriciteit) zijn van de installatie. Deze kosten kunnen aanzienlijk verschillen al naar gelang de materiaalkeuzes.

De belangrijkste corrosieschades in de ketelbouw zullen aan de hand van voorbeelden en onderzoek warden toegelicht. In het bijzonder worden besproken de corrosieschades daar erosiecorrosie en corrosie ander invloed van warmtebelasting. Ook deze corrosie problemen zijn te voorkomen daar een juiste materiaalkeuze. De LCC (Life Cycle Cost) van een machine at deel ervan kan warden berekend, wat kan bijdragen tot de juiste materiaalkeuze.

De LCC is de som geld die beschikbaar zou moeten zijn bij de start van het bedrijf om de investering, normaal onderhoud en grote reparaties (en overige bijzondere lasten) te kunnen bekostigen voor de levensduur van de installatie. In tabel 1 warden de materialen genoemd die in de verschillende componenten worden gebruikt. Tevens is aangegeven welke vormen van corrosie optreden in deze componenten. Hieruit blijkt dat de meeste componenten van betrekkelijk eenvoudige materialen zijn geconstrueerd.

Tabel 1

Toegepaste materialen in de water-stoom kringloop.

Component	Gekozen materialen voor de component	Corrosievormen in de component	
Verdamper	C-staal	Verdampercorrosie	
		Erosiecorrosie	
		Spanningscorrosie	
		Vermoeingscorrosie	
Stoomhouder	C-staal	Spanningscorrosie	
		WB-35	
		WB-36	
Voorwarmer	C-staal	Erosiecorrosie	
		15Mo3	Stilstandscorrosie
Oververhitter	13CrMo4.4	Sulfaat corrosie	
		10CrMo9.10	Sulfidatie
		AISI 347	Kruip
		14MoV6.3	Spalling
Stoomleidingen	13CrMo4.4	Vermoeingscorrosie	
		10CrMo9.10	Kruip
Stoomturbine	C-staal	Erosiecorrosie	
		X12CrMoV12.1	Vermoeingscorrosie
		X13Cr	Afzettingen
		Gietijzer	
Condensator	Al messing	Erosiecorrosie	
		Cu-Ni	Galvanische corrosie
		Titaan	Spleetcorrosie
		AISI 316	Ontzinking
Pompen	Duplex RVS	Putcorrosie	
		Gietijzer	

Ondanks de goede zorgen treedt er vaak in de grote eenheden van de elektriciteitscentrales corrosie op in de water-stoom kringloop.

De belangrijkste corrosievormen zijn :

- Erosiecorrosie
- Verdampercorrosie
- Spanningscorrosie

Het zou te ver gaan om bovenstaande corrosie-verschijnselen met de benodigde theorie nu te behandelen. Wel wordt ingegaan op een aantal typische schadegevallen om aan te tonen dat in de materiaalkeuze nog bepaalde selectiecriteria moeten worden gehanteerd. Eenvoudige C-stalen worden nog niet op corrosieweerstand geselecteerd, terwijl juist corrosie in de ketel- en apparatenbouw tot grote schades kan leiden.

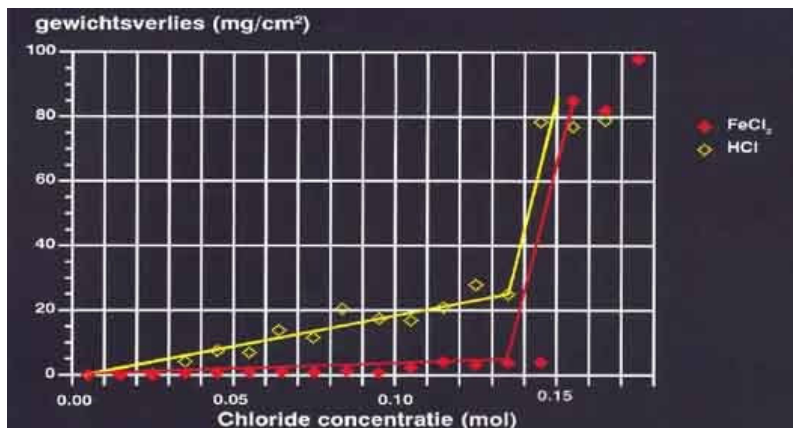
Alvorens de schadegevallen te behandelen is het eenvoudiger eerst twee testmethoden toe te lichten, waarmee voor de C-stalen en laaggelegeerde stalen de weerstand tegen verdampercorrosie en erosiecorrosie kan worden vastgesteld. Met behulp van deze informatie zijn de schadegevallen ook eenvoudiger te begrijpen.

Keuringsmethoden corrosieweerstand

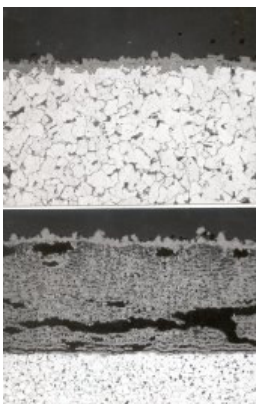
Verdampercorrosie

Zoals in zo veel corrosieschades het geval is, speelt het ontstaan van een zuur metaalchloride een belangrijke rol bij verdampercorrosie. In verdamperen kan onder afzettingen (ketelsteen) en het heersende warmteoverdrachtsproces (vaak koken) in geval van verontreinigd ketelwater (bijvoorbeeld door condensorlekkage), zuur chloride tot hoge concentraties worden ingedikt. Bij de hoge temperatuur (circa 200 tot 355 °C) ontstaat een oxide-(magnetiet = Fe_3O_4) laag die bij de hoge chloridenconcentratie niet altijd beschermend is. In de testmethode wordt dan ook de kritische concentratie aan chloride bepaald, waarbij de laag niet meer beschermend is.

Gebruikt wordt een FeCl_2 -oplossing. De magnetietlaag blijkt namelijk boven de kritische FeCl_2 -concentratie scheuren te gaan vertonen. Gebleken is dat elk staal een kritische FeCl_2 -concentratie heeft, waarbij de oxidelaag niet meer beschermend is als gevolg van dit scheurproces in de oxidelaag (zie de figuren 1 en 2). De ontstane gescheurde lagen zijn identiek van vorm met de lagen die bij schadegevallen ontstaan. Doordat een groot aantal stalen met deze keuringsmethode werd getest, kon een regressie-formule worden opgesteld tussen de staalsamenstelling en de kritische FeCl_2 -waarde. De regressieformules voor de verschillende stalen zijn gegeven in tabel 2.



Figuur 1: Het gewichtsverlies door corrosie van C-staal bij 310 °C en vier dagen expositietijd in HCl en FeCl_2 milieu.



Figuur 2

Oxidelagen, ontstaan in HCl (a,b) bij 310 °C en bij toenemende chloridenconcentraties. Molariteit: 0.12 foto: a en d. 0.14 foto: b

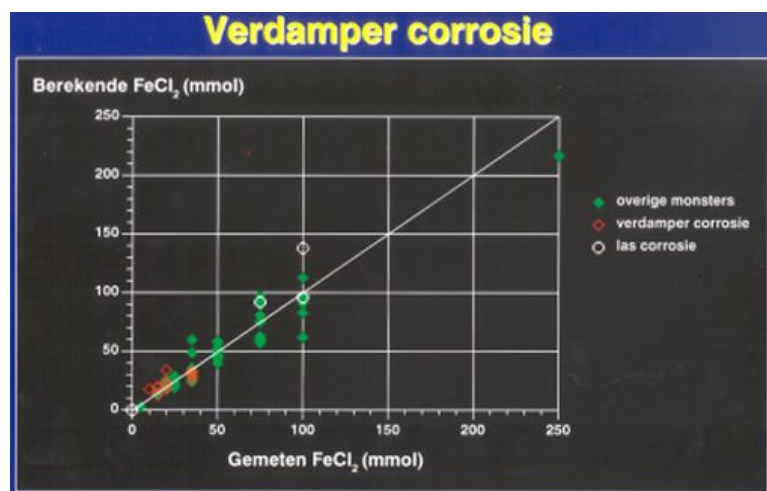
Tabel 2

Resultaten van de lineaire regressie berekeningen voor verdampercorrosie en erosiecorrosie

Weerstand stalen tegen verdampercorrosie								
ferrochloride (mmol) = $a_0 + a_1.C + a_2.Si + a_3.Cr + a_4.Mo + a_5.Mn + a_6.Cu$								
Staal	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	Correlatie
C-staal	-65	270	123	120	76	69	5	0,93
15Mo3	-96	-109	-53	260	58	207	64	0,85
14Mn4	291	-1514	-171	2080	-3505	-8	341	0,88
Alle stalen samen	-56	331	259	180	23	-24	106	0,80

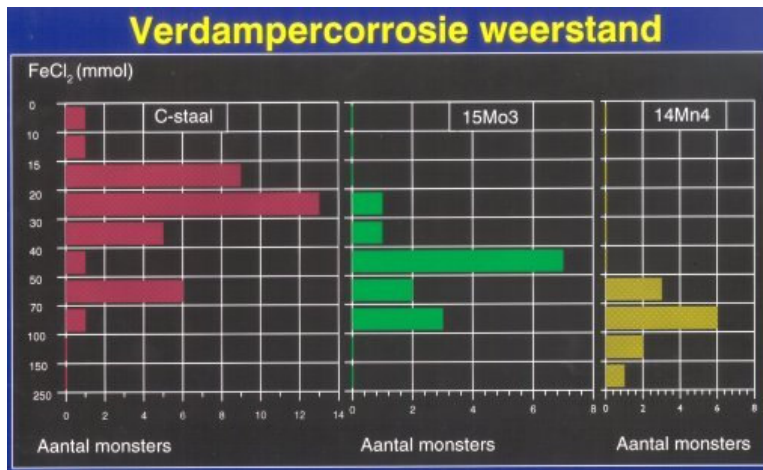
Gevoeligheid voor erosiecorrosie in natte stoom								
Gkema = $b_0 + b_1.C + b_2.Si + b_3.Cr + b_4.Mo + b_5.Mn + b_6.Cu$								
Staal	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	Correlatie
C-staal	89	37	1	-117	-41	6	-162	0,88
15Mo3	89	216	22	-130	-12	-55	-155	0,66
14Mn4	47	191	-29	-25	-209	15	-1	0,75
Alle stalen samen	85	57	-8	-108	-37	5	-117	0,79
C-staal (pijpen)	88	18	10	-132	-30	12	-167	0,91

In figuur 3 zijn de berekende en gemeten waarden van $FeCl_2$ uitgezet om een idee te geven van de betrouwbaarheid van de formules. Duidelijk wordt uit figuur 4 dat de drie stalen gemiddeld genomen in de volgorde C-staal, 15Mo3 en 14Mn4 een stijging in corrosieweerstand vertonen.



Figuur 3

Gemeten en berekende waarden van ferrochloride ter illustratie van de spreiding in de resultaten.



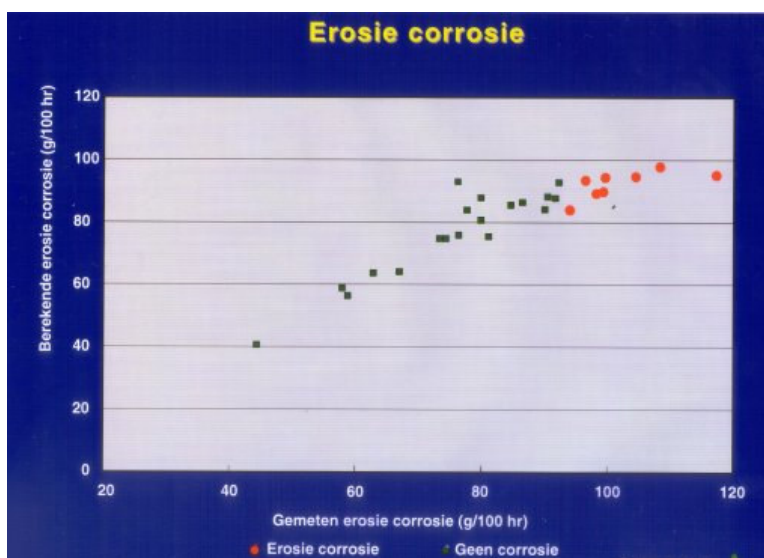
Figuur 4

Verdelingsdiagram van de corrosieweerstand van verschillende materialen bepaald in ferrochloride.

Erosiecorrosie

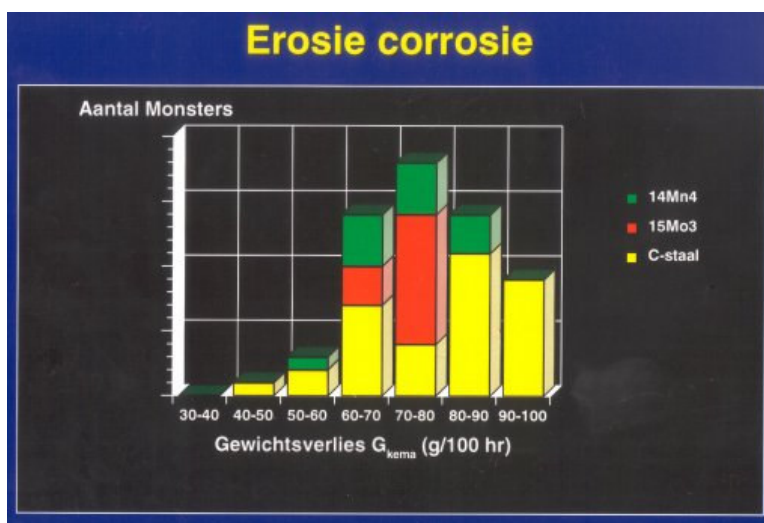
Bij erosiecorrosie in water stoom kringlopen is de staalsamenstelling naast de waterconditionering en stroomsnelheden van groot belang. De invloed van de staalsamenstelling wordt daarbij vaak onderschat. Bij KEMA werd de invloed van de staalsamenstelling op de weerstand tegen erosiecorrosie in natte stoom vastgesteld met behulp van een straalbuis methode. Daarbij wordt natte stoom met grote snelheid tegen het staal monster geblazen. Het O₂-gehalte en de geleidbaarheid van het water was laag, respectievelijk < 2 ppb en 30 S/m. De stoomsnelheid bedroeg 960 m/s. Na 100 uur beproeving werden de gewichtsverliezen (G) in gram gemeten.

Worden de resultaten met lineaire regressie verwerkt dan volgt dat de G-waarde met een regressievergelijking kan worden beschreven. Deze berekende waarde noemen we de GKEMA erosiecorrosie gevoeligheid van het materiaal. De formules uit de regressieanalyse zijn in tabel 2 weer- gegeven. In figuur 5 zijn de gemeten en de berekende absolute gewichtsverliezen van de monsters weergegeven. De monsters afkomstig van de schadegevallen zijn apart in dele figuur vermeld. In figuur 6 is een verdeling van de gewichtsverliezen voor de drie stalen C-staal, 15Mo3 en 14Mn4 gegeven. Het blijkt dat er geen duidelijk verschil is in erosiecorrosie weerstand van de drie materialen.



Figuur 5

De gemeten en berekende erosiecorrosie gevoeligheden van de geteste C-stalen. De stalen afkomstig van schadegevallen zijn apart vermeld.



Figuur 6: De verdeling van de erosiecorrosie gevoeligheid over de drie staalsoorten.

Schadegevallen en preventie door materiaalspecificatie

Verdampercorrosie

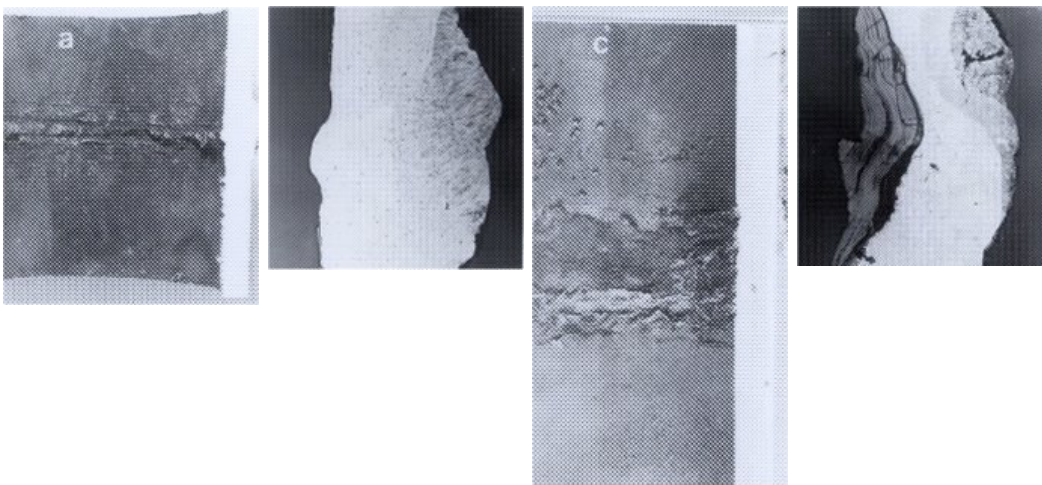
Tot 1994 is er veel geld en moeite besteed aan het perfectioneren van de thermohydraulica en de ketelwater chemie om corrosie het hoofd te kunnen bieden.

Jammer genoeg is de derde peiler "materiaalkeuze" niet op zijn waarde geschat. Bij nieuwbouw en reparatie wordt nog altijd de materiaalkeuze niet aangepast. Bij de materiaalkeuze worden sterkte- en kruip-eigenschappen gespecificeerd, niet de

corrosieweerstand. Om corrosie te vermijden rekent men volledig op de ketelwater chemie. De monsters voor bovengenoemd onderzoek waren grotendeels afkomstig van bedrijfsketels en nieuw pijpmateriaal. In figuur 3 zijn de monsters, afkomstig van schadegevallen, apart vermeld. In totaal zijn er twaalf pijpen afkomstig van verdampercorrosie, verdeeld over vijf verschillende ketels. Al deze pijpen hadden een FeCl_2 weerstand tussen 10 en 35 mmol.

Een van de ketels werd in 1964 in bedrijf genomen en na zeven jaar moest de gehele verdamper worden vervangen. Als gevolg van ernstige corrosie en de daarmee gepaard gaande waterstofbrosheid. Twee jaar na de vervanging trad er weer corrosie op en werden naast twee gecorrodeerde pijpen ook drie naastliggende pijpen, die niet waren aangetast, onderzocht. De pijpen van de oude verdamper en de twee nieuwe pijpen in de ketel bezaten alle een corrosieweerstand tussen 10 en 25 mmol FeCl_2 . De niet aangetaste, naastliggende pijpen van de vernieuwde ketel hadden waarden tussen 25 en 35 mmol FeCl_2 .

Bijzonder interessant is ook het gedrag van lasnaden in de verdampers. De stalen uit drie ketels hadden een hoge weerstand voor FeCl_2 -corrosie (verdampercorrosie), maar de lasnaden bezaten een zeer lage corrosieweerstand. In een schadegeval was van de twee lassen, circa 50 cm van elkaar verwijderd, een las sterk aangetast, terwijl de ander totaal geen corrosie vertoonde. Er zijn verschillende lastoevoegmaterialen gebruikt (zie figuur 7). Deze resultaten werden ondersteund met onderzoek aan een groot aantal proeflassen op het laboratorium.



Figuur 7

In een verdamperpijp bevonden zich twee lassen, circa 50 cm van elkaar verwijderd. Een las (foto's c en d) was sterk aangetast, terwijl de ander (foto's a en b) totaal geen corrosie vertoonde. Verschillende lastoevoegmaterialen zijn gebruikt

Aanbevolen wordt in verband met optreden van zuurcorrosie in verdampers (loogcorrosie komt niet zo veel voor) een minimale waarde voor de corrosieweerstand van 50 mmol FeCl₂ te specificeren bij reparatie of nieuwbouw van verdampers. Er moeten dus stalen en lastoevoegmaterialen worden gebruikt door de ketelfabrikant, waarbij naast specificaties voor sterkte en kruip ook de corrosieweerstand moet worden gespecificeerd.

Voor de grote ketels bij de E-bedrijven is specificatie van het staal en lastoevoegmateriaal op corrosieweerstand van minder groot belang geworden, omdat de waterconditionering inmiddels tegen hoge kosten tot grote hoogte is geperfectioneerd. Desondanks is specificatie op zijn plaats.

Erosiecorrosie

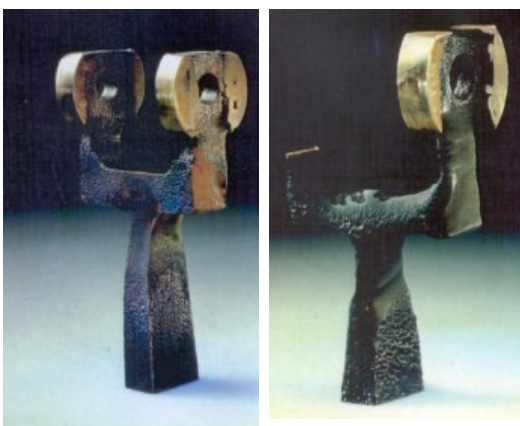
De monsters staal uit het laboratoriumonderzoek waren afkomstig van schadegevallen, van pijpstukken zonder schade, die respectievelijk voor een controle uit de ketels werden genomen en van pijpstukken uit het magazijn. De monsters afkomstig van schadegevallen zijn in figuur 5 apart vermeld. Opvallend is dat de monsters afkomstig van erosiecorrosie schades uit verschillende componenten ook in de natte stoomstraalproef een hoog gewichtsverlies hebben.

Schades traden op in:

- appendages
- natte stoomleidingen en waterafscheiders
- voorwarmers
- verdampers

Enkele erosiecorrosie schadegevallen uit de vier genoemde groepen zullen worden besproken. Bijzondere aandacht krijgen de schades waarbij in de component C-stalen met verschillende GKEMA waarden aanwezig waren. Dan bleek het staal met de laagste GKEMA waarde ook steeds niet of duidelijk minder te zijn aangetast.

Appendages



Figuur 8

Twee schakelarmen van voedingwaterpompen waren sterk door erosiecorrosie aangetast (zie figuur 8). Ondanks de langere bedrijfstijd (40.000 uur) van de schakelarm A was deze minder aangetast dan schakelarm B (10.000 uur). De verklaring ligt in het verschil in de GKEMA waarden voor de armen A en B respectievelijk 85 en 95.

Natte stoomleidingen

Een aardig voorbeeld is de natte stoomleiding achter de waterafscheider in een BWR. De monsters zijn uitgenomen op verschillende plaatsen in het systeem. Grote pijpen waren gevormd door het aaneen lassen van gebogen platen (figuur 9).



Figuur 9

De natte stoomleiding achter de waterafscheider, waarin de plaat met de hoge GKEMA waarde (95) was aangetast. De naburige niet aangetaste platen hebben een waarde van 75.



Het bleek dat deze niet altijd van dezelfde chemische samenstelling waren en dat de erosiecorrosie weerstand verschilde. Twee aaneengelaste platen met GKEMA waarden van 87 en 53 zijn afkomstig van een waterafscheider uit een Zweedse PWR (zie figuur 10).



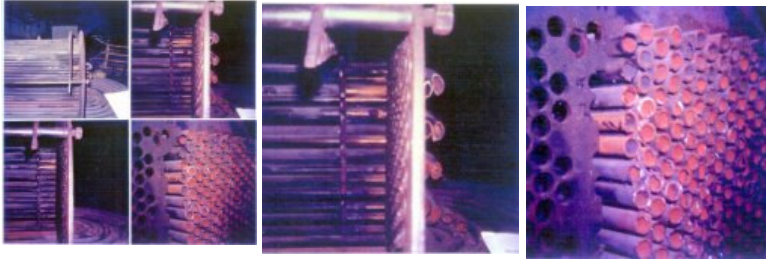
Figuur 10

Twee aaneengelaste platen met GKEMA waarden van 81 en 53 zijn afkomstig van een waterafscheider uit een drukwaterreactor in Zweden.

Opmerkelijk is hier de typische erosiecorrosie op de plaat met een GKEMA waarde van 87 en afzetting van ijzeroxiden op de andere plaat (de gepassiveerde).

Voorwarmers

In een lage druk voorwarmer werd erosiecorrosie gevonden. De aantasting was ogenschijnlijk willekeurig over de pijpen verdeeld. In totaal werden van 24 pijpen staalanalyses gemaakt en daaruit bleek dat in de voorwarmer twee charges staal waren toegepast met verschillende GKEMA waarden. Het zal duidelijk zijn geworden dat de pijpen met de hoogste GKEMA waarde waren aangetast (zie figuur 11).



Figuur 11.

Een aangetaste lage druk voorwarmer. Bij ontmanteling en analyse van de staalsamenstellingen bleek dat de voorwarmer was opgebouwd uit 2 batches staal uit verschillende GKEMA waarden.

Verdamper

In een 'steaming economiser' van een afgassenketel was erosiecorrosie opgetreden in de bochten van de pijpen, waar het water naar de buitenbocht wordt geslingerd (zie figuur 12).



Figuur 12

Een door erosiecorrosie aangetaste bocht van een 'steaming eco'. De GKEMA waarde was hoog (92),

Aan de binnenzijde van de bochten droogt het pijppoppervlak op of zetten zich grove magnetiet oplaeders af. De GKEMA waarde van het pijpmateriaal was hoog (92). Het probleem is opgelost door de bochten te vervangen en uiteindelijk voeren in staal 13CrMo4.4 (bevat 1 % Cr).

Op basis van de schadegevallen en de gemeten en berekende erosiecorrosie gevoeligheid wordt aanbevolen voor erosiecorrosie gevoelige componenten stalen met een GKEMA waarde te kiezen met een waarde van ten hoogste 90. Een 0.5 of 1% Cr staal heeft al een hoge weerstand tegen erosiecorrosie in natte stoom. Door nu in de waterkringloop stalen zonder speciale aandacht voor de corrosieweerstand toe te passen, is gelijk aan het spelen van 'Russische Roulette'. Corrosieproblemen in bestaande eenheden moeten dan worden opgelost door aanpassing van de waterconditionering, wat vaak veel geld (al) kosten. Figuur 11 Een aangetaste lage druk voorwarmer. Bij ontmanteling en analyse van de staalsamenstellingen bleek dat de voorwarmer was opgebouwd uit twee staalbatches met verschillende GKEMA waarden.

Life Cycle Cost

Om een materiaalspecificatie voor de stalen voor water-stoomkringlopen te realiseren zal moeten worden nagegaan wat de kosten zijn van de selectie van speciale materialen. Een betrekkelijk eenvoudige manier daarvoor is de Life Cycle Cost berekening, waarbij zo goed mogelijk alle kosten factoren worden ingeschat.

Bij het selecteren van een technische installatie of constructie wordt tot op heden veelal gebruik gemaakt van een vergelijking op basis van de bouwkosten. De jaarlijkse onderhoud- en vervangingskosten worden uitgedrukt in een vast percentage van de investeringskosten. Vervanging van grotere delen van de

installatie wordt niet apart in rekening gebracht. Het berekenen van alle kosten gedurende de gehele economische levensduur geeft een veel betere indicatie. Deze kostenberekening wordt aangeduid met Life Cycle Costs (LCC) en wordt in toenemende mate gebruikt in de industrie.

Bij een LCC-analyse moeten tenminste de volgende kosten in rekening worden gebracht:

- kosten voor de bouw van de installatie (investeringskosten)
- inspectie
- normaal en groot onderhoud, bijzondere waterconditioneringen
- vervangingskosten
- kosten ten gevolge van stilstand door materiaalproblemen
- opbrengst van restwaarde.

Deze kosten zijn over een lange periode verspreid. Om een goede vergelijking mogelijk te maken moeten alle kosten worden gerelateerd aan een gemeenschappelijk tijdstip: het bepalen van de huidige waarde (contante waarde) van de uitgaven die gedaan zullen worden. Dit contant maken gebeurt op basis van een vast rente- en inflatie percentage, waaruit een reële rente wordt berekend. De invloed van toekomstige veranderingen in rente en /of inflatie wordt hiermee in feite buiten de berekening gehouden.

De LCC kan met de volgende formule worden weergegeven:

$$LCC = AC + IC + \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{(1+r)^i} + \sum_{j=1}^a \frac{(A_j - R_j)}{(1+r)^{j(t)}}$$

Waarin:

- AC de kosten voor het materiaal en fabricage (AC)
- IC de kosten voor montage en installatie (IC) op de bouwplaats.
- Ci de jaarlijks terugkerende kosten voor exploitatie, inspectie, onderhoud en stilstand, bijzondere waterconditioneringen.
- Aj de kosten van de reparatie of vervanging in het jaar j, die niet onder het normale, jaarlijkse onderhoud vallen.
- Rj de eventuele restwaarde van de vervangen delen dient eveneens in de berekening te worden opgenomen. Met name hoogwaardig staal kan een aanzienlijke restwaarde vertegenwoordigen. Indien het afvoeren van restonderdelen geld kost wordt de 'restwaarde' negatief. Dit is bijvoorbeeld het geval met verwijderde rubber lining.
- r de reële rente (r), wordt gebruikt om de toekomstige kosten te relateren aan de huidige waarde: contant maken.

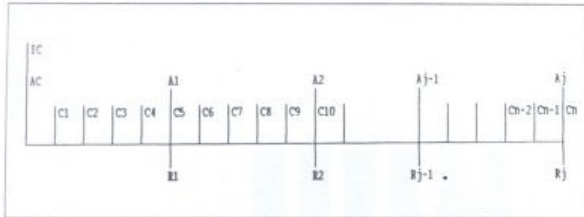
De reële rente (r) wordt gedefinieerd door:

$$r = (n-q)/100 / (1 + q/100)$$

waarin:

- n = rente (in %)
- q = inflatie (in %). Omdat de verhouding rente /inflatie door de jaren heen sterk kan fluctueren is een goede inschatting van deze waarden belangrijk a het aantal vervangingen gedurende de gehele levensduur
- N de totale, economische levensduur van de installatie

De invloed van de diverse factoren op de LCC is ook grafisch weergegeven in figuur 13.



Figuur 13: Verloop van de kosten tijdens de levensduur van de voorverwarmer.

Voor de LCC-berekeningen is een eenvoudig rekenprogramma ontwikkeld, waarmee alle factoren worden ingevoerd. Het rekenmodel is gebaseerd op het invoeren van drie groepen kosten:

- totaal aan investeringskosten ($AC + IC$ uit de formule)
- jaarlijkse onderhoudskosten (C_j): uitgedrukt als percentage van de totale investeringskosten
- kosten voor vervanging, restwaarde etc. (A_j-R_j , als functie van het jaar waarin de kosten gemaakt worden).

Daarnaast kunnen de levensduur, rente en inflatie gevarieerd worden. We kunnen nu de LCC berekenen voor een erosiecorrosie gevoelige component in een water stoom kringloop met name voor een voorwarmer.

Resultaten berekeningen

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de gebruikte gegevens voor de LCC-berekeningen voor een voorwarmer. We berekenen in totaal vijf opties. In de onderhoudskosten zitten ook de kosten van waterconditionering. Moet om corrosie te voorkomen speciale aandacht aan de waterconditionering worden geschonken, dan zal dit waarschijnlijk ook extra kosten met zich meebrengen (nog onbekend). Wordt bij een optie de waterconditionering speciaal aangepast dan worden de onderhoudskosten dus ook wat verhoogd.

Optie 1

Het bedrijf heeft geluk, want het C-staal bevatte wat meer Cu, Cr of Mo waardoor de erosiecorrosie weerstand van het staal zeer goed was. Er treden geen problemen op. Onderhoudskosten zijn gesteld op twee procent van de investering.

Optie 2

De 'Russische Roulette' is slecht gevallen en na circa tien jaar moe! een nieuwe voorwarmer worden geïnstalleerd. Inmiddels heeft de gecorrodeerde voorwarmer al heel wat ijzer afgegeven aan het systeem, welk ijzer mogelijk op de verdamperpijpen is afgezet en daar voor de nodige problemen kan zorgen. De voorwarmer wordt nu weer uitgevoerd in C-staal en de waterconditionering wordt aangepast om de erosiecorrosie in de hand te houden. De bundel uitgevoerd in standaard C-staal kost circa 85.000 gulden: het verwisselen van een nieuwe pijpenbundel kost circa 20.000 gulden. De kosten van onvoorzien uit bedrijf, extra kosten van de waterconditionering en mogelijke boeteclausules lijn niet in de calculatie opgenomen. De tweede bundel wordt bij toeval van een beter C-staal geconstrueerd. De onderhoudskosten worden op 2,5 procent gesteld.

Optie 3

Zoals optie 2, maar nu is de nieuwe bundel van een staal gebruikt dat nog slechter is dan de eerste bundel. In het vijftiende levensjaar moet de bundel weer worden vervangen. Soms wordt dan gekozen voor een roestvast stalen bundel. In deze optie kiezen wij voor een het staal 13CrMo4,4. Een bundel uitgevoerd in 13CrMo4.4 (een goed lasbaar staal) zal gezien de staal prijs van vijf gulden per kg circa 98,800 gulden moeten kosten.

Optie 4

Direct bij de eerste vervanging wordt gekozen voor het staal 13CrMo4.4.

Optie 5

Reeds bij de nieuwbouw is gekozen voor een voorwarmer met 13CrMo4.4 pijpen.

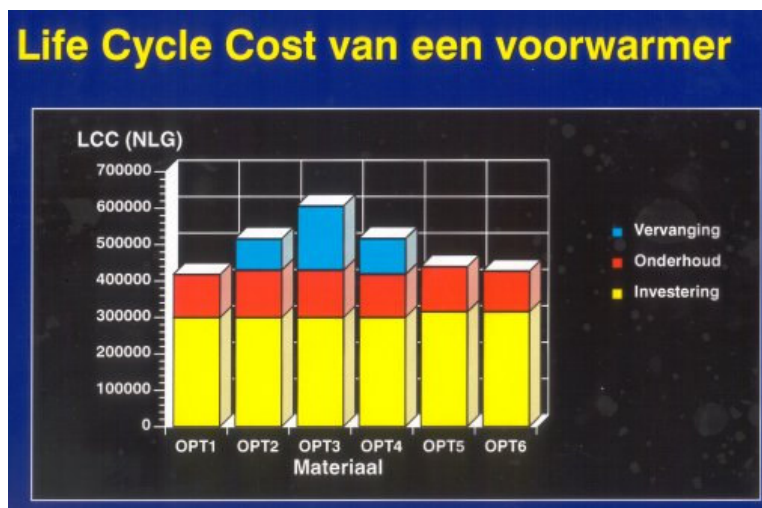
Optie 6

Indien voor de gehele water-stoom kringloop voor betere stalen wordt gekozen zal de waterconditionering mogelijk minder kostbaar zijn. De onderhoudskosten worden verlaagd door de eenvoudiger water-conditionering tot 1.8 procent.

Tabel 3 Nominale samenstellingen van de ongelegeerde en laaggelegeerde stalen.

Element	Materialen			
	St. 37 10.116	15Mo3 15.415	14Mn4 10.915	13CrMo4.4 17.335
C	0.32-0.39	0.12-0.2	0.1-0.18	0.1-0.18
Mn	0.5-0.8	0.4-0.8	0.9-1.2	0.4-0.7
Si	0.15-0.4	0.1-0.35	0.3-0.5	
P	< 0.045	< 0.035	< 0.05	< 0.05
S		< 0.035	< 0.05	< 0.05
Cr				0.7-1.1
Mo		0.25-0.35		0.45-0.65

In figuur 14 zijn de LCC-waarden van bovengenoemde opties samengevat. Het is duidelijk dat een keuze van een materiaal met verhoogd Cr-gehalte grote voordelen biedt.



Figuur 14: De resultaten van de LCC-berekeningen voor de verschillende opties.

Tabel 4

Basisgegevens van de LCC berekeningen voor een voorwarmer met een VO (verwarmend oppervlak) van 1200 m², diameter van 1.6 m en een lengte van 12 m.

Pijpen		
Uitwendige diameter	20 mm	
Pijplengten	10 m	
Pijpdiameter	12 mm	
Aantal pijpen	1860	
Soortelijk gewicht staal	7.85	
Pijpgewicht	10343 kg	
Kosten NLG		
	Uitgevoerd in materiaal	
	C-staal	13CrMo4.4
Voorwarmer	300.000	315.515
Bundel	85.000	100.515
Vervanging	20.000	20.000
Prijs per kg	3,50	5,00
Materiaal bundel	36.201	51.716

Tabel 5

De zes opties voor de LCC berekeningen van de voorwarmer (Verwarmend oppervlak = 1200 m² ; diameter = 1,6 m; lengte = 12 m; levensduur = 25 jaar)

Optie	Staal	G kema mg/100 hr	Vervanging in jaar	Waterkwaliteit eisen	Onderhoud %	LCC
KNLG						
1	C-staal	< 90		hoog	2.0	418
2	C-staal	> 90				
	Bij vervanging	< 90	10	strenger	2.2	516
3	C-staal	> 90				
	C-staal	> 90	10	strenger	2.2	
	13CrMo4.4		15			607
4	C-staal	> 90				
	13CrMo4.4		10	hoog	2.0	517
5	13CrMo4.4			hoog	2.0	440
6	13CrMo4.4			Minder streng	1.8	427

Gouden regels

In de ketel- en apparatenbouw lijn de corrosievormen verdampercorrosie, erosiecorrosie en spanningscorrosie belangrijke schadeoorzaken. In dit verband moeten de drie factoren waterconditioning, constructie en materiaalkeuze steeds kritisch worden bekeken. Elk van deze drie factoren kan doorslaggevend zijn bij het optreden van de schade.

Materiaalspecificaties voor ongelegeerde en laag gelegeerde stalen met betrekking tot corrosieweerstanden worden nog niet toegepast. terwijl toch uit onderzoek

bekend is dat variaties in de samenstelling van de ongelegeerde stalen een zeer grote invloed uitoefenen op de corrosieweerstand.

Om nagenoeg geen risico voor verdampercorrosie te lopen, is gebleken uit bedrijfservaringen dat het staal van het pijp- en lastoevoegmateriaal gespecificeerd moet worden op een corrosieweerstand hoger dan 50 mmol FeCl₂.

In erosiecorrosie gevoelige componenten zoals voorwarmers, economisers en natte stoom leidingen moet het staal op weerstand tegen erosie-corrosie worden gespecificeerd. Uit bedrijfservaringen blijkt dat een staal met een Gkema waarde van minder dan 90 weinig risico inhoudt voor erosiecorrosie.

Kostenberekeningen in de vorm van Life Cycle Cost berekeningen (LCC) kunnen helpen om te komen tot een verstandige materiaalkeuze, waarbij de totale kosten gedurende de bedrijfsperiode worden beschouwd. Het blijkt duidelijk uit de LCC berekening van een voorwarmer uitgevoerd in C-staal of een procent Cr-staal, dat een geringe verhoging in de aanschafkosten een grotere bedrijfszekerheid en kostenbesparing oplevert. Deze LCC-berekeningen kunnen voor vele verschillende componenten worden uitgevoerd.