

**Corrosiebestendige en
slijtvaste oppervlaktelagen
door oplassen en thermisch spuiten**

vm 108

VWM

*Corrosiebestendige en
slijtvaste oppervlaktelagen
door oplassen en thermisch spuiten*

vm 108



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00
Telefax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME-CWM/december 2009; 2^e druk

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Techniek en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon: 079 - 353 11 00
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: <http://www.fme.nl>

Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen door oplassen en thermisch spuiten

toelichting:

Voor u ligt de voorlichtingpublicatie "Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen, door oplassen en thermisch spuiten".

Deze voorlichtingspublicatie is bedoeld voor allen die te maken hebben of krijgen met het selecteren, toepassen en aanbrengen van slijtvaste en corrosiebestendige lagen. Daarbij moet gedacht worden aan constructeurs, lastechnici, werkvoorbereiders, enzovoorts.

Deze voorlichtingspublicatie is een update van de bestaande voorlichtingpublicatie VM108 uit 1997.

De updating was noodzakelijk omdat de ontwikkelingen van nieuwe oplas- en thermische spuittechnieken alsook nieuwe typen bedekkingslagen en legeringen niet stil hebben gestaan.

In deze voorlichtingspublicatie worden hoofdzakelijk de verschillende lasmethoden van het aanbrengen van corrosiebestendige en slijtvaste lagen besproken. Zeer beknopt wordt ingegaan op het aanbrengen via thermisch opspuiten. Voor uitgebreidere informatie over het thermisch spuiten wordt verwezen naar de bestaande voorlichtingspublicatie VM 95 "Thermisch spuiten".

Daarnaast mogen de volgende Technische Informatiebladen niet onvermeld blijven:

- TI 05-23 Dunne deklagen, met name via PVD en CVD voor onder meer gereedschappen
- TI 05-24 Dikke deklagen; selectie en keuze criteria in relatie met functionaliteit
- TI 05-25 Thermisch gespoten aluminium lagen
- TI 05-26 Coaten van producten uit dunne plaat
- TI 05-27 Kwaliteitsborging van (harde) deklagen

De bovengenoemde publicatie en Technische Informatiebladen kunnen gratis worden gedownload van de site www.dunneplaat-online.nl.

Het doel van deze publicatie is basisinformatie te verschaffen over de bedekkingslagen zelf en de methoden voor het aanbrengen daarvan.

samengesteld door:

W. Pors IWE (NIL)

Als co-lezer heeft G. van Krieken IWE (NIL) gefungeerd.

Eindredactie: P. Boers (Vereniging FME-CWM).

technische informatie:

Nederlandse Instituut voor Lastechniek (NIL)

- | | |
|-------------------------|--|
| - bezoekadres | Boerhaavelaan 40, Zoetermeer |
| - correspondentie-adres | Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER |
| - telefoon | 088 - 400 85 60 |
| - telefax | 079 - 353 11 78 |
| - e-mail | info@nil.nl |
| - website | www.nil.nl |

informatie over en bestelling van VM-publicaties, TI-bladen en praktijkaanbevelingen:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- | | |
|-------------------------|--|
| - bezoekadres | Boerhaavelaan 40, Zoetermeer |
| - correspondentie-adres | Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER |
| - telefoon | 079 - 353 11 00 |
| - telefax | 079 - 353 13 65 |
| - e-mail | info@fme.nl |
| - website | www.fme.nl |

Inhoud

	blz.		blz.
1 Inleiding	5	9 Materialen en materiaalkeuze	37
2 Systematisch benaderingswijze	6	9.1 Overzichten	37
3 Oppervlakte-eigenschappen en -eisen	7	9.2 Materialen voor oplossen	37
3.1 De invloed van de ondergrond	7	9.2.1 Materiaaloverzicht	38
3.2 Stap voor stap keuzes maken	7	9.3 Materiaal voor thermisch spuiten	39
3.3 Definities	8	10 Oplas- en thermische spuitprocessen	40
3.4 Wat gebeurt er aan het oppervlak?	8	10.1 Oplasprocessen	40
3.5 Oppervlakteparameters	9	10.1.1 Autogeenlassen	40
4 Oppervlaktedefect "Corrosie"	11	10.1.2 Elektrische booglasprocessen	40
4.1 Bezwijkvormen	11	10.1.3 Elektros lak oplossen	41
4.2 Overzicht corrosievormen	11	10.1.4 Poeder plasmalassen (PPAW)	41
4.2.1 Algemene corrosie	11	10.1.5 Laser oplossen (lasercladden)	41
4.2.2 Galvanische corrosie	11	10.1.6 Explosief oplossen	42
4.2.3 Selectieve aantasting	11	10.2 Thermisch spuiten	42
4.2.4 Putvormige corrosie	12	10.2.1 Autogeen draadspuiten	43
4.2.5 Spleetcorrosie	12	10.2.2 Autogeen poederspuiten	43
4.2.6 Interkristallijne corrosie	13	10.2.3 Elektrisch draadspuiten	43
4.2.7 Spanningscorrosie	13	10.2.4 Plasmaspuiten	43
4.2.8 Hoge temperatuur corrosie	14	10.2.5 Hoge-snelheidspuiten	44
4.3 Aanvullende informatie over de besproken corrosievormen	14	10.3 Proceskenmerken	44
4.3.1 Putvormige corrosie	14	11 Metaalkundige en aanverwante aandachtspunten bij het aanbrengen van deklagen	46
4.3.2 Spleetcorrosie	15	11.1 Metaalkundige en aanverwante effecten bij basis- en deklaagmateriaal	46
4.3.3 Spanningscorrosie	15	11.2 Thermisch spuiten	46
4.3.4 Interkristallijne corrosie	15	11.3 Oplassen	46
4.3.5 Corrosievermoeiing	15	11.4 Speciale aandachtspunten bij het oplossen en thermisch spuiten	48
4.3.6 Hoge temperatuur corrosie	16	11.5 Invloed van defecten in de deklaag	49
5 Oppervlaktedefect "Slijtage"	17	11.5.1 Scheuren in de deklaag	49
5.1 Bezwijkvormen	17	11.5.2 Poreusheid in de deklaag	50
5.2 Overzicht slijtagevormen	17	11.5.3 Insluitingen in de deklaag	50
5.2.1 Abrasieve slijtage	17	12 Beproevingen	51
5.2.2 Adhesieve slijtage	18	12.1 Functie van testen	51
5.2.3 Erosieve slijtage	18	12.1.1 Meten van functionele eigenschappen	51
5.2.4 Slijtagevermoeiing	18	12.1.2 Vergelijken van opties/varianten	51
5.3 Aanvullende informatie over de besproken vormen van slijtage	19	12.1.3 Kwaliteitsborging	51
5.3.1 Abrasieve slijtage	19	12.2 Invloed schaalgrootte van de proeven	52
5.3.2 Adhesieve slijtage	20	12.3 Testaspecten	53
5.3.3 Slijtagevermoeiing	20	12.3.1 Standaard slijtagetesten	53
6 Oppervlaktedefect "Mengvormen van corrosie en slijtage"	22	12.3.2 Standaard corrosietesten	54
6.1 Bezwijkvormen	22	12.3.3 Niet gestandaardiseerde beproevingsmethoden	55
6.2 Mengvormen	22	12.3.4 Praktijkbeproeving	56
6.2.1 Corrosieve slijtage	22	12.3.5 Ontwerpen van testen	56
6.2.2 Corrosievermoeiing	22	13 Softwarematige ondersteuning	58
6.2.3 Fretting	22	13.1 Algemeen	58
6.2.4 Erosie-corrosie	23	13.2 COSTCOMP (oplossen)	58
6.3 Aanvullende informatie over de besproken vormen van combinatie corrosie en slijtage	23	13.3 Overige selectiehulpjes	59
6.3.1 Fretting	23	14 Praktijkvoorbeelden	60
6.3.2 Erosie	23	14.1 Oplassen	60
6.3.3 Erosie-corrosie	24	14.2 Opspuiten	63
7 Mogelijke oplossingsrichtingen voor slijtage- en corrosieproblemen	25	15 Literatuuroverzicht	66
7.1 Algemeen	25		
7.2 Ontwikkelingen in processen en materialen	25		
7.3 Mechanismen en technieken	26		
8 Herkennen van problemen en de oplossingen	27		
8.1 Algemeen	27		
8.2 Analyse	27		
8.3 Correctie	34		

Hoofdstuk 1

Inleiding

Slijtage en corrosie veroorzaken jaarlijks een grote kapitaalvernietiging die wereldwijd per jaar op vele honderden miljarden euro's wordt geschat. Naast de werkelijke materiaalverliezen spelen de gevolgschade en de kosten voor herstelling van de schade een zeer belangrijke rol.

Om deze verliezen terug te dringen is kennis van de slijtage- en corrosiemechanismen een vereiste. Afhankelijk van de industrietaak ligt het accent meer op corrosie (bijvoorbeeld petrochemie) of op slijtage (bijvoorbeeld metallurgie). Een goede diagnose van de schade en de onderliggende oorzaken is moeilijk. Daardoor is ook het vinden van goede oplossingen voor het probleem vaak lastig. Deze publicatie vormt bij de diagnose en het vinden van een goede oplossing een leidraad.

Belangrijk in het bestrijden van corrosie en slijtage is dat degene die de bestrijding ter hand neemt, de definities van corrosie en slijtage kent.

Deze definities zijn:

► Corrosie

Corrosie is de ongewenste aantasting van een materiaal tengevolge van chemische of elektrochemische reacties met een omgevend medium.

► Slijtage

Slijtage is de ongewenste verandering van het oppervlak van een vast lichaam teweeggebracht door contact en een relatieve beweging van een vast, vloeibaar of gasvormig tegenlichaam.

Het uitgangspunt van oppervlaktelagen is verbetering van de eigenschappen van het oppervlak door het aanbrengen van lagen. Het oppervlak zodanig bedekken zodat het goed voldoet aan de werkomstandigheden wordt niet alleen technisch, maar ook economisch steeds belangrijker. Zeker als dure, massieve materialen vervangen kunnen worden door goedkopere oplossingen. Kenschetsing en het gebruik van oppervlakken in de techniek en tribologie kunnen leiden tot oplossingen.

Een grote variëteit aan technieken kan worden toegepast, inclusief recent ontwikkelde processen zoals opdammen, PVD, CVD, ionenimplantatie, laserbehandelingen, enz. De grote verscheidenheid en de gecompliceerdheid van materialen en processen die nu beschikbaar is, maakt de keus van een geschikte combinatie buitengewoon moeilijk.

Deze publicatie richt zich in het bijzonder op technici, die niet (kunnen) beschikken over een ter zake kundige, zonder dat wordt beoogd deze volledig te vervangen. Voor complexe problemen zal de steun van deskundigen altijd nodig blijven. In dergelijke gevallen wordt dan bereikt dat de diagnose van het probleem en de oplossing ervan gemakkelijker te begrijpen en te bespreken is.

Om de duidelijkheid niet uit het oog te verliezen is er bewust voor gekozen deze voorlichtingspublicatie te beperken tot hoofdzakelijk oplossen. Vanwege de beschikbaarheid van een aparte voorlichtingspublicatie "Thermisch spuiten" (VM 95), wordt deze techniek dan ook zeer beknopt besproken. Daarnaast wordt via een aantal problemen uit de industrie over oplossingen besproken.

Hierbij komen dan wel de volgende aspecten aan de orde:

- omgaan met het grote aanbod door een gestructureerde benadering, waarbij contact met specialisten en leveranciers pas plaatsvindt nadat alle relevante parameters zijn gekwalificeerd en zo mogelijk gekwantificeerd;
- duidelijk maken dat geen garantie op succes kan worden gegeven zonder aandacht voor kwaliteitsborging.

Voor de overige technieken voor behandeling van het oppervlak die hier niet worden besproken, wordt verwezen naar de eerder genoemde Technische Informatiebladen.

Aanbrengen van bedekkingslagen kan zowel preventief (in de nieuwbouwfase), alsook bij reparatie plaatsvinden. Om in beide gevallen een juiste selectie te kunnen maken van het toe te passen type bedekkingslaag en het aanbrengproces, wordt in hoofdstuk 2 een systematische benadering besproken. Deze wijze van benaderen is dezelfde als besproken in de voorlichtingspublicatie VM 129 "Reparatielassen". In hoofdstuk 3 worden de eigenschappen van oppervlaktelagen en de daaraan te stellen eisen besproken.

In hoofdstuk 4 worden de oppervlaktedefecten corrosie en in hoofdstuk 5 de slijtagefenomenen behandeld. Hoofdstuk 6 geeft mengvormen van corrosie- en slijtagefenomenen weer. Hoofdstuk 7 bespreekt de mogelijke oplossingsrichtingen voor slijtage en corrosie.

Hoofdstuk 8 "Herkennen van problemen en de oplossing" biedt een stramien voor het stapsgewijs verzamelen van informatie en het nemen van beslissingen die documenteerbaar zijn (kwaliteitsbeheer).

In hoofdstuk 9 wordt ingegaan op de toevoegmaterialen en de keuze-richting ervan.

De oplos- en thermische spuitprocessen worden in hoofdstuk 10 in beknopte vorm besproken, terwijl hoofdstuk 11 de metaalkundige en aanverwante aandachtspunten bij het aanbrengen van bedekkingslagen behandelt.

Mogelijke testen ter ondersteuning van de keuze van een geschikte oppervlaktelaag worden in hoofdstuk 12 beschreven. In hoofdstuk 13 worden softwarematige ondersteuningsbronnen genoemd, terwijl in hoofdstuk 14 enkele voorbeelden uit de praktijk zijn verzameld.

Tenslotte geeft hoofdstuk 15 een overzicht van mogelijk te raadplegen literatuur.

Hoofdstuk 2

Systematische benaderingswijze

Indien iets geconstrueerd wordt, weet de constructeur waarvoor het product dient. Bekend is dan ook of het product onderhevig is aan slijtage, corrosie dan wel combinaties daarvan; dit naast de aard en de grootte van de belasting. Op de aard en de grootte van de belasting wordt in het algemeen goed geconstrueerd. Echter, over de mogelijke aantastingen bezit de constructeur vaak te weinig kennis. Wil men materialen toepassen die bestand zijn tegen de te verwachten aantasting, dan moet bekend zijn welke vorm van aantasting te verwachten is. Kennis van onder andere materialen, slijtage- en corrosievormen is dus onontbeerlijk.

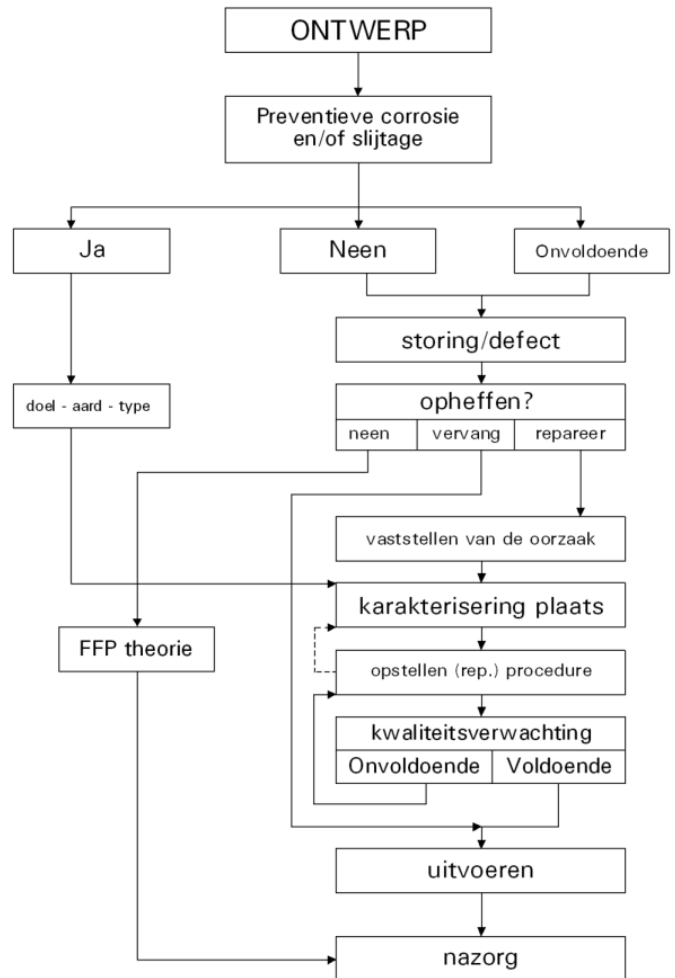
Zo moet anderzijds de oorzaak van het ontstaan van het opgetreden oppervlaktedefect bekend zijn, wil men op een zodanige wijze repareren dat het defect niet meer optreedt.

Voorts is het van wezenlijk belang dat de reparatieplaats "gekaracteriseerd" wordt. Hieronder moet worden verstaan dat onder andere de volgende factoren bekend zijn:

- wat is de oorzaak van het defect;
- welke basismaterialen zijn toegepast;
- welke deklaagmaterialen zijn toegepast;
- welke kwaliteit wordt vereist;
- wat zijn de applicatieomstandigheden (bijvoorbeeld voor lassen).

Als dit alles bekend is kan een gedegen (reparatie)procedure worden opgesteld. Bij elke stap in deze "filosofie" zijn er afwegingspunten. Bovenstaande overwegingsfactoren en afwegingspunten, in combinatie met de verschillende te doorlopen stappen, leiden tot het schema "Reparatiefilosofie" (zie figuur 2.1).

Dit schema moet door de constructeur eigenlijk ook in de "tekentafelfase" worden doorlopen bij de keuze van de toe te passen materialen. In deze fase van de constructie worden vaak de verkeerde beslissingen genomen, omdat onvoldoende aandacht wordt besteedt aan de omstandigheden waaronder de constructie moet functioneren.



figuur 2.1 Schema "Reparatiefilosofie"

Hoofdstuk 3

Oppervlakte-eigenschappen en -eisen

3.1 De invloed van de ondergrond

Over oplossingen met deklagen wordt vaak pas nagedacht nadat in de praktijk een probleem is ontstaan dat moet worden opgelost; het basismateriaal is dan al gekozen. Soms wordt "uit oogpunt van zekerheid" een verkeerd basismateriaal gekozen. Bijvoorbeeld: een corrosievaste deklaag met eronder een austenitisch corrosievast staal "voor de zekerheid".

Een belangrijke reden hiervoor is, dat bij veel constructeurs de kennis ontbreekt van deklaagtechnieken en materialen. Men gaat af op elders opgedane ervaringen met vaak sterk afwijkende omstandigheden, of men gaat alleen af op informatie van leveranciers. Gedreven door commerciële belangen wordt soms meer beloofd dan waargemaakt kan worden in de hoop op een toevalstreffer. Onderzoek naar de kwaliteit van de gekozen deklaag wordt dan ook niet gestimuleerd. Wat dit betreft hebben de leveranciers al snel het gelijk aan hun kant, omdat controles aan het product vaak niet mogelijk of zeer kostbaar zijn.

Eisen stellen aan de kwaliteit van een deklaag betekent, dat eerst bekend moet zijn welke eisen de toepassing aan het oppervlak stelt en in welke mate deze moeten worden gereproduceerd. Een voorbeeld maakt duidelijk wat hier wordt bedoeld.

In veel gevallen, zeker bij het thermisch spuiten, is de hechting met het basismateriaal belangrijk. Dit kan worden gekwantificeerd als een kracht die nodig is om de deklaag los te trekken. Deze kracht is in principe goed meetbaar, maar betekent ingewikkeld en destructief onderzoek. De verleiding is dan groot om naar een 'representatief' proefstuk te grijpen, wat in de praktijk een simpel rechthoekig plaatje van enkele mm dikte betekent. Hierop wordt vervolgens een perfecte deklaag aangebracht en beproefd. De hechting van de deklaag wordt echter bepaald door factoren zoals:

- ▶ oppervlakteruwheid van het basismateriaal;
- ▶ reinheid van het oppervlak;
- ▶ niveau, richting en diepte van (bewerkings)restspanningen;
- ▶ oppervlaktespanning van het deklaagmateriaal tijdens het aanbrengen;
- ▶ uitzettingscoëfficiënten en procestemperatuur;
- ▶ behandelingsstijd;
- ▶ nabehandeling;
- ▶ geometrie.

Deze opsomming maakt duidelijk dat voor een 'representatief' proefstukje aan veel oppervlakedetails aandacht moet worden besteed. Het kwantificeren van deze aspecten, laat staan het formuleren van eisen, is niet eenvoudig en wordt normaal dan ook niet gedaan. De waarde van proefstukken is beperkt als de condities ervan te sterk afwijken van het uiteindelijke product. Dit geeft dan ook duidelijk aan dat de resultaten van testen zeer zorgvuldig moeten worden geïnterpreteerd. Hierop gebaseerde keuzes moeten onder actuele praktijkcondities worden geverifieerd door testen op volle schaal. Doet men dit niet, dan blijft de onzekerheid. Men moet zich dan blijven realiseren dat het gereede product zich feitelijk in een testfase bevindt en dat eventueel afwijkend gedrag goed geanalyseerd moet worden.

Moet een product echter in één keer slagen, dan moeten op kleinere schaal proeven worden gedaan. Hierbij moeten de belangrijkste aspecten apart worden bekeken, waarbij samenwerking met het oplos- of spuitbedrijf voorop moet staan. Door een eenduidige vastlegging van de machine-instellingen bij testen, kan de noodzaak bovengenoemde aspecten te kwantificeren vervallen. Men vertrouwt dan op de reproduceerbaarheid van de instellingen. De testcondities worden overgebracht naar de productie. Hoofdstuk 12

geeft meer informatie over het testen en beproeven van deklagen.

Onzekerheid over de reproduceerbaarheid van het productieproces kan leiden tot het volgende:

- ▶ de spanningen in het basismateriaal, die ontstaan als gevolg van de voorbewerking, kunnen sterk variëren;
- ▶ bij verkeerd gritstralen zullen tijdens het afkoelen in een keramische laag niet altijd de gewenste drukspanningen ontstaan;
- ▶ de scheurgevoeligheid wordt onbeheersbaar door hoge lokale trekspanningen.

De mechanische voorbereiding van de ondergrond is, zeker bij het thermisch spuiten, zeer belangrijk en moet worden afgestemd op de eisen die de deklaag stelt. Het resultaat is in termen van spanningen moeilijk meetbaar, vooral tijdens het productieproces. Voor meer informatie wordt verwezen naar de voorlichtingspublicatie VM 95 "Thermisch spuiten".

Het komt ook voor dat het proces weliswaar reproduceerbaar is en een daarmee samenhangend reproduceerbaar resultaat oplevert, maar dat door onbekendheid met de oppervlakte-eigenschappen het resultaat 'reproducerend verkeerd' is. De deklaag wordt dan vaak als 'slechte oplossing' terzijde gelegd. Zonder voldoende inzicht is het dan onmogelijk om op het gewenste niveau bij te sturen. De meeste opdrachtgevers zullen niet tot lang lopend 'trial and error' onderzoek besluiten en al snel geen geloof meer hechten aan de 'oplossing'.

Tenslotte komt het veelvuldig voor dat er onvoldoende kennis is van de bedrijfsomstandigheden, laat staan van de wijze waarop de behandeling op deze omstandigheden reageert. Dit heeft tot een groot aantal mislukkingen geleid.

3.2 Stap voor stap keuzes maken

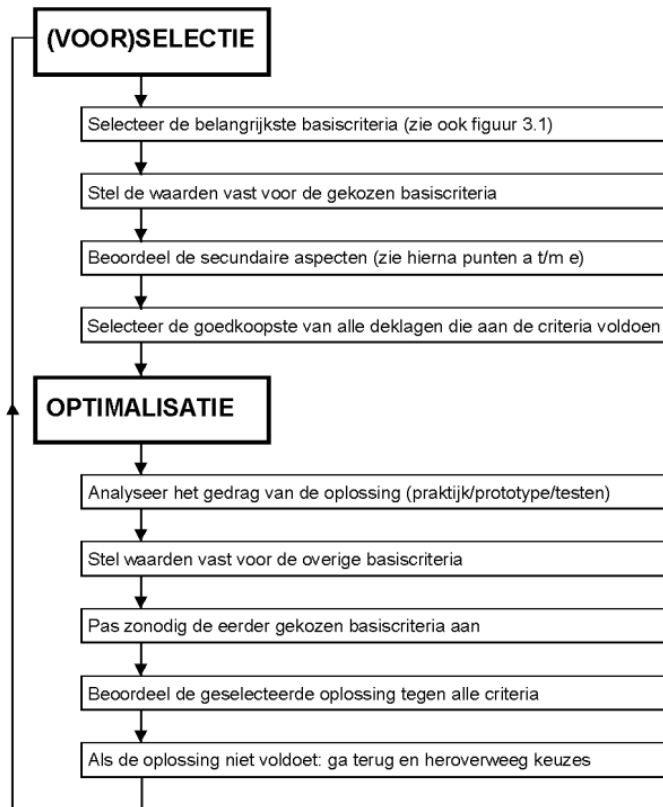
Het is noodzakelijk van tevoren te bepalen welke eigenschappen op welk niveau voor de toepassingen nodig zijn. Dit betekent ook dat een bepaalde logische volgorde moet worden gevolgd bij het kiezen van een deklaag en een aanbrengproces. Dit is weergegeven in figuur 3.1, waarbij 16 basiscriteria zijn te onderscheiden.

1. Bedrijfstemperatuur
2. Omgevingscondities (milieu)
3. Type deklaagmateriaal
4. Hardheid deklaagmateriaal
5. Deklaagdikte en homogeniteit
6. Type basismateriaal
7. Hardheid basismateriaal
8. Oppervlakteruwheid
9. Contactdruk
10. Contactvorm
11. Type relatieve beweging
12. Relatieve snelheden
13. Grootte en vorm van het onderdeel
14. Aantal onderdelen
15. Kosten
16. Verkrijgbaarheid

figuur 3.1 Basiscriteria bij de selectie

Met behulp van deze basiscriteria kan via een logisch stappenplan een juiste keuze gemaakt worden (zie figuur 3.2).

De meeste criteria zijn te kwantificeren op basis van normale ontwerpinzichten. De criteria 3 en 4 kunnen met behulp van hoofdstuk 12 van deze voorlichtingspublicatie worden bepaald. Criterium 5 vraagt om optimalisatie van het ontwerp tegen de mogelijkheden van de deklaag. De criteria 2 en 9 t/m 12 bepalen hoe het product zich zal gedragen bij corrosie en slijtage, waarvoor de hoofdstukken 4 t/m 6 achtergrondinformatie geven. Bekijk vooral figuur 3.2 goed om te bepalen wat voor een bepaalde toepassing de belangrijkste



figuur 3.2 Stapsgewijs kiezen

aspecten kunnen zijn. Hoofdstuk 9 geeft verder algemene aanwijzingen voor het oplossen van corrosie- en slijtageproblemen met deklaag. Voor meer specifieke problemen kunnen leveranciers en/of specialisten worden geraadpleegd.

De keuze wordt verder bepaald door afweging van secundaire aspecten, te verdelen in de volgende categorieën:

- ▶ bedrijfsmatige beperkingen (beschikbaarheid van middelen en personeel voor het aanbrengen van de bedekkingslaag);
- ▶ beperkingen uit de fabricageprocessen (thermische belasting, bewerkingsspanningen, kwetsbaarheid);
- ▶ geometrische beperkingen (hanteerbaarheid, bereikbaarheid);
- ▶ beperkingen door het karakter van het oppervlak (bewerkbaarheid);
- ▶ economische beperkingen (kostprijs, toegevoegde waarde).

Hier zullen problemen kunnen ontstaan. De definitie van bedrijfsmatige beperkingen zal van bedrijf tot bedrijf en van onderdeel tot onderdeel verschillen. Zo kan:

- ▶ de gewenste methode van voorbereiding of aanbrengen niet beschikbaar zijn;
- ▶ kan het beschikbare proces een te grote warmte-inbreng hebben voor het basismateriaal;
- ▶ de geometrie niet geschikt zijn voor het aanvankelijk gekozen proces, bijvoorbeeld het aanbrengen van een deklaag in een kleine boring;
- ▶ de gewenste oppervlakteruwheid niet bereikbaar zijn door de aanwezigheid van een grove structuur in het basismateriaal (grote kristallen, ook wel grote korrels genoemd);
- ▶ het proces en het materiaal te duur zijn.

Om een juiste keuze te kunnen maken is informatie nodig. Deze is niet altijd op het gewenste moment voorhanden. Dit is deels op te lossen door informatie in te winnen bij leveranciers, collega's, specialisten, enz. Hierbij moet steeds worden uitgegaan van de functie die door het onderdeel moet worden vervuld. Uit de antwoorden kan worden afgeleid welke parameters moeten worden gekwantificeerd en dus om een nadere bestudering vragen. Niet alle parameters zijn kwantificeerbaar; het is ook niet altijd nodig dat ze worden gekwantificeerd. Niet kwantificeerbare parameters

veroorzaken een zeker risico. Hiervan kan een inschatting worden gemaakt door naar de mogelijke gevolgen van falen te kijken. Het is theoretisch mogelijk op dit punt een volledige faalanalyse uit te voeren. Afhankelijk van de aanwezige kennis en ervaring ontstaat bij deze afweging gevoel voor de noodzaak om een specialist te raadplegen. Wanneer wordt beslist dat alle vragen voldoende zijn beantwoord, is een overzicht van eisen en onzekerheden ontstaan waarmee de eerste keus kan worden gemaakt. Ook een niet volledige beantwoording blijft zijn waarde behouden, omdat altijd kan worden teruggehaald waar een keuze op werd gebaseerd.

3.3 Definities

In de inleiding zijn al de definities van de aantastingsvormen corrosie en slijtage gegeven. Corrosie is een verzamelnaam voor alle vormen van chemische aantasting en slijtage voor mechanische aantasting van het oppervlak. Er zijn ook tussenvormen, waarin het oppervlak tegelijk door chemische en mechanische oorzaken wordt beschadigd.

Voor corrosie is de definitie (volgens het Zweedse Jernkontoret Instituut):

Corrosie is de ongewenste aantasting van een materiaal tengevolge van chemische of elektrochemische reacties met een omgevend medium.

Corrosie kan verder nog worden onderscheiden in twee hoofdgroepen n.l. de atmosferische en de procescorrosie. Deze vormen kunnen als volgt worden omschreven:

- ▶ *Atmosferische corrosie* vindt plaats in een atmosfeer, bij temperaturen tussen -20 en $+70$ °C, waartoe zowel de corrosie in de buiten- als in de binnenlucht behoort (inclusief de ruimten in apparaten en verpakkingen), mits vloeistoffen en gassen, die onderdeel van een proces uitmaken, afwezig zijn.
- ▶ *Procescorrosie* is de ongewenste aantasting van constructiematerialen als gevolg van reacties met de in de installaties of installatiedelen voorkomende (proces)vloeistoffen of gassen.

De definitie voor slijtage is:

Slijtage is de ongewenste verandering van het oppervlak van een vast lichaam teweeggebracht door contact en een relatieve beweging van een vast, vloeibaar of gasvormig tegenlichaam.

Een in de slijtagewereld veel voorkomend begrip is "tribologie". Tribologie is het hoofdbegrip voor de complexe fysische en chemische wrijvings- en slijtageprocessen van zich bewegende en relatief langs elkaar bewegende lichamen, respectievelijk stoffen.

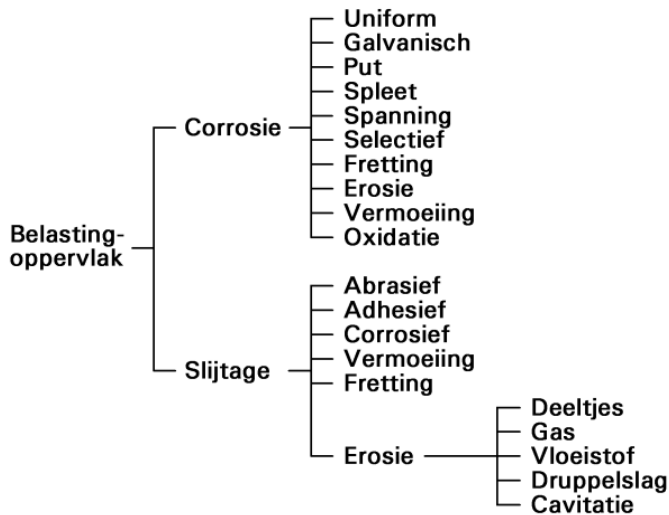
Uit bovenstaande definities volgt dat het in alle gevallen gaat om een ongewilde aantasting van een oppervlak. Het zal duidelijk zijn dat bij het gelijktijdig optreden van zowel corrosie als slijtage een versterking van de aantasting zal optreden.

3.4 Wat gebeurt er aan het oppervlak?

De keuze van een deklaag wordt in eerste instantie bepaald door wat zich aan het oppervlak afspeelt. Dit kunnen soms zeer complexe processen zijn, waardoor aan het oppervlak de volgende belangrijkste eisen kunnen worden gesteld:

- 1) corrosiebestendigheid,
- 2) nucleaire bestendigheid,
- 3) slijtagebestendigheid,
- 4) hogetemperatuurbestendigheid,
- 5) thermische eigenschappen,
- 6) elektrische eigenschappen,
- 7) mechanische eigenschappen,
- 8) optische eigenschappen,
- 9) wrijvings-eigenschappen.

In deze publicatie wordt alleen aandacht geschonken aan corrosie en slijtage (zie het schema in figuur 3.3).



figuur 3.3 Schema van de te behandelen onderwerpen in deze publicatie

Belastingsvormen dienen zo goed mogelijk te worden omschreven. Waar mogelijk moet er naar worden gestreefd de belastingsparameters te kwantificeren.

Bij corrosie is de omgeving van het oppervlak bepalend. De chemische samenstelling van het milieu aan het oppervlak, in combinatie met de temperatuur, stroomdoorgang en dergelijke, bepalen de corrosievorm en -snelheid.

Bij slijtage zijn altijd minimaal twee oppervlakken betrokken. Deze kunnen even groot zijn, of sterk in grootte verschillen, zoals bij deeltjes die langs een vlak vliegen. Het is vooral de relatieve verplaatsing van de oppervlakken ten opzichte van elkaar die invloed heeft.

Nadat alle aan het oppervlak optredende belastingsvormen zo goed mogelijk zijn omschreven, moet het bestaande en gewenste oppervlak worden gekarakteriseerd.

3.5 Oppervlakteparameters

Het oppervlak kan met behulp van een aantal parameters worden gekarakteriseerd. De belangrijkste zijn:

- morfologie van het oppervlak
- chemische samenstelling
- microstructuur
- mechanische eigenschappen
- stabiliteit
 - chemisch
 - fysisch

Bij de keuze van een deklaag is het belangrijk om het bestaande oppervlak te karakteriseren op bovenstaande parameters. Dit niet alleen om te onderzoeken of het bestaande oppervlak geschikt is voor de belasting ervan, maar is ook nodig als uitgangspunt voor een eventuele oppervlaktebehandeling.

Bij de karakterisering van het oppervlak wordt zowel gevraagd om een kwantificering op macro-, alsook op microschaal. Bij veel processen is de ruwheid of de poreusheid van het oppervlak bepalend voor de levensduur van dat oppervlak.

Van de mechanische eigenschappen is niet alleen de hardheid van het oppervlak belangrijk. Ook de vermoeiingssterkte, rekgrens, breukrek en (koud)versteving van het oppervlak zijn van invloed op bijvoorbeeld het slijtagegedrag.

Het aantal combinaties van zowel procesparameters als oppervlakteparameters is oneindig groot. Het geven van een beschrijving van die combinaties is dan ook niet mogelijk. Aan de hand van enkele voorbeelden wordt aangegeven hoe men processen, die zich aan het oppervlak afspelen, kan herleiden tot procesparameters en oppervlakteparameters.

Corrosie

In de industrie wordt veelvuldig gebruik gemaakt van corrosiebestendig staal (ook bekend als roestvast staal). Niet alleen vanwege de sterkte, maar ook vanwege de corrosiebestendigheid van het oppervlak.

De corrosiebestendigheid van het oppervlak is o.a. afhankelijk van:

- *het karakter van het oppervlak*: hoe gladder het oppervlak, des te kleiner het totaaloppervlak en des te groter de weerstand tegen corrosie.
- *de chemische samenstelling*: hoe meer 'edele' legeringselementen als chroom en nikkel, des te beter de bestendigheid tegen aantasting. Legelementen zijn echter duur.
- *de microstructuur*: een microstructuur bestaande uit meerdere fasen, heeft een negatief effect op de corrosiebestendigheid. Carbiden onttrekken de legeringselementen aan de matrix. Carbiden kunnen onbedoeld worden gevormd door het lassen of een (verkeerde) warmtebehandeling en daarmee de corrosiebestendigheid verminderen. Ook de aanwezigheid van insluitsels kan de corrosiebestendigheid nadelig beïnvloeden.

De mechanische eigenschappen van het oppervlak spelen hier nauwelijks een rol van betekenis.

Corrosie en slijtage

Wanneer het oppervlak uit het voorgaande voorbeeld ook op glijdende slijtage wordt belast, zal het oppervlak ook aan andere eisen moeten voldoen:

- *karakter van het oppervlak*: een glad oppervlak is nu ongunstig. Ten behoeve van een eventueel smeermiddel kan een bepaalde ruwheid of poreusheid gewenst zijn. Bovendien zijn vuil en slijtagepartikels minder schadelijk wanneer ze in holten in het oppervlak worden ingevangen.
- *chemische samenstelling*: om vastlassen van de ruwheidstoppen aan het tegenoppervlak te voorkomen, moeten beide oppervlakken een verschillende chemische samenstelling hebben. Doordat het oppervlak ruw is, zal in principe een hoog gehalte van een legeringselement gewenst zijn om de benodigde corrosiebestendigheid te verkrijgen. Inerte materialen als keramiek zijn in het voordeel, mits niet poreus.
- *microstructuur*: carbiden hebben een gunstig effect op de weerstand tegen slijtage van het oppervlak. Zij vormen harde eilanden in een zachtere matrix. Carbiden hebben een goede slijtageweerstand, terwijl het bindermateriaal moet zijn aangepast aan de corrosie. Nikkel is in dat opzicht gunstiger dan kobalt;
- *mechanische eigenschappen*: bij voorkeur dient er een verschil te zijn in de hardheid van de twee op elkaar werkende oppervlakken. Het hardste zal daarbij het minst slijten. Tevens is het gunstig wanneer het oppervlak taai is en gemakkelijk verstevigt.

Daarnaast mag goed onderhoud (goede smering) niet worden vergeten, zodat de uitgangspunten wel gehandhaafd blijven: falen van de deklaag voorkomen door de materiaalkeuze.

Slijtage en vermoeiing

Uit het corrosie- en slijtagevoorbeeld kan worden afgeleid dat in het algemeen een hard oppervlak gunstig is voor de weerstand tegen slijtage. Wanneer echter sprake is van een gecombineerd proces van slijtage en vermoeiing van het oppervlak, dan moet toch ook weer naar de andere oppervlakteparameters worden gekeken:

- *karakter van het oppervlak*: een bepaalde ruwheid en poreusheid zijn gunstig voor de slijtageweerstand (bijv. voor het vasthouden van het smeermiddel), maar ongunstig in verband met scheurinitiatie bij vermoeiing.
- *microstructuur*: een (inhomogene) structuur met harde deeltjes in die structuur is gunstig in verband met het slijtagegedrag. Een inhomogene structuur is echter ongunstig t.a.v. scheurinitiatie. Ook insluitsels en andere verontreinigingen in en vlak onder het oppervlak zijn ongunstig.
- *mechanische eigenschappen*: een hoge hardheid is gunstig voor de slijtagebestendigheid, maar ongunstig in ver-

band met scheurinitiatie als gevolg van vermoeiing. Vooral met betrekking tot de weerstand tegen vermoeiing is het van belang dat er geen groot verschil is in mechanische eigenschappen van het oppervlak en de ondergrond. Wanneer de elasticiteit van het oppervlak lager is dan die van het basismateriaal, zullen gemakkelijk scheuren in het oppervlak ontstaan, die vervolgens doorgroeien tot in de ondergrond.

Slijtage

Hierbij gelden voor de oppervlakteparameters de volgende aspecten:

- ▶ *karakter van het oppervlak*: een glad oppervlak is enerzijds gunstig, omdat het een lage wrijvingscoëfficiënt geeft; anderzijds is een ruwer oppervlak beter, omdat dit het smeermiddel beter vasthoudt. Wat nodig is, wordt bepaald door de snelheid en de afstand tussen de bewegende oppervlakken. Hoe nauwer de spleet des te gladder het oppervlak moet zijn. Voor een hydrodynamische smering heeft een glad oppervlak de voorkeur. Bij grenssmering zal een ruwer oppervlak beter zijn. Soms wordt bewust de structuur van een sinaasappelhuid in het oppervlak aangebracht.
- ▶ *chemische samenstelling*: om vastlassen van de ruwheidstoppen aan het tegenoppervlak te voorkomen, is het gewenst dat beiden oppervlakken een verschillende chemische samenstelling hebben. Materialen die niet spontaan een legering met elkaar willen vormen (bijvoorbeeld ijzer en tin) of die een keramisch laagje op het oppervlak vormen (bijv. chroom dat een zeer dun laagje chroomoxide opbouwt) hebben de voorkeur.
- ▶ *microstructuur*: carbiden hebben een gunstig effect op de weerstand tegen slijtage van het oppervlak. Zij vormen harde eilanden in een zachtere ondergrond;
- ▶ *mechanische eigenschappen*: bij voorkeur dient er verschil te zijn in de hardheid van de twee op elkaar werkende oppervlakken. Het hardste zal daarbij het minst slijten. Tevens is het gunstig wanneer het oppervlak taai is en gemakkelijk versterkt.

Combinaties van verschillende aantastingmechanismen maken het lastig een goede deklaag te kiezen. Daarom is het belangrijk zich te concentreren op vorm van de hoofdaantasting en trachten te achterhalen wat het effect zal zijn van de gevolgschade.

Hoofdstuk 4

Oppervlakedefect "Corrosie"

4.1 *Bezwijkvormen*

Schades aan installaties zijn het gevolg van bezwijkmechanismen van het materiaal, zoals:

- breuk door vermoeiing, bros breken en lamellaire scheurvorming (lamellair tearing);
- instabiliteitsproblemen, zoals bijvoorbeeld knik;
- invloed temperatuur op de sterkte-eigenschappen, zoals bijvoorbeeld kruip;
- corrosie;
- slijtage.

Op de laatste twee verschijnselen wordt in deze publicatie verder ingegaan. In tabel 4.1 worden de diverse verschijningsvormen gerepresenteerd.

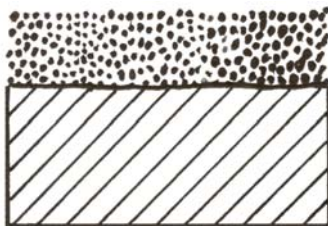
tabel 4.1 De diverse verschijningsvormen zoals die in deze publicatie worden behandeld

corrosie	zuivere corrosievormen	
	mengvormen	corrosievermoeiing fretting erosie-corrosie
slijtage	zuivere slijtagevormen	
	combinaties waarin corrosie en slijtage elkaar bevorderen	

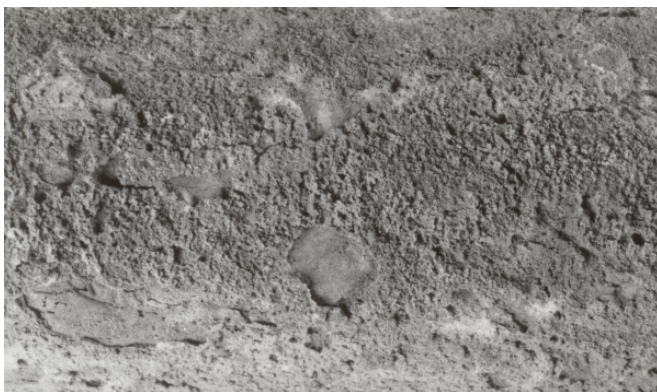
4.2 *Overzicht corrosievormen*

4.2.1 *Algemene corrosie* (figuren 4.1 en 4.2)

Wanneer de anodes en kathodes gelijkmatig over het oppervlak zijn verdeeld, zal het oppervlak vrijwel egaal worden aangetast (op de anodische plaats gaan metaalionen in oplossing en vindt dus de aantasting van het metaal plaats). Deze aantasting treedt op bij onbeschermde ongelegeerd staal; er ontstaat een roestlaag.



figuur 4.1 Schematische weergave van algemene corrosie



figuur 4.2 Algemene corrosie

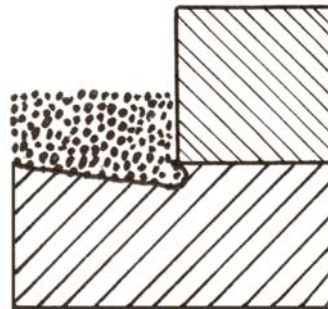
Kenmerken van algemene corrosie:

- geen speciale kenmerken;
- gelijkmatig aantasting van het uiterlijk;

- gelijkmatig verspreide, loszittende roest of andere corrosieproducten;
- gelijkmatige vermindering van de materiaaldikte;
- een van de volgende condities is aanwezig:
 - agressieve vochtige atmosfeer;
 - zwerfstromen;
 - biologisch actieve afzettingen;
 - gesmolten zouten;
 - vloeibare metalen.

4.2.2 *Galvanische corrosie* (figuur 4.3)

Bij deze corrosievorm zijn stroomgeleidende vloeistoffen (elektrolyt) aanwezig. De hoeveelheid aan stroomgeleidende vloeistoffen kan zelfs gering zijn. De stroom vloeit door dit elektrolyt van de onedele positieve elektrode (anode) naar de edele negatieve elektrode (kathode). De anode gaat hierbij in oplossing of verandert chemisch.



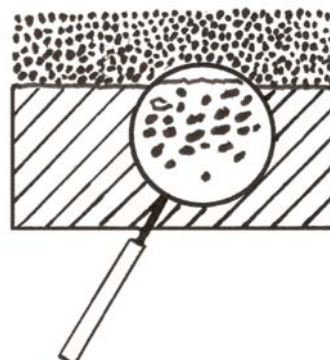
figuur 4.3 Schematische weergave van galvanische corrosie

Het uiterlijk is weinig verschillend van algemene corrosie, met dien verstande dat er verschillende materialen bij betrokken zijn, waarvan er slechts één is aangetast. Dit is het minst edele ofwel het anodische materiaal. Een potentiaalverschil van 0,2 V of meer maakt het optreden van deze vorm van corrosie mogelijk. Dit is in principe meetbaar met een hoogohmige voltmeter.

Een voorbeeld van galvanische corrosie is bijvoorbeeld de aantasting van de stalen boutjes waarmee de aluminium nummerplaten op de auto's zijn gemonteerd. Soms maakt men bewust gebruik van de galvanische corrosie voor bescherming tegen aantasting. Voorbeeld zijn de zinkanoden gemonteerd tegen de stalen poten van offshore-constructies die de constructies moeten beschermen tegen aantasting.

4.2.3 *Selectieve aantasting* (figuur 4.4 en 4.5)

Selectieve aantasting is een preferente corrosie en verwijdering van één of meer elektrochemisch actieve elementen uit een legering. De minder actieve elementen blijven achter. Het meest sprekende voorbeeld van deze aantastingsvorm is ontzinking, oftewel de selectieve verwijdering van zink uit messing. Het gevolg daarvan is, dat een poreuze rest van hoofdzakelijk zuiver koper overblijft dat weinig tot geen mechanische sterkte heeft.



figuur 4.4 Schematische weergave van selectieve aantasting



figuur 4.5 Selectieve aantasting

Figuur 4.5 geeft een voorbeeld van selectieve aantasting. Een oppervlaktekenmerk is onder meer het lokale karakter van de aantasting, waarbij in het door corrosie aangetaste gebied meerdere, dicht bij elkaar gelegen plekken voorkomen met daartussen niet of nauwelijks aangetast materiaal. De aangetaste plekken zijn poreus. Dit kan eenvoudig worden vastgesteld door met een brede viltstift over het oppervlak te gaan. De inkt wordt in de aangetaste plekken sterk geabsorbeerd. Deze vorm komt ook vaak voor bij deklagen die uit componenten met verschillende edelheid zijn opgebouwd.

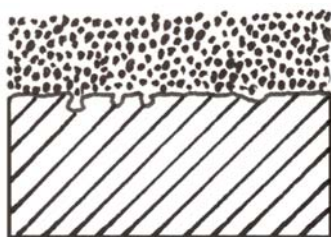
De aantasting komt o.a. voor in de materiaal-medium combinaties zoals aangegeven in tabel 4.2.

tabel 4.2 aantasting van materiaal-mediumcombinaties

materiaal	medium
koperlegeringen	stilstaand water
grijs gietijzer	grond, water
aluminiumbrons	HF, chloriderijke oplossingen
siliciumbrons	stoom, zure media
tinbrons	stoom, hete zoutoplossingen
Cu-Ni legeringen	condensorcondities
Monel	zuren, met name HF
superlegeringen	gesmolten zouten
C-staal	oxiderende media, waterstof bij hoge temperatuur
Fe-Cr legeringen	oxiderende media bij hoge temperatuur
Ni-Mo legeringen	zuurstof bij hoge temperatuur

4.2.4 Putvormige corrosie (figuur 4.6 en 4.7)

Wanneer de anode (bijvoorbeeld door beschadiging van de passieve film op corrosievast staal) erg klein is t.o.v. de kathode, zal de aantasting zich beperken tot enkele plaatsen. Door de concentratie van de corrosie op een klein oppervlak, zal de aantasting in dit geval vrij snel verlopen. Deze vorm van putvormige aantasting is karakteristiek voor metalen, die een beschermende oppervlaktefilm vertonen. Dit komt omdat een plaatselijke beschadiging, bij onvoldoende mogelijkheden tot repassivering, direct leidt tot deze aantasting. Deze vorm van corrosie is ook onder de naam "pitting" bekend.



figuur 4.6 Schematische weergave van putvormige corrosie



figuur 4.7 Putvormige corrosie

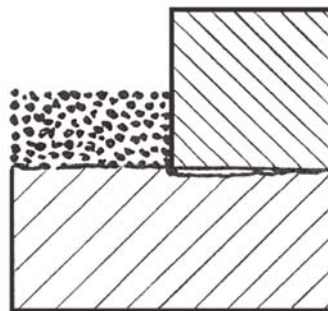
Dit is een ernstige vorm van aantasting vanwege de hoge snelheid waarmee de putten door de wanddikte heen kunnen groeien en komt vooral voor in waterige halogeenrijke milieu's zoals zeewater. Het uiterlijk kan verschillen van een enkel (al of niet diep) putje in een verder onaangetast veld, tot een verzameling dicht bij elkaar gelegen putjes. Meestal variëren de putjes sterk in grootte en diepte. Dit wordt uitgedrukt in de pitting factor, de verhouding tussen de grootste putdiepte en de gemiddelde putdiepte. Is deze 1 dan wordt gesproken van algemene aantasting. Putvormige corrosie is een verraderlijke vorm van corrosie, omdat het niet altijd duidelijk aan het oppervlak waarneembaar is. Een enkele put kan zelfs zijn doorgegroeid, waardoor "plotseling" lekkage optreedt.

Passieve materialen zijn gevoeliger dan actieve. Vooral corrosievast staal heeft veel last van deze aantastingvorm. Een wat hogere temperatuur kan de putvorming sterk bevorderen. Een hogere mediumtemperatuur verlangt een beter bestendig materiaal, bijvoorbeeld Alloy C-22 is tot 120 °C bestand, corrosievast staal type AISI 316 tot ca. 30 °C. De volgende combinaties zijn bekend:

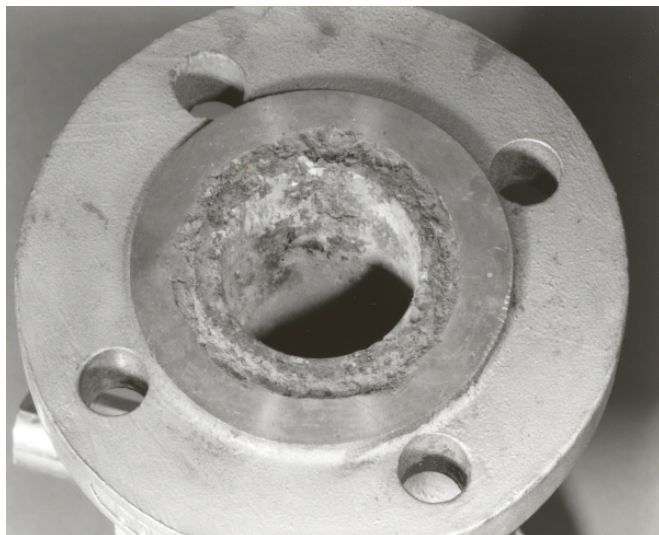
- staal in grond;
- corrosievast staal in zeewater;
- Al in (stilstaand) chloriderijk water;
- superlegeringen (Fe-, Ni-, Co-, Ti-basis) in halogeenrijke waterige media;
- corrosievast staal in thiosulfaatoplossingen.

4.2.5 Spleetcorrosie (figuur 4.8 en 4.9)

Hieronder verstaat men een plaatselijk versterkte corrosie in spleten. Het maakt hierbij niet uit hoe de spleet eruit ziet. Zowel spleten die ontstaan door contacten tussen lichamen als spleten in het lichaam zelf zijn gevaarlijk. Corrosie ontstaat door een verschil in zuurstofgehalte van het milieu in de spleet nabij het (buiten)oppervlak en dieper in de spleet. Een oplossing is, dusdanig construeren dat er geen spleten aanwezig zijn. Of de spleet groter maken, zodat er geen zuurstofverschillen kunnen optreden tussen de spleet en daarbuiten.



figuur 4.8 Schematische weergave van spleetcorrosie



figuur 4.9 Spleetvormige corrosie

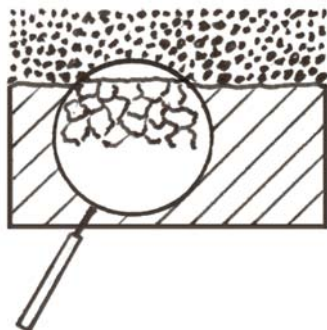
De volgende kenmerken zijn aanwezig:

- nauwe spleten met ten minste aan één kant een metaal, of
- lokale afzettingen, en
- een vochtige omgeving, en
- corrosieproducten aan de randen zichtbaar.

Passieve materialen zoals corrosievast staal zijn gevoeliger voor deze aantasting dan actieve materialen zoals C-staal. Algemene corrosie kan het optreden van spleetcorrosie verminderen. Omgekeerd kan het opheffen van algemene corrosie de aantasting rond spleten sterk doen toenemen. Spleetcorrosie komt veel voor in zeewater en andere chlooride-rijke waterige media.

4.2.6 Interkristallijne corrosie (figuur 4.10 en 4.11)

Bij deze corrosiesoort worden de kristalgrenzen preferent aangetast. Het meest bekend is dit verschijnsel bij corrosievast staal, waarin chroomcarbiden zijn gevormd. Bij temperaturen tussen 600 en 800 °C kunnen in bepaalde corrosievaste staalsoorten chroomcarbiden (Cr_{23}C_6) worden gevormd. Deze carbiden scheiden zich voornamelijk af op de korrelgrenzen. Het chroom, benodigd voor de vorming van de carbiden, wordt onttrokken uit de directe omgeving, waardoor een sterke verlaging van de voor de corrosievastheid benodigde hoeveelheid chroom optreedt. Het gevolg is dat direct naast de korrelgrens een aantasting op kan treden.



figuur 4.10 Schematische weergave van interkristallijne corrosie

De corrosie is uiterlijk pas waar te nemen als de aantasting van de korrelgrenzen een zeer ernstige vorm heeft bereikt. In dat geval zijn er gaten met een ruwe bodem en wanden te zien. Bij sterkere vergroting kan de hoekige korrelvorm hierin waarneembaar zijn. Lokaal kan de aantasting zich uitbreiden en op putvormige corrosie gaan lijken. Het onderscheid is te maken met een sterke loop, omdat in het opper-

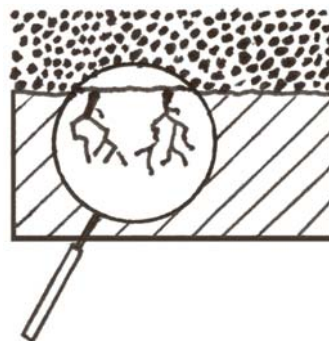
vlak de aangetaste korrelgrenzen een netwerk van scheurachtige aantekeningen vormen. Interkristallijne corrosie komt voor in aluminium, koper en AISI 304 en 316 en ferritische corrosievaste staalsoorten. Materialen die koud zijn vervormd, kunnen ook gevoelig zijn. Een bekend voorbeeld is AIMg 5 dat niet voor klinknagels moet worden gebruikt. De aantasting treedt op in zuurstofarme media.



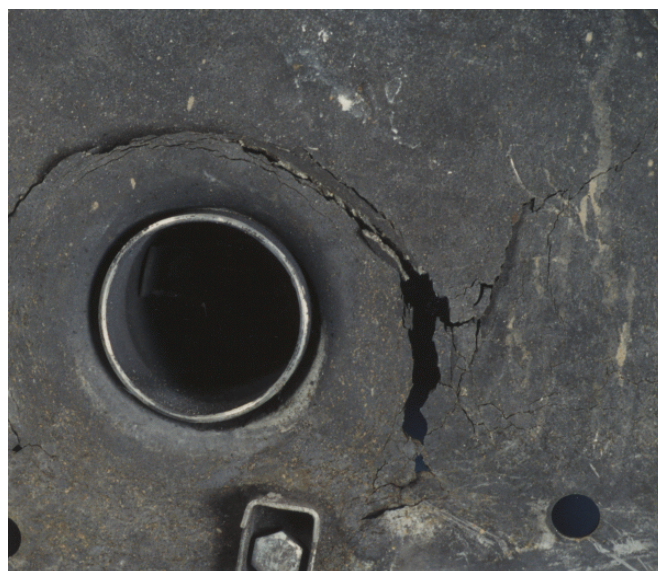
figuur 4.11 Interkristallijne corrosie

4.2.7 Spanningscorrosie (figuur 4.12 en 4.13)

Bepaalde metalen of legeringen kunnen in een specifiek milieu scheuren. Over de oorzaak van deze scheurvorming bestaan verschillende theorieën. Om deze vorm van corrosie te verkrijgen moet aan enkele voorwaarden worden voldaan. Naast de specifieke legering of metaal en een bepaald milieu zijn trekspanningen nodig. Ondanks het feit dat geen materiaalverlies optreedt, wordt de mechanische sterkte van de constructie dermate verzwakt, dat spontaan scheuren optreden.



figuur 4.12 Schematische weergave van spanningscorrosie



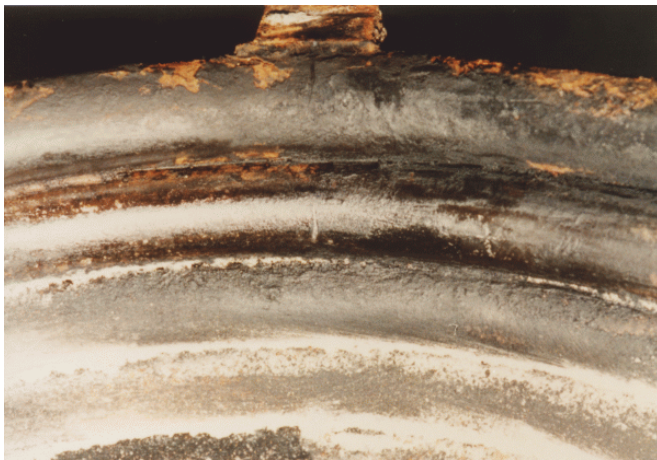
figuur 4.13 Spanningscorrosie

Kenmerkend voor spanningscorrosie is de aanwezigheid van scheuren die in de dwarsdoorsnede een vertakt uiterlijk hebben. De scheuren kunnen al ontstaan bij lage spanningen in mild agressieve, waterige media, waardoor de aantasting lang onopgemerkt kan blijven. Een voorwaarde is dat trekspanningen en een agressief milieu gelijktijdig aanwezig moeten zijn. Een hoge temperatuur werkt sterk stimulerend.

Spanningscorrosie kan bij veel materialen voorkomen, ook bij keramische materialen en plastics. Bekende materiaal-milieu combinaties, waarbij spanningscorrosie kan optreden, zijn opgenomen in tabel 4.3.

4.2.8 Hoge temperatuur corrosie (zie figuur 4.14)

Deze aantastingsvorm kent verschillende verschijningsvormen. Een belangrijke aanwijzing is de aanwezigheid van dikke, loszittende oxidelagen en een zeer onregelmatig uiterlijk. De wanddikte neemt meestal toe, omdat de corro-



figuur 4.14 Voorbeeld van hoge temperatuur corrosie

sieproducten een groter volume hebben.

Is de temperatuur hoog, dan zal er sneller oxidatie optreden. Bovendien is de dikte van de oxidelaag groter dan die welke ontstaat bij lagere temperatuur.

4.3 Aanvullende informatie over de besproken corrosievormen

4.3.1 Putvormige corrosie

Putvormige corrosie is zeer verraderlijk, omdat de aantasting niet gelijkmatig plaatsvindt, maar plaatselijk. De aantasting begint bij een plaatselijk defect in de oxidehuid. Er ontstaan kleine plekken direct onder het oppervlak, die als anode werken. Behalve door defecten kan deze corrosievorm ook ontstaan doordat verf, roest, slib, mosselen en dergelijke op het oppervlak vastzitten. Ook slakresten na het lassen geven deze problemen. Goed beitsen en passiveren is een oplossing om putvormige corrosie tegen te gaan. Evenals bij spanningscorrosie geldt ook hier dat molybdeenhoudende corrosievaste soorten minder gevoelig voor putvormige corrosie zijn. Hetzelfde geldt voor de duplex corrosievaste staalsoorten. Dit kan worden uitgedrukt in een getal, de Pitting Index (PI) of Pitting Resistance Equivalent (PRE).

De pitting index kan worden berekend met de volgende formule: $PI = \%Cr + 3,3\%Mo + 30\%N$

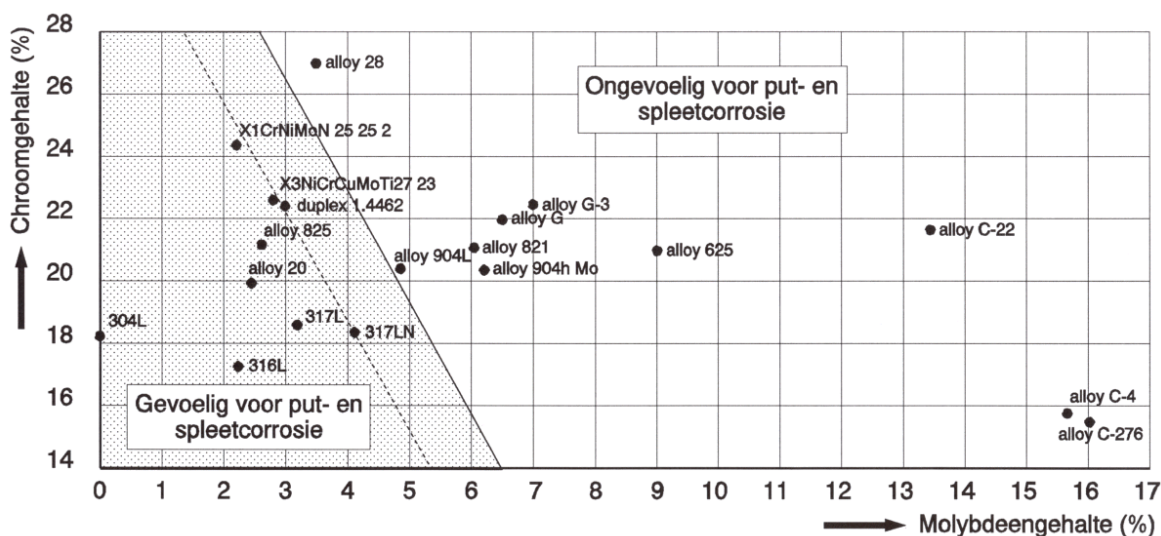
Hoe hoger het getal, des te beter de weerstand tegen putvormige corrosie.

Titaan gestabiliseerde corrosievaste staalsoorten zijn zeer gevoelig voor deze aantastingsvorm. Aangeraden wordt in plaats van het AISI 321 type AISI 347 (Nb gestabiliseerd) te gebruiken. Materialen met een hoge PI- of PRE-waarde verdienen de voorkeur (zie figuur 4.15). Zij hebben meestal ook een hogere weerstand tegen algemene aantasting, spleet- en spanningscorrosie.

Figuur 4.15 geeft van een aantal Cr- en Mo-bevattende legeringen hun plaats in de rangvolgorde ongevoeligheid voor putvormige corrosie weer.

tabel 4.3 Materiaal-mediumcombinaties waarbij spanningscorrosie kan optreden

materiaal	medium
C-staal	hete nitraat, hydroxide en carbonaat/bicarbonaatoplossingen
hoge-sterkte staal	waterige elektrolytoplossingen (in het bijzonder H ₂ S houdende)
austenitisch corrosievast staal	hete geconcentreerde chloridenoplossingen, stoom met chloriden, halogenen
nikkellegeringen	schone stoom onder hoge druk
α-brons	ammoniakhoudende oplossingen
messing	ammoniak
aluminiumlegeringen	waterige halogeenoplossingen, chloriden, bromiden en fluoriden
titaanlegeringen	waterige halogeenoplossingen, organische vloeistoffen, N ₂ O ₄
magnesiumlegeringen	waterige chloridenoplossingen
zirkoniumlegeringen	waterige chloridenoplossingen, organische vloeistoffen



figuur 4.15 Relatieve weerstand tegen putvormige aantasting

4.3.2 *Spleetcorrosie*

Spleetcorrosie is een plaatselijk versterkte corrosie in spleten, die in het corroderende metaal aanwezig zijn, of door contact met andere lichamen gevormd worden. In deze spleten treden concentratieverschillen in het zuurstofgehalte op door diffusieverhindering tussen het binnenste van de spleet en de overige aantastende vloeistof, waardoor beluchtings-elementen worden gevormd (Evans-elementen). Deze elementen worden gekenmerkt, doordat ze het beluchte gedeelte niet aantasten, terwijl het niet-beluchte deel corrodeert. De spleet wordt dan als gevolg van zuurstofverarming versterkt aangetast.

Alle chemische voorwaarden, die normaal corrosie veroorzaken, bevorderen en verhogen in hoge mate een spleetcorrosie.

De gevoeligheid voor spleetcorrosie kan worden uitgedrukt in de spleetcorrosie-index: $SI = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N$.

Hoe hoger het getal des te beter de weerstand tegen spleetvormige corrosie.

De enige remedie ter oplossing van deze aantastingsvorm is spleten te voorkomen. Dit betekent dus veelal constructieve maatregelen. Bij in bedrijf zijnde installaties is het noodzakelijk dat ze goed schoon worden gehouden.

4.3.3 *Spanningscorrosie*

Trekspanningen van buitenaf opgelegd en restspanningen als gevolg van het lassen kunnen bij austenitische corrosievaste staalsoorten spanningscorrosie veroorzaken. Vooral in chloridehoudende milieu's is dit het geval. Chloriden zijn bijvoorbeeld aanwezig in zee- of brak water, PVC houdende isolatiematerialen, folies, tapes, maar ook in beitsmiddelen en spoel- of afperswater. Bij deze aantasting door chloriden treden scheuren op, die bij een austenitisch corrosievast staal meestal transkristallijn verlopen. Een tweede kenmerk is dat de hoofdscheur aan het einde veel vertakkingen heeft (zie figuur 4.16).

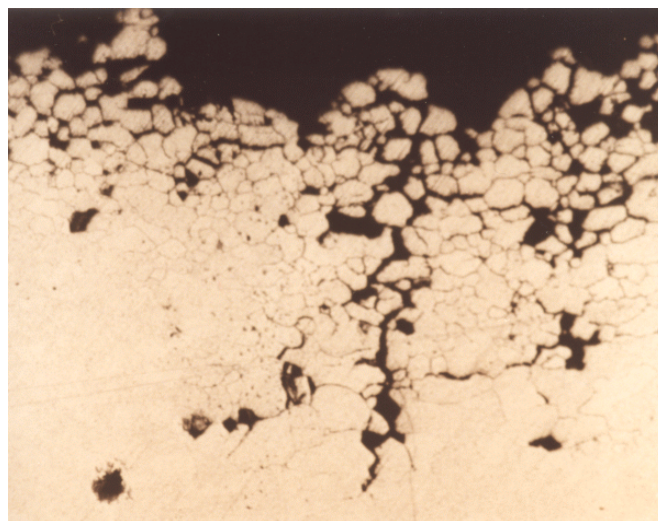


figuur 4.16 Spanningscorrosiescheur

Spanningscorrosie treedt in het algemeen op die plaatsen op, waar trekspanningen aanwezig zijn. Om spanningscorrosie te voorkomen kan een warmtebehandeling bij 900 °C of hoger worden toegepast. Dit kan uiteraard ook door de lasspanningen zo laag mogelijk te houden. Men kan echter ook de samenstelling van het staal aanpassen en corrosievaste staalsoorten met een verhoogd nikkel- en/of molybdeen-gehalte toepassen. Ook kan worden overwogen duplex- of ferritisch corrosievast staal te gebruiken.

4.3.4 *Interkristallijne corrosie*

Door verhitting van corrosievast staal tussen 450 en 850 °C kunnen koolstof en chroom zich verbinden tot chroomcarbiden, die zich langs korrelgrenzen uitscheiden. De koolstofatomen verplaatsen zich in dit temperatuurgebied zeer gemakkelijk naar de korrelgrenzen. De diffusiesnelheid van chroom daarentegen is niet groot, waardoor bij het ontstaan van deze chroomhoudende uitscheidingen de omgeving van de kristalgrenzen armer aan chroom wordt. Als het chroomgehalte beneden 12% daalt, ontstaat daar dan een corrosiegevoelige zone. De aantasting die dan op kan treden, noemt men interkristallijne corrosie (zie figuur 4.17).



figuur 4.17 Interkristallijne corrosie

Indien chroomverarming langs de korrelgrenzen is opgetreden, kan corrosie worden voorkomen door homogeen te gloeien bij 900 °C. Bij deze temperatuur blijven de chroomcarbiden wel bestaan, maar door diffusie wordt de chroomverarming langs de korrelgrenzen opgeheven.

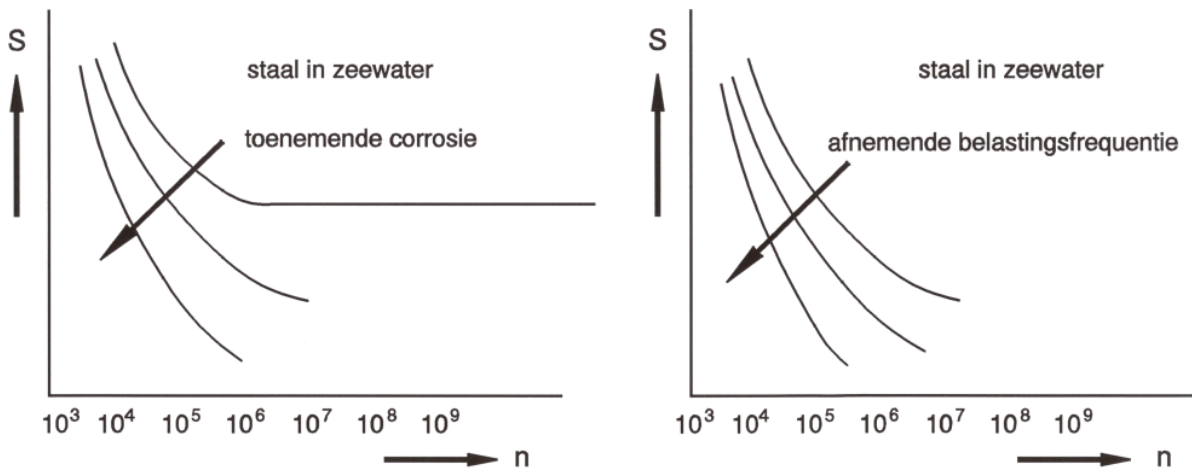
Een andere methode om het gevaar voor het optreden van interkristallijne corrosie te verminderen, is het materiaal te gloeien tussen 1050 en 1100 °C, bij voorkeur gevolgd door afschrikken in water.

Om de vorming van chroomcarbiden te vermijden of te vertragen kan men:

- het koolstofgehalte verlagen tot maximaal 0,03%;
- stabiliserende legeringselementen toevoegen, die sterkere carbidevormers zijn dan chroom, zoals titaan en niobium.

4.3.5 *Corrosievermoeïing*

Het vermogen om wisselende belastingen op te nemen vermindert in een corrosief milieu. Een aangetast onderdeel zal meestal geen aantasting door algemene corrosie vertonen. Het mechanisme is nog niet duidelijk. Kathodische bescherming kan het probleem voorkomen, zodat het mechanisme voor een deel elektrochemisch van aard moet zijn. Naarmate de frequentie van de belasting afneemt neemt de weerstand tegen vermoeïing verder af (zie figuur 4.18).



figuur 4.18 Schematische invloed corrosie op vermoeingssterkte: S = spanning en n = aantal spanningswisselingen

4.3.6 Hoge temperatuur corrosie

Wanneer corrosievast staal in contact komt met hete gasen, vindt een chemische reactie plaats tussen het hete gas en de legeringselementen in dat staal. De reactieproducten vormen een oppervlaktehuid, waarvan de eigenschappen door het gas en de legeringselementen van het staal worden bepaald.

Beneden de temperatuur waar het staal sterk begint te oxideren (scalingtemperatuur) beschermt deze huid het staal tegen een verdere aantasting.

Aantasting in lucht

Als staal wordt verhit in lucht, wordt een oxidehuid op het oppervlak gevormd. Wordt het chroomgehalte van 0 tot 27% verhoogd, dan zal de scalingtemperatuur stijgen van 500 naar 1125 °C. De elementen silicium en aluminium en tot een bepaalde hoogte ook nikkel, verhogen de oxidatiebestendigheid van staal.

Aantasting in rookgassen

Gassen, vrijgekomen bij de verbranding van olie, kolen en cokes, bevatten altijd wat zwavel. Wanneer de verbranding volledig is (oxiderend), zal dit in de vorm van SO_2 voorkomen en in de vorm van H_2S wanneer de verbranding niet volledig is (reducerend). De zwavelverbindingen verkorten de levensduur van het staal aanzienlijk. Met chroom gelegeerde staalsoorten hebben een goede weerstand tegen zowel een oxiderende als een reducerende atmosfeer. Om deze reden worden de ferritische chroomstaalsoorten onder deze omstandigheden aanbevolen. Echter, hogere kruipsterkten nopen dikwijls tot het toepassen van austenitische staalsoorten. In een reducerende zwavelatmosfeer echter zullen deze staalsoorten als gevolg van het hoge nikkelgehalte tot een aantasting van de korrelgrenzen leiden, omdat op de korrelgrenzen het laagsmeltende eutecticum Ni-NiS (645 °C) wordt gevormd. Boven dit smeltpunt verloopt deze aantasting zeer snel.

Naast zwavel kunnen ook metaaloxiden een sterk versnelde oxidatie bewerkstelligen. Berucht zijn bijvoorbeeld V_2O_5 uit stookolie en alkalimetaaloxiden zoals Na_2O .

Catastrofale oxidatie

Materialen zoals molybdeen, tantaal, niobium en wolfram reageren bij hoge temperatuur heftig met zuurstof en vormen daarbij dikke poreuze oxidelagen zonder samenhang (het corrosieproduct is vaak poedervormig en staat onder drukspanning). Deze vorm van oxidatie is catastrofaal. Catastrofale oxidatie vormt vooral een probleem bij legeringen, die molybdeen bevatten, zoals AISI 316 en 317, met 2 tot 3% Mo (molybdeentrioxide verdampt zeer snel).

Aantasting door vloeibare metalen

Hittebestendige materialen zijn alleen bestand tegen vloeibare metalen, wanneer zij niet of heel slecht kunnen oplossen in het gesmolten materiaal; voorbeeld: bij lagere

temperatuur lost staal niet op in kwik, gesmolten alkali-metalen of lood. Als nevenreactie treedt echter hier ook aantasting op, die zich op het grensvlak lucht/metaalsmelt concentreert.

Niet altijd vindt de aantasting door een vloeibaar metaal aan het oppervlak plaats. Staan bijvoorbeeld (on)gelegeerde staalsoorten onder trekspanning en tevens bloot aan een vloeibaar metaal, dan kan een op spanningscorrosie lijkende aantasting optreden. Gesmolten tin en koper kunnen bijvoorbeeld langs de korrelgrenzen het staal binnendringen.

Hoofdstuk 5

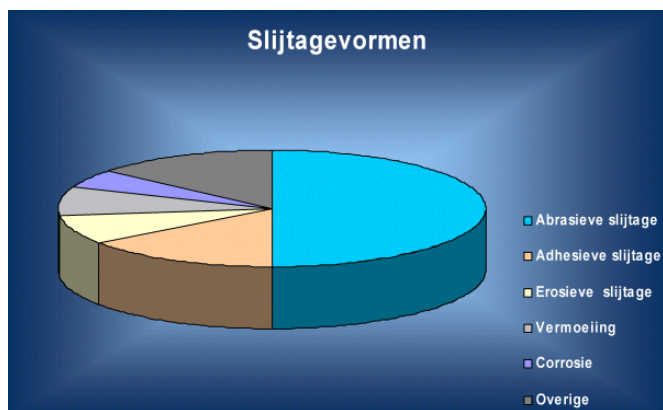
Oppervlaktedefect "Slijtage"

5.1 *Bezwijkvormen*

Diverse vormen van bezwijken zijn al besproken in de hoofdstukken 3 en 4. Hieronder volgt een bespreking van de bezwijkvormen: Slijtage.

5.2 *Overzicht slijtagevormen*

In de praktijk kan men verschillende slijtagevormen tegenkomen. Een globale indeling en de mate waarin men deze vormen (inclusief de mengvormen) tegenkomt is weergegeven in figuur 5.1.



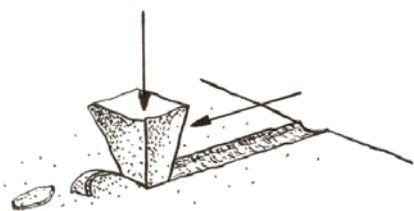
figuur 5.1 Globale onderverdeling slijtagevormen

In de praktijk kan het gebeuren dat een bepaald slijtage-type op den duur overgaat in een ander type. Ook komt het voor dat twee typen gelijktijdig optreden. Daarbij kan corrosie ook nog een belangrijke rol spelen. Het behoeft geen betoog dat bij een dergelijke combinatie de schade aanzienlijk wordt vergroot. Het blijkt dat abrasieve slijtage het meeste voorkomt, en wel in ongeveer de helft van alle gevallen! Deze slijtagevorm zal dan ook in deze publicatie de grootste aandacht krijgen.

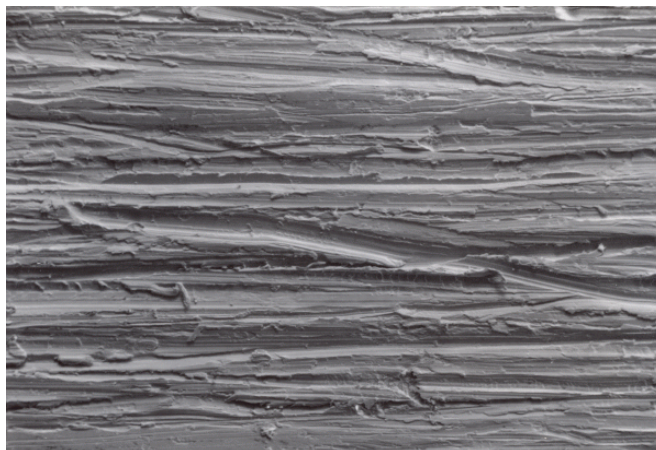
In het navolgende zullen de slijtagevormen, genoemd in figuur 5.1, nader worden toegelicht.

5.2.1 *Abrasieve slijtage* (figuren 5.2 t/m 5.5)

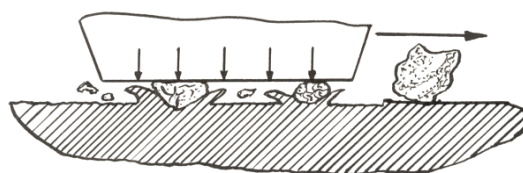
Abrasieve slijtage wordt vaak omschreven als krassen, insnijden of gutsen, afhankelijk van de ernst van de schade aan het oppervlak (vast te stellen door een visueel onderzoek). Smering kan de slijtage verergeren, omdat het smeermiddel de slijtagedeeltjes uit het systeem opneemt en daardoor de slijtagesnelheid met een factor 2 à 4 kan verhogen. Verder moet onderscheid worden gemaakt naar de belasting. Figuur 5.2 symboliseert de beschadiging door een hoge belasting, waarbij puntlasten deeltjes diep in het oppervlak drukken (Engels: high-stress abrasion). Figuur 5.4 geeft de beschadigingsvorm die bij lage belasting ontstaat als de belasting over een groot aantal deeltjes wordt verdeeld (Engels: low-stress abrasion).



figuur 5.2 Schematische weergave van abrasieve slijtage (high-stress)



figuur 5.3 Abrasieve slijtage (high-stress)



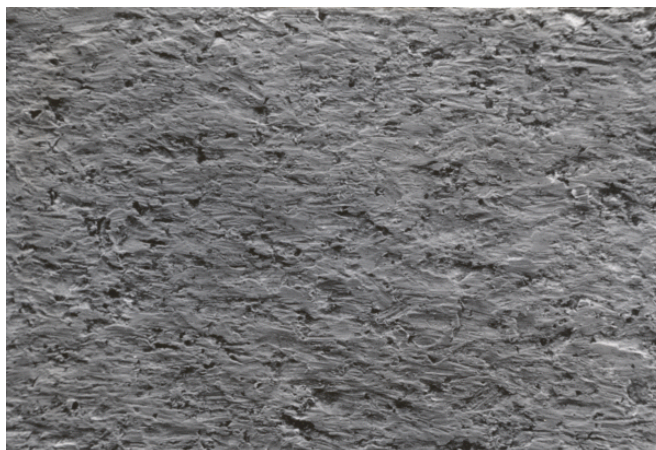
figuur 5.4 Schematische weergave abrasieve slijtage (low-stress)

Abrasieve slijtage komt zeer veel voor in de mijnbouw (zand- en grindwinning), hoogovenbedrijven, ertsoverslagbedrijven, enz.

Bij het over elkaar heen bewegen van twee harde oppervlakken vertonen beiden materialen krassen in de bewegingsrichting. De krassen hebben de vorm van de abrasieve deeltjes (zie figuur 5.3). Is een van de oppervlakken veel zachter, dan vertoont dit diepe krassporen die niet corresponderen met het samenwerkende oppervlak. Het kan ook abrasieve deeltjes en slijtdelen van het harde materiaal hebben ingebed. De slijtdeeltjes hebben de vorm van spaantjes of klontjes.

'Low stress' abrasieve slijtage (zie figuur 5.5) kenmerkt zich doordat het oppervlak onregelmatig is afgesleten met kleine groefjes. Vaak hebben de langsstromende deeltjes een stromingspatroon achtergelaten. Het oppervlak kan ook een glad gepolijst uiterlijk hebben. De slijtdeeltjes zijn moeilijk van de abrasieve deeltjes te onderscheiden.

Bij een hoge belastingen zijn de krassen en putten duidelijker zichtbaar. De diepte hangt af van de hardheid van het materiaal en de deeltjes.

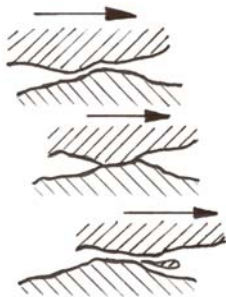


figuur 5.5 Abrasieve slijtage (low-stress)

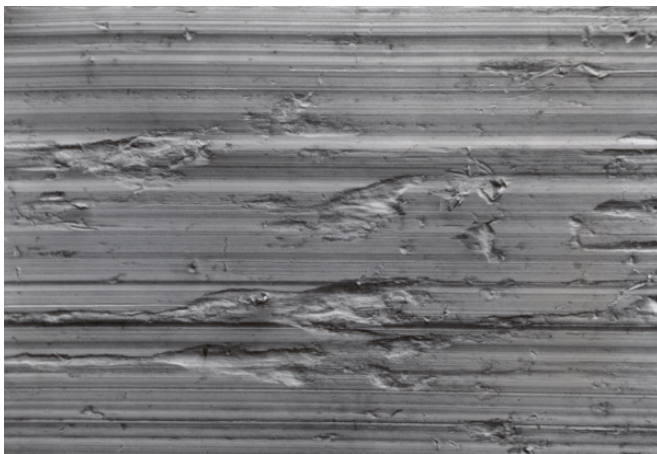
5.2.2 *Adhesieve slijtage* (figuur 5.6 en 5.7)

Wanneer twee oppervlakken elkaar belasten, wordt de gehele belasting gedragen door een zeer klein vlak van uitstekende deeltjes. De werkelijke vlaktedruk tussen deze deeltjes is zeer hoog. Er zal dan ook een adhesie tussen deze deeltjes plaats vinden.

Deze slijtagevorm vertoont een onregelmatig oppervlak met een versmeerd uiterlijk. De slijtdeeltjes zijn groter dan $10\text{ }\mu\text{m}$ en onregelmatig. Er is materiaaltransport van het ene oppervlak naar het andere. Is er een groot verschil in hardheid, dan lijkt het hardere materiaal onbeschadigd, maar kan een uitgesmeerd laagje van het zachte materiaal hebben overgenomen of aanloopkleuren vertonen. Het zachte materiaal kan een versmolten uiterlijk hebben.



figuur 5.6 Schematische weergave van adhesieve slijtage



figuur 5.7 Adhesieve slijtage

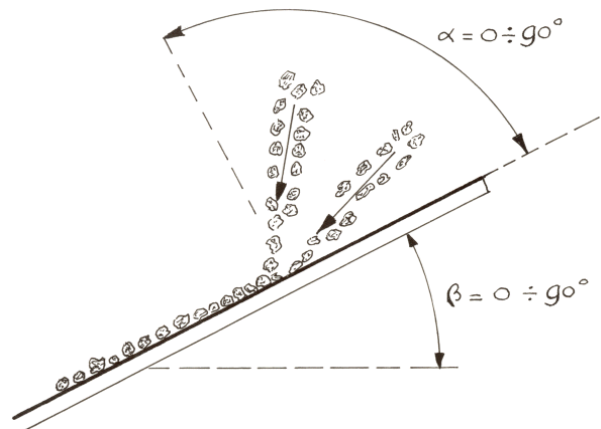
5.2.3 *Erosieve slijtage* (figuur 5.8 t/m 5.10)

Onder erosieve slijtage verstaat men het materiaalverlies aan het oppervlak als gevolg van de inwerking van een langs stromende vloeistof of gas, al dan niet met vaste deeltjes. De volgende vormen kunnen worden onderscheiden:

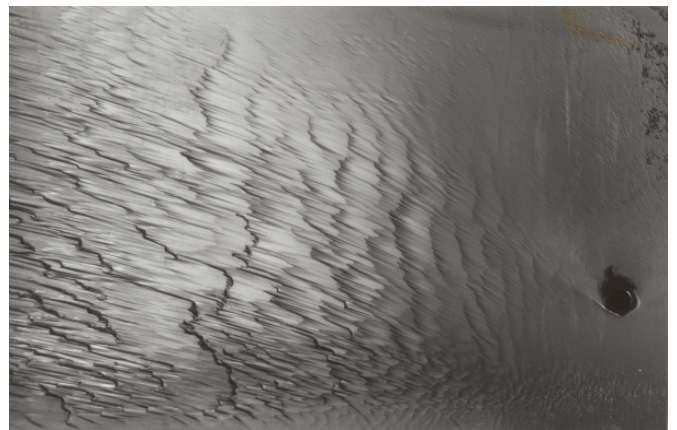
- deeltjes erosie (transport van zand-water-mengsels);
- gaserosie (uitlaatkleppen van verbrandingsmotoren);
- vloeistoferosie (vloeistoffen, zie ook mengvorm: erosie-corrosie);
- druppelslag (lagedruk gedeelten van gasturbines);
- cavitatie (imploderen van dampbellen bij schepsschroeven en in pompen).

Het oppervlak is onregelmatig afgesleten en heeft een glad, mat uiterlijk zoals een gestraald oppervlak. In het oppervlak kunnen ingebedde deeltjes voorkomen. De slijtdeeltjes zijn doorgaans niet te onderscheiden.

Een speciale vorm van erosieve slijtage is de cavitatie-erosie. Deze vorm van slijtage treedt op indien dampbellen, die op het oppervlak aanwezig zijn, imploderen. Hierbij worden metaaldeeltjes uit het oppervlak gerukt en ontstaan gaten in het oppervlak. Deze vorm van slijtage kan voorkomen bij schepsschroeven en waaiers van centrifugaalpomp.

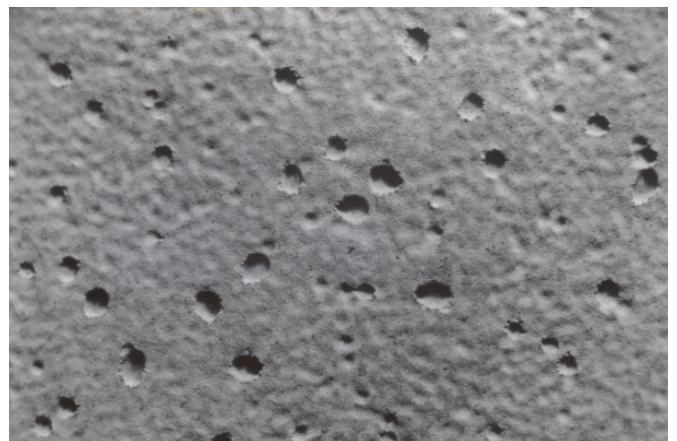


figuur 5.8 Schematische weergave van erosieve slijtage



figuur 5.9 Erosieve slijtage

Figuur 5.10 geeft een oppervlak weer, aangetast door cavitatie-erosie. Bij cavitatie-erosie is het oppervlak bedekt met kleine diepe kratertjes die uiteindelijk zullen leiden tot uitbreken van grotere stukken materiaal.



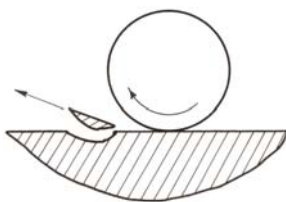
figuur 5.10 Cavitatie-erosie

5.2.4 *Slijtagevermoeiing* (figuur 5.11 en 5.12)

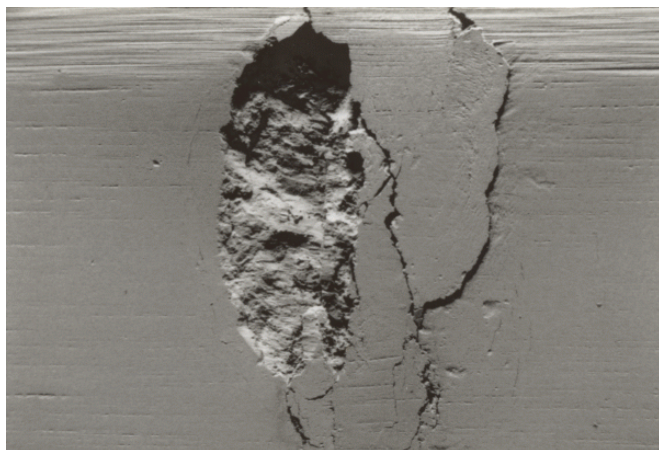
Slijtagevermoeiing is een vorm van scheuren in of nabij het oppervlak als gevolg van een wisselende belasting, waarbij materiaal deeltjes uit het oppervlak breken.

Voorbeelden van deze slijtage zijn:

- het pitten van tandflanken bij tandwielen;
- het uitbreken van stukjes materiaal uit een spoor- of kraanwiel en spoorstaaf of kraanrails.



figuur 5.11 Schematische weergaven van slijtagevermoeding



figuur 5.12 Slijtagevermoeding

Het oppervlak vertoont brede oppervlakkige putten met een licht onregelmatige bodem, waarin vermoeiingsgroeilijnen (striaties) herkenbaar kunnen zijn. De putten zijn verschillend van grootte en liggen in het gebied waar de hoogste schuifspanningen optreden. De slijtdeeltjes zijn onregelmatig gevormde brokjes en schilfers, die enkele tot tientallen mm groot kunnen zijn.

Het uitbreken van deze stukjes onder het oppervlak is het gevolg van schuifspanningen die onder het oppervlak het grootst zijn. Diepte en grootte van deze schuifspanningen kunnen worden berekend met de theorie van Hertz (zie ook § 5.3.3).

5.3 Aanvullende informatie over de besproken vormen van slijtage

5.3.1 Abrasieve slijtage

In § 5.2 is een opsomming gegeven van de verschillende slijtagevormen. In dit paragraaf wordt dieper ingegaan op de achterliggende mechanismen.

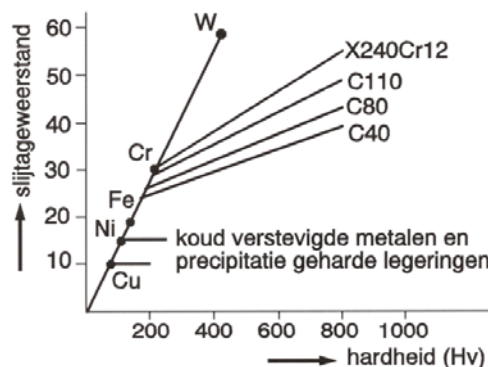
Abrasieve slijtage treedt op wanneer harde, hoekige deeltjes in een materiaaloppervlak dringen en vervolgens materiaal verwijderen door een aantal mechanismen, die afhangen van de aard van het tribologische systeem. Het belangrijkste mechanisme bij taaiere materialen is verspanen, waarbij de abrasieve deeltjes spanen verwijderen uit het materiaaloppervlak. Een ander mechanisme van materiaalverwijdering is ploegen. Dit veroorzaakt een plastische deformatie en daardoor harding; een voortdurend ploegen introduceert vermoeiingseffecten. Al deze factoren dragen bij tot verwijdering van materiaal.

Bij brossere materialen is uitschilferen het dominante slijtamechanisme. Dit verschijnsel treedt op wanneer laterale scheurtjes onder het oppervlak en verticale scheurtjes elkaar snijden. Deze vorm van abrasieve slijtage wordt vaak omschreven als krassen, insnijden of gutsen, afhankelijk van de ernst van de schade aan het oppervlak.

Uit het bovenstaande volgt dat voor een abrasieve slijtage het indringen van een abrasief in het materiaaloppervlak nodig is. Dit betekent dat het abrasief dus harder dan het materiaal moet zijn. Voor het verwijderen is verder een verplaatsing van het abrasief nodig.

De onderzoekers Babicef en Chroescof hebben deze relatie onderzocht. Deze onderzoeken hebben geleid tot figuur 5.13. Het blijkt dat de hardheid van een materiaal niet alleen zaligmakend is voor een goede weerstand tegen abrasieve slijtage, maar dat ook nog een aantal belangrijke factoren een rol speelt, zoals:

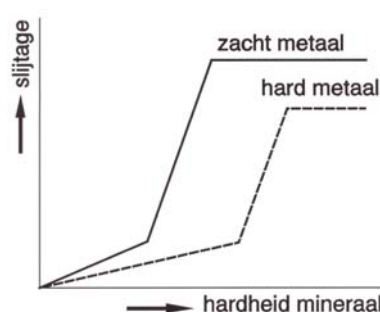
- ▶ hardheid abrasief;
- ▶ scherpte abrasief;
- ▶ trefhoek abrasief met het werkstuk.



figuur 5.13 Verband tussen abrasieve slijtage bij verschillende metalen

Hardheid abrasief

Zoals reeds vermeld is het indringen van een abrasief materiaal in het oppervlak een factor, die de grootte van de slijtageweerstand bepaalt. Zoals uit figuur 5.14 blijkt, is de hardheid van een materiaal van zeer groot belang.



figuur 5.14 Slijtage als functie van de hardheid van een mineraal

Deze figuur, voor het eerst door dr. Wahl gepubliceerd, laat de invloed van de hardheid van een slijtend mineraaldeeltje zien in relatie tot de hardheid van het werkstuk. Zolang het mineraal zachter is dan het werkstukmateriaal, zal het deeltje niet in het oppervlak dringen en vindt dus geen of nauwelijks slijtage plaats. Een mineraal met hoge hardheid wordt in het werkstuk gedrukt en zal als een beiteltje het materiaal verspanen. Hierbij treedt zeer sterke slijtage op. Als de hardheid van het mineraal ongeveer gelijk is aan die van het werkstuk kan, afhankelijk van de omstandigheden, een lage of een zeer hoge slijtagewaarde ontstaan. Er is dus een overgangsbereik dat sprongsgewijs verloopt. Dit verklaart het vaak geconstateerde grote verschil in slijtagegedrag bij overeenkomende, maar niet identieke condities. Tabel 5.1 geeft van enkele bekende mineralen en structuurbestanddelen de hardheid weer.

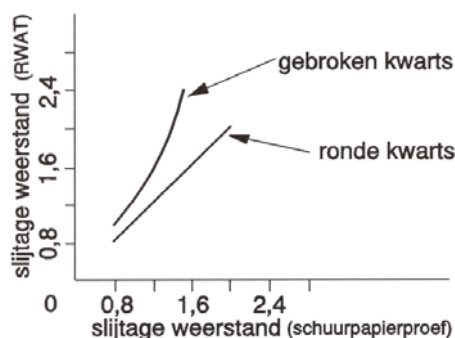
Scherpte van het abrasief

Dat een scherp abrasief eerder in een materiaal zal dringen dan een abrasief met een ronde korrel behoeft geen nadere uitleg. Uit deze constatering kan dus de conclusie worden getrokken dat een scherp mineraal een grotere slijtage zal veroorzaken dan een minder scherp mineraal. Men moet echter wel bedenken dat door het transport van de mineralen, zoals bijvoorbeeld in de Rubber Wheel Abrasion Test (RWAT - zie § 12.3) optreedt, breuk in de mooie ronde

korrels kan optreden, wat zal resulteren in scherpe korrels! Een en ander is afhankelijk van de brosheid van het abrasief en de snelheid hiervan. Als voorbeeld zie figuur 5.15.

tabel 5.1 Vickershardheid mineralen en structuurbestanddelen

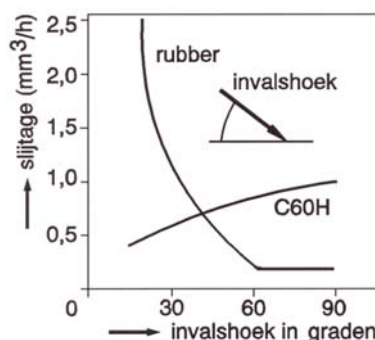
Abrasief	Hardheid H_V	Materiaal	Hardheid H_V
Kolen	32	Ferriet	70 - 200
Gips	36	Perliet	250 - 460
Kalk	110	Austeniet	170 - 350
Vloeispaat	140	Martensiet	500 - 1000
Cokes	200	Cementiet	800 - 1000
IJzererts	470	Chroomcarbide	1200 +
Glas	500	Aluminiumoxide	2000
Sinter	750	Titaancarbide	2400
Kwarts	900 - 1300	Vanadiumcarbide	2800
Korund	1800	Wolframcarbide	2000



figuur 5.15 Invloed scherpste van het abrasief op de slijtage

Trefhoek van het abrasief met het werkstuk

De aard van de belasting is van grote invloed op de grootte van de slijtage. Figuur 5.16 geeft hiervan een duidelijk voorbeeld. In deze figuur wordt onderscheid gemaakt tussen een glijdende en een stotende slijtage. Men ziet dat bij een gehard staal C60H, bij een toenemende invalshoek van het mineraal, de slijtage toeneemt; bij een elastisch materiaal, zoals rubber, is dit net omgekeerd. Uit de figuur volgt dat bij een invalshoek van 45° en groter ook rubber toegepast kan worden.



figuur 5.16 Abrasieve slijtage als functie van de invalshoek bij een hard en elastisch materiaal

5.3.2 Adhesieve slijtage

Bij ductiele materialen, zoals metalen en kunststoffen, kan ook diffusie optreden op die plaatsen waar door hoge puntbelastingen zogenaamde koude lasverbindingen worden gevormd. Hierdoor ontstaat een nog sterkere verbinding. Indien één van de oppervlakken een zijdelingse beweging maakt over het andere oppervlak, zullen deze verbindingen breken. Als deze beweging voortgaat, zullen nieuwe verbindingen worden gevormd en weer worden verbroken.

Als de adhesiesterkte van de verbinding minder is dan de cohesiesterkte van de materialen die de uitsteeksels vormen, zal de verbinding afscheuren op de originele contactpunten en zal er geen materiaalverlies van beide oppervlakken plaats vinden. Als echter de adhesiesterkte groter is dan de cohesiesterkte, dan zal de verbinding scheuren in het zwakste uitsteeksel. Zowel de wrijving tussen de op elkaar bewegende oppervlakken en de slijtage die daarbij optreedt, kan verminderd worden door het toepassen van oppervlaktelagen met een kleine schuifsterkte of een hard basismateriaal. De kracht tussen de oppervlakken wordt door deze laag naar het basismateriaal geleid, terwijl afschuiving in deze laag plaatsvindt.

Geschikte lagen zijn naast oxiden, chloriden, sulfiden, ook zachte metalen als lood en zilver en veel niet-metalen. Oxiden zijn de meest normale beschermende lagen.

Om effectief te zijn als bescherming tegen adhesieve slijtage, moet een loopvlak de volgende eigenschappen bezitten:

- tegenmateriaal kan er geen legering mee vormen (chemisch inert);
- goede hechting;
- gelimiteerde dikte;
- lage schuifsterkte;
- druksterkte minder of gelijk aan het basismateriaal.

Een goede hechting wordt verkregen, wanneer de specifieke volumeverhouding groter is dan 1. Metalen met een gunstige volumeverhouding zijn: koper, beryllium, zink, aluminium, silicium, lood, chroom, molybdeen, ijzer, kobalt en nikkel.

5.3.3 Slijtagevermoeiing

Slijtagevermoeiing wordt veroorzaakt door wisselende schuifspanningen onder het oppervlak van een werktuig-onderdeel. Deze schuifspanningen initiëren scheuren in of nabij het oppervlak. De scheuren breiden zich uit en verenigen zich, hetgeen tot het uitbreken van deeltjes leidt. Indien deze schuifspanningen in het gebied liggen net onder een aangebrachte opspuit- of opslaslaag, is de kans groot dat de gehele laag uitbreekt. Met behulp van de theorie van Hertz kan betrouwbaar de diepte en grootte van deze schuifspanningen worden bepaald. In het algemeen geldt:

indien P de kracht is tussen twee gebogen lichamen, waarvan de stralen R_1 en R_2 zijn, is p de maximum vlaktedruk tussen deze lichamen:

$$p = 1,5 \frac{P}{\pi ab}$$

a en b zijn de halve assen van de contactellips en worden via de rekenfactoren m (invloed stralen R_1 en R_2) en n (invloed elasticiteitsmodulus) als volgt bepaald:

$$m = \frac{4}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Is E de elasticiteitsmodulus van het materiaal en μ de constante van Poisson (beide lichamen worden verondersteld van hetzelfde materiaal te zijn) dan geldt:

$$n = 4 \frac{E}{3(1 - \mu^2)}$$

De halve assen van de ellips zijn dan:

$$a = \alpha \sqrt[3]{\frac{Pm}{n}}$$

en

$$b = \beta \sqrt[3]{\frac{Pm}{n}}$$

De factoren α en β worden bepaald uit de geometrie van de twee in contact staande lichamen en zijn een functie van θ :

$$\cos \theta = \frac{B}{A}$$

Indien de hoek tussen de vlakken, waarin de krommen $1/R_1$ en $1/R_2$ zijn gelegen φ is, geldt:

$$A = \frac{2}{m}$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2}\right)^2 - \frac{2}{(R_1 R_2)} \cos 2\varphi}$$

$$\alpha = 4,557 e^{-0,0178 \theta} \text{ en } \beta = 0,236 + 8,22 \cdot 10^{-3} \theta.$$

Het teken van de teller moet zo gekozen worden dat deze positief is.

De schuifspanning τ op een afstand y onder het oppervlak is:

$$\tau = \frac{2pay}{\pi(a^2 + y^2)}$$

Voor het speciale geval dat een cilinder over een plat vlak rolt, kan men de maximum vlaktedruk en de diepte van de maximum schuifspanning als volgt bepalen:

$$p = \sqrt{\frac{PE}{2\pi Rl(1-\mu)}}$$

Hierin is R de straal van de cilinder en l de breedte waarover de kracht P op het platte vlak werkt. De maximum schuifspanning ligt hier op een diepte t onder het oppervlak:

$$t = 0,78 \sqrt{8(1-\mu) \frac{PR}{\pi EI}}$$

De toelaatbare spanning bij een lijncontact ligt op $p = 3,1 \text{ HB N/mm}^2$; bij een puntcontact is dit $5,3 \text{ HB N/mm}^2$. (HB is de Brinellhardheid van het materiaal). Hierbij is rekening gehouden met plastische vervormingen en vermoeiing, dus waarbij na $2 \cdot 10^7$ omwentelingen nog geen putjes en/of afbladderingen te zien zijn.

Men moet zich realiseren dat de schuifspanning die de toelaatbare waarde overtreft, in een redelijk brede band kan liggen.

Omdat de slijtagevermoeiing begint met het ontstaan van microscheurtjes onder of nabij het oppervlak, is het logisch het ontstaan van deze scheurtjes te bestrijden. Dit houdt in:

- voorkom harde oppervlaktelagen, speciaal als er een scherpe scheiding (geen diffusie) tussen laag en basismateriaal is;
- beperk insluitingen;
- voorkom harding;
- vermijd een grove structuur;
- voorkom brosheid, zoals bij keramiek of gietijzer.

Bovenvermelde factoren doen zich bij het oplossen voor in de overgangzone. Bij oppervlaktelagen moet men dus zorgen dat de hoogste spanningen niet in deze kritieke zones komen te liggen. Is dit namelijk wel het geval, dan bestaat het gevaar voor uitschaling van de gehele opslasdikte!

Kader 5.1 geeft een voorbeeld van een berekening.

Voorbeeld

Een ruwijzer transportwagen loopt over spoorstaven van het UIC60-profiel. De wielbelasting $P = 287 \text{ kN}$, de wielstraal is $R_1 = 500 \text{ mm}$, de straal van de kop van de spoorstaaf $R_2 = 300 \text{ mm}$. De spoorstaven hebben een minimum treksterkte van 900 N/mm^2 terwijl de elasticiteitsmodulus $2,2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ bedraagt. Het getal van Poisson $\mu = 0,27$.

$$m = \frac{4}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{4}{\frac{1}{500} + \frac{1}{300}} = 750 \text{ mm}$$

$$n = \frac{4E}{3(1-\mu^2)} = \frac{4 \cdot 2,2 \cdot 10^5}{3(1-0,27^2)} = 316399 \text{ N/mm}^2$$

$$3\sqrt{\frac{Pm}{n}} = 3\sqrt{\frac{287000 \times 750}{316399}} = 8,8 \text{ mm}$$

$$A = \frac{2}{m} = \frac{2}{750} \text{ mm}^{-1} = 0,00267 \text{ mm}^{-1}$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2}\right)^2 - \frac{2}{(R_1 \cdot R_2)} \cos 2\varphi} =$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{500}\right)^2 + \left(\frac{1}{300}\right)^2 - \frac{2}{(500 \cdot 300)}} = 0,000673 \text{ mm}^{-1}$$

$$\cos \theta = \frac{0,000673}{0,00267} = 0,252 \quad \therefore \theta = 75,4^\circ$$

$$\alpha = 4,55e^{-0,0178 \theta} = 4,55e^{-0,0178 \cdot 75,4} = 1,19$$

$$\beta = 0,36 + 8,22 \cdot 10^{-3} \cdot \theta = 0,36 + 8,22 \cdot 10^{-3} \cdot 75,4 = 0,856$$

De halve assen van de contactellips zijn dan:

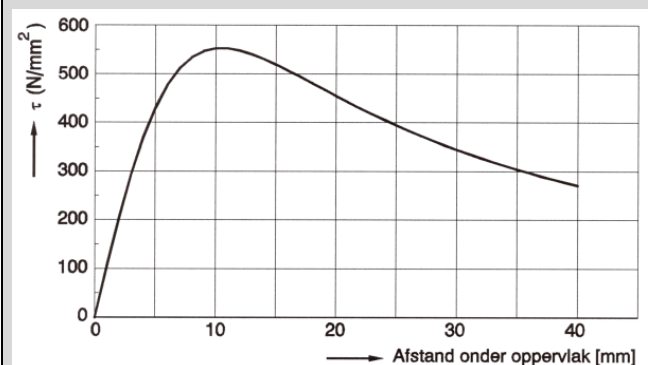
$$a = 1,19 \times 8,8 \text{ mm} = 10,47 \text{ mm}$$

$$b = 0,856 \times 8,8 \text{ mm} = 7,53 \text{ mm}$$

De Hertz vlaktedruk:

$$p = 1,5 \frac{P}{\pi ab} = \frac{1,5 \times 287000}{\pi \cdot 10,47 \cdot 7,53} = 1738 \text{ N/mm}^2$$

Figuur 5.17 geeft de verdeling van de schuifspanning onder het oppervlak van de railkop.



figuur 5.17 Schuifspanning als functie van de afstand onder het oppervlak van de railkop

kader 5.1 Voorbeeld van een berekening

Hoofdstuk 6

Oppervlaktedefect "Mengvormen van corrosie en slijtage"

6.1 Bezwijkvormen

De diverse vormen van bezwijken zijn al besproken in hoofdstuk 3, 4 en 5.

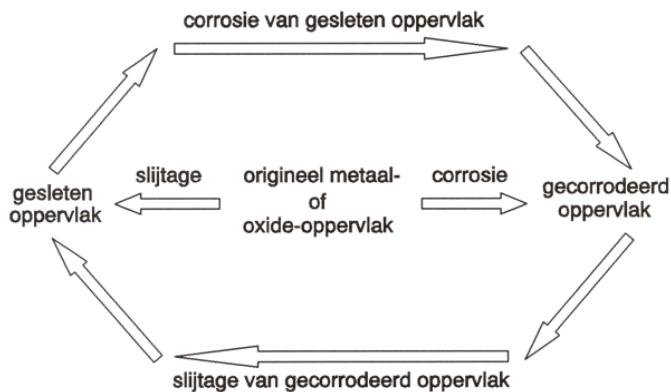
In de praktijk komt het bijna nooit voor dat een oppervlak onderhevig is aan slechts één bezwijkvorm. Meestal is er sprake van een mengvorm van de bezwijkvormen, soms van primair twee. Maar door de vorming van bijproducten ontstaat een secundaire aantasting. Enkele veel voorkomende gecombineerde bezwijkvormen worden hier besproken.

6.2 Mengvormen

6.2.1 Corrosieve slijtage

Corrosieve slijtage is een slijtageproces, waarbij chemische of elektrochemische reacties een grote rol spelen. De slijtage en corrosiefuncties zijn volgens het schema in figuur 6.1 aan elkaar gekoppeld.

Indien één of beide aantastingtypen van het originele oppervlak gering of afwezig is, dan domineert of de slijtage of de corrosie. Omdat de slijtagesnelheid van een gecorrodeerd oppervlak altijd groter zal zijn dan van een niet gecorrodeerd oppervlak en de corrosiesnelheid van een gesleten oppervlak vaak groter zal zijn dan van een niet gesleten oppervlak, zal de totale snelheid van het materiaalverlies bij corrosieve slijtage hoog zijn. De mechanische belasting kan worden overgedragen door langs elkaar bewegende vlakken of door deeltjes die langs vlakken bewegen.



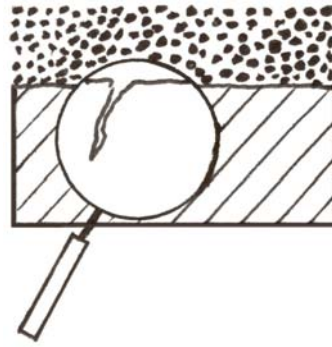
figuur 6.1 Schema van de koppeling tussen slijtage en corrosiefuncties

Deze vorm van aantasting komt voor bij installaties die in de mijnbouw, de bouw, landbouw of olie- en gaswinning worden gebruikt en blootgesteld zijn aan abrasieve stoffen over een brede range aan vochtgehalte. Door het ontbreken van uitgesproken stroming kan er niet van erosie worden gesproken. Voorbeelden zijn baggermachines, transportinstallaties in grind- en kalkfabrieken.

6.2.2 Corrosievermoeïing (figuur 6.2 en 6.3)

Hieronder verstaat men het versneld optreden van vermoeïing als gevolg van corrosie. Gewoon leidingwater kan dit al teweeg brengen.

Het scheuoppervlak is doorgaans vrij glad met soms kleine stapjes en bedekt met corrosieproducten. Schoongemaakt met speciale reinigingsmiddelen zijn soms de groeilijnen nog terug te vinden. Scheuren in een dwarsdoorsnede gezien, zijn vaak nog gevuld met corrosieproducten en zijn rechter dan spanningscorrosiescheuren, zonder vertakkingen.



figuur 6.2 Schematische weergave van corrosievermoeïing

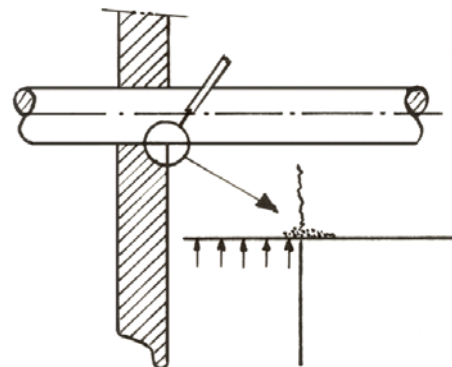


figuur 6.3 Corrosievermoeïing

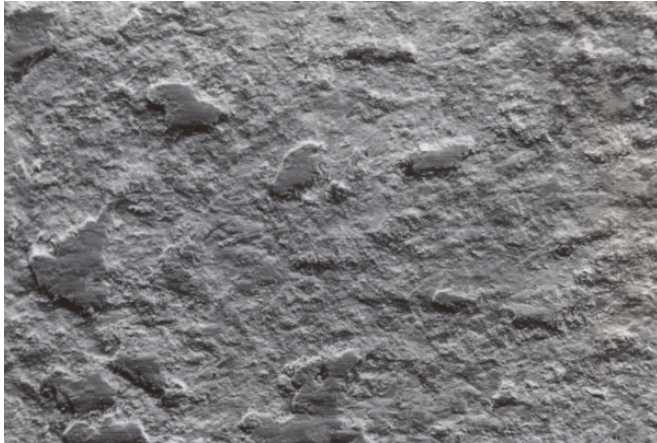
De spanningsconcentratie kan hoog oplopen, waardoor de groeilijnen verder uit elkaar liggen dan bij vermoeïing zonder corrosie. De extra wigwerking van de opgesloten corrosieproducten kan er oorzaak van zijn dat, ondanks een gelijkmatig belastingsspectrum, toch groeilijnen met onregelmatige afstanden worden gevonden.

6.2.3 Fretting (figuur 6.4 en 6.5)

Deze aantastingvorm wordt ook wel schavielslijtage genoemd of schavielcorrosie. Schavielen is een bekend verschijnsel bij vlaggenmasten, waarbij het vlaggentouw zeer snel langs de mast zwiept. Dit verschijnsel treedt op in de techniek, wanneer twee oppervlakken ten opzichte van elkaar een heen en weer gaande beweging maken met een kleine amplitude. Bijvoorbeeld bij spoorwielen die op een as zijn gekrompen. De krimpverbinding wordt gedwongen microbewegingen te maken als gevolg van de dynamische doorbuiging van de as. De schade treedt op in de vorm van een oppervlaktepitting, vergezeld met een zeer klein verlies aan materiaal, echter voldoende om tot vermoeïings-scheuren te leiden. Kenmerkend is het poedervormige corrosieproduct.



figuur 6.4 Schematische weergave van fretting

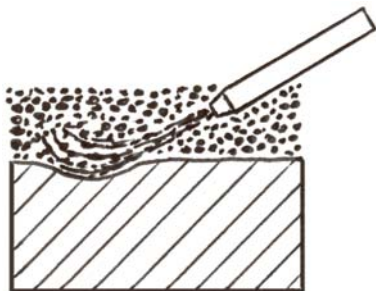


figuur 6.5 Fretting

Het oppervlak is donkerbruin tot zwart gekleurd door de aanwezigheid van geoxideerde metaaldeeltjes. Het oppervlak kan er pokdalig uitzien en de putten kunnen elkaar overlappen, waardoor een ruw uiterlijk ontstaat. Bij sterkere vergroting hebben de putjes zelf een ruw oppervlak. De slijtagedeeltjes zijn fijn en volledig geoxideerd.

6.2.4 **Erosie-corrosie** (figuur 6.6 en 6.7)

Dit ontstaat door snelstromende gasen of vloeistoffen, waarin zich deeltjes bevinden. Zowel de massa van de deeltjes als hun snelheid zijn belangrijk. Het proces wordt aanzienlijk versneld als in het transporterende medium wervelingen optreden.



figuur 6.6 Schematische weergave van erosie-corrosie



figuur 6.7 Erosie-corrosie

Het oppervlak heeft een fijn-bewerkt uiterlijk, wat niet verwonderlijk is, want het mechanisme wordt in een beheerste vorm gebruikt voor het bewerken van moeilijk verspaanbare metalen. Door de aanwezigheid van corrosieproducten is het oppervlak donker matgrijs van uiterlijk.

6.3 **Aanvullende informatie over de besproken vormen van combinatie corrosie en slijtage**

6.3.1 **Fretting**

Fretting kan optreden wanneer:

- twee componenten zijn ontworpen om ten opzichte van elkaar te bewegen, zoals bij lagers, splineverbindingen, kleppen, scharnieren;
- twee componenten niet zijn ontworpen om ten opzichte van elkaar te bewegen, zoals bij verbindingen met bouten of klinknagels en perspassingen.

Deze slijtage/corrosievorm kan bestreden worden door constructieve oplossingen, die de onderlinge bewegingen uitsluiten. Door de toegankelijkheid van het oppervlak te verminderen, door gebruik te maken van viskeuze oliesoorten en in het bijzonder met een antioxidant of door MoS₂-dek-lagen (molycote), kan het ontstaan van fretting worden vertraagd.

Met opspuittechnieken kan succes worden geboekt door gebruik te maken van zachte lagen zoals koper, aluminium, cadmium, of harde lagen zoals molybdeen, kobalt en keramische materialen.

6.3.2 **Erosie**

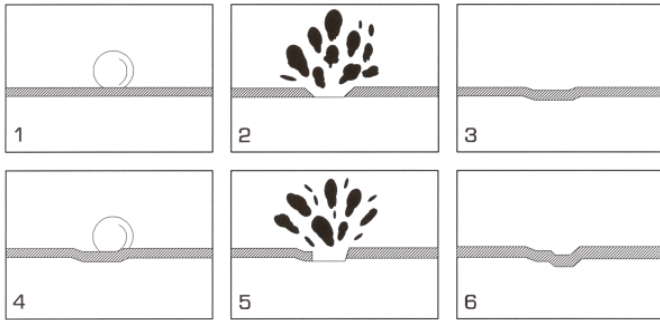
Door zijn vele verschijningsvormen is erosie moeilijk nauwkeurig te karakteriseren. De eigenschappen en de snelheid van het dragende medium en de deeltjes bepalen gezamenlijk het effect. De optredende slijtage is daardoor alleen goed te voorspellen als de praktijkcondities in testen zo goed mogelijk worden nagebootst. Dit maakt erosietesten duur. Het alternatief is gebruik te maken van ervaring uit eerdere toepassingen. Als dit weloverwogen gebeurt, met zorgvuldige afweging van de mogelijk effecten van de verschillen, kan dit een bruikbaar alternatief zijn. Belangrijk is dan, dat de eerste praktijkresultaten worden beoordeeld tegen de achtergrond van deze beslissing.

Kenmerkend voor alle erosievormen is, dat de deeltjes één oppervlak raken, waarbij de uitwendige belasting laag is. Zij kunnen langs het oppervlak rollen en daarbij een rij putjes achterlaten, of in het oppervlak snijden, waarbij lange diepe sporen kunnen ontstaan. Veel fijne deeltjes geven hierbij een polijstend effect. Oppervlakken kunnen dus zowel een ruw als een glad uiterlijk krijgen. De deeltjes kunnen ook in het oppervlak achterblijven en zich daar zo vastzetten, dat het oppervlak uiteindelijk zichzelf kan beschermen tegen verdere aantasting.

Of deeltjes rollen of snijden wordt bepaald door de vorm van de deeltjes en de hoek waaronder ze het oppervlak raken. Een kleine hoek stimuleert rollen. Een grotere hoek neigt tot graven. Treffen de deeltjes het oppervlak onder ongeveer 90°, dan bepalen massa en snelheid van de deeltjes en de versteviging die het oppervlak ondergaat in welke mate het oppervlak wordt beschadigd. Snellere deeltjes hebben meer kinetische energie en geven een grotere kans op beschadiging, naarmate hun snelheid en massa groter zijn. Als het metaaloppervlak kan verstevigen, wordt hun effect echter kleiner met de verstevigungsgraad. Corrosie-vaste materialen vertonen daardoor in veel gevallen een relatief gunstig gedrag. Fouten in het oppervlak zoals putten, spleten en richeltjes vergemakkelijken de initiatie van erosieschade, vooral als de deeltjes het oppervlak raken onder een scherpe hoek.

Een bijzondere vorm van erosie is cavitatie, waarbij de deeltjes worden gevormd door dampbellen in een vloeistof. De bellen ontstaan als de vloeistofdruk sterk varieert, waarbij de druk in bellen zelf zo laag kan worden dat ze in elkaar klappen (imploderen). Dit veroorzaakt schokeffecten, waarbij zeer hoge krachten vrijkomen. Door het herhaald effect kunnen grote stukken materiaal uit het oppervlak worden geslagen (zie figuur 6.8). Hoge vloeistofsnelheden en wervelingen stimuleren het optreden ervan. Materialen met een hoge weerstand tegen erosie-corrosie zijn ook bestand tegen cavitatie. Veelal is het echter goedkoper het ontwerp

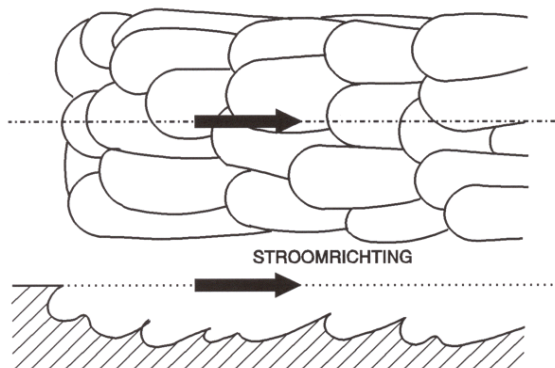
aan te passen om een beter stromingsgedrag te krijgen. Brosse deklagen zijn slecht bestand tegen cavitatie.



figuur 6.8 Schematisch verloop van het cavitatieproces

6.3.3 *Erosie-corrosie*

Erosie-corrosie (zie figuur 6.9) treedt op in snelstromende corrosieve vloeistoffen. De corrosie kan zo'n sterk effect hebben dat bij gelijke, niet-corrosieve condities, zeer geringe of zelfs in het geheel geen schade zou ontstaan. De verklaring hiervoor wordt vooral gevonden in het door chemische aantasting afbreken van een beschermende oxidehuid. Zelfs een matig corrosief milieu kan al tot desastreuze schade leiden. Als het toepassen van steeds slijtvastere ferritische materialen geen effect lijkt te hebben, is de kans groot dat het toepassen van een corrosievast staal type AISI 316, een onverwacht gunstig effect heeft; zeker als men aanvankelijk met abrasieve slijtage van doen denkt te hebben. Dit kan vooral gebeuren bij natte abrasieven. De aantastingsvorm is ook berucht bij toepassingen waar turbulenties in de vloeistof ontstaan, zoals bij bochtstukken, door-gangsvernauwingen en pompwaaiers, waar dan ook veelvuldig corrosiebestendige legeringen worden gebruikt om slijtageproblemen te voorkomen.



figuur 6.9 Schematisch beeld erosie-corrosie

De typering van de schade is over het algemeen niet zo moeilijk, omdat het verloop van het aantastingsproces vaak heftig is. In korte tijd kunnen pompwaaiers compleet verdwenen zijn. Verder is de aanwezigheid van stromingspatronen in het oppervlak kenmerkend.

Hoofdstuk 7

Mogelijke oplossingsrichtingen voor slijtage- en corrosieproblemen

7.1 Algemeen

De meest eenvoudige oplossing om aantasting van een installatiedeel, hetzij door slijtage, hetzij door corrosie of een combinatie hiervan, te voorkomen, is het maken van een juiste materiaalkeus voor het betreffende onderdeel. Het onderdeel kan gemaakt worden van een massief slijt- of corrosievast materiaal of van een basismateriaal met de gewenste mechanische eigenschappen, waarna het oppervlak zodanig wordt bewerkt dat goede corrosie- en/of slijt- vaste eigenschappen worden verkregen.

Het basismateriaal moet echter zo worden gekozen dat door de aangebrachte bescherming de werking van het onderdeel niet negatief wordt beïnvloed.

De keus van een dergelijk basismateriaal opent tevens de mogelijkheid de tijdens bedrijf verloren gegane corrosie- en/of slijt- vaste lagen opnieuw aan te brengen en zo het deel een tweede leven (of meer) te geven.

Men kan twee principieel verschillende systemen toepassen, namelijk:

- de oppervlaktelaag beïnvloeden;
- een oppervlaktelaag opbrengen.

Gesplitst naar deze twee systemen geeft tabel 7.1 een opsomming van veel toegepaste processen. Deze publicatie behandelt hoofdzakelijk het oplassen, terwijl het opspuiten beknopt wordt behandeld. Onder het oplassen valt ook het explosief oplassen. Terwijl bij het mechanisch opbrengen door middel van plateren ook het aanbrengen van opgelaste slijt- platen valt.

7.2 Ontwikkelingen in processen en materialen

Ontwikkelingen bij deklagen richten zich met name op verbetering van de systemen waarmee het materiaal op de ondergrond wordt aangebracht. In de laatste jaren is hierdoor de range aan verwerkbaar samenstellingen en vormen van het toevoegmateriaal sterk toegenomen.

Verder zijn zowel voor het oplassen als het thermisch spuiten nog verdere ontwikkelingen te verwachten in de stroom- bronnen en de regeling ervan. Men wil hiermee het volgende bereiken:

- verhogen van de neersmeltsnelheid;
- vermindering van de opmenging;
- constant houden van de kwaliteit;
- verhoging van de efficiency.

Men geeft vooral aandacht aan:

- elektroslak bandlassen met hoge snelheidspoeders;
- elektroslak bandlassen met éénlaagspoeders;
- pulsbooglassen, onder andere ook bij het onder poeder lassen, ter realisering van een constantere inbranding en vermindering van de opmenging;
- gevulde draden en gevulde lasbanden.

Sommige corrosietoepassingen verlangen een meer homogene deklaag, waarvoor een zeer nauwkeurige handhaving van de afstand tussen elektrode en werkstuk nodig is. Robotisering voorziet hierin. In dit verband moet ook worden gewezen op het lasercladden. Een laser als warmtebron wordt gebruikt om een lasdraad of poeder, dat van tevoren op het werkstuk is aangebracht of direct in de lichtbundel gespoten, om te smelten. De laserenergie is zeer nauwkeurig te doseren, wat de homogeniteit van de deklaag ten goede komt (beheersing en beperking van inbranding en dus opmenging). Door deze lokale warmte-inbreng zal het werkstuk veel minder vervormen dan bij conventionele op- lastechnieken. Daar komt bij dat door de hoge afkoelsnel- heid amorphe structuren kunnen ontstaan, waardoor de corrosiebestendigheid wordt verbeterd.

tabel 7.1 Opsomming van veel toegepaste processen

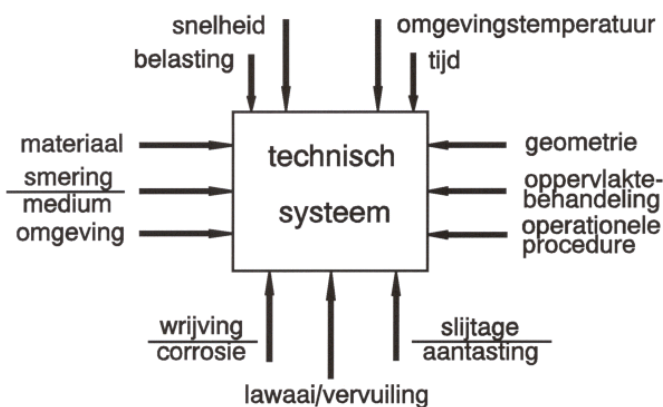
oppervlaktelaag beïnvloeden	oppervlaktelaag opbrengen
MECHANISCH	MECHANISCH
kogelstralen rollen-walsen-kalibreren	plateren
THERMISCH	THERMISCH
oppervlakteharden ► inductief ► vlam ► laser/elektronenstraal ► impuls ► wrijving	smelten ► oplassen ► gietplateren ► vertinnen ► verzinken ► emailleren
THERMOCHEMISCH	MECHANISCH-THERMISCH
a. harden ► carboneren ► carbonitreren	a. opspuiten ► metalen ► kunststoffen ► harde stoffen
b. al dan niet harden ► boreren ► chromeren ► vanaderen	b. plateren ► explosief ► wals
c. niet harden ► nitreren ► oxideren ► sulfideren	
FYSISCH	
a. in normale omgeving ► impregneren	
b. in autoclaaf ► vacuümimpregneren	
AFSCHEIDEN IN GASFASE	ELEKTROCHEMISCH
CVD	a. kathodische afscheiding ► verchromen ► vernikkelen ► Ni-dispersie ► vertinnen ► verzinken
PVD	
diversen ► plasma nitreren ► plasma etsen ► ionen implantatie ► plasma polymerisatie	b. anodische afscheiding
	CHEMISCH
	a. stroomloos metaal afscheiden ► vernikkelen
	b. chemische reactielagen ► fosfateren

In de materialensfeer zijn ontwikkelingen te verwachten in een uitbreiding van het aantal legeringen, voornamelijk door de ontwikkeling van gevulde draden en banden voor het oplossen. Ook bij thermische spuitpoeders zijn er mogelijkheden om meerdere slecht legerende materialen samen te voegen, waardoor het aantal mogelijkheden in materialen vrijwel oneindig wordt en de kwaliteit toeneemt (minder poreusheid). Hier moet men denken aan de ontwikkeling van gevulde draden op basis van nikkellegeringen. Vooral de verwerkbaarheid van superlegeringen en reactieve materialen zal hiervan profiteren.

op het gedrag te anticiperen en door testen te verifiëren. Om deze te kunnen interpreteren is kennis nodig. Dit hoofdstuk probeert hiervoor een basis te leggen door inzicht te verschaffen in de verschijnselen van corrosie en slijtage. Tevens maakt het de adviezen van eventueel te raadplegen specialisten in het vakgebied toegankelijker.

7.3 *Mechanismen en technieken*

Bekend is dat onder het begrip corrosie veel verschillende aantastingvormen vallen. Minder bekend is, dat dit eveneens bij slijtage het geval is. Het is voor het oplossen van beide verschijnselen absoluut noodzakelijk dat de juiste aantastingvorm bekend is, om tot een afdoende oplossing van het probleem te komen. Slijtage en corrosie gedragen zich als technische systemen. Dat wil zeggen dat een groot aantal parameters het gedrag bepaalt. Het grote aantal beïnvloedbare parameters maakt het zoeken naar een oplossing complex, zoals figuur 7.1 laat zien. De afbeelding toont de vele variabelen, die bijdragen aan de eigenschappen van een technisch systeem. Het technische systeem bepaalt de eigenschappen van het object in zijn omgeving. De eigenschappen zijn te beïnvloeden door één of meer parameters van het technische systeem te veranderen. Als de eigenschappen onvoldoende zijn, zal bij voorkeur die parameter aangepast worden die de goedkoopste oplossing biedt. Het toepassen van een oppervlaktebehandeling zal dan ook vaak een goedkopere oplossing bieden dan het kiezen van een "beter" materiaal.



figuur 7.1 Systeembenadering corrosie en slijtage

Het uitwendig gedrag is de resultante van deze samenwerkende factoren. Het is daarom niet mogelijk een deklaag los te zien van zijn omgeving. Dit geldt voor zowel het basismateriaal dat de deklaag moet dragen, als de omgeving waarin of waartegen de deklaag moet werken. Door de vaak zeer complexe samenhang is het moeilijk alle factoren en hun relaties te kwantificeren, zodat voorspellen van het gedrag niet eenvoudig is. Binnen het vakgebied wordt dan ook vaak opgemerkt dat de wetenschap van corrosie en slijtage niet in staat is een bepaald gedrag te voorspellen, maar wel altijd (achteraf) te verklaren. Dit maakt een beoordeling van corrosie- en slijtageproblemen buiten hun context riskant. Het vereist veel ervaring om de samenhang te kunnen zien en op grond van eerdere ervaringen tot oplossingen te komen. Hierdoor is de verleiding groot corrosie- en slijtageproblemen vanuit een no-nonsense werktuigkundig vakmanschap te benaderen, waarbij eerdere verklaringen van het gedrag in een specifieke omgeving van onschatbare waarden zijn. Op zich is deze benadering niet verkeerd, als men zich de betrekkelijkheid van de oplossingen blijft realiseren. Het is zeer goed mogelijk om langs deze weg

Hoofdstuk 8

Herkennen van problemen en de oplossingen

8.1 Algemeen

Elke goede oplossing begint met een zorgvuldige definitie van het probleem. De moeilijkheid bij het oplossen van een slijtage- en/of corrosieprobleem zit dan ook minder in het vinden van de weg in het grote aanbod van materialen en processen. Veel meer is het lastig te herkennen welk soort slijtage of corrosie nu precies een rol speelt. Dit hoofdstuk is dan ook bedoeld om een probleem te analyseren. Hiervoor zijn vragen, schema's en referentiebeelden opgenomen, waarmee op een gestructureerde manier de inhoud van dit en de vorige hoofdstukken kan worden gebruikt om een probleem zo duidelijk mogelijk te beschrijven. Waar mogelijk worden ook oplossingen aangegeven. De langs deze weg opgestelde probleefdefinitie kan ook worden gebruikt om samen met leveranciers of specialisten oplossingen te zoeken.

Figuur 8.1 geeft het proces weer om van probleem tot oplossing te komen. Het is een gesloten kringloop, waar op twee plaatsen kan worden ingestapt, afhankelijk of het probleem te maken heeft met een nieuw of een bestaand product.

Centraal staan de 16 basiscriteria van § 3.2. die voor elk (her)ontwerp moeten worden gekwantificeerd. Het resultaat is een systeem dat in zekere mate voldoet aan de eisen voor slijtage- en/of corrosiebestendigheid. Is kwantificering niet mogelijk, dan zullen de parameters ten minste kwalitatief moeten zijn bepaald en moeten er testen volgen. Het maakt niet uit of dit in het laboratorium gebeurt, of direct in het veld. In de kringloop kan 'praktijk' eenvoudig worden vervangen door 'testen'. Blijkt het gedrag niet te voldoen, dan volgt een analyse. Na de analyse volgen corrigerende maatregelen. De hiervoor benodigde informatie kan worden gevonden in deze voorlichtingspublicatie, bij leveranciers of bij specialisten. Aanpassing van de relevante basiscriteria resulteert in een bijstelling van de materiaal- en/of proceskeuze en geeft nieuwe systeemp parameters, waarmee het praktisch gedrag opnieuw bekeken wordt.

Bij een bestaand product wordt gestart met de analyse, waarbij het nodig kan zijn eerst door aanvullend onderzoek de (belangrijkste) niet-bekende systeemp parameters te bepalen. Het resultaat van elke stap in de kringloop moet worden vastgelegd. Vooral omdat elke niet benoembare parameter de onzekerheid vergroot. In het overleg met leverancier en/of specialist is het belangrijk dit aan te kunnen geven.

8.2 Analyse

De analyse heeft de structuur van een gesloten enquête. Elke vraag wordt gevolgd door twee of meer antwoorden, waar een keus uit moet worden gemaakt. Waar nodig wordt per vraag een korte toelichting gegeven of wordt verwezen naar een paragraaf waar meer informatie te vinden is. Is de keuze gemaakt, dan volgt een aanwijzing naar de volgende vraag. Combinaties van effecten worden zoveel mogelijk vermeden. Waar dit te verwachten is, wordt aangeraden wel de analyse uit te voeren, maar voor de oplossing te overleggen met een specialist.

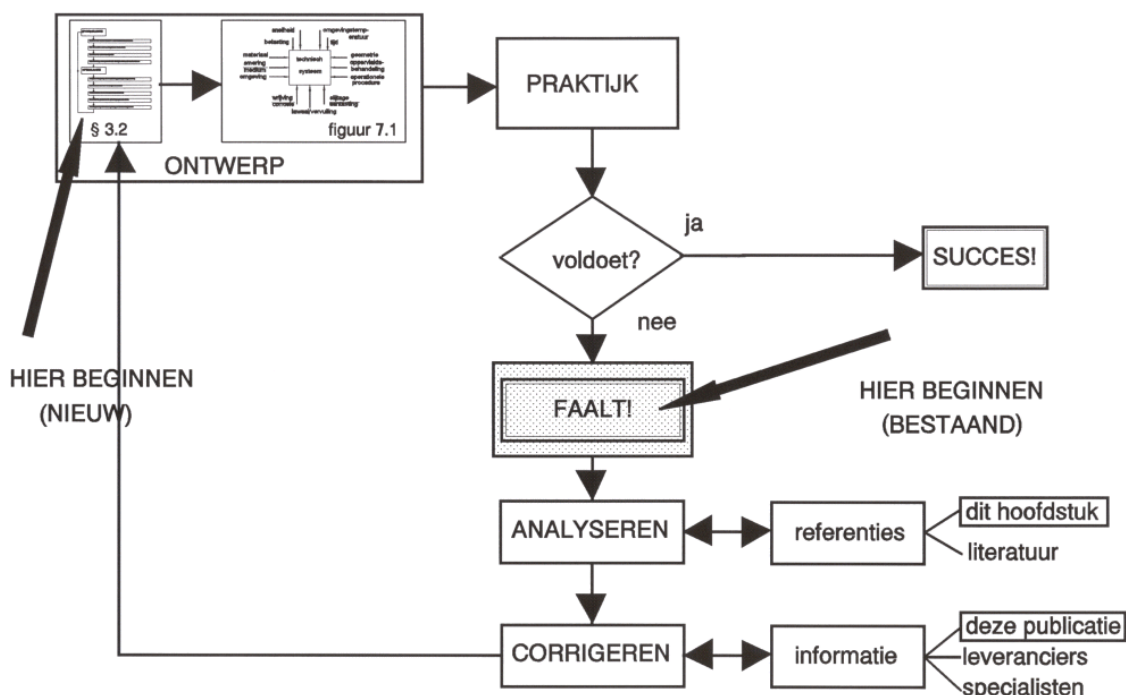
VRAAG 1

Betreft het een nieuw of een bestaand product?

antwoord 1a Nieuw → ga door met vraag 2
antwoord 1b Bestaand → ga door met vraag 11

toelichting

Het antwoord op de vraag is bepalend voor de plaats waar de kringloop van figuur 8.1 wordt gestart. Bij een bestaand probleem wordt ervan uitgegaan dat er schade is door corrosie en/of slijtage. Door vergelijken met typische voorbeelden kan in dat traject worden getracht om de schade te typeren. Hiervoor is een schema opgenomen, waarmee de mogelijk optredende slijtagevorm wordt bepaald. Vervolgens worden voor de verschillende schadetypes enkele mogelijke oplossingen genoemd. Voor complexere gevallen zal de hulp van een specialist moeten worden ingeroepen. Voor een nieuw product is dit niet mogelijk.



figuur 8.1 Kringloop van probleem tot oplossing

VRAAG 2

Betreft het een lagertoepassing?

antwoord 2a Nee → ga door met vraag 3

antwoord 2b Ja → kies een geschikt laagsmeltend materiaal of koperlegering, voor bijzondere gevallen aluminiumoxide

toelichting

Deze vraag heeft betrekking op gesmeerde lagers. Onge-smeerde lagers worden later behandeld als langs elkaar be-wegende vlakken, waarbij slijtage slechts beperkt toelaat-baar is. De keuze voor een lagermateriaal wordt niet direct beperkt door een opspuit- of oplasmateriaal. Voor de keuze gelden normale ontwerpuitgangspunten. Zowel lagermate-rialen met een laag (babbitts) als een hoog smeltpunt (ko-perlegeringen) zijn te verwerken. De poreusheid van een spuitlaag kan worden gebruikt om zelfsmurende lagers te maken. Verder geeft opspuiten de mogelijkheid om een dunne looplaag aan te brengen op materialen die zelf geen goede loopeigenschappen hebben. Oplassen wordt door-gaans alleen bij reparaties gedaan. Er zijn ook speciale spuit-materialen op basis van molybdeen voor extremere omstan-digheden beschikbaar, bijvoorbeeld als er bij hoge lagertem-peraturen ook noodloopeigenschappen nodig zijn. Tenslotte zullen veel 'gewone' materialen betere loopeigenschappen hebben als zij worden gespoten. Dit berust op de aanwezig-heid van harde oxiden. Moet een lager elektrisch isolerend zijn, dan kan hiervoor plasma gespoten aluminiumoxide worden gebruikt. Chroomoxide heeft door zijn lage wrijvings-coëfficiënt zeer goede lagereigenschappen. Dit geldt ook voor thermisch gespoten legeringen op molybdeenbasis.

VRAAG 3

Wat is de te verwachten bedrijfstemperatuur?

antwoord 3a <350 °C → alle materialen mogelijk, pas op met smeltpunt van laag-smeltende materialen, ga door met vraag 4

antwoord 3b 350-600 °C → geen bronzen, geen molyb-deen(legeringen), wolfram-carbide-kobalt oplaslegerin-gen en cermets tot 500 °.

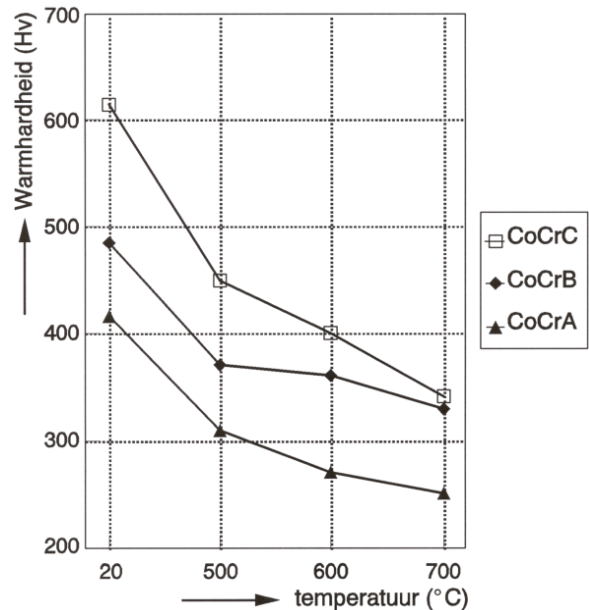
antwoord 3c 500-850 °C → enkele ijzerbasislegeringen zijn nog geschikt tot 650 °C, oplossen met oxidatiegevoeligheid (ook bij keramische materialen!), alle nikkelbasis-legeringen m.u.v. nikkelalumi-niumlegeringen (tot 650 °C), alle keramische materialen m.u.v. TiO₂-houdende (tot 550 °C).

antwoord 3d >800 °C → raadpleeg een specialist

toelichting

De temperatuurranges zijn globaal gesteld en overlappen elkaar daardoor ook. Sommige materialen zijn beperkt dan de klasse aangeeft. Een voorbeeld zijn aluminiumlegeringen. Deze zijn te gebruiken tot 480 °C. Gelegerde staalsoorten zijn meestal te gebruiken tot 500 °C. Staalsoorten met molybdeen kunnen tot 600 °C worden toegepast. Boven 500 °C wordt de matrix van de meeste kobalt cermets zo zacht, dat de carbiden niet meer worden vastgehouden. Bovendien zal oxidatie plaatsvinden. In dat geval moet men gebruik maken van normale legeringen op kobaltbasis. Fi-guur 8.2 toont voor deze materialen de hardheid als functie van de temperatuur.

Ook de belasting speelt een rol, bijvoorbeeld in verband met kruiseffecten. De hier gekozen grove indeling heeft vooral te maken met extra problemen die ontstaan. Zo moet er boven 600 °C rekening worden gehouden met oxidatie. Boven 800 °C wordt voor de meeste materialen de oxida-



figuur 8.2 De hardheid als functie van de temperatuur van enkele kobaltlegeringen

tie ontoelaatbaar. De martensitische en veredelde materia-len verliezen boven 500 °C snel hun hardheid en sterkte. Het raadplegen van de ontlaatcurve voor een bepaald mate-riaal in verband met bijvoorbeeld spanningsarm gloeien is daarom noodzakelijk. Deze gegevens staan gewoonlijk in de catalogus van de fabrikant. Boven 350 °C kunnen uitscheidingen worden gevormd die tot verbroosing leiden, met als gevolg overgevoeligheid voor stotende belasting.

Beperkingen ontstaan door typische materiaaleigenschappen als smeltpunten, uitscheidings- en omzettingstemperaturen. Keuzes hierin worden bepaald door normale metallurgische ontwerpuitgangspunten, met dien verstande dat dan bijvoor-beeld van een samengesteld spuitpoeder de eigenschappen van de meest beperkende fase bekend moeten zijn. Dit is normaal gesproken de fase met de laagste smelttempera-tuur of een fase die ongewenste verbindingen met andere aanwezige elementen vormt. De hoogst toelaatbare tempe-ratuur is normaal ook op te vragen bij leveranciers.

Een tweede beperking, die zwaarder gaat gelden naarmate de temperatuur hoger is, wordt gevormd door verschillen in uitzettingscoëfficiënt. Oplassen heeft hier het voordeel, dat door een metallurgische binding grotere spanningen op de overgangszone worden verdragen. Dit geldt ook voor de ingesmolten spuitlagen. Snelle temperatuurovergangen en thermische schokken geven een extra grote belasting. Lagen kunnen hierdoor scheuren of eraf springen. Oplos-singen zijn te vinden door meerdere lagen aan te brengen met verschillende uitzettingscoëfficiënten. Een bekend voor-beeld is 12% Cr-staal gespoten op aluminium remschijven waar de temperatuur aan het oppervlak kan oplopen tot ca. 850 °C. Dit gaat heel goed als er een laag aluminium-brons tussen zit.

Tot 350 °C gelden nauwelijks beperkingen (geldt niet voor laagsmeltende metalen als babbitts!). Alle materialen en processen zijn toepasbaar.

Boven 800 °C zijn ook de meeste keramieken niet meer te gebruiken. Alleen speciale, zeer zuivere oxidekeramieken kunnen bij hogere temperaturen worden gebruikt. Hoogge-legerde metallische materialen met minstens 5% aluminium of 2% silicium zijn in een aantal gevallen nog te gebruiken tot ca 1000 °C. Gespoten puur aluminium wordt ook wel gebruikt als oxidatiebescherming. Het zet zich bij bedrijfs-temperatuur om in aluminiumoxide. Verder komen Si-rijke insmeltlegeringen nog in aanmerking, afhankelijk van het type zijn ze bestand tegen oxidatie tussen 925 °C en 980 °C (met een aluminium toplaag tot 1150 °C).

VRAAG 4

Is er sprake van een agressief milieu?

- antwoord 4a** Nee → ga door met vraag 5
antwoord 4b Ja → ga door met vraag 6

toelichting

De aanwezigheid van een agressief milieu beperkt de materiaalkeus. De combinatie met een beweging kan de situatie nog moeilijker maken, omdat veel materialen bestand zijn tegen corrosie dankzij de aanwezigheid van een dunne (passieve) beschermde (oxide)laag. Door slijtage kan deze voortdurend verdwijnen. Dit geldt bijvoorbeeld voor alle legeringen met chroom. In een degelijke situatie kan de keuze voor een inert keramisch materiaal uitkomst bieden. Een andere mogelijkheid is te kiezen voor één van de zeer edele metallische nikkelbasislegeringen. De beoordeling wordt gebaseerd op normale ontwerpinzichten, waarbij bestendigheidstabellen van de leveranciers van toevoegmaterialen over het algemeen goed bruikbare informatie verschaffen. Het is hiervoor noodzakelijk het milieu zo goed mogelijk te kennen. Onzekerheden kunnen worden afgedekt met het uitvoeren van corrosieproeven.

Milde vormen kunnen worden bestreden met het opbrengen van RVS, waarvoor diverse oplos- en opspuitmaterialen bestaan. De lagen moeten dicht zijn, dus bij spuiten bij voorkeur insmelten of HVOF-sputten. Een andere mogelijkheid is sealen.

In een waterige omgeving (elektrolytoplossing) zijn ook zink(legeringen) en aluminium(legeringen) goed bruikbaar. Dit zijn typische spuitmaterialen die het onderliggende staal kathodisch beschermen. De lagen hoeven dan ook niet dicht te zijn, maar moeten wel goed hechten. Anders ontstaat te gemakkelijk ondercorrosie door gebrek aan zuurstof in de spleet tussen deklaag en basismateriaal.

Meer informatie over corrosie is te vinden in § 4.2. Ontwerpers die niet vertrouwd zijn met corrosie wordt aangeraden een specialist te raadplegen.

VRAAG 5

Is er slijtage te verwachten?

- antwoord 5a** Nee → ga door naar vraag 6
antwoord 5b Ja → ga door naar vraag 7.

toelichting

Is het antwoord niet direct te geven, ga dan door naar vraag 7.

VRAAG 6

Welk type corrosie is te verwachten?

LEES EERST TER VOORBEREIDING § 4.2.

- antwoord 6a** algemene corrosie → lees § 4.2 en de toelichting
antwoord 6b galvanische corrosie → zie toelichting
antwoord 6c selectieve aantasting → zie toelichting
antwoord 6d spleetcorrosie → lees § 4.2 en de toelichting
antwoord 6e putcorrosie → lees § 4.2 en de toelichting
antwoord 6f interkristallijne corrosie → lees § 4.2 en de toelichting; raadpleeg een specialist
antwoord 6g spanningscorrosie → lees § 4.2 en de toelichting; vermijd trekspanningen
antwoord 6h hoge temperatuur corrosie → lees § 4.2 en de toelichting van vraag 3
antwoord 6i anders (mengvorm) → ga naar vraag 9

BEPAAAL DE CORROSIEVORM, SELECTEER MOGELIJKE OPLOSSINGEN EN GA DOOR NAAR VRAAG 10.

toelichting

De corrosiebestendigheid van een deklaag wordt bepaald door de edelheid van het materiaal en de dichtheid (poreusheid). Vooral het laatste is bij thermisch gespoten lagen een serieuze en beperkende factor. Een effectieve afsluiting van de poriën in het oppervlak is mogelijk op drie manieren: 'sealen' met een speciale kunststof, omsmelten of gebruik maken van de zelf helende eigenschappen die sommige materialen bezitten. De corrosieproducten zijn dan zelf dicht en hechten sterk. Voorbeelden zijn zink, aluminium en silicium.

Opgelaste corrosiebestendige deklaag zijn dicht en sluiten de ondergrond tegen corrosieaantasting af.

Anticiperen op een bepaald type corrosie vergt specialistische kennis van corrosieprocessen. De herkenning van het corrosietype aan de hand van eerder in een soortgelijke situatie opgetreden aantasting is soms mogelijk. In § 4.2 zijn referentiebeelden gegeven van corrosieverschijnselen, zoals deze bij bestaande, door corrosie aangetaste producten zijn waar te nemen. Ook in de literatuur is veel informatie te vinden. Zeer goed bruikbaar hiervoor is de Corrosieatlas van Elsevier.

De interface is een zwakke plek bij alle deklaagsystemen. Bij veel producten is deze aan de zijkant toegankelijk voor het milieu. Blootstelling aan corrosie veroorzaakt een snelle aantasting, waarbij de deklaag van de ondergrond wordt gedrukt. Dit is te voorkomen door de zijkant goed af te dekken, bijvoorbeeld met een las over de interface.

Algemene corrosie is de enige vorm die goed voorspelbaar is. De corrosiesnelheid is goed te meten en kan worden gebruikt om de levensduur te berekenen. Zo valt uit proeven af te leiden, wat voor een toepassing de minimale deklaagdikte moet zijn. De lagen moeten 100% dicht zijn, dus oplossen, insmelten of sealen.

Voor een middelmatig agressieve omgeving zijn vrijwel alle austenitische materialen goed te gebruiken. Voor zeer agressieve milieu's komen alleen inerte keramische materialen, of Ni-basislegeringen in aanmerking. Bij de olie- en gaswinning is gespoten aluminium met veel succes toegepast. Ook kunststoffen kunnen goede bescherming bieden. Mengsels van verschillende sterke zuren vragen om de bijstand van een specialist.

Galvanische corrosie is goedkoop op te lossen met zich opofferende zink- of aluminiumlagen. Deze zijn alleen te spuiten. Door hun van nature aanwezige inhomogeniteit zijn deklaag zelf relatief gevoelig voor deze corrosievorm. In sterke elektrolytoplossingen moet daarom al snel worden gekozen voor relatief edeler materialen. Als de insmeltelingen niet voldoende weerstand blijken te hebben, moeten nikkelbasislegeringen of keramische materialen worden gekozen. De lagen moeten dicht zijn.

Selectieve aantasting is vooral een probleem bij thermisch gespoten lagen. De microstructuur kent voor deze aantastingsvorm veel zwakke plekken o.a. doordat de hoge afkoelsnelheid onstabiele fasen vormt met hoge inwendige spanningen en ook segregaties kan veroorzaken. Daarnaast bestaat de microstructuur vaak uit meerdere fasen met grote verschillen in edelheid. De minst edele fase kan preferent worden aangetast, waardoor de sterkte verloren gaat. De hardmetalen op kobaltbasis zijn relatief gevoelig in sterke zuren. Echter ook keramische materialen kunnen zich onverwacht slecht gedragen. Zo kan er in SiC vrije silicium voorkomen dat in sterke zuren oplost; bij Al_2O_3 wordt dit veroorzaakt door vrije aluminium. Ook de aanwezigheid van SiO_2 kan problemen geven. Agressieve milieu's verlangen daarom de meest zuivere vorm van een materiaal. Vooral bij keramieken maakt dit de laag relatief duur.

Spleetcorrosie kan bestreden worden met materialen die goed bestand zijn tegen pitting. Beter is echter om spleten door constructieve aanpassingen te voorkomen.

Putvormige corrosie wordt zeer sterk beïnvloed door de temperatuur, waarbij verschillen van 10 °C het corrosiebeeld totaal kunnen veranderen. Het is dus zaak dat het

materiaal een voldoende hoge pitting-temperatuur of PRE-waarde bezit (zie § 4.3). Deze zijn echter voor deklaagmaterialen nog nauwelijks bepaald. Met de nodige voorzichtigheid kunnen de voor basismaterialen bekende waarden een richtlijn geven. Bedenk daarbij dat deklaagmaterialen (zeker opspuitmaterialen) inhomogener zijn, wat pitting in de hand werkt. Veiliger is het in milieu's die pitting veroorzaken (halogeenrijke oplossingen) voor pitting ongevoelige materialen met ten minste 50% nikkel te kiezen. Hoe hoger het nikkelgehalte, hoe groter de weerstand. Alloy B heeft zich in dit opzicht bewezen en kan zelfs beter zijn dan de gesmede equivalent. In de papierindustrie wordt putvormige corrosie aan koolstofstalen rollen effectief bestreden met fenol geseald aluminiumbrons.

De keus van het voor de toepassing meest geschikte toevoegmateriaal is complex, omdat naast de samenstelling ook andere factoren in beschouwing moeten worden genomen, zoals de laagdikte en de microstructuur. Bij opgelaste deklagen is vooral het ferrietgehalte belangrijk. Bij lasprocessen, waarbij poeder wordt gebruikt, is het mogelijk via het poeder de chemische samenstelling van de deklaag aan te passen. Een belangrijk hulpmiddel om één en ander te voorspellen is het Schaefflerdiagram.

Interkristallijne corrosie kan, als oplosgloeien niet mogelijk is, worden bestreden met een Mo-rijk corrosievast staaltypen, gebaseerd op type AISI 316, als oplos- of opspuitmateriaal. Ook de (duurdere) Ni-basislegeringen zijn ongevoelig hiervoor. Bij oplossen moet verder het koolstofgehalte goed in de gaten worden gehouden. Door opmenging kan bij de niet gestabiliseerde corrosievaste staalsoorten oplossen in twee lagen nodig zijn. Het koolstofgehalte van de neersmelt is direct afhankelijk van het koolstofgehalte van het basismateriaal, de opmenging en het koolstofgehalte van het lastoevoegmateriaal.

Spanningscorrosie in koolstofstaal (alkalisch milieu) kan worden vermeden door oplossen met corrosievaste staaltypen AISI 309, 316L en 310, zuiver nikkel en Inconel 625. Spanningscorrosie verlangt dat er geen trekspanningen in het oppervlak voorkomen. Een opgelaste RVS laag zal, vanwege de hogere uitzetting, sterker krimpen en juist trekspanningen in de laag opbouwen. Een goed aangebrachte deklaag bevat van nature hoge drukspanningen. Thermisch gespoten lagen zijn daardoor goed te gebruiken, mits goed nabehandeld met een siliconen gemodificeerde sealer. Bij RVS basismateriaal is het mogelijk zich opofferende deklagen te gebruiken. Een voorbeeld is een Pb-SnSb 2-2 thermisch gespoten deklaag voor chloriderijke omgeving. Een andere mogelijkheid bij RVS is opspuiten van Al met een thermische nabehandeling, waarbij dit wordt omgezet in een intermetallische FeAl-verbinding. Spanningscorrosie onder isolatiemateriaal bij RVS kan worden opgelost met siliconen-geseald gespoten aluminium.

Hoge temperatuur corrosie verlangt de aanwezigheid van stabiele, goed hechtende oxidefilms. Metallische materialen met een hoog percentage aan chroom, bij voorkeur in combinatie met enkele procenten aluminium of silicium, geven goede bescherming tegen aantasting door hete gassen en oxidatie. Ook puur aluminium geeft bescherming en wordt vaak gebruikt voor grootschalige onderdelen die met rookgassen in contact komen. Voor de bescherming van oververhitterpijpen is met succes HVOF gespoten RVS type 316 en type 420 gebruikt. In sterk reducerende zwavelrijke omgeving kan Ni 50Cr worden gebruikt, waarmee ook lokaal reparaties kunnen worden uitgevoerd.

Hoge temperatuur corrosieproblemen zijn complex maar er bestaan veel goede oplossingen met thermisch gespoten lagen. De ondersteuning door een specialist brengt deze binnen bereik.

VRAAG 7

Hoe wordt het oppervlak belast?

Antwoord 7 LOOP DOOR HET SCHEMA IN TABEL 8.1 EN GA MET HET ANTWOORD NAAR VRAAG 8

toelichting

Aan de hand van het schema kan worden nagegaan welk type slijtage eventueel kan worden verwacht. Of en in welke mate slijtage zal optreden, hangt af van een aantal factoren:

- de grootte van de belasting;
- snelheid waarmee vlakken bewegen en de snelheid van de deeltjes;
- de aanvangs- en (lokale) bedrijfstemperatuur
- de oppervlakteruwheid;
- vorm, grootte en scherpte van abrasieve deeltjes.

Materiaalparameters als hardheid, elasticiteitsmodulus, microstructuur, oplosbaarheid van het ene materiaal in het andere bepalen gezamenlijk het effect. Zij worden gekozen op basis van normale constructieve inzichten. Leidt dit tot te dure materialen of zijn de eisen die aan het oppervlak worden gesteld strijdig met de eisen voor de gehele dwarsdoorsnede (bijvoorbeeld sterkte), dan kan dit met deklagen worden opgelost.

Een aparte opmerking verdient de oppervlakteruwheid. Niet alleen is het ten aanzien van slijtage moeilijk een oppervlak goed te karakteriseren, ook de waarde van de ruwheid verdient veel aandacht. Oppervlakken met een zelfde Ra-waarde hebben of goede loopeigenschappen, of zijn geschikt om er mee te vijlen. Een hoge ruwheidswaarde kan aanvankelijk een zeer hoge slijtagesnelheid geven, maar later kan de slijtage zich stabiliseren op een zeer lage waarde (inloop-effect). Een zeer glad oppervlak kan door 'kleven' een hoge

tabel 8.1 Schema voor het bepalen van het type slijtage

Zijn er abrasieve deeltjes aanwezig (zand, stof, fragmenten, korrels, brokjes)?									
NEE					JA				
Bewegen er twee vlakken tegen elkaar?					Is er één oppervlak of zijn er twee met een abrasief ertussen?				
JA			NEE	TWEET	EEN				
Is er een continue beweging, een lange glijweg (>0,5 mm) of is er sprake van een trillingsbeweging met kleine amplitude (<0,5 mm)?					Is het abrasief droog of wordt het gedragen door een vloeistof?				
continu of lange glijweg		trilling of oscillatie			DROOG				VLOEISTOF
Is de belasting constant of wisselend?					is de belasting laag of hoog?				
CONSTANT	WISSELEND				HOOG	LAAG			
						Wrijven de deeltjes langs het oppervlak of slaan zijn in (impact)?			
			WRIJVEN	IMPACT					
adhesieve slijtage	slijtage-vermoeiing	fretting	geen slijtage-probleem	abrasieve slijtage	'high stress' abrasieve slijtage	'low stress' abrasieve slijtage	erosie		

slijtagesnelheid geven die later op een lagere waarde stabiliseert als het oppervlak wat ruwer is geworden. Als vuistregel kan men aannemen dat fijn slijpen een goed bruikbaar oppervlak oplevert. Deklagen moeten dan ook slijpbaar zijn. Bij lage belastingen kan ook een fijngedraaid oppervlak nog acceptabel zijn.

VRAAG 8

Welk type slijtage is te verwachten?

LEES EERST TER VOORBEREIDING § 5.2

- antwoord 8a** abrasieve slijtage → lees § 5.2 en de toelichting
antwoord 8b adhesieve slijtage → lees § 5.2 en de toelichting
antwoord 8c erosieve slijtage → lees § 5.2 en de toelichting
antwoord 8d slijtagevermoeiing → lees § 5.2 en de toelichting
antwoord 8e anders (mengvorm) → ga naar vraag 9.

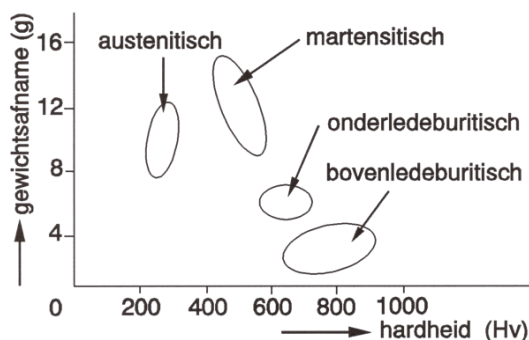
BEPAAI DE SLIJTAGEVORM, SELECTEER MOGELIJKE OPLOSSINGEN EN GA DOOR NAAR VRAAG 10.

toelichting

Als zij worden gedragen door een basismateriaal met voldoende sterkte (weerstand tegen indrukking), hebben in het algemeen thermisch gespoten keramische dekragen een uitstekende weerstand tegen slijtage. Zij verdragen, in tegenstelling tot de metallische materialen, nauwelijks trekspanningen. Te grote trekspanningen ontstaan direct als de ondergrond wegzakt. Opgelaste lagen stellen minder eisen aan de ondergrond, omdat zij door hun dikte zelf voldoende draagkracht kunnen opbrengen.

Als het werkstuk insmelten verdraagt, of als warmtebehandelen na het opbrengen mogelijk is, dan vormen de insmeltlegeringen een veelzijdig toe te passen groep. De meeste hebben een nikkelmatrix. De meest slijtvaste legeringen bevatten harde deeltjes van bijvoorbeeld wolframcarbide.

Abrasieve slijtage zonder grote drukken of schokken kan in de meeste gevallen worden opgelost door een materiaal met een ledeburitische structuur te gebruiken (zie figuur 8.3). Ook andere materialen met veel harde bestanddelen (carbiden, boriden) kunnen worden gebruikt. Kenmerkend voor deze belasting is, dat de slijtende deeltjes heel blijven en steeds meer afronden. Bij hoge belastingen breken de abrasieve deeltjes en blijven daardoor scherp.



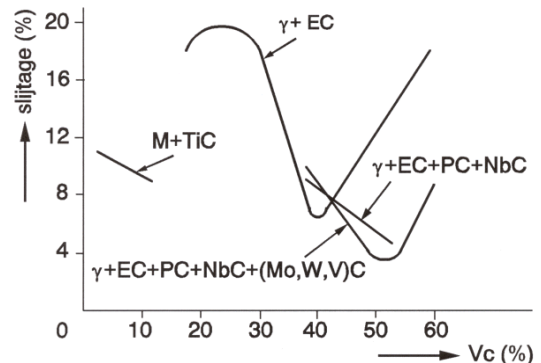
figuur 8.3 Abrasieve slijtage als functie van de hardheid van verschillende types opasmaterialen (deze grafiek is verkregen met resultaten van de straaalslijtageproef)

Bij een matige stootbelasting blijkt dat een legering met een hoeveelheid carbiden van ca. 30% tot de beste resultaten leidt. De hoeveelheid carbiden kan op een eenvoudige manier uit de chemische samenstelling van de opgelaste laag worden bepaald:

$$V_c = 9,43 \times \%C + 0,39 \times \%(\text{carb.v.el.}) - 7,3$$

Hierin is: V_c de hoeveelheid carbiden en carb.v.el. de hoeveelheid carbidevormende elementen.

De soort carbiden speelt ook een belangrijke rol. Figuur 8.4 geeft de resultaten van RWAT proeven. Bij gelijke V_c waarde kan de optredende slijtage beduidend anders zijn.



figuur 8.4 Invloed van de structuur op de slijtage.
 EC = eutectische carbiden; PC = primaire carbiden;
 M = martensiet (gegevens zijn met de RWAT-proef verkregen)

Overigens wordt in de literatuur voor optimale resultaten een hardheidsverhouding tussen het werkstuk en het abrasief $H_w/H_a > 0,6$ aanbevolen. Deze praktijkwaarde geldt voor alle materialen, zowel opgelast als opgespoten. Bedenk hierbij wel, dat zowel het oppervlak als de deeltjes aanzienlijk harder kunnen worden door de optredende versteviging. Bij austenitisch mangaanstaal wordt van dit principe optimaal gebruikgemaakt.

Wanneer corrosie een rol speelt, zal men moeten zorgen dat het chroomgehalte van de matrix voldoende hoog is. Bij grote drukken of schokken wordt met toenemende belasting gebruikgemaakt van een taaier en minder hard materiaal. Zelfs bij de bovenledeburitische legeringen moet men er op bedacht zijn, dat een grote hoeveelheid carbiden in de structuur niet garant staat voor een grote slijtvastheid. Met HVOF dekragen zijn diverse successen geboekt o.a. met sneldraaiende ventilatoren in een zandrijk medium. Voor de plasmagespoten dekragen blijken fijne geagglomerde poeders het beter te doen dan gegoten en gebroken poeders.

Adhesieve slijtage kan bij gebrekkige smering worden bestreden met een koperlegering. In de praktijk heeft zich hiervoor aluminiumbrons (12% Al) bewezen, dat zowel kan worden opgelast als opgespoten. Bij een onvolkomen smering tussen dit materiaal en koolstofstaal voldoet het ook bij een stotende belasting zeer goed. Voor zuigerveren vinden plasmagespoten Mo-legeringen veel toepassing vanwege hun zeer lage wrijvingscoëfficiënt tegen gietijzer. Belangrijk is dat de oxidefilm die zich eventueel vormt intact blijft. Wordt deze door de hoge belasting verbroken, dan verloopt de slijtage zeer snel. Het beoordelen van deze slijtagevorm en het kiezen van oplossingen is moeilijk en vraagt kennis van tribologie. Daardoor is voor de complexere gevallen al gauw de ondersteuning door een specialist nodig. Enkele algemene richtlijnen zijn echter wel te geven.

Thermisch gespoten lagen hebben voordelen boven opgelaste lagen, omdat hun poriën 'release agents' en smeermiddelen kunnen opnemen die tijdens het langs elkaar bewegen van de vlakken weer langzaam worden vrijgegeven. Chroomoxide heeft een zeer lage wrijvingscoëfficiënt en is chemisch inert, waardoor het uitstekende loopeigenschappen en anti-vreteeigenschappen heeft. Geïmpregneerd met PTFE heeft het zich bewezen als een materiaal voor de zwaarste slijtagebelastingen in de textielindustrie, ook onder zware corrosiebelasting. Als er geen corrosie te verwachten is, zijn haarscheuren in het oppervlak acceptabel, tenzij het tegenloopvlak zacht is, zoals bij afdichtingen. Voor afdichtingen mag het loopvlak niet te ruw zijn, anders ontstaat abrasieve slijtage aan het pakkingmateriaal. Een te glad oppervlak is evenmin gewenst, omdat de pakking dan gaat kleven. In de praktijk blijken oppervlakken met een ruwheid

(Ra) tussen 0,2 en 0,4 μm goed te voldoen. Asbussen behandeld met een wolframcarbide cermet of met chroomoxide geven met de meeste pakkingmaterialen weinig problemen. Aluminiumoxide met 3-13% titaandioxide wordt ook veel gebruikt, maar verlangt vaak een slijtvaster pakking-systeem. Deze deklaag voldoet zeer goed bij pluniers die aan corrosie blootstaan. Voor deze toepassing kan de deklaag relatief glad gespoten worden en kan in veel gevallen ook zonder nabewerking worden gebruikt. De deklaag is minder slijtvast dan puur aluminiumoxide, maar fijner van structuur met minder poreusheid en taaier. Een HVOF variant met 40% titaandioxide blijkt goede loopeigenschappen te hebben.

Erosieve slijtage stelt hoge eisen aan de oppervlaktegesteldheid. Een hoge ruwheid en scherpe overgangen (scheuren) zijn uit den boze. De grootte van de deklaagdeeltjes en de afstand tussen de harde deeltjes bij cermets moeten groter respectievelijk kleiner zijn dan de inslaande deeltjes. Bij pompen die afvalwater verwerken blijkt een HVOF WC/Co deklaag op een martensitisch RVS te voldoen. In slurries met katalysator, zoals in de olie-industrie, werkt dezelfde deklaag goed op interne onderdelen van type 316 RVS. Zowel oplossen als opspuiten is mogelijk. De keuze wordt bepaald door de vereiste laagdikte en hechting. Bij een invalshoek $< 30^\circ$ hebben de gespoten WC-cermets de hoogste slijtvastheid, gevolgd door de insmeltlegeringen en de HVOF gespoten stellietachtigen.

Voor cavitatie zijn diverse oplossingen mogelijk. In figuur 8.5 wordt een aantal materialen opgesomd met een afnemende bestendigheid tegen cavitatie.



figuur 8.5 Overzicht van een aantal materialen in relatie met bestendigheid tegen cavitatie

Slijtagevermoeiing verlangt een martensitisch of austenitisch deklaagmateriaal. Het is belangrijk de laagdikte zo te kiezen, dat de overgangszone buiten het gebied van de grootste schuifspanningen komt te liggen. De kans is anders groot, dat de laag in zijn geheel loslaat. Ook dit toepassingsgebied ligt in de werkingssfeer van de tribologie. Ondersteuning van een specialist en het uitvoeren van testen zijn dan ook essentieel. Voor de zwaarste condities komen alleen oplossen en ingesmolten spuitlagen in aanmerking. De overige deklaagen hebben onvoldoende hechtsterkte.

VRAAG 9

Welke mengvorm is te verwachten?

LEES TER VOORBEREIDING EERST HOOFDSTUK 6.

- antwoord 9a** corrosievermoeiing → zie § 6.2 en de toelichting
antwoord 9b fretting → zie § 6.2 en de toelichting
antwoord 9c erosie corrosie → zie § 6.2 en de toelichting

BEPAAAL DE MENGFORM, SELECTEER MOGELIJKE OPLOSSINGEN EN GA DOOR NAAR VRAAG 10.

toelichting

Corrosievermoeiing is één van de moeilijkst te bestrijden vormen van aantasting. Niet alleen moet de deklaag goed bestand zijn tegen dynamische belastingen, maar ook moet de weerstand tegen corrosie hoog zijn. Aangezien voor dynamische belastingen de hechting met de ondergrond van het grootste belang is, zullen thermisch gespoten deklaagen, behalve de ingesmolten typen, zich niet goed gedragen. Oplossen zal de beste oplossingen geven, waarbij afhankelijk van de corrosievorm, van RVS-typen en nikkelbasislegeringen goede resultaten mogen worden verwacht. Bij het opspuiten is de gebruikte techniek van doorslaggevend betekenis. Insmelten en HVOF technieken geven de beste resultaten. Gezocht moet worden naar lagen met een zo hoog mogelijke waarde voor de elasticiteitsmodulus en de breuktaaiheid. Oplossingen zullen veel onderzoek en ondersteuning van een specialist verlangen.

Fretting kan worden bestreden met kobaltbasislegeringen. Vooral composieten, versterkt met harde molybdeenoxiden (opspuiten), andere oxiden, nitriden en carbiden (oplossen en opspuiten) worden toegepast. Opgelaste en dichte, HVOF gespoten lagen gedragen zich het beste, maar vlamgespoten en ingesmolten NiCrSiB lagen met Mo voldoen ook goed.

Erosie-corrosie wordt op grond van praktische ervaring beter bestreden met keramische materialen dan met metallische thermisch gespoten materialen. Met name Al_2O_3 met of zonder ZrO_2 en ZrO_2 met 2% yttriumoxide voldoen zeer goed. Metallische thermisch gespoten materialen bevatten veel oxiden tussen de deklaagdeeltjes en hebben daardoor voor deze toepassing te weinig onderlinge samenhang. Ingesmolten nikkelchroomlegeringen kunnen nog wel voldoen. In die industrie, waar water aanwezig is, zal corrosie extra problemen opleveren bij slijtage. Een voorbeeld is het transport van slurry. Als erosie-corrosie optreedt, zullen de individuele effecten van het slijtageproces, in het bijzonder wanneer laag chroom houdende legeringen staan blootgesteld aan erosie en abrasieve slijtage, versneld optreden. Wanneer een staal of gietijzer wordt blootgesteld aan lucht na een botsing met een vreemd lichaam die de oxide/hydroxide laag verwijdert, zal onmiddellijk een nieuwe laag worden gevormd. Deze lagen zijn zacht en brokkelig en verlenen de basis geen enkele bescherming. Dit gebeurt niet als chroom tot ca. 12% bij laag koolstoflegeringen wordt toegevoegd en met een toenemend percentage bij een toenemend koolstofgehalte. In dit geval wordt een laag chroomoxide gevormd, die niet alleen chemisch stabiel is, maar ook hard en slijtagebestendig is.

Ruitvormige oplossingen leveren als gevolg van potentiaalverschillen tussen het edele oplasmetaal en het onedele basismetaal slechte resultaten. In veel gevallen kan de corrosie dusdanig overheersen, dat het gebruik van een corrosievast staal te verkiezen is boven een slijtvast materiaal.

VRAAG 10

Zijn scheuren toelaatbaar?

- antwoord 10a** Nee → brosse materialen en materialen met een hoge krimp vallen af; pas op met hoge belastingen
antwoord 10b Ja → alle gevonden materialen zijn toepasbaar

KIES EEN ANTWOORD EN GA DOOR NAAR § 8.3.

DIT IS HET EINDE VAN DE ANALYSE.

toelichting

Scheuren zijn niet altijd te voorkomen en een scheurvrij oppervlak is niet altijd nodig. Hardchroom wordt bijvoorbeeld zeer breed toegepast maar bezit altijd een netwerk van fijne scheurtjes. Bij erosie en dynamische belasting zijn scheuren ongewenst. Bij corrosie kunnen scheuren nog wel worden getolereerd als de deklaag zelf helende eigenschappen bezit of als er een dichte corrosiebestendige bufferlaag onder is aangebracht.

De ledeburitische opaslegeringen zijn niet zonder scheurvorming op te lassen. Deze legeringen worden meestal alleen gebruikt wanneer abrasieve slijtage moet worden bestreden en de belasting weinig stotend is. Bij dit slijtage-type, met uitzondering wanneer het abrasief zeer fijnkorrelig is, zijn scheuren niet van invloed op de slijtweerstand van de legering. Wanneer echter corrosie een rol bij de slijtage speelt, kunnen scheuren niet acceptabel zijn. Ook wanneer dit niet het geval is, en de slijtage niet onder corrosieve omstandigheden plaatsvindt, kan in de periode voor de ingebruikname van het onderdeel in de scheuren toch al corrosie optreden, wanneer dat deel in de buitenlucht is opgeslagen. Deze corrosie kan zo ver gaan, dat het opaslmateriaal van het basismateriaal wordt gedrukt. Een tectyl-behandeling van het opgelaste vlak zal dit probleem groten-deels opheffen.

Noot: Deze vraag is aan het eind van de analyse geplaatst omdat eerst corrosievorm en/of slijtagetype bekend moeten zijn.

VRAAG 11

Is er sprake van een reparatie?

antwoord 11a Ja → ga naar vraag 12

antwoord 11b Nee → ga naar vraag 13

toelichting

Reparaties beperken de oplossing meer dan modificaties, vooral als deze op locatie moeten worden uitgevoerd. De uitvoering is vaak eenmalig en moet een hoge slaagkans hebben. Bij modificaties is het opvangen van tegenvallende resultaten vaak gemakkelijker en kan er meer speelruimte zijn voor experimenten. De vraag is hier met name gesteld om een extra stap in te bouwen, die de aanwezigheid van mogelijke ontwerpfouten detecteert bij ad hoc schade.

VRAAG 12

Is het schadebeeld symmetrisch?

antwoord 12a Ja → ga naar vraag 13.

antwoord 12b Nee → maak eerst zeker dat er geen ontwerp- of afstelfout is gemaakt, ga dan door naar vraag 13

toelichting

Fouten in afstellingen en bewerking openbaren zich vaak door a-symmetrie in draag- en schadebeelden. Ook onbedoelde scheve belastingen leiden tot een dergelijk beeld en zijn meestal terug te voeren op ontwerpfouten; bijvoorbeeld het schranken van geleidingen. Boven de lage normaalkracht, waar in het ontwerp van uit wordt gegaan, zijn onverwacht hoge piekbelastingen aanwezig die kunnen worden opgeheven door de speling en ruwheid aan te passen. Een deklaag heeft pas zin als volledig duidelijk is dat dergelijke fouten niet aan de orde zijn.

VRAAG 13

Welke ruimte is beschikbaar voor een deklaag?

antwoord 13a Geen → probeer een oplossing met andere technieken (opdampen, inchromeren enz.)

antwoord 13b < 1 mm → kies voor opspuiten

antwoord 13c 1-3 mm → opspuiten of oplassen (zie toelichting)

antwoord 13d 3-5 mm → thermisch spuiten of oplassen (zie toelichting)

antwoord 13e > 5 mm → kies voor oplassen, opspuiten voor een beperkt aantal materialen nog mogelijk (zie toelichting)

BEPAALEN DE LAAGDIKTE EN GA DOOR NAAR VRAAG 14.

toelichting

Bij bestaande producten kunnen de afmetingen beperkt zijn. Soms is het mogelijk de afmetingen eerst te verkleinen en daarna de weggenomen materiaaldikte weer aan te brengen als een deklaag. Oplassen verlangt meer ruimte dan opspuiten. In het gebied tussen 1 en 5 mm zijn beide mogelijk, met dien verstande dat bij het opspuiten van keramische materialen de laagdikte beperkt is in verband met de opbouw van inwendige spanningen. Dit kan worden ondervangen door eerst een metallische laag van voldoende dikte aan te brengen (wat vaak toch al nodig is voor een betere hechting). Bij het oplassen van lagen dunner dan ca. 5 mm moet het effect van de opmenging in de gaten worden gehouden. Beneden 5 mm kan het naar verhouding te kostbaar zijn om twee lagen aan te brengen. In dat geval kan beter worden gekozen voor draadspuiten. Zeer dikke lagen zijn goedkoper aan te brengen door oplassen, vooral met hoogrendementsprocessen.

De bovenledeburitische legeringen mogen in het algemeen niet dikker dan twee laslagen zijn. In enkele gevallen, bijvoorbeeld wanneer drukspanningen in het onderdeel aanwezig zijn, zoals bij gebogen platen waarbij de oplassing in de drukzone ligt, zijn drie lagen toegestaan.

VRAAG 14

Is vervormen bij het aanbrengen van de deklaag toegestaan?

antwoord 14a Ja → geen beperkingen

antwoord 14b Nee → kies een proces met een lage warmte-inbreng

KIES EEN ANTWOORD EN GA DOOR NAAR VRAAG 15.

toelichting

Vooraf bij reparaties die op locatie worden uitgevoerd, is nabewerken om vervorming van het werkstuk op te heffen maar heel beperkt mogelijk. Ook als het geen reparatie betreft, kan het noodzakelijk zijn de warmtebelasting minimaal te houden om vervorming te beperken, bijvoorbeeld als een product moeilijk is in te spannen, of alleen lokaal wordt behandeld. De gevoeligheid voor thermische vervorming neemt toe met de complexiteit van de geometrie en de warmte-inbreng. APS (Atmosferisch Plasma Spuiten) is het minst belastende proces, gevolg door laser- en TIG-oplassen. Bij dunwandige, holle cilindrische lichamen zal een veelarmig hulpkruis, geplaatst voor het oplassen, de vervormingen beperken. Dit kruis kan na het spanningsarmgloeien worden verwijderd.

Als de deklaag voldoende dik kan worden aangebracht en nabewerkt, is er in principe geen beperking. De vereiste laagdikte zal met de grootte van het werkstuk en de optredende vervorming toenemen (zie ook de toelichting bij vraag 13).

VRAAG 15

Zijn structuurveranderingen in het basismateriaal acceptabel?

antwoord 15a Ja → geen beperkingen

antwoord 15b Nee → kies een proces met lage warmte-inbreng of voer een warmtebehandeling uit na het coaten

KIES EEN ANTWOORD EN GA DOOR NAAR VRAAG 16.

toelichting

Veredelde materialen kunnen door thermische invloeden hun sterkte verliezen. Is dit niet acceptabel, dan is het noodzakelijk de warmte inbreng te beperken. Maatregelen zoals beschreven voor het beperken van vervormingen werken positief. Als de geometrie en massa van het werkstuk dit toestaan, kan ook achteraf de microstructuur door opnieuw veredelen worden hersteld. Ook kan een warmtebehandeling achteraf nodig zijn om scheuren te voorkomen. De hechting van de deklaag aan het basismateriaal moet in dit geval voldoende zijn. Bij opgelaste en ingesmolten thermisch

gespoten lagen is dit in principe geen probleem. Materialen met een groot verschil in uitzetting kunnen beter worden vermeden, of er moet een meerlaagstechniek worden toegepast. Soms is veredelen en spanningsarmgloeien ook op locatie mogelijk (bijvoorbeeld met verwarmingsbanden). Bij zeer grote werkstukken kan ook ter plekke een oven om het werkstuk worden opgebouwd.

VRAAG 16

Wat is het schadebeeld?

- antwoord 16a** Corrosie → zie § 4.2
antwoord 16b Slijtage → zie § 5.2
antwoord 16c Mengvorm → zie § 6.2
antwoord 16d Bewerkingsfout → zie § 8.3

toelichting

Ad 16a

Bepaal aan de hand van hoofdstuk 4.2 het corrosietype. Het kan nodig zijn het object eerst goed te reinigen om de schade te kunnen typeren. Maak in dat geval eerst foto's om het aantastingsbeeld vast te leggen en vang zo nodig de corrosieproducten op voor nader onderzoek. Kan de aantasting niet worden getypeerd, dan kunnen specialistische handboeken mogelijk helpen of raadpleeg een specialist.

IS HET TYPE BEPAALD, GA DAN NAAR DE TOELICHTING VAN VRAAG 6, BEPAAL DE MOGELIJKE OPLOSSINGEN EN GA HIERMEE VERVOLGENS NAAR § 8.3.

Ad 16b

IS HET TYPE BEPAALD, GA DAN NAAR DE TOELICHTING VAN VRAAG 8, BEPAAL DE MOGELIJKE OPLOSSINGEN EN GA HIERMEE VERVOLGENS NAAR § 8.3.

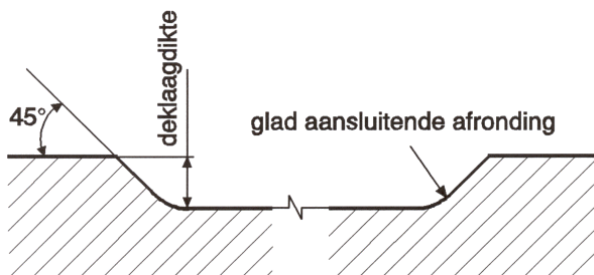
Ad 16c

Bepaal aan de hand van § 6.2 het type mengvorm. Het kan nodig zijn het object eerst goed te reinigen om de schade te kunnen typeren. Maak in dat geval eerst foto's om het beeld vast te leggen en vang zo nodig de slijtageproducten op voor nader onderzoek. Kan de vorm niet worden getypeerd, dan kunnen specialistische handboeken mogelijk helpen of raadpleeg een specialist.

IS HET TYPE BEPAALD, GA DAN NAAR DE TOELICHTING VAN VRAAG 9, BEPAAL DE MOGELIJKE OPLOSSINGEN EN GA HIERMEE VERVOLGENS NAAR § 8.3.

Ad 16d

Voor het herstellen van foute maten, bijvoorbeeld als gevolg van bewerkingsfouten, moeten de opgebrachte lagen bij voorkeur aan de zijkant worden gesteund. De beste methode hiervoor is een kamer in het oppervlak aan te brengen volgens figuur 8.6. Deze uitvoering is zowel voor oplassen als opspuiten geschikt. Prepareer het werkstuk hiervoor en ga naar § 8.3.



figuur 8.6 Voorbewerking voor reparatielaag

8.3 Correctie

Het uitvoeren van de hiervoor behandelde analyse geeft lang niet altijd directe, concrete oplossingen. Wel zal men altijd aanknopingspunten vinden om een niet-gewenste situatie te kunnen corrigeren. In dat geval geeft de analyse

richting aan aanvullend onderzoek, waarna met de onderzoekresultaten de kringloop van figuur 8.1 opnieuw wordt doorlopen.

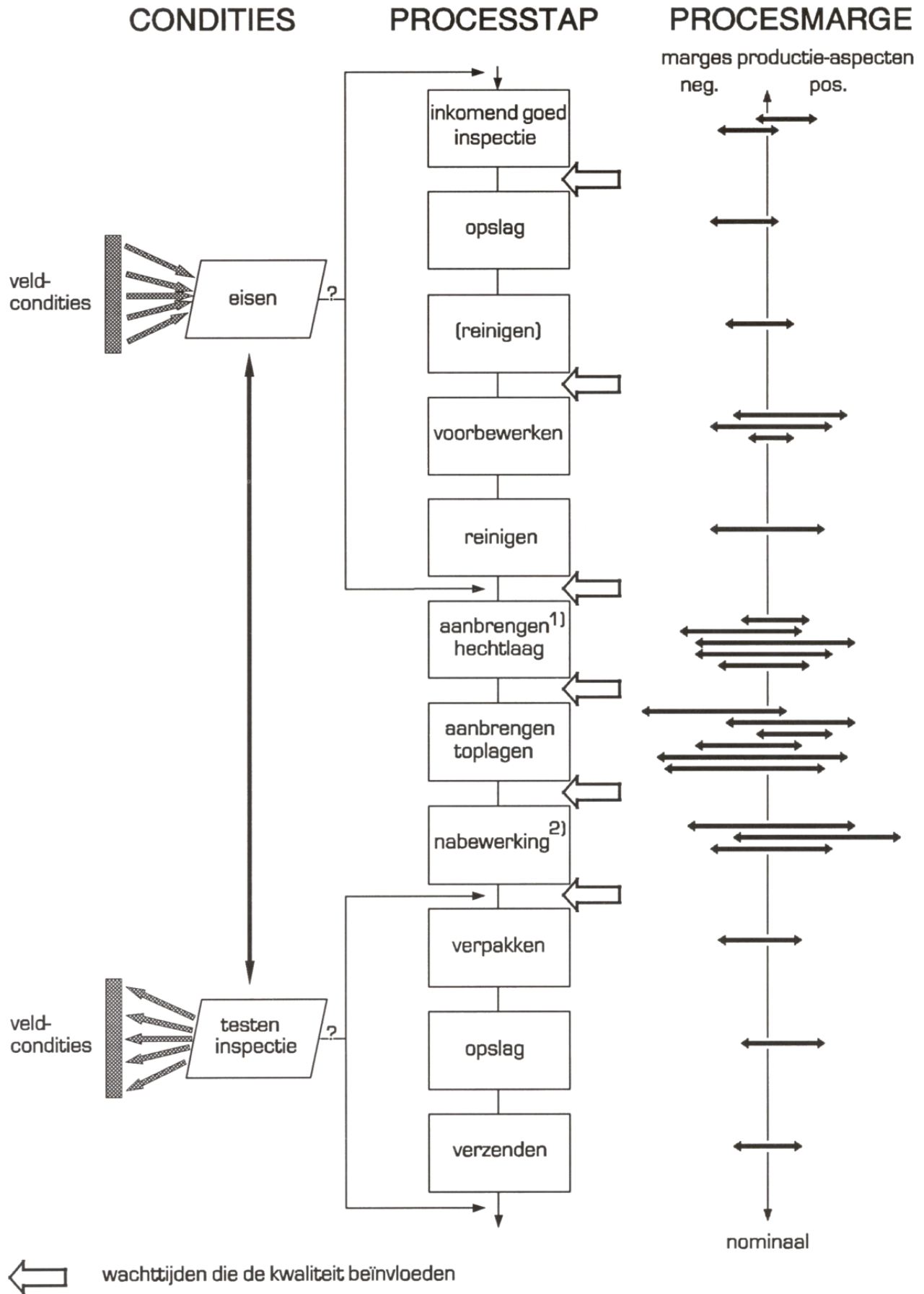
De gevonden oplossingen moeten worden aangebracht op het basismateriaal. Het schema in figuur 8.7 geeft een idee van de factoren die tijdens de fabricage van een deklaag de kwaliteit bepalen. Het voorbeeld geeft een willekeurig overzicht, dat zowel voor het oplassen als het thermisch spuiten aangeeft waarop moet worden gelet. Belangrijk is te ervaren hoe de gevonden oplossing afhangt van het vakmanschap van de uitvoering. Het is dan ook zeker noodzakelijk gevonden oplossingen in detail te bespreken met de mogelijke leverancier. De figuur omvat drie kolommen: condities, processtap en procesmarge.

De kolom 'condities' geeft de kringloop aan tussen eisen en de resultaten van testen en inspecties. De eisen conditioneren het productieproces ten aanzien van de voorbereiding en/of het aanbrengen van de deklaag. Bijvoorbeeld: toepassingen waarbij de hechting kritisch is, verlangen zoveel aandacht ten aanzien van reiniging en voorbereiding, dat men aangetoond wil hebben dat het oppervlak aan bepaalde criteria voldoet, voor men verder kan gaan in het productieproces. Is de toepassing minder kritisch, dan kan worden vertrouwd op het beschikbare vakmanschap zonder dat dit wordt aangetoond. In de laatste stadia van het productieproces worden alle test- en inspectieresultaten geëvalueerd en afgezet tegen de eisen. De eerste gelegenheid voor een volledige evaluatie doet zich voor direct na de nabewerking. Voor kritische toepassingen kan het gewenst zijn ook voor de laatste drie productiestappen controles in te bouwen. Dit is vooral belangrijk als er veel tijd verloopt, voordat het product, nadat het van een deklaag is voorzien, wordt gebruikt. De invloed van verpakking, opslag en transport over een langere termijn wordt vaak onderschat.

De kolom 'processtap' spreekt voor zich. De pijlen geven aan waar wachttijden kunnen optreden. De factor tijd heeft altijd invloed op de kwaliteit. Het is dus zinvol op de plaats van de pijlen na te gaan of een test noodzakelijk is, om te bewijzen dat deze invloed niet onacceptabel is.

De laatste kolom is illustratief. De kolom maakt duidelijk, dat elke productiehandeling marges kent. Het aantal kritische variabelen en de marge op de waarde ervan, verschilt per productiestap. In de illustratie is het aantal pijlen willekeurig. Er is alleen bedoeld aan te geven bij welke productiestappen meer kritische variabelen te verwachten zijn dan bij anderen. Een acceptabele eindkwaliteit ontstaat alleen als alle stappen vallen binnen een band rond de nominale waarde, die alle marges met elkaar kan verbinden. In de illustratie is het proces zo kritisch dat dit is gereduceerd tot een enkele lijn. Bedoeld is aan te geven dat een verkeerde ligging van een enkele parametermarge het gehele productieproces onhanteerbaar kritisch kan maken. In de praktijk zal men streven naar een voor de productiesituatie geoptimaliseerde ligging van de marges, waardoor een zo breed mogelijke werkbare band ontstaat. De marges kunnen uit productie-ervaringen worden herleid, de positie binnen de marges door ingangs- en productiecontroles. Leveranciers die volgens ISO 9000 werken zullen weinig problemen hebben hun afnemers dit te laten zien. Het bezit van ISO 9000 is echter beslist niet noodzakelijk om afnemers te overtuigen, mits de relevante informatie beschikbaar is.

Voor met het bereikte resultaat verder wordt gegaan in de kringloop van figuur 8.1 om de oplossing te toetsen aan de oorspronkelijke of bijgestelde ontwerpvoorwaarden, moeten nog de volgende vragen vermeld in tabel 8.1 worden beantwoord.



1) Bij oplossen facultatief

2) Mechanische en thermische nabehandelingen

figuur 8.7 Productieproces deklaag - kwaliteitsaspecten

tabel 8.1 Overzicht van te beantwoorden vragen

1. **Heeft de oplossing zich eerder bewezen?**
 - (JA) **Is het een standaardoplossing?**
 - (JA) **Zijn de gebruikte materialen in overeenstemming met een specificatie?**
 - (JA) OPLOSSING BEREIKT.
 - (NEE) Maak duidelijke afspraken met de leverancier. Oplossing bereikt.
 - (NEE) Tracht de condities te achterhalen en vergelijk deze met de eigen omstandigheden.
 - Zijn de gevonden verschillen groot?**
 - (JA) Testen noodzakelijk. Ga verder met vraag 2.
 - (NEE) Oplossing waarschijnlijk bereikt. Voer een praktijktest uit en herhaal de analyse van § 8.2 als er schade ontstaat. Als er geen schade in de test ontstaat is de oplossing bereikt.
 - (NEE) Testen van de oplossing is noodzakelijk. Ga verder met vraag 2.
2. **Voldoet de oplossing nog aan de oorspronkelijke ontwerpisen?**
 - (JA) Voer de testen uit. Bij schade analyse herhalen. Documenteer de resultaten en ga door naar vraag 3.
 - (NEE) Pas het ontwerp aan. Raadpleeg hiervoor zo nodig leveranciers en/of specialisten. Voer daarna de testen uit. Bij schade analyse herhalen. Documenteer de resultaten en ga verder met vraag 3.
3. **Zijn de testresultaten in orde en zijn de bedrijfscondities zoals oorspronkelijk voorzien?**
 - (JA) OPLOSSING BEREIKT.
 - (NEE) Analyseer de condities en vergelijk deze met gegevens van andere toepassingen. Raadpleeg zo nodig leveranciers en/of specialisten om vast te stellen welk risico wordt gelopen, zeker als ook het ontwerp moest worden aangepast. Voer aanvullende testen uit en voer met de resultaten de analyse van § 8.2 opnieuw uit. Indien uit alle testresultaten voldoende vertrouwen is ontstaan, is de oplossing bereikt.

Toelichting

De gevonden oplossing moet altijd worden gewogen naar bekendheid en ervaring. Hiermee wordt bedoeld dat men moet trachten na te gaan hoe representatief de gevonden oplossing is voor de eigen situatie. Daar komt bij dat ook alle factoren die bij de realisatie van belang zijn, moeten worden beoordeeld. Dit vindt bijvoorbeeld zijn weerslag in de ervaring van een leverancier met het aanbrengen van de gevonden deklaag.

In de analyse werd de keuze van de oplossingen primair bepaald op het type corrosie of slijtage. Daarnaast spelen ook nog andere factoren een belangrijke rol, zoals de:

- bewerkbaarheid;
- verwerkbaarheid.

In voorkomende gevallen bij nieuwe toepassingen kunnen deze aspecten zelfs doorslaggevend zijn. Naar de mening van de auteur moet echter het aanleggen van prijsbepalende criteria in principe pas plaatsvinden, nadat alle technisch haalbare oplossingen zijn gevonden.

1 Bewerkbaarheid

De bewerkbaarheid is een belangrijke kostenbepalende factor tijdens de realisatie. Veel slijtvaste materialen zijn zo hard, dat de vereiste ruwheid alleen door een dure (diamant)slijpbewerking kan worden bereikt. Bij het afwegen van de bewerkingskosten voor de gevonden oplossingen kan blijken dat de oplossing economisch niet verantwoord kan worden. Dit betekent dat er geen oplossing is. Om dit te herkennen is het noodzakelijk in het schema van figuur 3.2 economische criteria op te nemen. Na de (theoretisch) uitgevoerde correctie worden de eigenschappen van het systeem dan ook getoetst aan de economische randvoorwaarden. Alleen hiermee is het mogelijk een oordeel zuiver te houden en de reden (te duur!) om een oplossing te verwerpen ook later terug te kunnen vinden. Het zal nu meteen duidelijk zijn dat men, om toch tot een werkbaar oplossing te komen, de oorspronkelijke technische eisen moet verlagen, waarbij men zich moet realiseren dat dit in de meeste gevallen ook kortere levensduurverwachting betekent. Deze situatie doet zich vaak voor bij reparaties, waar de mogelijkheden voor nabewerking, bijvoorbeeld vanwege de omvang van een object, beperkt zijn.

De materialen met een ledeburitische structuur zijn met de gebruikelijke verspanende technieken niet bewerkbaar. De enige mogelijkheid om het oppervlak te bewerken is schuren en slijpen. Bij reparaties van de opgelaste

laag kan men ook elektrisch gutsen. Keramische materialen zijn alleen nog te slijpen met diamant.

2 Verwerkbaarheid

Niet alle materialen zijn voor een gekozen proces verkrijgbaar. De gewenste samenstelling zou bijvoorbeeld een dermate hoog gehalte aan legeringselementen moeten bevatten, dat dit niet in de vulling van een gevulde draad of de bekleding van beklede elektroden kan worden opgenomen. Een massieve draad kan in verband met de brosheid niet als een ledeburitische legering worden geleverd. Bij het onder poeder en het elektroslaklassen kan men terugvallen op gesinterde band. Men kan nagenoeg alle gewenste samenstellingen verkrijgen in gesinterde band. Ook bij het thermisch spuiten kunnen zich dergelijke beperkingen voordoen.

De verwerkbaarheid heeft dus grote invloed op de proceskeuze en daarmee ook op de kosten. Het kan blijken dat een noodzakelijk proces niet (op tijd) beschikbaar is. De verwerkingsaspecten kunnen dus ook betekenen dat de gevonden oplossing niet voldoet en de oorspronkelijke uitgangspunten moeten worden herzien. In dit geval wordt geadviseerd de afweging te herleiden tot een kostenafweging, waarmee toetsing aan figuur 3.2 mogelijk blijft. Een (te) late levering kost geld maar kan opwegen tegen het verlies van levensduur als een minder optimaal proces moet worden gekozen.

Hoofdstuk 9

Materialen en materiaalkeuze

9.1 Overzichten

Bij de selectie van materialen is het voornaamste doel te komen tot een optimale oplossing voor iedere situatie. Een goed keuzeproces beslaat een aantal stappen:

- ▶ bepaling van de bedrijfsomstandigheden en de gewenste levensduur;
- ▶ evaluatie van voorafgaande ervaringen onder gelijke omstandigheden;
- ▶ evaluatie van de bruikbaarheid van de beschikbare legeringen voor de praktijkomstandigheden;
- ▶ selectie, bij voorkeur met ondersteuning door praktijkproeven, van de meest economische laag voor de toepassing, waarbij rekening wordt gehouden met bijkomende factoren.

De eerste van deze stappen is vaak het moeilijkst, omdat het de vaststelling van het type en de gecompliceerdheid van het slijtage- of corrosiepatroon inhoudt. Niettegenstaande dat moet het de start zijn voor de selectie van een materiaal. Bestudering van de aangetaste onderdelen kan waardevolle informatie opleveren. De voorgaande hoofdstukken geven hiervoor achtergrondinformatie. De tweede en derde stap moeten theoretische en praktische gebruiksgegevens hiervoor opleveren. Vaak wordt de vierde stap genomen zonder praktijkproeven uit te voeren, vooral wanneer tijd en omstandigheden dit relatief moeilijk maken. Meestal wordt dan vertrouwd op bedrijfservaringen om de keuze te bevestigen of te wijzigen door alsnog uitvoeren van proeven.

Het keuzeproces, dat een directe invoering van een legering aan de hand van de omstandigheden aan het oppervlak mogelijk maakt, moet ook aandacht schenken aan andere factoren, zoals:

- ▶ het basismateriaal;
- ▶ de warmtebehandelingen of bewerkingsmethoden;
- ▶ de verkrijgbaarheid van de legeringen, de uitrusting, het personeel en de kosten.

In het kader van deze publicatie hangt de keuze van het materiaal vooral af van het type corrosie en/of slijtage. Secundair spelen een belangrijke rol:

- ▶ bewerkbaarheid;
- ▶ ontlaatvastheid in verband met warmtebehandeling;
- ▶ aanwezigheid van scheuren;
- ▶ verwerkbaarheid;
- ▶ temperatuurbestendigheid.

Voor de derde stap zijn de materialen in deze publicatie gesorteerd op samenstelling, waarbij globale informatie over de eigenschappen bij de beschrijvingen is opgenomen. De voor het zoeken handigste rubricering zou echter op eigenschappen zijn. De meeste leveranciers geven echter alleen zeer summere informatie op dit gebied. Wat zij wel aangeven is het toepassingsgebied. Vaak zijn de materialen in hun documentatie dan ook op toepassingsgebied ingedeeld. In deze publicatie wordt daarom volstaan met een korte opsomming.

De chemische samenstelling geeft een indicatie van de te verwachten eigenschappen. Omdat ook geringe hoeveelheden van bepaalde legeringselementen al een duidelijke invloed kunnen hebben, geeft tabel 9.1 eerst een overzicht van de effecten van de belangrijkste legeringselementen. Hiermee is het mogelijk een grove voorselectie te maken, die zowel voor oplassen als thermisch spuiten bruikbaar is. Bedenk hierbij wel dat verbindingen (oxiden, carbiden, silicaten) in belangrijke mate kunnen afwijken van de eigenschappen van hun samenstellende elementen. Geringe hoeveelheden van een element zijn van betekenis voor het onderdrukken of juist stimuleren van structuurbestanddelen. Zo kan de vorming van austeniet worden bevorderd door nikkel, of juist worden onderdrukt door chroom. Chroom

bevordert ook de corrosie- en oxidatiebestendigheid door de opbouw van een dunne oxidehuid, die door een geringe hoeveelheid aluminium of een zeldzame aarde-element als yttrium wordt versterkt.

9.2 Materialen voor oplassen

De vorm waarin de oplasmaterialen vervaardigd worden is van belang voor de samenstelling van de uiteindelijke deklaag. In het algemeen zijn de volgende vormen maatgevend:

Massieve draad (kort en niet gehaspeld)

Lasprocessen: Autogeen en TIG

Leveringsvorm:

- ▶ Getrokken: In verband met de trekeigenschappen zal deze draad een beperking ondervinden in de chemische samenstelling of anderszins alleen tegen hoge kosten kunnen worden vervaardigd vanwege de benodigde tussengloeelingen en reinigingsprocedures.
- ▶ Gegoten: Kan tot zeer hoge legeringniveaus worden vervaardigd. Door de gevoeligheid voor krimpspanningen en de ontgassingsproblemen tijdens het gieten zijn de staven slechts in beperkte lengten en diktematen verkrijgbaar. (CoCrW-staven worden tot 2 m lengte en 8 mm diameter gegoten. Ze worden voor het automatisch TIG-lassen gebruikt.
- ▶ Gesinterd: Kan tot zeer hoge legeringniveaus worden vervaardigd. Lengten en diameters van de staven zijn sterk afhankelijk van de procesfaciliteiten.

Massieve draad (haspelbaar)

Lasprocessen: MIG/MAG, OP, TIG-gemechaniseerd, bmbe (als kerndraad voor beklede elektroden)

Leveringsvorm:

- ▶ Getrokken: Als gevolg van de vereiste trekeigenschappen en de eis om deze draden te kunnen wikkelen, zal deze draad een beperking ondervinden in de chemische samenstelling. Bij toepassing van deze draad als kerndraad voor beklede elektroden kunnen echter, via toevoegingen aan de bekleding, zeer hoge legeringniveaus (> 60%) in de neersmelt worden gerealiseerd.
- ▶ Kerndraad + bindmiddel: Op een flexibele kerndraad, bijv. nikkel, kunnen met behulp van een bindmiddel, wolframcarbiden worden aangebracht. Met dit draadsysteem kunnen carbide-volumepercentages tot 70% worden gerealiseerd.

Gevulde draad (haspelbaar)

Lasprocessen: MIG/MAG, TIG, OP

Leveringsvorm:

- ▶ Gewalst en getrokken: De vereiste bewerkingseigenschappen van de strip waaruit deze gevulde draad wordt vervaardigd, namelijk verwalsbaarheid, vouwbaarheid en de mogelijkheid tot trekken, beperkt de samenstelling van de strip. Door de vulling met gelegeerd poeder, kan echter alsnog, binnen zekere grenzen, een legeringsniveau worden gerealiseerd dat, afhankelijk van de uiteindelijke gewenste materiaaldiameter, kan reiken tot 30 - 40%.

Band/strip (haspelbaar)

Lasprocessen: OP en ES

Leveringsvorm:

- ▶ Massieve band: De verwalsbaarheid beperkt de samenstelling van het band. Laaggelegeerd materiaal, de standaard corrosievaste staalsoorten en de nikkellegeringen zijn goed walsbaar.
- ▶ Gevulde band: Worden legeringselementen vereist die het walsen van een massieve band onmogelijk maken, dan kan worden uitgegaan van een gevulde draad als basis en deze plat walsen.
- ▶ Gesinterde band: Via een sinterproces kunnen de vereiste legeringselementen tot een strip worden gevormd. Hiermee kan een nagenoeg onbeperkt scala aan banden worden vervaardigd.

tabel 9.1 Invloed van chemische elementen in technische legeringen

element	effect
Al	chemisch onedel, beschermt de ondergrond door preferent op te lossen (galvanische bescherming). Verhoogt de oxidatiebestendigheid. Vormt met stikstof harde nitriden die de slijtvastheid verhogen. Met zuurstof vormt het een technisch zeer belangrijk, breed toepasbaar keramisch materiaal.
B	verhoogt reeds bij kleine hoeveelheid de sterkte en hardheid ten koste van de corrosiebestendigheid. Verbeterd sterk de warmvastheid van austenitische materialen.
C	verhoogt de slijtvastheid door de vorming van carbiden. Vergroot de scheur gevoeligheid bij lassen en vermindert de bewerkbaarheid. Heeft op zich geen invloed op de corrosiebestendigheid maar bij de vorming van carbiden moet hier wel rekening mee worden gehouden door onttrekking van bijvoorbeeld chroom aan de matrix.
Ce, Hf, Y	zeldzame aarden. Verhogen de dichtheid en stabiliteit van oxidelagen en daarmee de oxidatiebestendigheid.
Co	vormt geen carbiden, maar verhoogt de warmvastheid en wordt daarom veel toegepast met Ni in legeringen voor hoge temperatuur. De basislegering met chroom heeft een hoge weerstand tegen veel corrosieve milieu's en heeft een hoge slijtvastheid en vormt met toevoeging van koolstof, wolfram en molybdeen de basis voor een serie technisch zeer belangrijke deklaagmaterialen (stellieten). Vooral voor hoge temperaturen.
Cr	verhoogt in oplossing sterk de corrosiebestendigheid van legeringen in oxiderend milieu. Verbeterd de weerstand tegen lokale aantasting (put- en spleetcorrosie). In aanwezigheid van koolstof worden carbiden gevormd, die de slijtvastheid verhogen, maar de corrosiebestendigheid verminderen. Bij hoge temperatuur daarentegen wordt wel door de combinatie met zuurstof de oxidatiebestendigheid verbeterd. In een nikkel-chroom matrix vormen zij technisch belangrijke cermets voor slijtagebestrijding in corrosieve omgeving. Ook de warmvastheid en de oxidatiebestendigheid worden gunstig beïnvloed. Chroom heeft een lage uitzettingscoëfficiënt en warmtegeleiding, waardoor bij steile thermische gradiënten gemakkelijk scheuren ontstaan.
Cu	verbetert de weerstand tegen aantasting in maritiem milieu, zwavelzuur en waterstoffluoride bevattende zure milieu's. Vormt de basis voor lagermaterialen. Technisch belangrijk zijn koperlegeringen met een open structuur voor zelfsmurende lagers.
Mn	vormt harde microstructuren (martensiet) en maakt bij gehalten boven 12% samen met koolstof staal austenitisch. Door koudvervorming zeer geschikt voor deklagen voor stotende belasting.
Mo	kan in een aantal gevallen chroom of wolfram vervangen en vormt met andere elementen complexe, stabiele carbiden. Verhoogt verder de warmvastheid, maar vermindert de oxidatiebestendigheid. Sterke verbetering van de corrosieweerstand in reducerend milieu. Vermindert de gevoeligheid voor put- en spleetcorrosie en halogeen spanningscorrosie. Verhoogt de sterkte door oplosharding. Technisch zeer belangrijk materiaal voor het bestrijden van vreten van langs elkaar bewegende vlakken.
N	het element kan vermindering van de taaiheid door uitscheidingen veroorzaken, veroudering en blauwbronsheid tot gevolg hebben. Als legeringselement vergroot dit het γ -gebied en stabiliseert het austeniet. Bij austenitische staalsoorten verhoogt het de sterkte-eigenschappen: in het bijzonder de rekgrens en de sterkte bij hogere temperaturen. In de vorm van nitride-uitscheidingen in martensitisch RVS kan het koolstof vervangen.
Nb Ta	komen meestal samen voor. Zeer sterke carbidevormers. Verbrost boven 300 °C in aanwezigheid van waterstof, zuurstof, stikstof en/of koolstof. Sterke weerstand tegen corrosie door o.a. geconcentreerde zuren, vloeibare metalen, metaaldampen en gesmolten zouten.
Ni	sterke verbetering van de corrosievastheid in zwak reducerende en alkalische milieu's. Vermindert sterk de gevoeligheid voor halogeen-spanningscorrosie en verbetert de thermische stabiliteit. Vormt een goede basis voor het maken van legeringen met uiteenlopende eigenschappen.
Si	verbetert de oxidatiebestendigheid door vorming van een dichte oxidehuid. In combinatie met molybdeen vormt het een intermetallische verbinding die zelfhelende eigenschappen bezit bij oxidatie bij temperaturen boven 1100 °C. Vormt met stikstof en koolstof technisch belangrijke keramische materialen.
Ti	verbetert de weerstand tegen corrosie, vooral in oxiderende en chloridehoudende milieu's. Sterke carbidevormer.
V	verfijnt de primaire korrels en daarmee de gietstructuur. Is een sterke carbidevormer, waardoor de weerstand voor abrasieve slijtage, de snijeigenschappen en de warmvastheid verhoogd worden. Het verkleint het γ -gebied.
W	effecten vergelijkbaar met molybdeen, maar minder sterk. Heeft een sterk negatieve invloed op de thermische stabiliteit. Grote invloed op de sterkte door oplosharding. Vormt een carbide, dat opgenomen in een metallische matrix (meestal kobalt), technisch belangrijk cermets voor slijtagebestrijding oplevert.
Zn	vormt de meest economische bescherming van staal tegen atmosferische corrosie. Effect vergelijkbaar met aluminium. Wordt ook hiermee samen gebruikt in agressievere industriële en maritieme milieus.
Zr	grote weerstand tegen corrosie in sterk zure en alkalische milieu's, zouten, zeewater. Heeft een grote affiniteit met zuurstof en wordt daarom gebruikt voor hoog temperatuurbestendig keramisch materiaal.

Buis (niet haspelbaar)

Lasprocessen: Autogeen, TIG, Bmbe
Leveringsvorm:

- Buismateriaal, zowel op austenitische als op ferritische basis, wordt gevuld met carbiden in poedervorm. Afhankelijk van de korrelgrootte van het poeder kan een variatie aan buisdiameters worden geleverd. Bij het neersmelten dient het buismateriaal als bindmiddel voor de op te lassen laag. Het buismateriaal kan ook worden voorzien van een bekleding, zodat een gevulde laselektrode wordt verkregen.

Gevuld koord (haspelbaar)

Lasprocessen: Autogeen, TIG
In een flexibel kunststof koord met een diameter tussen 5 en 8 mm zijn wolframcarbiden in een nikkelbasis opgenomen. Het wolframcarbidegehalte is > 60%. Het wordt op spoelen van 20 kg geleverd.

Opmerking:

Bij processen zoals OP, ES en hun varianten is ook het gebruikte poeder bepalend voor de eigenschappen van de

neersmelt. Overleg met de lastoevoegmateriaalleverancier is dan ook onontbeerlijk.

9.2.1 Materiaaloverzicht

De legeringen, geschikt voor het aanbrengen via de verschillende oplasttechnieken van bedekkinglagen, zijn opgenomen in de norm NEN-EN 14700: 2005: "Welding consumables - Welding consumables for hardfacing". Deze norm is op het moment van opstellen van deze voorlichtingspublicatie (2009) nog alleen in de Engelse tekst verkrijgbaar.

Volgens deze norm kan een aanduiding zijn: S Fe7.

Deze aanduiding houdt in:

- S: aanduiding van de vorm van toevoegmateriaal, in dit geval solid wire (massieve lasdraad);
- Fe7: legering op basis van ijzer.

In deze norm is een serie tabellen opgenomen, weergevende:

- vorm van het toevoegmateriaal;
- chemische samenstelling van de typen toevoegmaterialen;
- toepassingsgebieden van de verschillende typen toevoegmaterialen;

- ▶ vorm van het toevoegmateriaal en het proces waar het kan worden gebruikt;
- ▶ voorbeelden van toepassing van de verschillende legeringen.

Het voert te ver alle tabellen hier op te nemen; wel wordt hier vermeld:

- ▶ de aanduiding van de vorm van het toevoegmateriaal (tabel 9.2)
- ▶ onderverdeling hoofdgroepen legeringen (tabel 9.3)
- ▶ toepassingsmatrix op laslegeringen (figuur 9.1)

over veel ervaring en zullen hun klanten naar behoren adviseren. Toch is het van belang om ook zelf te kunnen beoordelen wat voor een specifieke toepassing mogelijk en nodig is, omdat materialen met dezelfde chemische samenstelling van verschillende leveranciers verschillende eigenschappen kunnen hebben. Voor meer en uitgebreide informatie over de toevoegmaterialen en legeringen voor het thermisch spuiten wordt verwezen naar VM 95 "Thermisch spuiten".

tabel 9.2 Aanduiding vorm product volgens EN 14700

symbool	productvorm
E	Beklede elektrode
S	Massieve lasdraad
T	Gevulde draad en gevulde staaf
R	Gegoten staaf
B	Massieve band
C	Gesinterde staaf, gevulde band en gesinterde band
P	Metaal poeder

tabel 9.3 Indeling legeringen volgens EN 14700 op basis van het hoofdlegeringselement

Aanduiding	Legering op basis van
Fe1 tot en met Fe20	ijzer
Ni1 tot en met Ni20	nikkel
Co1 tot en met Co3	kobalt
Cu1	koper
Al1	Aluminium
Cr1	chroom

Uitgaande van de verschillende legeringen en hun structuurvorm, zoals ingedeeld in de norm EN 14700, kan een matrix worden opgesteld. In deze matrix is weergegeven welke structuurvorm bestand is tegen een bepaalde vorm van slijtage, corrosie en bijbehorende belasting. In figuur 9.1 is deze matrix weergegeven.

laag ← weerstand tegen abrasieve slijtage → hoog			
austenitische Mn- en Cr-Mn stalen	laag gelegeerde stalen	wolframcarbide composieten	laag
martensitische roestvaste stalen			↑
austenitische Cr-Ni stalen	snelstalen	austenitische en martensitische hoog Cr stalen	weerstand tegen hoge temp. en corrosie
legeringen op basis van Co en Ni			↓
laag ← weerstand tegen stootbelastingen → hoog			hoog

figuur 9.1 Overzicht toepassingsgebied op lasmaterialen

9.3 Materialen voor thermisch spuiten

Het aanbod is zeer breed. Niet alleen door de diversiteit in vorm (draad, poeder) maar ook door het feit, dat met het elektrisch draadspuiten combinaties kunnen worden gemaakt, waarmee in feite iedere gewenste (pseudo)legering te maken is. Bij de poeders heeft men te maken met grote verschillen in korrelvorm, -grootte en -verdeling die het gevolg zijn van de verschillende poederfabricageprocessen. Een complicerende factor is het feit, dat leveranciers onder een zelfde merknaam poeders, met verschillende processen gemaakt, op de markt kunnen brengen. Het zal duidelijk zijn dat het niet eenvoudig is om hierin een weg te vinden. De meeste leveranciers beschikken echter

Hoofdstuk 10

Oplas- en thermische spuitprocessen

10.1 Oplasprocessen

Voor het oplassen zijn de keuzecriteria in verband met de beschikbaarheid van het lastoevoegmateriaal anders dan bij het verbindingslassen. Zo zal men die lasprocessen kiezen, die een grote neersmelt combineren aan een geringe en met name goed beheersbare opmenging met het onderliggende materiaal. Uiteraard is een en ander ook afhankelijk van de grootte en de geometrie van het werkstuk. De meest hiervoor in aanmerking komende lasprocessen (tussen haakjes staan de procesaanduidingen volgens NEN ISO 4063) zijn daarom:

- OP-draadlassen (121);
- OP-bandlassen (122);
- ES-lassen met band (73);
- MIG/MAG lassen (131, 135, 136);
- Plasmalassen (150);
- Poeder plasmalassen (PPAW) (152);
- Laser oplassen (52).

Als de opmenging te groot is, of als (zeer) dunne lagen moeten worden gerealiseerd, kunnen andere processen, zoals thermisch spuiten, galvanotechnieken, opdampen (PVD/CVD) en lasercladden, hierin voorzien.

Ondanks het feit dat het booglassen met beklede elektrode (111) geen hoge neersmeltsnelheid heeft, zijn er toch uitgebreide mogelijkheden voor dit proces. Zeker daar waar reparaties ter plekke moeten worden uitgevoerd. De oorzaak is de grote flexibiliteit van en het grote aanbod aan oplastoevoegmaterialen voor dit proces. Ook wordt het autogeenlassen (311) en het TIG-lassen (141) voor de wat kleinere werkstukken nog steeds toegepast.

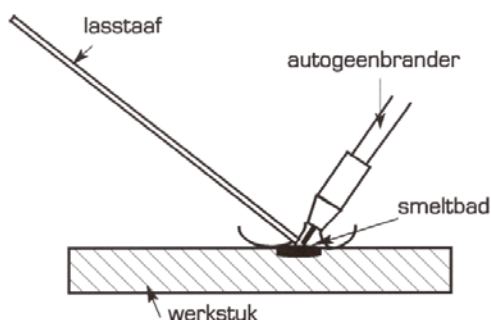
Voor de fabricage van beklede platen past men ook het explosiellenassen toe (441).

In het onderstaande wordt iets dieper op de verschillende lasprocessen ingegaan.

Bij het lassen kan het nodig zijn om voorzorgsmaatregelen te nemen. Deze maatregelen kunnen invloed hebben op de mechanische eigenschappen van het basismateriaal. Dit is beschreven in hoofdstuk 11. Lees dit hoofdstuk aandachtig door, voordat tot het aanbrengen van een oppervlaktelaag wordt overgegaan. Het kan namelijk zijn dat naar aanleiding hiervan een ander proces gekozen moet worden.

10.1.1 Autogeenlassen

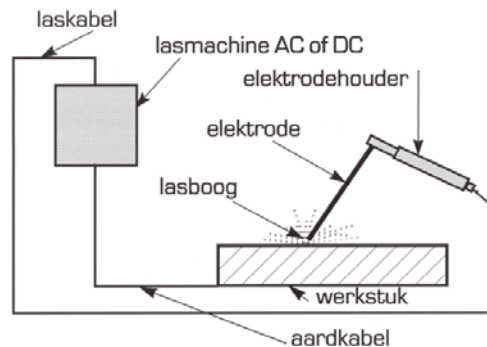
Bij het autogeenlassen (zie figuur 10.1) wordt zowel het werkstuk als het op te lassen materiaal tot smelten gebracht door middel van een autogene vlam (verbranding acetyleen met zuurstof). Men kan in vele posities lassen maar de neersmeltsnelheid is laag. Met dit proces kan men ook "opsolderen", waarbij slijtvaste wolframcarbiden worden ingesmolten in bijvoorbeeld een bronzematrix op een koolstofstalen ondergrond. Hierbij smelten de ondergrond en de carbiden nauwelijks; wel echter het "bindend materiaal" waarin de carbiden aanwezig zijn.



figuur 10.1 Het principe van autogeen oplassen

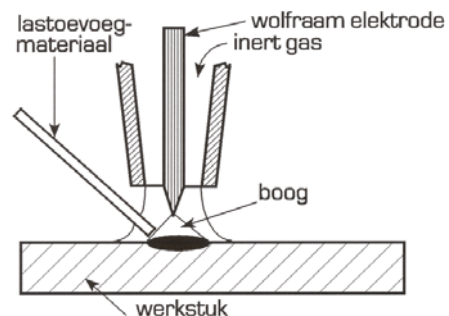
10.1.2 Elektrische booglasprocessen

Het booglassen met beklede elektrode (zie figuur 10.2) wordt uitgevoerd met een afsmeltende elektrode van de gewenste opaslegering. De bekleding van de elektrode zorgt voor het beschermgas en de benodigde afschermende slak. Bovendien kan men in de bekleding legeringselementen opnemen. Het is een goedkope en eenvoudige manier van oplassen. Het proces is zeer flexibel, men kan in veel posities (afhankelijk van het soort opasmateriaal) materiaal opbrengen. De opmenging met het basismateriaal kan relatief groot zijn en de neersmeltsnelheid is in het algemeen laag.



figuur 10.2 Het principe van oplassen door middel van booglassen met beklede elektrode

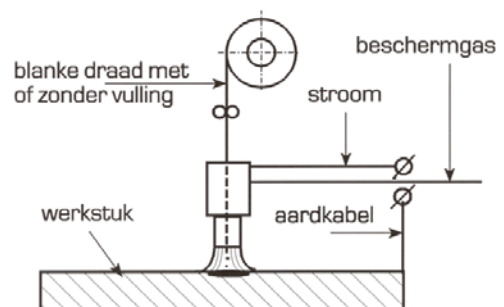
Het TIG-oplassen (zie figuur 10.3) wordt uitgevoerd door een boog te onderhouden tussen een niet-afsmeltende elektrode van wolfram of een wolframlegering en het op te lassen werkstuk. Het opasmateriaal en het beschermgas worden gescheiden toegevoegd. Het proces is geschikt voor zuiver en nauwkeurig opaswerk of reparaties van bijvoorbeeld kleine porositeiten in de deklaag. De neersmeltsnelheid is laag en de opmenging gering.



figuur 10.3 Het principe van TIG-oplassen

MIG-/MAG-lassen met massieve of gevulde lasdraad (zie figuur 10.4). Het oplassen met niet-ijzer legeringen gebeurt onder bescherming van een inert gas (MIG; 131). Bij het MAG-lassen (135) gebruikt men een actief gas. Afhankelijk van de druppelovergang onderscheidt men:

- kortsluitbooglassen (KB);
- openbooglassen (OB);
- pulsbooglassen.



figuur 10.4 Het principe van oplassen door middel van MIG-/MAG-lassen

Het pulsbooglassen wordt veel toegepast voor roestvast staal en non-ferro legeringen. Het openbooglassen (vooral met gevulde draden) wordt veelal gebruikt voor het oplassen van slijtvaste lagen. Men maakt hierbij onderscheid tussen:

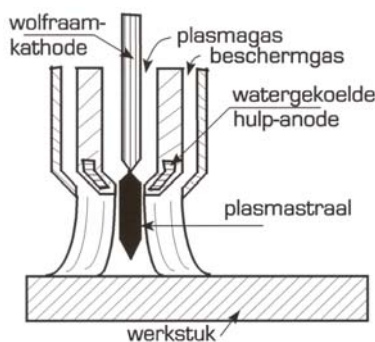
- ▶ lassen onder gasbescherming (MAG; 136);
- ▶ lassen zonder gasbescherming met gasloze draden (114).

Voordelen van gasloze draden zijn:

- ▶ eenvoudige apparatuur;
- ▶ ongevoelig voor tocht en wind;
- ▶ hogere neersmelt door een grotere uitsteeklengte.

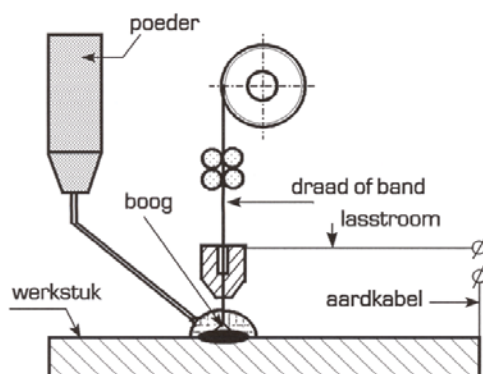
Als nadeel van deze draden moet de grote hoeveelheid ontwikkelde lasrook worden genoemd.

Plasma oplassen (zie figuur 10.5) lijkt op het TIG-proces, maar nu zorgt een geïoniseerd gas, het plasma, voor de benodigde smeltwarmte, die op kan lopen tot 15.000 °C. Het proces leent zich bij uitstek voor het zeer nauwkeurig oplassen van kleine onderdelen.



figuur 10.5 Het principe van plasma oplassen

Onder poeder oplassen met draad of band (zie figuur 10.6) wordt uitgevoerd met een afsmeltende elektrode bestaande uit het opslasmateriaal in de vorm van draad of band. Het smeltbad wordt afgeschermd met een laag poeder dat, naast de afscherming, het lasproces actief kan beïnvloeden. De neersmeltsnelheid is hoog en kan door het zogenaamde I^2R -effect tot zeer hoog worden opgevoerd. Het kan slechts onder de hand worden uitgevoerd. De vermenging met het basismateriaal is, vanwege de hoge stroomsterkte die wordt toegepast, hoog.



figuur 10.6 Het principe van onder poeder lassen

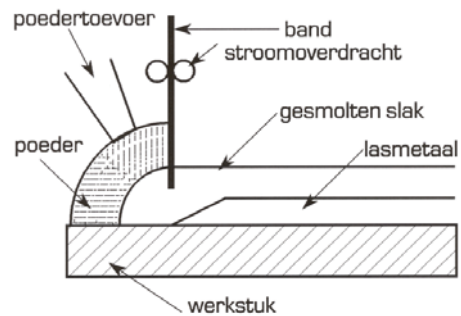
De draad die wordt afgesmolten kan of een gevulde draad zijn of een massieve draad. De keuze is afhankelijk van de legering die moet worden neergesmolten. Hoog gelegerde slijtvaste draden met ca. 40 % legeringsbestanddelen zijn alleen in gevulde draaduitvoering verkrijgbaar.

Zoals het proces aangeeft, wordt de draad onder een laag poeder afgesmolten. Het te gebruiken poeder kan zowel oplegerend zijn (toebranden van de gewenste legeringselementen) alsook neutraal. Aan de opslag van het poeder zijn eisen te stellen: de opslag moet droog plaatsvinden

om vochtopname ervan, met als resultaat mogelijke koudscheurvorming te voorkomen.

10.1.3 Elektroslak oplassen

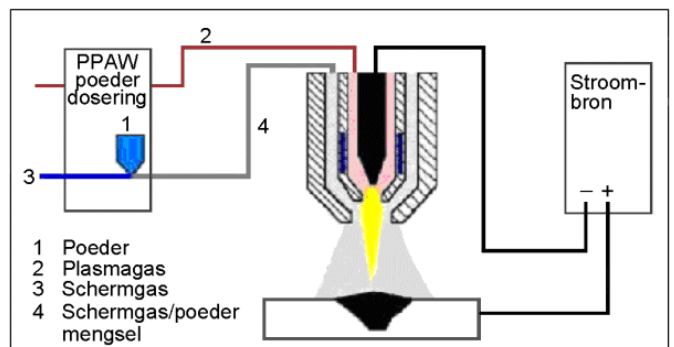
Bij elektroslak oplassen (zie figuur 10.7) wordt de benodigde smeltwarmte verkregen door de ohmse weerstand van de slak tussen het werkstuk en de elektrode (er is geen boog!). Elektroslak oplassen met band geeft een zeer geringe opmenging en een zeer hoge afsmeltsnelheid. Bij gebruik van band en een lange uitsteeklengte (tot 90 mm) kan de neersmeltsnelheid oplopen tot 45 kg/h (ES ESO-lassen genoemd: extended stick-out).



figuur 10.7 Het principe van elektroslak oplassen

10.1.4 Poeder Plasmalassen (PPAW)

Dit proces is een variant van het standaard plasmalassen en lijkt een concurrent te worden van zowel het plasma- als het TIG-lassen. Het principe van het proces is weer gegeven in figuur 10.8.



figuur 10.8 Het principe van het poeder plasmalassen

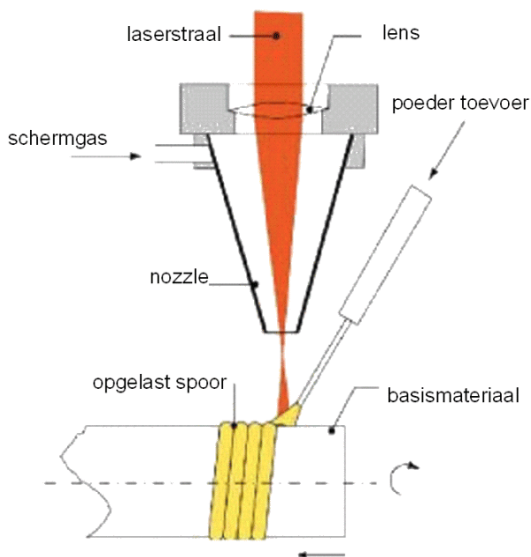
Er wordt gelast met een normaal ingesnoerde plasmaboog, die wordt ontstoken door een hulpboog (de zogenaamde pilotboog). Het poeder plasmalassen onderscheidt zich van het conventionele lassen, doordat in plaats van een koude lasdraad een poeder in het smeltbad wordt gebracht. Dit poeder wordt aangevoerd door het beschermgas of door een extra poedergasstroom en in de lasboog tot smelten gebracht. Het poeder heeft dus dezelfde functie als een koude draadtoevoer bij het TIG-lassen of conventioneel plasmalassen.

10.1.5 Laser oplassen (lasercladden)

Lasercladden is het, met een gefocusseerde laserbundel als energiebron, aanbrengen van een deklaag met behulp van toevoegmateriaal. Lasercladden wordt daarbij gekenmerkt door een geringe opmenging tussen toevoegmateriaal en basismateriaal, waarbij beiden worden omgesmolten. Bovendien is de vervorming ten gevolge van de zeer geconcentreerde warmte-inbreng gering (zie figuur 10.9). Het toevoegmateriaal kan op twee manieren worden toegevoegd:

- ▶ in de vorm van poeder of draad; dit is een één-stapsproces;
- ▶ in de vorm van een vooraf aangebracht materiaal, bij-

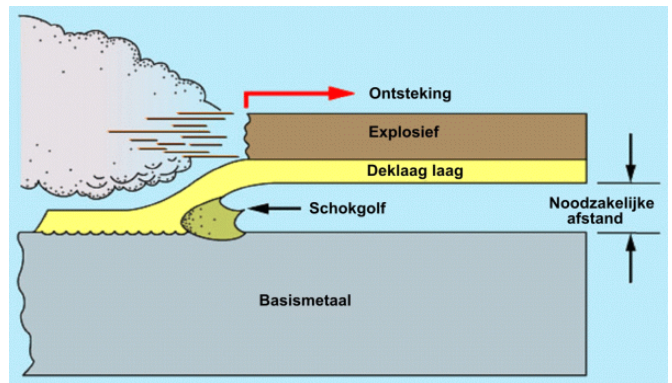
voorbeeld een galvanische of thermisch gespoten laag of een prepad van poeder in polymeer. Dit wordt een tweestapsproces genoemd.



figuur 10.9 Principe van het lasercladden

10.1.6 Explosief oplassen

Explosieflassen is een vorm van koud druklassen. Hierbij worden onder zeer hoge druk bij kamertemperatuur delen aan elkaar gelast, zonder dat smelten van het metaal ter plaatse van de verbinding optreedt. Het proces van het explosief lassen en de opstelling van de delen is in figuur 10.10 schematisch weergegeven. De bekledingsplaat wordt met afstandstukjes op een constante afstand ten opzichte van de basisplaat gehouden. Op de bekledingsplaat wordt een laag springstof aangebracht. Tussen de springstof en de bekledingsplaat wordt vaak een beschermingsplaat aangebracht om de bekledingsplaat te beschermen tegen de verbrandingsgassen van de springstof. Wordt de springstof aan één kant ontstoken, dan plant de explosie zich met de detonatiesnelheid langs het oppervlak voort. Door de explosie wordt de bekledingsplaat plaatselijk zeer sterk vervormd



figuur 10.10 Het principe van explosief oplassen

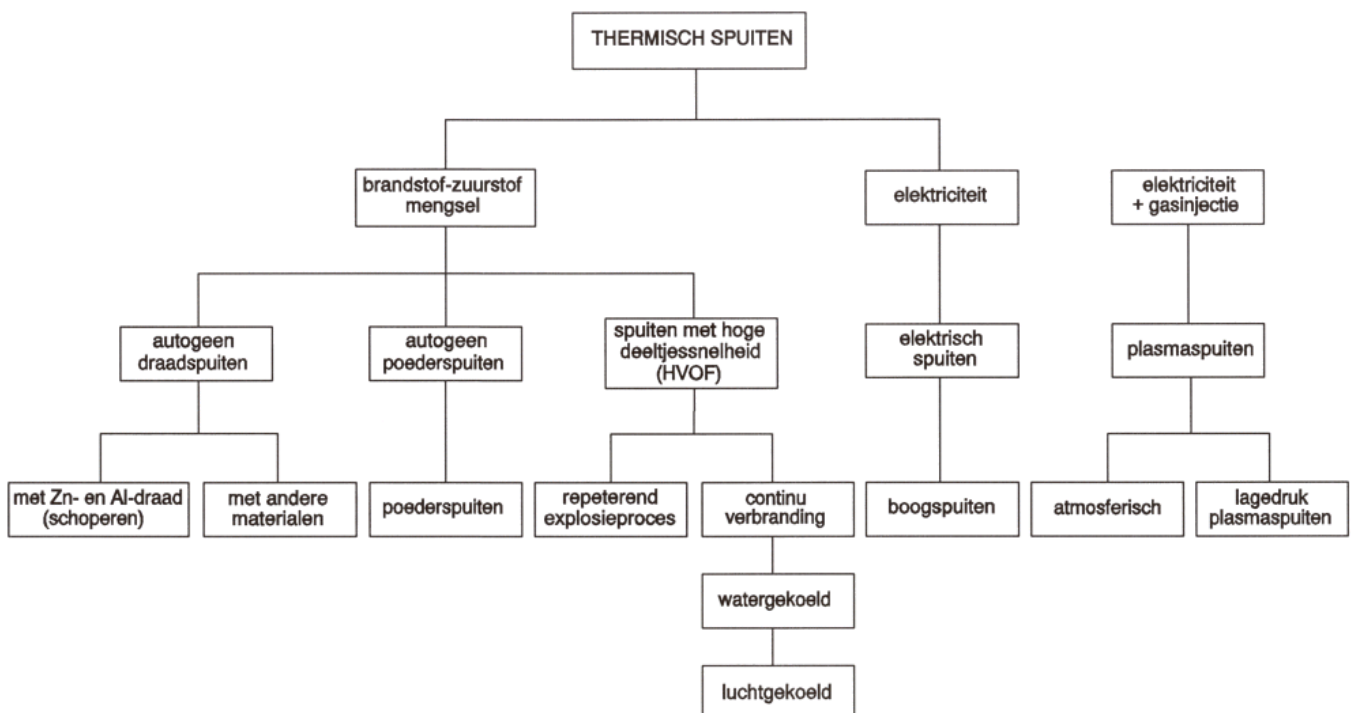
en ondergaat over een betrekkelijk korte afstand ten opzichte van de basisplaat een zeer hoge versnelling. Eerst genoemde plaat botst daardoor met hoge snelheid op de basisplaat en last hieraan vast.

10.2 Thermisch spuiten

We spreken van thermisch spuiten als wordt uitgegaan van energie die gebruikt wordt om een te verspuiten materiaal, in draad- of poedervorm, om en nabij het smeltpunt te brengen en vervolgens te verstuiven.

Is de thermische energie afkomstig van een brandend gas-zuurstofmengsel, dan spreken we van vlamspuiten. Is de energie afkomstig van elektrische energie, dan spreken we van elektrisch spuiten, en als de energie afkomstig is van elektrische energie met gasinjectie dan spreken we van plasmaspuiten.

Een schematische indeling van de thermische spuitprocessen naar energiebron is weergegeven in figuur 10.11. De thermische energie dient ertoe, het aan te brengen deklaagmateriaal, in de vorm van poederdeeltjes of draad, op te warmen tot om en nabij het smeltpunt. Gelijktijdig wordt het materiaal versneld tot minimaal enkele tientallen meters per seconde. Door deze snelheid ontstaat er een gerichte straal van spuitdeeltjes, die het mogelijk maakt dat voorwerpen op een zekere afstand (bijvoorbeeld 100 mm) in elke positie kunnen worden voorzien van een deklaag.



figuur 10.11 Schematisch overzicht thermische spuitprocessen

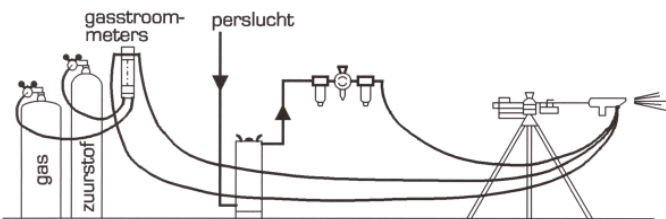
Evenzo kenmerkend voor de thermische spuittechniek is het ontbreken van een smeltbad van deklaag en substraatmateriaal, zoals wel aanwezig bij de opasprocessen. De proceswarmte wordt praktisch alleen gebruikt om materiaal-deeltjes die de deklaag gaan vormen, te verhitten en niet om het substraat te verwarmen. Het thermisch spuiten wordt daarom ook wel een "koud" spuitproces genoemd.

Thermisch spuiten is een flexibele techniek. De flexibiliteit blijkt onder andere, doordat het thermische spuiten mobiel, dus op locatie, kan worden uitgevoerd. De thermische spuittechniek is bij uitstek geschikt als reparatiemethode voor allerlei industriële onderdelen.

De spuitdeeltjes dienen over voldoende thermische en kinetische energie te beschikken om goedhechtende deklaag te kunnen vormen. De thermische spuittechniek staat toe dat materialen, welke in uitzettingscoëfficiënt sterk verschillen, succesvol op elkaar kunnen worden aangebracht, omdat het substraat relatief koud blijft. Tevens kunnen grote verschillen in uitzettingscoëfficiënt van het deklaag en het substraatmateriaal worden opgevangen door het aanbrengen van tussenlagen. De belangrijkste processen uit figuur 10.11 worden hier beknopt besproken. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar de voorlichtingspublicatie VM 95 "thermisch spuiten".

10.2.1 Autogeen draadspuiten

Autogeen draadspuiten is het oudste proces. Door middel van een elektro- of persluchtmotor wordt een materiaal in draadvorm door een spuitpistool getransporteerd en centraal in een brandend gas-zuurstofmengsel tot smelten gebracht. Vervolgens wordt het gesmolten draadmateriaal door perslucht naar het substraat verstoven, om daar een deklaag te vormen. In figuur 10.12 is schematisch een autogene draadspuitinstallatie weergegeven.



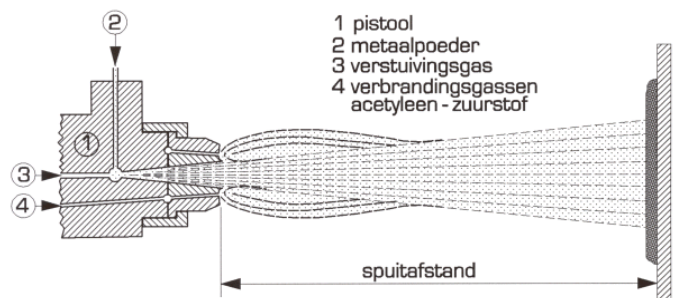
figuur 10.12 Principeschema van een autogene draadspuitinstallatie

Kenmerkende laageigenschappen voor het autogeen draadspuitproces zijn de typische microporeuze lamellaire structuur van de deklaag met een bepaald percentage oxide-insluitingen, een matige treksterkte, hoge drukvastheid en een geringe rek.

Het specifieke toepassingsgebied van het autogeen draadspuiten ligt bij de corrosiebestrijding, bescherming, opvulling, dikke lagen voor reparatie, verbeteren van loopeigenschappen of wrijvings eigenschappen en het spuiten van witmetaal lagere.

10.2.2 Autogeen poederspuiten

Autogeen poederspuiten (zie figuur 10.13) is een techniek die omstreeks 1956 in opkomst kwam en in eerste instantie was bedoeld om materialen te kunnen verspuiten die niet in draadvorm kunnen worden geproduceerd; met name waren dit de insmeltlegeringen op nikkel- of kobaltbasis en aanvankelijk ook de keramische materialen, zoals aluminium-oxide en zirkoonoxide. Autogene poederspuitpistolen zijn compacter en lichter dan alle andere typen van thermische spuitpistolen. Het spuitmateriaal wordt in poedervorm door middel van een transportgas door het pistool gevoerd en centraal in een brandend gas-zuurstofmengsel (meestal acetyleen-zuurstof) geïnjecteerd, gesmolten en getransporteerd naar het substraat.

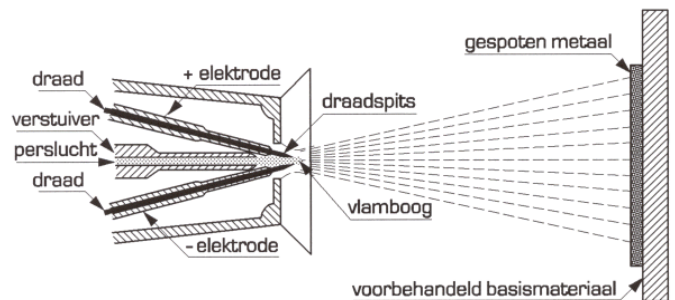


figuur 10.13 Het principe van autogeen poederspuiten

Het systeem wordt vooral toegepast voor het spuiten van de zogenaamde insmeltlegeringen. Het principe van het aanbrengen van deze materialen berust erop dat men ná het spuiten van de deklaag het werkstuk een warmtebehandeling (circa 1100 °C) geeft met een acetyleen- of propaanbrander, inductieverhitting of verhitting in een oven. Deze behandeling wordt aangeduid met "insmelten" of "fusen". Het proces wordt hiermee een "warm" spuitproces. Het doel van het insmelten is een goede hechting (door middel van diffusie) tot stand te brengen tussen de afzonderlijke spuitdeeltjes en tussen de deklaag en het substraat.

10.2.3 Elektrisch draadspuiten

Het elektrisch draadspuiten (zie figuur 10.14) is een techniek, waarbij twee elektrisch geleidende draden door een spuitpistool worden getransporteerd. Tussen de uiteinden van deze draden wordt een elektrische boog getrokken, waardoor ze afsmelten. Het gesmolten materiaal wordt met perslucht naar het substraat getransporteerd, waar het een deklaag vormt. Deklagen worden snel en tegen lage energiekosten opgebracht. De voordelen van elektrisch draadspuiten zijn de grote spuitcapaciteit en de goede hechting. De mobiliteit van de apparatuur is groot, hetgeen het proces geschikt maakt om op locatie te werken.

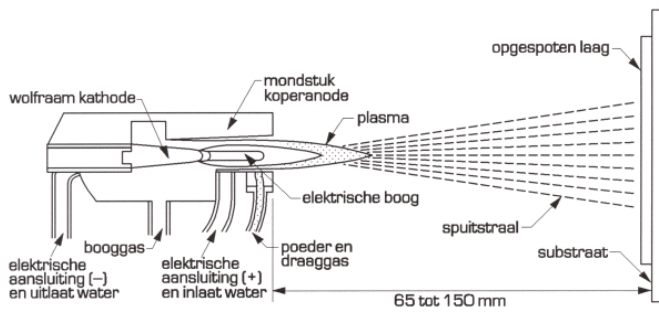


figuur 10.14 Het principe van elektrisch draadspuiten

10.2.4 Plasmaspuiten

Het thermisch spuiten door middel van plasma (zie figuur 10.15) is een poederspuittechniek die de laatste jaren het meest in de belangstelling is gekomen. Vooral de ruimtevaart en de vliegtuigmotorenbouw hebben deze ontwikkelingen bevorderd. Vrijwel elk poedervormig materiaal kan met behulp van het plasmaproces worden verspoten om op nagenoeg elk substraat een deklaag te vormen. Het plasmaspuiten wordt het meest toegepast in de omgevingsatmosfeer, we spreken dan van het atmosferische plasmaspuiten (APS). Het kan echter ook onder geconditioneerde omstandigheden en onder een druk lager dan 1 bar plaatsvinden. In dat geval spreekt men van vacuümplasmaspuiten, of beter van lagedrukplasmaspuiten (LPPS = Low Pressure Plasma Spraying).

Bij de plasmaspuitprocessen wordt een boogontlading opgewekt tussen een wolfram elektrode, de kathode en een watergekoelde koperen mondstuk, de anode. Het gas om het plasma op te wekken wordt axiaal of radiaal draaiend toegevoerd aan het plasmaspuitpistool. Een rotatie van het



figuur 10.15 Het thermisch spuiten door middel van plasma

booggas bevordert de boogstabiliteit in de omgeving van de elektrode en zorgt voor een rotatie van het plasma bij het mondstuk (nozzle), hetgeen ertoe bijdraagt dat de slijtage van de anode (anode-erosie) wordt beperkt. Het gas verlaat als een plasma de mondstukopening.

De temperatuur in het plasma is afhankelijk van de mondstukconfiguratie en van de procesparameters en kan waarden van 15.000 °C bereiken. Argon of stikstof, al of niet gemengd met helium of waterstof, worden als gassen toegepast. Het gebruik van twee-atomige gassen resulteert in een hoge energie-inhoud van het plasma.

10.2.5 Hoge-snelheidspuiten

Deze techniek kent verschillende uitvoeringsvormen, elk met een specifiek karakter. Er zijn drie hoofdgroepen te onderscheiden:

- ▶ watergekoeld intermitterend explosieproces (detonatieproces);
- ▶ watergekoeld continu verbrandingsproces;
- ▶ luchtgekoeld continu verbrandingsproces.

Het kenmerk is dat de poederdeeltjes met een hogere snelheid (gassnelheid tussen 800 en 2200 m/sec, deeltjessnel-

heid globaal 1/3 hiervan) naar het werkstuk worden getransporteerd, waarbij een deklaag met een grote dichtheid en goede hechting wordt gevormd. De continu processen worden doorgaans aangeduid als High Velocity Oxygen Fuel processen (HVOF). De brandstof kan zowel een gas (acetyleen, propaan of propyleen) of een vloeistof (kerosine) zijn. Figuur 10.16 geeft een voorbeeld van een modern luchtgekoeld principe met gas.

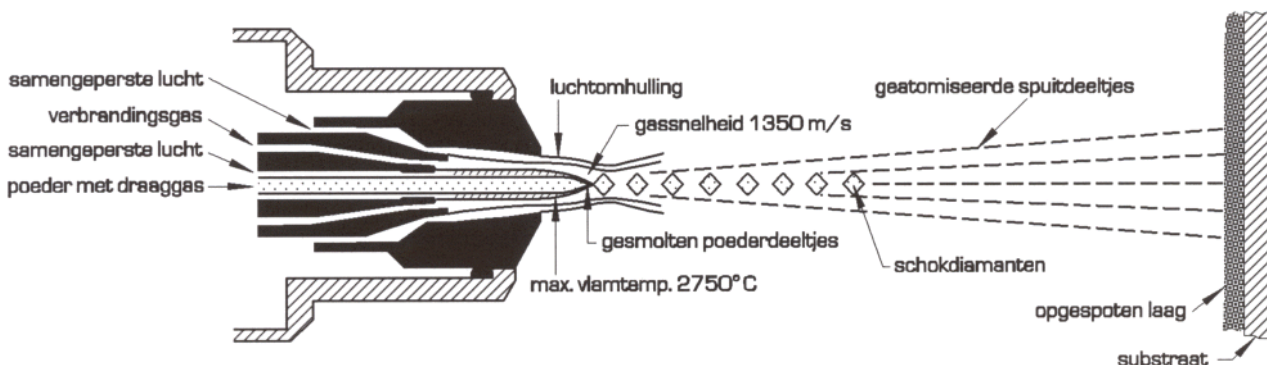
Bij de botsing met het werkstuk treden microlasverschijnselen op. Ondanks de grotere spuitafstand wordt de werktemperatuur hoger dan bij de andere processen; kleine producten kunnen gemakkelijk oververhit raken. Bij moderne varianten van dit proces wordt dit ondervangen.

10.3 Proceskenmerken

De werkgebieden van oplassen en opspuiten overlappen elkaar. Voor het maken van een keuze kan men zich in eerste instantie laten leiden door het gegeven welke omgevingsfactor maatgevend is. Voor corrosiebestrijding heeft men dichte, chemisch bestendige lagen nodig. Voor slijtagebestrijding zal men vooral behoefte hebben aan lagen die, over de dikte gezien, homogeen zijn. Hier zijn, door het ontbreken van opmengingsverschijnselen, de thermisch gespoten lagen in het voordeel. Bij het 'koud' spuiten treedt bovendien geen vervorming op.

Naast deze eerste grove indeling wordt de keuze bepaald door de belasting die moet worden opgevangen door de combinatie van deklaag en basismateriaal. Bij dunne thermisch gespoten lagen wordt de draagkracht volledig bepaald door het basismateriaal. Vooral de brossere keramische lagen vragen dan een sterke ondergrond. Bij de dickere opgelaste lagen is het basismateriaal minder kritisch, mede doordat de taaiheid van de opgelaste laag wel enige vervorming van het basismateriaal toestaat.

Een verder onderscheid kan worden gemaakt naar de economie. De tabellen 10.1 en 10.2 geven een overzicht van een aantal processen.



figuur 10.16 Principe van een luchtgekoeld hoge snelheidsspuitproces

tabel 10.1 Lasprocessen

factoren	lasproces						
	autogeen	Bmbe ¹⁾	TIG	MIG/MAG	OP	ES	ES-eso ²⁾
laspositie	alle	alle	alle	KB: alle OB: hor. Gev.dr.: hor.	horizontaal	horizontaal	horizontaal
neersmeltsnelheid (kg/uur) ³⁾	0,5 - 1	0,5 - 5	0,5 - 2; met extra draad tot 10	KB: 1 - 2 OB: 2 - 6 Gev.dr.: 4 - 12	draad: 5 - 10 band: 10 - 15	band: 18 - 25	band: 20 - 45
investeringskosten	laag	laag	afhankelijk uitvoering	matig	hoog	hoog	hoog
opmenging (%)	1 - 5	10 - 30	5 - 10%	KB: 5 - 15 OB: 10 - 30 Gev.dr.: 10 - 30	15 - 20 met band; tot 60% met draad	10 - 15	10 - 15
legeringstypen	on- en laag-gelegeerd staal	staal: hoog en laaggelegeerd ⁴⁾	beperkt	onbeperkt; met massief beperkt	onbeperkt ⁵⁾	onbeperkt ⁵⁾	onbeperkt ⁵⁾
invloed lasser	zeer groot	groot	groot	matig - groot	gering	gering	gering

1) Booglassen met beklede elektrode.

2) Extended stick-out.

3) Bij 100% inschakelduur.

4) Non ferro: beperkt.

5) Indien gesinterde band wordt meegerekend.

tabel 10.2 Opspuitprocessen (100% inschakelduur)

factoren	spuitproces					
	autogeen poeder	autogeen draad	elektrische boog	APS	VPS	HVOF
spuitpositie ¹⁾	alle	alle	alle	alle	alle	alle
neersmeltsnelheid (kg/uur) ²⁾	ca. 7	6 - 12	8 - 16	2 - 8	2 - 8	2,5 - 6
investeringskosten	laag	laag	laag	hoog	zeer hoog	hoog
oxidatie	hoog	hoog	matig tot hoog	matig tot gering	zeer gering	gering
materiaaltypen	onbeperkt	metalen (incl. non ferro) cermets	onbeperkt ³⁾	onbeperkt	onbeperkt	onbeperkt ⁴⁾
invloed spuiters ⁵⁾	groot	groot	groot	groot	gering	gering

1) Alleen voor 90° spuihoek, kleinere hoeken mogelijk met verlies van kwaliteit.
 2) Bij 100% inschakelduur.
 3) Met inbegrip van gevulde draad met geleidende mantel.
 4) Geldt niet voor alle processen. Materialen met een hoog smeltpunt zijn moeilijk of onmogelijk.
 5) Bij een handmatige voering van het pistool is de invloed van de spuiters zeer groot. Bij de meer geavanceerde processen is mechanisatie of robotisering gebruikelijk, waardoor de invloed van de spuiters afneemt.

Oplassen en opspuiten geven voor veel toepassingen dek-lagen met vergelijkbare functionele eigenschappen in termen van slijtage en corrosie. De proceskeuze zal dus voor een belangrijk deel worden bepaald door wat beschikbaar is. Enkele kenmerkende verschillen zijn er de oorzaak van dat bijvoorbeeld vol-keramische materialen niet zijn op te lassen en mengsels van metaal en keramiek weer wel. Een aluminiumoxidelaag kan dus alleen worden gespoten, een hardmetaallaag (bijvoorbeeld WC-Co) kan zowel worden gespoten als opgelast. Hierbij moet wel worden bedacht dat met

oplassen dikke slijt- en corrosievaste lagen worden aangebracht en met opspuiten dunnere. Bij oplassen zal men altijd in een bepaalde mate last hebben van vermenging met de ondergrond, bij opspuiten geldt dit bezwaar niet. Tabel 10.3 geeft een overzicht van kenmerkende verschillen waarmee men rekening moet houden. De tabel is te gebruiken om snel te bepalen of men moet kiezen voor oplassen of opspuiten. Ook de overlap tussen beide is hiermee zichtbaar gemaakt.

tabel 10.3 Overzicht van enkele belangrijke proceskenmerken bij oplassen en opspuiten

kenmerk	oplassen	opspuiten
warmte-inbreng	relatief hoog, maar beperkt als pulserend wordt gelast of indien de laspositie en lasproces wordt aangepast.	aanzienlijk lager dan bij oplassen. Door koeling van het werkstuk tijdens het spuiten is de oppervlaktetemperatuur beneden 150 °C te houden. De warmte-inbreng in het werkstuk is hierbij vrijwel nihil. Bij insmeltlegingen is de warmtebelasting daarentegen veel hoger, omdat een warmtebehandeling bij temperaturen boven 1000 °C vereist is.
type hechting	metallurgisch, hechtsterkten liggen ver boven de 100 MPa, de maximale hechtsterkte die met spuiten haalbaar is en de kenmerkende hechtsterkte voor hardchroomlagen.	mechanisch (bij insmeltlegingen ook chemisch). Typische hechtsterkten liggen rond 25 MPa voor vlamspuiten, 45 MPa voor plasmaspuiten en 80-100 MPa voor HVOF. Bij exotherm reagerende materialen: metallurgisch.
bereikbare oppervlakteruwheid	oplaslagen laten zich bewerken als de met hun samenstelling overeenkomende basis-materialen, dat wil zeggen dat de meeste materialen gepolijst kunnen worden. Materialen met grove harde deeltjes hebben ook na slijpen een hoge oppervlakteruwheid.	de te bereiken oppervlakteruwheid wordt sterk bepaald door de korrelgrootte en -verdeling. Vanwege de relatief zwakke binding van de korrels onderling kunnen ze bij het slijpen en polijsten uit het oppervlak worden getrokken. Met homogene fijne poeders zijn Ra waarden van 0,05 µm bereikbaar. Typische waarden in als-gespoten toestand zijn 2-20 µm Ra.
dichtheid	niet scheurgevoelige materialen zijn 100% dicht.	opgespoten lagen zijn poreus, behalve de ingesmolten lagen. Afhankelijk van materiaal en proces liggen de waarden tussen 0,5 en 20%. Bij chemisch inerte keramische materialen wordt de laag dan ook meestal afgesloten met een kunststof ('sealen') als een corrosiebelasting te verwachten is. Bij voldoende dikte en een lage eigen porositeit kan het achterwege blijven bij voldoende beheersing van het spuitproces.
scheurgevoeligheid	vergelijkbaar met gegoten volmateriaal.	door de geringere hechting van de poederdeeltjes heeft een opgespoten laag vrijwel geen eigen sterkte. Vooral bij sterk wisselende belasting zijn ze daardoor relatief gevoelig voor scheurvorming. Ingesmolten lagen zijn in dit opzicht gunstiger. Dikkere spuitlagen kunnen hoge restspanningen hebben en reageren daardoor gevoeliger op uitwendige belastingen. Door een goede procesvoering, waarbij vooral de voorbewerking belangrijk is, kan men de restspanningen een hoge negatieve waarde geven (drukspanningen), waarmee de scheurvorming kan worden onderdrukt.
kwetsbaarheid	vergelijkbaar met volmateriaal van dezelfde samenstelling.	gevoelig voor (mechanische) beschadiging. Opgespoten voorwerpen verlangen doorgaans extra zorg bij transport, montage en gebruik. Ingesmolten lagen zijn gunstiger.
dynamische sterkte	vergelijkbaar met gegoten materiaal van dezelfde samenstelling.	de lagen hebben vrijwel geen eigen sterkte. De dynamische sterkte na opspuiten hangt daardoor nauw samen met de voor- en nabewerking. Onder dynamische omstandigheden wordt grof stralen afgeraden: de hechting kan verminderen. Dit geldt niet voor insmelten (zie type hechting). Hier is grof stralen altijd noodzakelijk. Na slijpen zal altijd een controle op scheuren nodig zijn.
materiaalvrijheid	beperkt door het smeltgedrag, waardoor o.a. molybdeen en keramiek niet mogelijk zijn.	vrijwel alle materialen zijn verwerkbaar. Speciale poeders zijn relatief gemakkelijk op verzoek te maken; lagen met samenstellingsgradiënten zijn mogelijk.
beschikbaarheid materialen	meeste toevoegmaterialen genormeerd, doorgaans goed door elkaar te gebruiken. De beschikbaarheid van massieve band is beperkt, gesinterde en gevulde band in principe onbeperkt.	weinig genormeerd (alleen DIN), waardoor onderling moeilijk te vergelijken. Meeste leveranciers hebben voor de gebruikelijke materialen lijsten met equivalenten. Bij poeders hiermee erg oppassen vanwege grote invloed poederfabricageproces. Verder is bijna alles verkrijgbaar, exotische materialen bijvoorbeeld door zeven geschikte fractie uit poedermetallurgische materialen.
vorm toevoegmateriaal	draad, band, staf, beklede elektrode, poeder.	draad, staf, poeder.
corrosiebestendigheid	vergelijkbaar met gegoten materiaal van dezelfde samenstelling.	wordt bepaald door de dichtheid, het vulmateriaal en/of de hechtlaag. Voor kritische toepassingen zijn hechtlagen op basis van nikkel beschikbaar die toepassing ook onder zeer zware condities mogelijk maakt. Voor aantasting in waterige omgeving zijn kathodische beschermingslagen op basis van Zn en/of Al aan te brengen. Deze voldoen vaak beter dan soortgelijke galvanisch aangebrachte lagen.

Hoofdstuk 11

Metaalkundige en aanverwante aandachtspunten bij het aanbrengen van deklagen

11.1 Metaalkundige en aanverwante effecten bij basis- en deklaagmateriaal

Door het oplassen en opspuiten kunnen, door de toegevoerde warmte van het proces, spanningen en metallurgische veranderingen in het basismetaal en het toevoegmateriaal optreden. Verantwoordelijk hiervoor zijn de temperatuur en de opmenging. De mechanische eigenschappen van bijvoorbeeld een staalsoort zijn vaak door een warmtebehandeling verkregen.

Ook tijdens de bewerking van het product of werkstuk kunnen spanningen in het materiaal zijn gekomen. Als de temperatuur bij het oplassen of opspuiten in het materiaal gelijk is aan of hoger dan die van de warmtebehandeling, zullen de eigenschappen van het materiaal wijzigen. Bovendien kunnen vormveranderingen optreden. De resultaten worden tijdens lassen, het insmelten van een spuitlegering, of in ieder geval tijdens bedrijf zichtbaar. Het is dus zaak de temperatuurhuishouding te controleren om de materiaaleigenschappen te behouden.

11.2 Thermisch spuiten

Thermisch spuiten kan over het algemeen op iedere metalen ondergrond, maar ook op andere ondergronden worden toegepast.

Toch zijn er een paar uitzonderingen:

Gietijzersoorten kunnen problemen opleveren, omdat het grafiet de binding negatief kan beïnvloeden. Bij automatenstaalsoorten heeft het hoge gehalte aan zwavel of lood een zelfde bezwaar.

Thermoplastische kunststoffen kunnen ook als basismaterialen worden gebruikt; er bestaat echter altijd een risico voor het oververhitten van de kunststof.

Keramieken als basismateriaal worden in de praktijk niet opgespoten, omdat ze al de eigenschappen bezitten die men met het opspuiten zou willen bereiken; het is echter wel mogelijk.

Bij het thermisch spuiten is een goede hechting van de opgespoten laag met het basismateriaal van essentieel belang. Om de hechting te bevorderen wordt het werkstuk eerst gestraald. Daarbij is het belangrijk om de zuiverheid van het straalgrit goed te monitoren. Vervuild grit kan tot problemen leiden, bijvoorbeeld corrosie onder de opgespoten laag. Dit houdt in dat grit voor het stralen van koolstofstaal gescheiden moet worden gehouden van het grit, dat gebruikt wordt voor het stralen van bijvoorbeeld corrosievast staal.

Een andere factor die de resultaten van opspuitprocessen beïnvloedt, is de hardheid van het basismateriaal. Harde materialen kunnen problemen opleveren. Speciale tussenlagen kunnen worden gebruikt om dit probleem te overwinnen, maar het is wenselijk de hardheid van het basismateriaal beneden de 50 HRC te houden.

11.3 Oplassen

Bij het oplassen zijn er twee overwegingen om voor een bepaald proces te kiezen:

1. zal de neersmelt het basismateriaal beïnvloeden?
2. zal het oplassen scheuren kunnen veroorzaken in het basismateriaal?

De eerste vraag kan worden beantwoord door de vaste oplosbaarheid van het oplasmateriaal in het basismateriaal te onderzoeken.

Daarbij kan een richtlijn zijn:

- ijzer-, nikkel-, kobaltoplaslegeringen zullen samensmelten met een basismateriaal op ijzerbasis;
- deklagen op koperbasis kunnen worden toegepast op koper-, nikkel- en ijzerbasismaterialen;

Koper heeft een slechte oplosbaarheid in ijzer. Booglassen kan tot scheurvorming leiden als gevolg van koperpenetratie. Koperpenetratie is het in vloeibare fase dringen tussen de vaste staalkristallen en zorgen voor scheurvorming. Koperlegeringen zullen daarom bij nieuwbouw niet vaak worden opgelast, hooguit voor tijdelijke reparaties. Toepassing van nikkel als bufferlaag voorkomt koperpenetratie.

Voor het tweede punt moet een aantal invloedsfactoren nader worden beschouwd, te weten:

- voorwarmen;
- het koolstofequivalent van het basismateriaal;
- het waterstofgehalte van het lastoevoegmateriaal;
- het spanningsniveau dat na oplassen optreedt.

Deze factoren bepalen tezamen de gevoeligheid voor het optreden van de zogenaamde "koudscheuren".

Voorwarmen

Voorwarmen van een materiaal zorgt voor een verlaging van de afkoelsnelheid. Zeker bij daartoe gevoelige staalsoorten kan een snelle warmteafvoer leiden tot harde, brose en scheurgevoelige structuren. Voorwarmen kan deze scheurgevoelige structuur voorkomen.

Voor het voorwarmen wordt over het algemeen een autogene of aardgasvlam gebruikt. Men moet zich realiseren dat de brandbare gassen uit koolwaterstoffen bestaan. Bij de verbranding kan waterstof uit de vlam ontstaan en het werkstukmateriaal in diffunderen, met waterstofscheuren als gevolg.

Daarnaast zal een verkeerd afgestelde vlam tot roetvorming op het werkstuk leiden. Roet is een vorm van koolstof en kan op zijn beurt weer aanleiding geven tot opkoling. Hierdoor kan weer een harde structuur ontstaan bij een snelle afkoeling. Vandaar dat het gebruikmaken van weerstandsverwarmings-elementen de voorkeur verdient (zie ook de voorlichtingspublicatie VM 128 - "Warmtebehandelingen van staal").

Koolstofequivalent

Koolstof is het belangrijkste element dat bij een snelle afvoer van warmte zorgt voor harde en scheurgevoelige structuurbestanddelen. Naast koolstof hebben meer elementen invloed op de vorming van harde structuurbestanddelen bij een snelle afkoeling. De invloed van deze elementen is bepaald ten opzichte van het element koolstof. Dit heeft geleid tot het zogenaamde Koolstofequivalent, een factor die iets zegt over de hardbaarheid van een staal. Het koolstofequivalent wordt bepaald aan de hand van de formule, opgesteld door het International Institute of Welding, het IIW, en is opgenomen in de norm NEN-EN 1011-1. Deze formule voor de berekening van het koolstofequivalent is:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Het geldigheidsgebied ligt tussen waarden van 0,35 en 0,70. In tabel 11.1 zijn voor vier niveaus van het koolstofequivalent aanbevelingen voor de voorwarmtemperaturen opgenomen. Overigens is de voorwarmtemperatuur ook nog afhankelijk van factoren als:

- het lasproces en de lasparameters;
- krimpspanningen en spanningen tengevolge van structuurumzettingen.

Austenitisch corrosievast staal en austenitisch mangaanstaal worden niet voorgewarmd vanwege de scheurgevoeligheid hiervan.

Voorwarmen betekent wel dat het werkstuk zal uitzetten. Tevens kan het werkstuk ten gevolge van inwendige spanningen daarbij vervormen. Met dit fenomeen moet terdege rekening worden gehouden. Het kan voor komen dat bepaalde maten na het oplassen niet meer kloppen. Daarom moet het oplassen plaatsvinden vóórdat de verspaning wordt uitgevoerd.

tabel 11.1 Voorwarmtemperaturen

Koolstofequivalent C_{eq}	Aanbevolen voorwarmtemperatuur in °C
< 0,40	0 - 100
0,40 - 0,55	100 - 200
0,55 - 0,65	200 - 250
> 0,65	250 - 350

Waterstofgehalte van het lasmetaal

De waterstof vanuit het lastoevoegmateriaal zal diffunderen naar zones waar roosterfouten aanwezig zijn. Dit zijn bijvoorbeeld de harde zones, ontstaan door een snelle warmteafvoer.

Ook hier heeft voorwarmen een gunstig effect: het waterstof zal door de voorwarmtemperatuur gemakkelijker het werkstuk uit diffunderen dan door het vaste metaal naar de eerder genoemde roosterfouten.

Spanningsniveau

Bij hogere temperaturen zal de rekgrens van staalsoorten afnemen. Spanningen zullen bij een bepaalde temperatuur relaxeren (afnemen) tot die ter hoogte van de rekgrens bij die temperatuur. Naast dat voorwarmen een relaxerende werking heeft, zullen de spanningen zich ook egaliseren bij een hogere temperatuur.

Uit bovenstaande is duidelijk geworden dat voorwarmen een gunstig effect heeft: scheurvorming ten gevolge van onder meer opharding van de door de laswarmte beïnvloede zone neemt af.

De bovengrens van de voorwarmtemperatuur wordt bepaald door een aantal factoren:

- ▶ het oppervlak van het werkstuk oxideert voor het neer te smelten metaal uit, waardoor het risico van bindingsfouten en poreusheid toeneemt. De limiet voor een laaggelegeerd staal ligt bij 400 °C en voor een hittevast materiaal bij 600 °C.
- ▶ met een toenemende temperatuur kan de sterkte van het basismateriaal aanzienlijk minder zijn dan van het lasmetaal en dit doet het risico van vervorming eerder toe- dan afnemen. Ook kan een grote opmenging optreden; bij verschillende basismaterialen kan dit tot korrelgroei leiden door een verdunning van de remmende elementen.

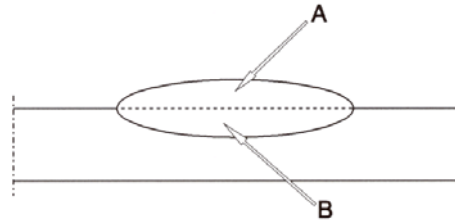
De ondergrens wordt bepaald door de energie-inhoud van de warmtebron, waarmee de deklaag wordt aangebracht. Bij lassen zal dit altijd voldoende zijn om samen met de directe warmte van de boog een sterke metallurgische hechting tot stand te brengen. Bij het opspuiten is de energie-inhoud van de deeltjes kritisch en zal in veel gevallen een minimumtemperatuur van 100-150 °C gewenst zijn, vooral bij keramische materialen. Bij insmeltdeklagen moet een zo hoge temperatuur worden gehandhaafd, dat het oppervlak niet tot smelten wordt gebracht. Voor grote werkstukken kan ondersteuning door aparte branders nodig zijn.

De werkstuktemperatuur moet tijdens het opbrengen van de deklaag tussen een vastgesteld minimum (de voorwarmtemperatuur) en een maximum temperatuur blijven. Dit maximum is noodzakelijk teneinde te voorkomen dat de sterkte- en hardheidseigenschappen van zowel opslasmaal, alsmede de warmte-beïnvloede zone teveel afneemt. Deze maximum temperatuur wordt de tussenlaag- of interpasstemperatuur genoemd.

Opmenging

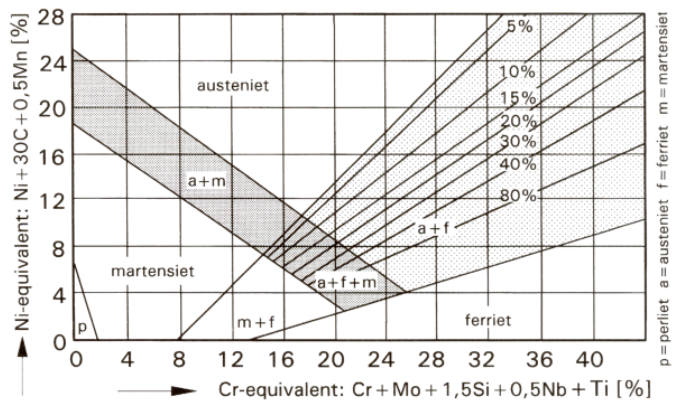
De eigenschappen van het zuivere toevoegmateriaal kunnen door de temperatuur, alsmede door de opmenging worden beïnvloed. Onder de opmenging wordt verstaan de vermenging van het toevoegmateriaal met het basismateriaal. In tegenstelling tot opgespoten lagen die niet in het oppervlak zijn versmolten, zijn gelaste lagen met elkaar en met het basismateriaal versmolten. De grootte van de opmenging is afhankelijk van het lasproces en wordt omschreven door de formule (zie ook figuur 11.1 en tabel 10.1):

$$\% \text{Opmenging} = \frac{A \times 100}{A + B}$$



figuur 11.1 Parameters berekening opmenging

Bij de definitie van het begrip opmenging wordt aangenomen dat het lasmetaal homogeen van samenstelling is en dat het oppervlak A van de rupsdoorsnede geheel gemengd is met de samenstelling van het basismateriaal met het oppervlak B. Het mengen van het lasmetaal met het basismateriaal is van grote invloed op de chemische samenstelling en dus op de structuur. Het beïnvloedt dus in hoge mate de corrosie- en slijtvaste eigenschappen van de lagen. Om een bepaalde samenstelling in de eerste laag te krijgen, moet dus worden uitgegaan van een hoger gelegeerd toevoegmateriaal. Bij corrosievast staal kan het effect van de opmenging op de microstructuur van de deklaag worden voorspeld met het zogenaamde Schaefflerdiagram (zie figuur 11.2). In dit diagram zijn de structuurbestanddelen aangegeven als functie van het nikkel- en het chroomequivalent. De voorspelling is redelijk betrouwbaar. De opmenging speelt vooral bij oplossen een belangrijke rol. Ook ontstaan veranderingen in de chemische samenstelling, doordat het materiaal van de ene (vaste) toestand overgaat naar de andere (vloeibare) in een actieve (oxiderende) omgeving.



figuur 11.2 Schaefflerdiagram met temperatuurinvloedsgebieden

Thermische spanningen

Een volgend punt is het ontstaan van thermische spanningen in het werkstuk. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in de thermische uitzetting tussen de deklaag en het basismateriaal en door het temperatuurverloop tijdens het opbrengen. Deze spanningen kunnen vervormingen van het werkstuk of in het geval van hardoplasmaterialen, krimp-scheuren van de opgebrachte laag tot gevolg hebben. Positieve effecten zijn ook te verwachten. Vooral bij keramische lagen zal een hoge drukspanning in de deklaag de belastbaarheid sterk verhogen.

De warmtehuishouding

Het basismateriaal moet vóór het oplossen in zachte toestand zijn. De hoogte van de voorwarm- en de tussenlaagtemperatuur zal ontlaten van een gehard staal tot gevolg hebben. Werkstukken vervaardigd door gieten of smeden of van stafmateriaal dat een flinke verspanning heeft ondergaan, moeten worden spanningsarmgegloeid vóór de eindbewerking van het werkstuk. Dit moet zeker gebeuren wanneer vervormingen tot een minimum beperkt dienen te blijven. Bij insmelt(opspuit)legeringen ligt de processtemperatuur boven de 1000 °C om een metallurgische hechting te bereiken. Het zal duidelijk zijn dat bij dergelijke processtemperaturen niets van de warmtebehandelingsstoestand

van het basismateriaal overblijft. Dit zal men moeten accepteren, anders is aansluitend een warmtebehandeling nodig om de eigenschappen te herstellen.

Controle van de tussenlaagtemperatuur

De minimum en maximum temperatuur waartussen veilig kan worden opgelast is hiervoor aan de orde geweest. Het handhaven van de tussenlaagtemperatuur betekent in de praktijk dat het werk soms onderbroken moet worden om te voorkomen dat de bovenste temperatuurgrens wordt overschreden. Ook kunnen de werkzaamheden op een koeler gedeelte van het werkstuk moeten worden voortgezet, indien dit mogelijk is. Dit zal zich vooral voordoen bij oplossen.

Om bij grote werkstukken de minimumtemperatuur te handhaven kan het bijplaatsen van branders noodzakelijk zijn. Ook bij lassen kan dit nodig zijn, omdat bijvoorbeeld op geen enkel moment enig deel van het werkstuk beneden de omzettingstemperatuur voor martensiet mag komen, omdat anders in de WBZ de kans op scheuren te groot wordt. Dit betekent in de praktijk dat plaatselijk voorwarmen nodig kan zijn.

Als de opslaswerkzaamheden aan het werkstuk aan het einde van de dag nog niet zijn afgerond, moet de voorwarmtemperatuur gehandhaafd blijven om een ongecontroleerde afkoeling, met mogelijke scheurvorming tot gevolg, te voorkomen.

Warmtebehandeling direct na het oplassen

Problemen bij hardbare staalsoorten door het optreden van hardingsstructuren en koudscheuren kunnen worden voorkomen door een direct aansluitende warmtebehandeling. Dit kan op twee manieren gebeuren:

- ▶ temperatuuregalisatie op de procesinrichting, gevolgd door een langzame afkoeling in een isolatiepoeder of -deken;
- ▶ temperatuuregalisatie op de procesinrichting, gevolgd door een onmiddellijke overbrenging naar een oven, voorgewarmd op de minimum tussenlaagtemperatuur. De opvolgende temperatuurcyclus kan dan verschillende wegen volgen:
 - koelen tot net onder het martensiettransformatiepunt; op die temperatuur houden en vervolgens verhogen om de martensiet te temperen;
 - verhogen tot de austeniteertemperatuur, gevolgd door afkoelen met lage snelheid om een perlietstructuur te verkrijgen;
 - verhogen van de temperatuur voor de snelste transformatie tot austeniet of perliet. Vervolgens hierop houden tot de omzetting is voltooid en daarna langzaam afkoelen.

Om de vereiste behandeling te kiezen moet men bij voorkeur isotherme of continue afkoeltransformatiediagrammen van het basismateriaal raadplegen.

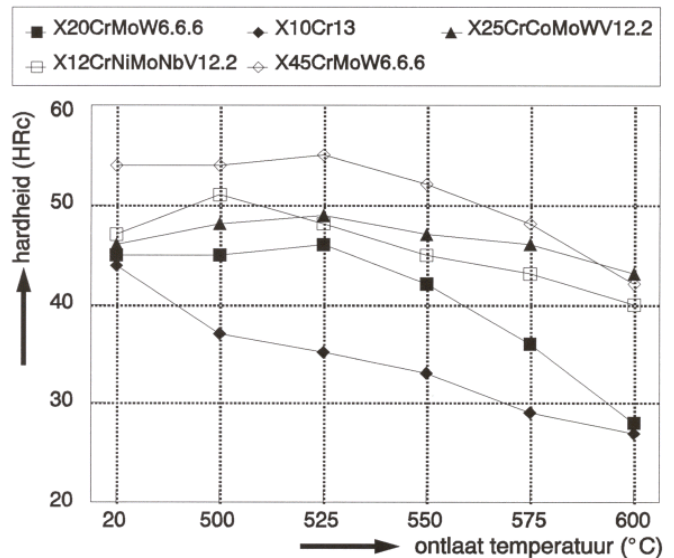
Latere warmtebehandelingen

Opgelaste werkstukken die afgekoeld zijn, zullen meer rest-spanning bezitten, dan die een (aansluitende) warmtebehandeling hebben ondergaan in een oven. Een warmtebehandeling bij een temperatuur gebruikelijk voor spanningsarmgloeien, voor staalsoorten rond de 650 °C, is effectief wanneer onderdelen moeten worden verspaand en ook voor een stabiliteit van de dimensies tijdens bedrijf. Bij deze temperatuur zullen de meeste opslasmaterialen sterk ontlaten (zie figuur 11.3).

In de praktijk zal dan ook een temperatuur tussen 500 en 550 °C het meest worden toegepast. Een langzame opwarming en afkoeling is noodzakelijk. Een praktijkwaarde voor de opwarm- en afkoelsnelheid, bij een geometrie met een gemiddelde complexiteit, is 50 °C/h.

11.4 Speciale aandachtspunten bij het oplassen en thermisch spuiten

Sommige staalsoorten worden bros wanneer ze worden blootgesteld aan verhoogde temperaturen. Bijvoorbeeld 11-14% mangaanstaal moet koud worden gehouden door intermitterend te lassen of door waterkoeling. Sommige



figuur 11.3 Hardheid als functie van de ontlaattemperatuur

nikkel-chroomstaalsoorten zijn gevoelig voor ontlaatsbroosheid of voor een reductie van de taai-bros overgangstemperatuur. In sommige hooggelegeerde corrosievaste staalsoorten kan de brosse sigmafase gevormd worden. Specialistische adviezen zijn noodzakelijk.

Er is een groot aantal metalen en legeringen in gebruik. Wanneer de mogelijkheid wordt overwogen een deklaag toe te passen om de levensduur te verlengen, moet de eerste vraag zijn of er een goedkoper basismateriaal met een betere lasbaarheid gebruikt kan worden. Bij het oplassen moet worden gelet op de volgende kenmerken, die het aanbrengen van een deklaag bemoeilijken of zelfs onmogelijk maken:

- ▶ het smeltpunt van het basismateriaal is lager dan dat van de opslaslegering;
- ▶ bewerkingseigenschappen;
- ▶ bevat gemakkelijk oxiderende elementen, zoals aluminium of koper;
- ▶ het materiaal is hard en bros;
- ▶ een niet-gestabiliseerd corrosievast staal;
- ▶ het staal bevat veel stikstof of silicium.

Grijs gietijzersoorten

Het smeltpunt van deze materiaalgroep is lager dan van staal en dit beperkt de legeringen die opgelast kunnen worden zonder het basismateriaal om te smelten en dus de neersmelt te verdunnen. Bijna alle materialen met ongeveer eenzelfde thermische uitzetting kunnen worden opgespoten, of er kan - net als bij oplassen - worden gewerkt met nikkelrijke bufferlagen. Andere problemen houden het risico van scheuren van het basismateriaal in; het heeft een lage treksterkte en, afhankelijk van de samenstelling, een harde brosse overgangzone en zelfs een grotere broosheid. De problemen kunnen groter worden bij de aanwezigheid van gietfouten.

Wit gietijzer

Wit gietijzer is extreem bros door uitscheiding van primaire carbiden (cementiet-Fe₃C) in een matrix van martensiet; oplassen wordt niet aanbevolen. Opspuiten is daarentegen toepasbaar.

Ni-hard soorten

Deze slijtbestendige gietijzersoorten kunnen worden opgelast, mits nauwgezet de warmtehuishouding gecontroleerd wordt: dat wil zeggen homogeen voorwarmen tot 75 °C en een maximum tussenlaagtemperatuur van 150 °C, die beslist niet overschreden mag worden. Bij het oplassen met een ledeburitische legering is scheuren van de opgelaste laag onvermijdelijk. Opspuiten kent bij dit materiaal nauwelijks beperkingen.

Bufferlagen

De term bufferlaag wordt gebruikt voor een tussen het basismateriaal en de uiteindelijke deklaag aangebrachte laag. Deze laag kan noodzakelijk zijn om:

- ▶ spanningen te verlagen;
- ▶ de hechting te verbeteren (voornamelijk bij opspuiten);
- ▶ scheuren te voorkomen;
- ▶ een barrière te vormen bij poreuze (keramische) toplagen;
- ▶ een betere opasbare ondergrond te verkrijgen;
- ▶ de dikte van dure deklaagmaterialen te beperken.

Het aanbrengen van bufferlagen kan zowel bij het oplassen als thermisch spuiten nodig zijn.

Er is een aantal toepassingen waarbij van bufferlagen gebruik wordt gemaakt. Dit gebeurt onder meer bij de volgende gevallen:

- ▶ harde deklaag op een zacht materiaal bij hoge belastingen. Wanneer een harde opaslegering wordt gebruikt op een zacht basismateriaal bestaat de kans dat de harde laag kapot gaat, omdat de zachte ondergrond wordt ingedrukt onder de hoge belasting (vergelijk de belasting van een glasplaat op een matras). Onder extreme omstandigheden kan dit uitschalen van de opaslaag tot gevolg hebben. Om dit te voorkomen wordt een laag van een sterk en taai materiaal op het werkstuk onder de harde deklaag aangebracht;
- ▶ wanneer het verschil in thermische uitzetting tussen deklaag en basismateriaal groot is en de oppervlaktehardheid groter is dan 50 HRC, kan het zinvol zijn één of meer extra lagen toe te passen met een uitzettingscoëfficiënt tussen die van het basismateriaal en de deklaag. Om een slijtvaste 12-13% chroomstalen laag te spuiten op gegoten aluminium remschijven is bijvoorbeeld met succes aluminiumbrons toegepast. Dit kan ook een laag zijn met een vergelijkbare samenstelling en een lagere hardheid (tussen 25 en 30 HRC). Hiermee worden scheuren in de harde toplaag voorkomen;
- ▶ wanneer het ontwerp uitgaat van een relatief dikke deklaag, kan de volledige dikte, opgebouwd met alternatieve lagen, economisch zijn. Bij booglasprocessen zal de natuurlijke opmenging met het basismateriaal zorgen voor de benodigde gradatie in eigenschappen;
- ▶ wanneer een onderdeel is blootgesteld aan zware stoten of buigen, bestaat het risico dat in de aangebrachte laag, die tijdens het lassen niet is gescheurd en waardoor de restspanningen niet zijn afgenomen, fijne dwarsscheurtjes ontstaan. Deze zijn niet schadelijk voor de harde deklaag, maar wel bestaat het gevaar dat tijdens bedrijf de scheuren als spanningsconcentraties zullen fungeren en zullen doorgroeien tot in het basismateriaal. De tendens doet zich het sterkst voor wanneer het basismateriaal gemaakt is van een hoge-sterkte staal. Het gebruik van een bufferlaag voorkomt deze scheurgroei;
- ▶ thermische barrière-deklagen zijn functioneel poreus. Onder de deklaag wordt daarom een hoog oxidatievaste en dichte nikkel-aluminiumlaag aangebracht. Van dit mechanisme wordt ook gebruik gemaakt bij plasmagespoten slijtvaste keramische lagen die moeten werken in een corrosieve omgeving. Onder de laag wordt een edele en dichte metallische bufferlaag aangebracht (type AISI 316, nikkel-chroom of nikkelbasislegeringen als Alloy 625, Alloy C-22 en Alloy 276).

11.5 Invloed van defecten in de deklaag

De aanwezigheid van defecten in het basismateriaal beïnvloedt de kwaliteit van de deklaag. Veel deklaag worden gebruikt om de levensduur van onderdelen te verhogen, waaronder die voor de chemische en petrochemische industrie, centrales en voor krachtwerktuigen. De eisen voor deze toepassingen zijn hoog en na het bewerken worden deze delen daarom onderworpen aan een onderzoek naar fouten in de aangebrachte lagen.

Twee belangrijke defectbronnen, afkomstig uit het basismateriaal zijn:

- ▶ discontinuïteiten in het oppervlak, zoals poreusheid en scheuren;
- ▶ insluitingen, zoals vormzand in gietstukken, oxidehuid op smeedstukken, slakdelen, segregatie, enz.

Dit type defect vormt een onderbreking van het oppervlak, waardoor lokaal een slechte hechting ontstaat. Bij het oplassen kan ter plekke aanwezig niet-metallisch materiaal ook in het smeltbad terechtkomen en daar (vrij grove) defecten veroorzaken. Een zorgvuldig onderzoek is dus nodig, zowel vóór als na het aanbrengen van de deklaag.

Defecten moeten worden uitgegraven om vast te stellen of ze geen onderdeel uitmaken van een groter onderhuids defect. Insluitingen moeten ook in zijn geheel worden weggenomen en de aldus ontstane holten moeten weer worden opgevuld.

Bij het inlassen van deze defecten gebruikt men lasmetaal met ongeveer dezelfde samenstelling als het basismateriaal.

11.5.1 *Scheuren in de deklaag*

Koudscheuren

Koudscheuren, ook wel waterstofscheuren genoemd, is een van de meest voorkomende verschijnselen bij het lassen van on- en laaggelegeerd staal. Ze ontstaan bij relatief lage temperatuur en kunnen na het lassen, zelfs wel 48 uur na het lassen, optreden. Vaak treedt dit scheurtype op in de warmte-beïnvloede zone. In het lasmetaal zelf kunnen ze echter ook voorkomen.

Koudscheuren kunnen bij het lassen ontstaan wanneer aan de volgende vier voorwaarden gelijktijdig wordt voldaan:

- ▶ aanwezigheid van voldoende opgeloste waterstof;
- ▶ aanwezigheid van trekspanningen;
- ▶ scheurgevoelige, brosse structuur, die gevoelig is voor waterstofopname;
- ▶ temperaturen lager dan 200 °C.

Dit type scheur is bij het opspuiten niet bekend.

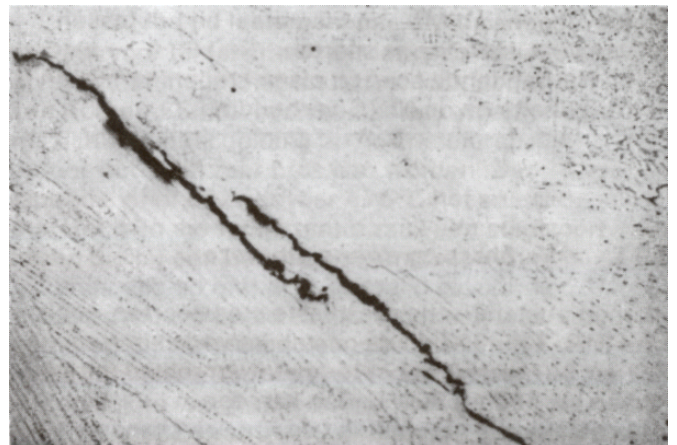
Warmscheuren

Warmscheuren worden gevormd bij hoge temperatuur tijdens het stollen of kort daarna. Een warmscheur heeft een duidelijke aanloopkleur aan de scheurranden. Men onderscheidt twee typen:

- ▶ stollingsscheuren;
- ▶ smeltscheuren.

Stollingsscheuren ontstaan bij legeringen met een groot stoltraject. Beruchte legeringen zijn de koper-nikkellegeringen. De scheuren bevinden zich in het midden van een lasrups, waar de krimp het grootst is (zie figuur 11.4).

Bij het thermisch spuiten wordt het ontstaan voornamelijk bepaald door de dikte van de aangebrachte laag. Dunne lagen hebben hier doorgaans geen last van.



figuur 11.4 Stollingsscheur in type AISI 347 lasmetaal

In austenitische corrosievaste staalsoorten moet, om stollingsscheuren te voorkomen, vrijwel altijd een kleine hoeveelheid ferriet aanwezig zijn. Tijdens de austenitische stolling treedt segregatie op, met name van zwavel. Indien de stolling volledig austenitisch verloopt, neemt de concentratie zwavel in de neersmelt zulke hoge waarden aan, dat het laatste materiaal te laat stolt. Een percentage delta-ferriet van minimaal 3% voorkomt scheuren zonder de corrosie-eigenschappen te veel geweld aan te doen. Om deze reden houdt men een maximum van 8% aan. Men zal dus een ferrietgehalte aanhouden tussen de 3 en 8%. Overigens is het accuraat bepalen van het ferrietgehalte nog steeds een punt van discussie tussen vele instanties. Het gebruik van het ferrietnummer (FN) volgens NEN ISO 8249- 1985 en AWS A4.2-91 is tot op heden een door veel deskundigen geaccepteerde manier om het ferrietgehalte vast te leggen. Men moet wel bedenken dat deze waarde niet het werkelijk volumepercentage weergeeft en men dus van tevoren afspraken moet maken over de manier waarop het ferrietgehalte wordt bepaald.

Andere methoden om het ferrietgehalte te bepalen zijn:

1. Met behulp van een diagram volgens:
 - Schaeffler;
 - Schaeffler-De Long (invloed N);
 - Welding Research Council (invloed Mn, Si, C, Cu, N en Nb nauwkeuriger verwerkt).
2. Point counting
Dit is een microscopische telmethode, waarbij in het microscoopbeeld, zo nodig in drie richtingen, het aantal ferrietvelden in de austenietmatrix wordt geteld met behulp van een telraaster.
3. Beeldanalyse
Een microscopische methode waarbij door middel van een speciale etsing een groot contrast wordt aangebracht tussen de ferriet- en de austenietfase. De meting verloopt verder automatisch.

Smeltscheuren zijn het gevolg van de aanwezigheid van laagsmeltende fasen (S- en P-verbindingen) in het deklaagmetaal. Deze laagsmeltende fase komt aan de korrelgrenzen terecht. Als gevolg van krimpspanningen zullen scheuren op deze zwakke plaatsen ontstaan. Ze moeten over het algemeen worden toegeschreven aan onzuiverheden. Schoner toevoegmateriaal voorkomt dit type scheuren. Bij het lassen kunnen door mangaantoevoegingen (vorming van het hoogsmeltende MnS) dergelijke scheuren ook worden voorkomen. Bij het oplossen wordt vaak een overlap tussen de verschillende lasrupsen van meer dan 50% toegepast; de warm-scheuren worden dan omgesmolten. Bij het lassen van corrosievast staal is een 100% austeniet structuur zeer gevoelig voor warm-scheuren. Enkele procenten δ -ferriet in de matrix heft dit probleem op.

Krimpscheuren

Krimpscheuren zijn gewoonlijk met het blote oog waarneembaar en behoeven het functioneren van het werkstuk niet negatief te beïnvloeden. Bij de hardere oplos- en insmeltlegeringen die de hoogste weerstand tegen abrasieve slijtage opleveren, verminderen deze scheuren de restspanningen. Deze scheuren zijn zelden de oorzaak van het wegbreken van de laag van het basismateriaal, vooropgesteld dat geen harding in de warmte-beïnvloede zone (WBZ) is opgetreden en een voldoende binding met het basismateriaal heeft plaatsgevonden.

Scheuren zijn echter niet toegestaan in:

- ▶ afdichtende oppervlakken van kleppen, mechanische zittingringen, drukkerijrollen, enz.;
- ▶ oppervlakken, die aan erosie staan blootgesteld;
- ▶ oppervlakken, die zowel aan slijtage als aan corrosie staan blootgesteld;
- ▶ oppervlakken onderworpen aan een vermoeiingsbelasting;
- ▶ oppervlakken, die geen procesmateriaal mogen opnemen, die latere partijen kunnen besmetten, zoals extrusie van kunststoffen.

Scheuren die geen invloed op de levensduur van een onderdeel tijdens bedrijf hebben, kunnen tijdens de opslag, bij-

voorbeeld in de buitenlucht, een vorm van spleetcorrosie veroorzaken. Gevallen waarbij via deze scheuren onder de deklaag corrosie optreedt, waardoor de laag er af wordt gedrukt, zijn niet zeldzaam. Indien dit het geval is, moet gedurende de opslagperiode het oppervlak geconserveerd worden met bijvoorbeeld een tectyllaag. Een nog betere methode is om, ook bij opgelaste lagen, een sealer te gebruiken, zoals bij het opspuiten gebruikelijk is.

Slijpscheuren

Slijpscheuren zijn gewoonlijk zeer ondiep, maar kunnen groeien onder mechanische of thermische spanningen. Zij moeten worden behandeld als krimpscheuren. Vooral moeilijk te bewerken materialen zijn hier zeer gevoelig voor. Het slijpen van dunne thermisch gespoten keramische lagen vereist in dit verband speciale ervaring.

Scheuren in de grenslaag

Indien de deklaag door slechte hechting met het basismateriaal omhoog komt, kan het materiaal afschilferen of uitschalen onder lichte mechanische druk of relatief kleine temperatuurverschillen. Om deze reden moeten de werkstukken worden afgekeurd. Reparatie kan alleen door een totale verwijdering van de deklaag plaatsvinden.

11.5.2 Poreusheid van de deklaag

De mate van poreusheid en de afmetingen van de poriën kunnen enorm variëren tussen een paar spikkels - onzichtbaar voor het blote oog - tot grote poriën en sponsachtige gebieden. Bij spuittechnieken is een zekere mate van poreusheid normaal en bij sommige toepassingen zelfs gewenst (thermische isolatie). Bij oplassen en poederspuiten met insmeltlegeringen zijn de lagen doorgaans niet poreus. Als het hier toch voorkomt, is dit meestal het gevolg van een slechte voorbereiding of van een verkeerde proceskeuze. Van geval tot geval zal vooraf bekeken moeten worden wat acceptabel is. Overigens is het van groot belang van tevoren vast te stellen hoe de beoordeling zal plaatsvinden.

11.5.3 Insluitingen in de deklaag

Wat voor poreusheid geldt, geldt ook voor de insluitingen. Insluitingen kunnen op verschillende manieren ontstaan. De bekendste zijn wel de slakinsluitingen, die kunnen ontstaan bij het lassen met beklede elektroden, met gevulde draden en bij het onder poeder lassen. Deze onvolkomenheden moeten worden aangemerkt als fouten van de lasser. Of zij moeten worden gerepareerd, hangt af van de toepassing van de deklaag. Zo zullen slakinsluitingen bij onderdelen onderhevig aan abrasieve slijtage minder ernstig zijn, dan wanneer zij zich bijvoorbeeld in een afdichtrand bevinden.

Hoofdstuk 12

Beproevingen

12.1 Functie van testen

Beproevingen kunnen zowel aan het basismateriaal plaatsvinden als aan de lastoefogmaterialen of de opspuitmaterialen. Ook moet van de aangebrachte laag bepaald worden of aan de eisen, gesteld aan de eigenschappen, wordt voldaan. De beproevingen van het basismateriaal (trekproef, diverse hardheidsmetingen, enz.) worden als algemeen bekend beschouwd en worden niet behandeld. Het testen van de toevoegmaterialen voor oplassen, respectievelijk opspuiten, zal veelal worden gedaan door de fabrikant. Het bedrijf dat de laag aanbrengt, maar soms ook de eindgebruiker, kan verlangen dat de resultaten worden gedocumenteerd, door bijvoorbeeld een certificaat bij de levering te eisen. Een andere invalshoek is het onderling vergelijken. De oppervlaktegesteldheid vóór het aanbrengen en het testen van de opgebrachte laag zijn hier van belang. Dit geldt uiteraard ook als men de functionele eigenschappen van een opgebrachte laag wil controleren. Tenslotte zullen zowel de voorbereiding van de ondergrond als de toevoegmaterialen aan bepaalde kwaliteitseisen moeten voldoen om een deklaag met de gewenste eigenschappen te krijgen. Ook hieraan kan onderzoek gedaan worden. In het algemeen kunnen testen dus worden gebruikt zoals in tabel 12.1 vermeld. Het testen vervult alleen een functie voor de aangekruiste velden. Deze worden hieronder nader toegelicht.

tabel 12.1 Functie van testen

functie	voorbewerking ondergrond	toevoegmaterialen en beschermgassen	deklaag
meten van functionele eigenschappen	X	X	X
vergelijken van opties/varianten (ranking)			X
kwaliteitsborging	X	X	X

12.1.1 Meten van functionele eigenschappen

Deze functie is vooral van belang gedurende de ontwikkeling van producten, bij analyse van problemen en bij arbitrage. Van tevoren moet goed bekend zijn hoe de eigenschappen van het deklaagsysteem in de test worden aangesproken. Juist vanwege het systeemkarakter moet goed worden nagedacht over alle elementen van figuur 7.1 om ook vergelijking met en gebruik van eerdere ervaring mogelijk te maken.

Vorbewerking ondergrond

De kwaliteit van de ondergrond is een belangrijke, bepalende factor in het systeem, vooral bij thermisch gespoten lagen, vanwege de mechanische hechting. Bij ingesmolten lagen, waar een metallurgische hechting ontstaat, is beheersing van de factoren die de diffusie bepalen van belang. Functionele testen zullen doorgaans gericht zijn op het kwantificeren van de invloed van vervuiling en restspanningen van de voorbereiding(en).

Ook bij lassen is de voorbereiding van essentieel belang. Het is sterk afhankelijk van het basismateriaal. Koolstofstaal is in het algemeen "vergeevingsgezinder" dan nikkellegeringen of corrosievast staal. Maar let ook op oude onderdelen die ter reparatie moeten worden opgelast. Vet en olie kunnen heel diep in het materiaal dringen en tijdens het lassen tot poreusheid van de opaslaag leiden.

Toevoegmaterialen en beschermgassen

Dit is doorgaans het gebied van de leverancier; zij zijn doorgaans zeer zorgvuldig voordat zij een product op de markt

brengen. Voor zowel de uitvoerder als de eindgebruiker is het goed te weten dat de leverancier in zijn laboratoria veel werk heeft verzet om de materialen bepaalde eigenschappen mee te geven. Heeft men een specifiek probleem met of vragen over een eigenschap, dan is enig aandringen bij de tussenhandel vaak voldoende om de gewenste gegevens beschikbaar te krijgen. Bedenk hierbij wel dat men terughoudend kan zijn in het openbaar maken van 'gevoelige gegevens'. Daar staat tegenover dat men leveranciers die in het geheel niet bereid zijn informatie te verstrekken ervan mag verdenken 'zomaar iets te beweren'.

Deklaag

De functionele eigenschappen zijn systeemafhankelijk en moeten in hun juiste context worden beoordeeld, dat wil zeggen naar de specifieke condities die gelden bij de testen. Veelal zal de informatie uit een test niet gemakkelijk overdraagbaar zijn naar een andere situatie, maar met de nodige ervaring kan men anticiperen op de eigenschappen en deze vervolgens in een specifieke test verifiëren. Ook hier geldt dus zeer nadrukkelijk de betekenis van figuur 7.1.

12.1.2 Vergelijken van opties/varianten

De belangrijkste toepassing is hier om de beschikbare opties naast elkaar te kunnen zetten. Doorgaans zal men dit doen op basis van één of meer functionele eigenschappen. De context van de proeven is door het herhalingselement echter minder kritisch. Wel moet erop worden gelet dat de functionele eigenschap op de juiste wijze wordt aangesproken. Het heeft bijvoorbeeld geen zin dekragen te vergelijken op weerstand tegen abrasie als de hardheid van het testmedium (bijvoorbeeld aluminiumoxidegrit) veel hoger is dan die van het werkelijke medium (bijvoorbeeld zand). Testen met zand laat in dit geval het kantelpunt goed zien; door gebruik van hard grit kunnen de resultaten zo dicht bij elkaar komen te liggen dat goed en slecht niet goed te onderscheiden zijn. Omgekeerd geldt echter ook dat als er veel ervaring is met een test, zoals bijvoorbeeld de zoutsproei-test, deze wel kan worden gebruikt voor andere milieus, mits de hoofdcomponenten aanwezig zijn. Zo is het goed mogelijk deze test te gebruiken voor alle milieus waarin sprake is van een neutraal (of licht zuur) zout, waterig milieu, of wanneer men alleen geïnteresseerd is in het vinden van een deklaagoptie die geen doorgaande poreusheid naar de ondergrond oplevert.

De in tabel 12.1 niet aangekruiste velden zijn alleen van belang als de functionele eigenschappen in detail bekend zijn. Rangschikking op basis van benadering is te riskant.

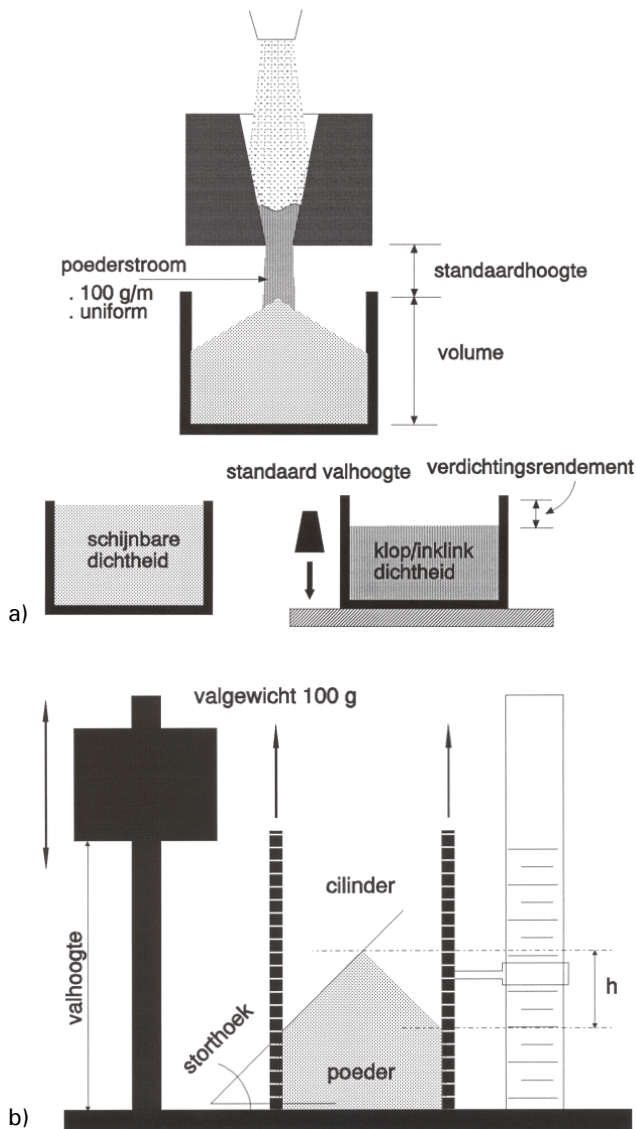
12.1.3 Kwaliteitsborging

Kwaliteitsborging omvat het gehele proces van inkoop naar het gereede product. Onderdelen van de kwaliteitsborging zijn dus onder meer de voorbereiding van het basismateriaal, controle op het ingekochte toevoegmateriaal, inzet van en toezicht op het juiste personeel (bij lassen inzet van gecertificeerde lassers), toepassing van goedgekeurde procedures (bij het lassen via lasmethodekwalificaties), niet-destructieve beproeving, enz.

Bij de testen is het prettig als de functionele eigenschappen en de resultaten van vergelijkende proeven bekend zijn, maar dit is niet noodzakelijk. Een test voor kwaliteitsborging behoeft geen functionele eigenschap aan te spreken, als men alleen geïnteresseerd is vast te stellen of de te testen deklaag overeenkomt met een eerdere, waarvan men de functionele eigenschappen al kent. Voor kwaliteitsborging behoeft men dus alleen zeker te weten dat een 'goede' deklaag en een 'slechte' deklaag in een arbitraire test een duidelijk herkenbaar verschillend gedrag laten zien.

Zo kan men voor voorbereiding van de ondergrond met een simpele waterdruppel nagaan of het oppervlak voldoende schoon (vetvrij) is. Op een vetvrij oppervlak zal de druppel meer uitvloeien dan op een vette ondergrond. Voor de toevoegmaterialen en dragergassen kan bijvoorbeeld met een vast ingesteld proces gekeken worden of

een spuitpoeder 'normaal loopt' (zie figuur 12.1a en b). Het loopgedrag van een spuitpoeder wordt in grote mate bepaald door de korrelgrootte, de verdeling van de korrelgrootte en de vorm van de korrel. Een ronde korrel vertoont een beter loopgedrag dan een hoekige korrel.



figuur 12.1 Testen van poeder (a) loopgedrag volgens Hall, (b) storthoek

Om de hechting van een opgespoten deklaag te bekijken moet een proefplaatje worden gespoten. Bij buiging ervan moet minimaal een bepaalde hoek gehaald kunnen worden voor de deklaag scheurt of er af springt.

Ook bij het oplassen is het aan te bevelen een aantal rupsen op een proefplaat te lassen. Let er wel op dat de dikte daarvan vergelijkbaar is met de werkelijkheid, zodat de warmte-afvoer vergelijkbaar is. Via een oppervlakteonderzoek kan op scheurvorming worden gecontroleerd en via een macroscopisch onderzoek kan de inbranding worden bepaald. Leveren deze onderzoeken een onbevredigend resultaat op, dan kan via aanpassing van de lasparameters wel een bevredigend resultaat verkregen worden. Deze beproevingen leveren een goedgekeurde lasmethode op. Voor het verkrijgen van een goedgekeurde lasprocedure voor het gemechaniseerd lassen wordt verwezen naar de norm NEN-EN 1418.

Ook het gedrag tijdens slijpen en polijsten zegt veel over de deklaag. Men kan berekenen dat de dichtheid bepaalt hoeveel materiaal per slijpbeweging kan worden afgenomen bij een bepaalde belasting. De afname per slijpbeweging

geeft dus ook een idee van de slijtvastheid. Hierop is de 'schuurpapier' proef gebaseerd. De vorm van de slijp- of schuurdeeltjes heeft een grote invloed. Men moet dus altijd dezelfde soort en kwaliteit schuurpapier gebruiken met dezelfde druk om een goed gevoel voor het deklaaggedrag te krijgen.

De oppervlakteruwheid na slijpen en polijsten is niet alleen een functie van de bewerkingsparameters. Vooral bij keramische materialen wordt het eindresultaat sterk bepaald door de bindingskrachten in het deklaagmateriaal en de natuurlijk aanwezige holten (poreusheid). Om een zeer glad oppervlak te krijgen, is een sterk materiaal met een fijne, homogene korrel nodig. Het al of niet reproduceren van de ruwheid na slijpen is dan vaak meer een materiaalgegeven dan een bewerkingsaspect. Ook dit kan men goed gebruiken bij de kwaliteitsbeoordeling.

12.2 Invloed schaalgrootte van de proeven

Algemeen gesteld zal men altijd streven naar eenvoudige, snel uit te voeren testen, omdat realistische bedrijfsproeven enkele zwaarwegende bezwaren kennen:

- ▶ lange beproevings tijden (maanden tot jaren);
- ▶ voor de opzet en het volgen van deze proeven is deskundig personeel noodzakelijk, dat het productiepersoneel 'voor de voeten kan lopen';
- ▶ tijdens de lange beproevingsduur kunnen in het milieu of het belastingspectrum wijzigingen optreden;
- ▶ tijdens het aantastingsproces kunnen verschuivingen naar andere schadetypen optreden.

Deze bezwaren worden ondervangen als de testcondities en de proefstukken worden vereenvoudigd. De test krijgt daarbij een zekere afstand tot de werkelijkheid. Deze afstand is groter naar mate de schaalgrootte en de geometrie van het proefstuk sterker afwijken van die van het werkelijke object. Dit komt, omdat de interactie van het proefstuk met zijn omgeving anders is; het gaat feitelijk om een ander technische systeem. Voor een kritische toepassing is het daarom nodig de initiële eenvoudige proeven te laten opvolgen door realistischer testen. In stappen wordt daarbij het technische systeem dichterbij de werkelijkheid gebracht, naarmate de zekerheid over de gevonden oplossing toeneemt. Dit gaat niet zonder problemen. Vaak gebruikt men voor de initiële testen standaardproeven die, omdat ze in normen zijn beschreven, een te groot waarheidsgelalte krijgen toegemeten. De warmtestromen en de grootte en verdeling van spanningen en vervormingen kunnen in een klein, eenvoudig proefstuk heel anders zijn dan in het werkelijke object.

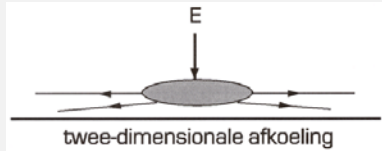
Wat vooral in de gaten moet worden gehouden, is dat de fysische eigenschappen van de deklaag heel anders kunnen zijn dan die van de ondergrond. Vooral het verschil in uitzetting is van groot belang. Bij een relatief dun proefstuk leidt dit verschil primair tot vervormingen en blijven de spanningen laag. Bij een grotere doorsnede is dit net andersom. Hervreiding van spanningen is steeds moeilijker naarmate de doorsnede groter en de geometrie complexer wordt. Dit kan problemen geven met de hechting van de deklaag, terwijl hier geen sprake van was bij het kleinere proefstuk. Ook kunnen bij toenemende schaalgrootte scheuren ontstaan. Een dun stuk materiaal voert de warmte slecht af; bij een grote doorsnede kan de ondergrond de warmte zo snel afvoeren, dat hierin hardingseffecten kunnen optreden, of poreusheid kan ontstaan. De veranderingen in de warmtestromen en spanningen kunnen sprongsgewijs verlopen, bijvoorbeeld als de warmtestroom overgaat van 2-dimensionaal (dun plat proefstuk) naar 3-dimensionaal (zie kader 12.1). Een holle geometrie heeft ook een heel andere warmtehuishouding dan een massieve. Belangrijk is vooral te letten op verhoudingen.

De kern van een goed testtraject is, dat men de volgende, realistischer testfase pas ingaat, als de test waar men bezig is aan de verwachtingen voldoet. Dat wil zeggen dat men van tevoren moet nadenken over het mogelijke resultaat.

De afkoeltijd tussen 800 en 500 °C is belangrijk, omdat uit proefnemingen is gebleken dat:

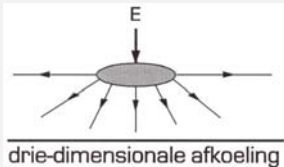
1. Voor alle plaatsen in een zone waar de piektemperatuur boven de 900 °C is gekomen, de afkoeltijd in dat gebied nagenoeg gelijk is.
2. In dit gebied de meeste omzettingen in de structuur plaatsvinden.

De afkoeltijd tussen 800 en 500 °C ("t_{8/5}"): a. Voor een twee-dimensionale afkoeling geldt:



$$t_{8/5} = \frac{1}{4\pi\lambda\rho c} \cdot \frac{E^2}{t^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right]$$

b. Voor een drie-dimensionale afkoeling wordt dit:



$$t_{8/5} = \frac{E}{2\pi\lambda} \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right)$$

Indien deze twee vergelijkingen aan elkaar gelijk worden gesteld, verkrijgt men dus de overgangsdikte, waarbij de twee-dimensionale warmteovergang overgaat in een drie-dimensionale. De overgangsdikte is:

$$t_1 = \sqrt{\frac{E}{2\rho c} \left(\frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right)}$$

Voor staal ligt, afhankelijk van de warmte-inbreng, de overgangsdikte tussen ca. 15 en 20 mm.

In het voorgaande is:

t_{8/5} = afkoeltijd van 800 naar 500°C in s

t = materiaaldikte in cm

E = warmte-inbreng = Ul/v in J/cm

U = boogspanning in V

I = stroomsterkte in A

v = voortloopsnelheid in cm/s

t₁ = overgangsdikte (2-dimensionaal naar 3-dim.)

T₀ = voorwarm- (of omgevings)temperatuur in °C

c = soortelijke warmte in J/g

ρ = dichtheid in g/cm³

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt in W/cmK

kader 12.1

De uitslag van de test geeft dan aan of men wel of niet op de goede weg is. Vooral voor een dure en tijdrovende praktijkproef is voldoende zekerheid een absolute voorwaarde. Eigenlijk is een bedrijfsproef pas verantwoord als men in redelijkheid mag aannemen dat de uitslag positief zal zijn. Besluit men voor testen met een in stappen toenemende realiteit, dan wordt voor elke volgende fase een nieuwe verwachting opgesteld.

Soms is een hybride-oplossing verantwoord: men gebruikt eenvoudige testcoupons onder actuele bedrijfscondities. Bij corrosieonderzoek is dit vaak de enige mogelijkheid bij een moeilijk voorspelbaar of fluctuerend procesmilieu.

De oude norm DIN 50322 gaf zes beproevingscategorieën voor een testtraject met stapsgewijze verschillen in schaal-grootte. Ondanks dat deze norm niet meer geldig is, is het systeem van indeling in categorieën nog goed te hanteren. Deze zijn hier weergegeven, aangevuld met een voorbeeld.

1. Bedrijfsproeven met complete installaties.

Bijvoorbeeld een treinstel met opgelaste assen of opge-

spoten tanden in een tandwielkast op de baan; men denkt geslaagd te zijn, maar wil een langduriger verificatie onder actuele omstandigheden.

2. *Proeven met de complete installatie op een proefstand.* Het treinstel met de tandwielkast op een proefstand; men kent het gedrag van de tandwielen door en door, maar is onzeker over de interacties met de andere tandwielen, lagers, enz.
3. *Proeven met het te testen onderdeel.* Alleen de tandwielkast wordt beproefd; men heeft voldoende vertrouwen in het gedrag voor een duurproef.
4. *Proeven met vormstukken, d.w.z. proefstukken met de juiste, eventueel verkleinde vorm.* Alleen de opgelaste assen of de opgespoten tandwielen; men kent de eigenschappen en het gedrag van deklagen, maar is onzeker over de invloed van de geometrie en/of schaalgrootte.
5. *Modelproeven met proefstukken.* Proefstukken onder dezelfde belasting als de assen of de tandwielen met verschillende deklagen, waarvan men de eigenschappen kent en het gedrag enigszins kan voorspellen.
6. *Eenvoudige testcoupons met coatings.* Men wil het gedrag van de deklagen leren kennen door het proces te simuleren in vereenvoudigde testopstellingen of men wil eigenschappen meten, al of niet in standaardtesten.

De laatste drie categorieën worden modelproeven genoemd. Door de beproevingen op deze wijze steeds te vereenvoudigen zal de meetnauwkeurigheid weliswaar toenemen, echter de vertaling van de proefresultaten naar de praktijk zal steeds moeilijker worden, tenzij men de proeven zoals hierboven in een onderling verband gebruikt.

Bij de betrouwbaarheidstesten zijn de testen op onderdeel- of vormstukniveau uitwisselbaar. Men doet doorgaans een van beide.

12.3 Testaspecten

In hoofdstuk 3 zijn oppervlakte-eigenschappen en -eisen besproken. Tezamen met de mogelijke degradatiefenomenen uit hoofdstukken 4, 5 en 6 kunnen nu testcondities worden ontwikkeld. Door hieraan ook prioriteiten toe te kennen, te baseren op de functie van de test en de toepassing van de deklaag, kunnen testen worden gekozen. In deze paragraaf worden standaardtesten, waarvan een deel ook reeds in normen is vastgelegd, en enkele belangrijke niet gestandaardiseerde proeven kort beschreven. Men moet zich wel realiseren dat laboratoriumproeven niet overeenkomen met de werkelijke praktijk; ze kunnen wel richtinggevend zijn. Zij zullen dus altijd gevolgd moeten worden door beproeving op werkelijke bedrijfsomstandigheden.

Laboratoriumproeven kunnen wel gebruikt worden voor het vergelijken van oplaslegeringen.

12.3.1 Standaard slijtagetesten

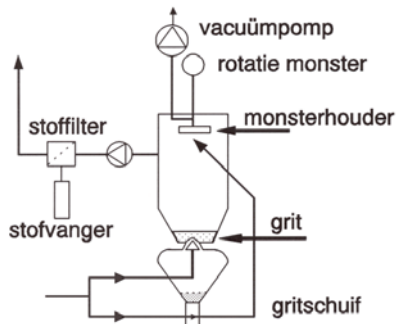
Voor tribologisch onderzoek is een aantal testen gestandaardiseerd. De meest gebruikte modelproeven worden hierna beschreven.

Straalslijtage beproeving

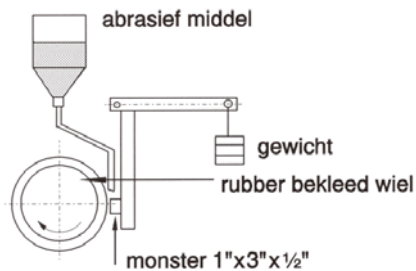
In figuur 12.2 is deze beproevingsmethode schematisch weergegeven. De straalslijtagewaarden worden bepaald door het gewichtsverlies tussen vóór en na het stralen te bepalen. De straaltijd van iedere cyclus is één uur. Het gemiddelde van 5 uur stralen is de gezochte slijtagewaarde in g/h.

Rubber Wheel Abrasion Test (RWAT)

Het principe van deze testmethode is in figuur 12.3 weergegeven. Deze proef staat beschreven in ASTM G65-91. Het abrasieve materiaal is in de meeste gevallen kwartszand. De gevonden slijtagewaarden worden uitgedrukt in procenten van de referentieslijtagewaarden, gevonden voor S 235 (St. 37).



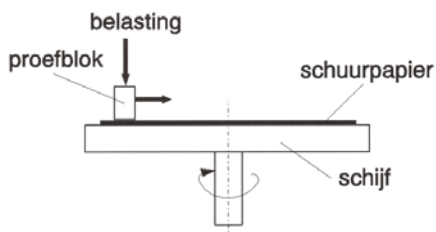
figuur 12.2 Schema straaalslijtage apparaat



figuur 12.3 Schema RWAT-apparaat

Schuurpapierproef

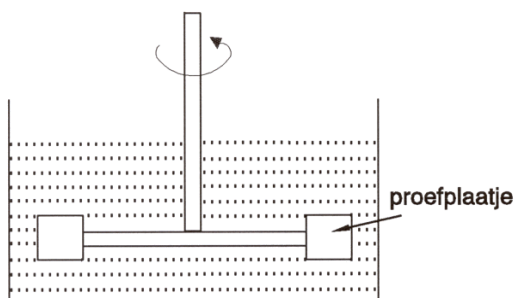
Het betreft hier een eenvoudige proef om de weerstand tegen een abrasieve slijtage te bepalen, waarbij de spanning relatief hoog is. Een testblok wordt onder belasting over een oppervlak bestaande uit schuurpapier bewogen (zie figuur 12.4). Er bestaan verschillende testapparaten en bewegingspatronen, die allen op dit principe berusten. De apparaten, waarbij het proefblok gedurende de gehele testperiode over nieuw papier wordt bewogen, verdienen de voorkeur, daar men dan geen last heeft van versleten schuurpapier. Het testresultaat wordt uitgedrukt als een gewichtsafname per tijdseenheid (g/h).



figuur 12.4 Schema schuurpapierproef

Slurryproef

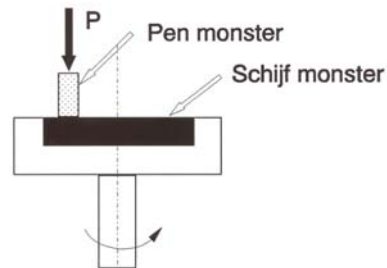
Bij het transport van zand-watermengsels staan pompen en leidingen, enz. bloot aan erosie door dit mengsel. Door twee of meer proefplaatjes in een bak door een dergelijk mengsel te laten bewegen, wordt deze slijtagevorm gesimuleerd (zie figuur 12.5). De test staat beschreven in ASTM G-75. Het resultaat wordt uitgedrukt als een gewichtsverlies per tijdseenheid (g/h).



figuur 12.5 Schema slurry-proef

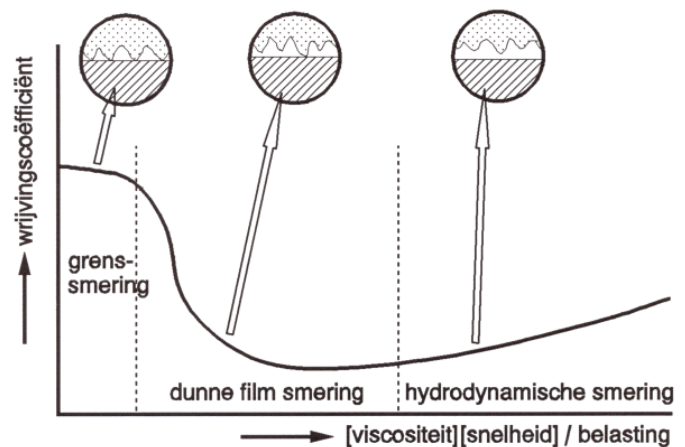
Pin on disc

Dit is een algemeen toepasbare testopstelling voor adhesieve slijtage (zie figuur 12.6). De opstelling is vergelijkbaar met de schuurpapierproef: een schijf draait onder een belaste pen, maar hier is de schijf het monster. De horizontale en verticale bewegingen van de pen kunnen worden gestuurd en de krachten en verplaatsingen hierbij worden gemeten. De slijtweg wordt gemeten op de schijf, zowel naar omvang als vorm. In een daartoe geschikte opstelling kan zowel gesmeerd als ongesmeerd worden getest.



figuur 12.6 Schema pin on disc-test

Geavanceerde uitvoeringen staan een volledige simulatie toe van hydrodynamische en grenssmeercondities. Met de pin-on-disc machine kan men dus ook een Stribeck curve, die de overgang tussen grenssmering en hydrodynamische smering in beeld brengt, opnemen en het gedrag van smeermiddelen evalueren (zie figuur 12.7). Omdat veel parameters zijn te variëren en tegenwoordig de gegevensverwerking per computer gebeurt, maakt dit de test tot een van de meest veelzijdige.



figuur 12.7 Schematische Stribeck curve

Bij varianten van de test kan ook de pin, die normaal van een standaard zeer slijtvast materiaal wordt gemaakt, worden onderzocht. Zo kan men het slijtend effect van verschillende deklagen op bijvoorbeeld kunststof lagermaterialen met elkaar vergelijken. Van deze test is afgeleid de block on ring test, waarbij een ronde pen of rechthoekig blokje op de buitenomtrek van de testschijf wordt geplaatst. Hiermee is het mogelijk conforme oppervlakken (oppervlakken met dezelfde kromming) te bekijken.

De test is beschreven in ASTM G 99 (pin on disk) en ASTM G 77 (block on ring).

De test is zeer goed te gebruiken voor het meten van functionele eigenschappen, maar is in een standaardopzet ook goed te gebruiken voor vergelijking en kwaliteitsborging. De eenheid is dan gewichtsverlies per tijdseenheid (g/h) van het zachtste materiaal.

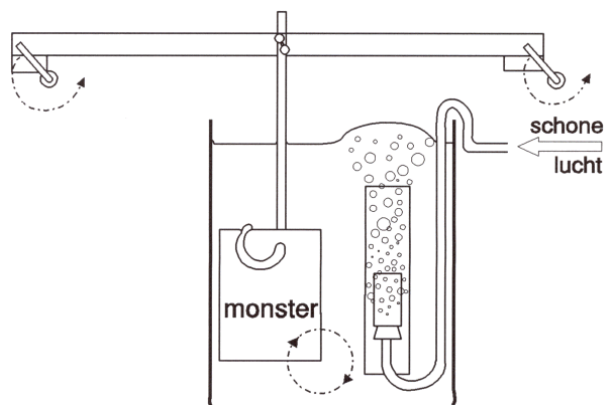
12.3.2 Standaard corrosietesten

Voor het corrosieonderzoek bij deklagen vormt de mogelijke aanwezigheid van onvolkomenheden een beperking

voor het toepassen van standaardtesten. Deze zijn ontwikkeld voor het keuren van massief materiaal. Als een deklaag doorgaande poreusheid bevat, bepaalt niet de deklaag, maar de ondergrond de weerstand tegen corrosie. De resultaten van standaardtesten kunnen dan zeer sterk afwijken en men krijgt absoluut geen juist beeld van de corrosieweerstand van het deklaagmateriaal. Toch zijn standaardtesten in een aantal gevallen nuttig te gebruiken; met name om te beoordelen of de aanwezige onvolkomenheden in de deklaag het corrosiegedrag onacceptabel beïnvloeden.

Een simpele immersietest (onderdompeling in een vloeistof) in leidingwater is hiervoor al vaak voldoende. Hiervoor zijn talloze uitvoeringen te bedenken. ASTM G31 geeft de algemene opzet en aandachtspunten voor een laboratorium immersietest. Belangrijk is dat monster en/of vloeistof circuleren. Figuur 12.8 geeft een voorbeeld van een opstelling waarbij het monster in een rondgaande beweging wordt gebracht.

De resultaten van de immersietest worden weergegeven als een gewichtsverlies per tijdseenheid of het aantal indicaties per oppervlakte-eenheid.



figuur 12.8 Voorbeeld immersietest

Zoutsproeitest

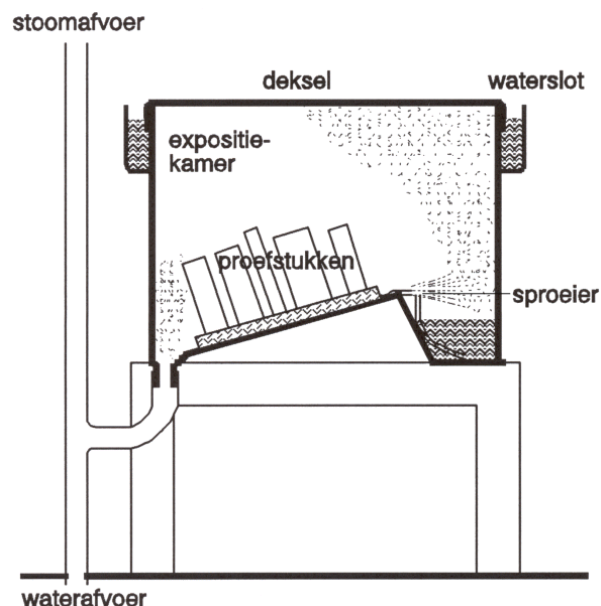
Een meer geavanceerde test is de zoutsproeitest zoals deze in ASTM B117 (standaarduitvoering), ASTM B287 en ASTM G85 (overige zoute milieu's) zijn beschreven (zie figuur 12.9). Bij de test wordt het materiaal blootgesteld aan een warme zoutnevel. De vernevelde zoutoplossing kan agressiever worden gemaakt door toevoegen van zuur. Goede deklaagen, gebaseerd op austenitisch corrosievast staal, superlegeringen of keramiek, moeten een blootstelling van 1000 uur aan de zure zoutsproeitest gemakkelijk kunnen doorstaan. Heeft men enige ervaring in het gedrag van deklaagen, dan kunnen ook elektrochemische proeven, zoals de potentiaalmeting volgens ASTM G5, worden gebruikt. Kent men de 'normale' stroomdichtheid bij een gesloten oppervlak, dan is direct te zien of er veel of weinig doorgaande fouten aanwezig zijn. De stroomdichtheid neemt dan proportioneel met het foutoppervlak toe. Op deze manier kan ook de weerstand tegen interkristallijne aantasting worden beoordeeld.

Het resultaat van de test kan worden uitgedrukt in het aantal indicaties per oppervlakte-eenheid. Bij sterke aantasting wordt het beeld vaak op foto vastgelegd.

Ferroxyltest

Een snelle indicatie van tot op het basismateriaal doorlopende poreusheid of scheuren is mogelijk met de ferroxyltest. Deze staat o.a. beschreven in ASTM A380 en NEN 2170. De invalshoek van beide normen is verschillend. ASTM A380 is bedoeld voor reinheidscontrole van oppervlakken van corrosievaste staalsoorten. Met de ferroxyltest wordt dan ijzercontaminatie aangetoond.

NEN 2170 is bedoeld voor het controleren van galvanische nikkel- en nikkelchroomlagen. Deze norm is summier in het geven van randvoorwaarden voor de omgeving, die echter nogal streng zijn. De waarschuwing dat ijzerhoudend stof



figuur 12.9 Zoutsproeitest

in de omgeving of in het spoelwater aanleiding kan geven tot foutieve resultaten moet uiterst serieus worden genomen. De ASTM geeft nog meer beperkingen. Zo wordt de test uiterst gevoelig genoemd en mag alleen worden uitgevoerd door personeel dat zeer goed vertrouwd is met de beperkingen. Verder mag de test niet worden gebruikt op oppervlakken die later met levensmiddelen in aanraking komen.

Op een oppervlak van een corrosievast staal worden contaminatie met ijzer, met stalen gereedschap aangebrachte merken, resten van ijzerhoudende beitsvloeistoffen, ijzerstof, ijzer- en ijzeroxide-insluitingen, enz. zeer scherp aangetoond. De ervaringen met de test voor dichtheidscontrole zijn echter wisselend. Een belangrijke oorzaak bij thermisch gespoten lagen is, dat veel keramische poeders als natuurlijke verontreiniging een beetje ijzer bevatten. Bij de test kan dit ten onrechte doorgaande poreusheid suggereren. De ferroxyltest mag dan ook nooit zomaar gebruikt worden. Goede afspraken vooraf en ervaring met het gedrag van een specifieke deklaag in de test zijn absoluut noodzakelijk. Het testresultaat wordt gegeven als het aantal poriën per oppervlakte-eenheid. De NEN hanteert een maximum van 50/dm²; daarboven wordt 'ontelbaar' aangegeven.

ASTM A262

Standaardtesten als de Streicher test, de Huey test en de Strauss test, allen beschreven in ASTM A262, geven een bepaalde gewichtsafname gedurende de beproevingsstermijn. Voor dikke opslagen zijn ze goed te gebruiken, mits de niet met een deklaag bedekte delen van het monster goed zijn afgedekt. Hiervoor zijn normaal in de handel verkrijgbare meer-componenten epoxyharsen zeer geschikt. Op deze manier is ook de ijzerchloridetest volgens ASTM G48 te gebruiken voor het beoordelen van de weerstand tegen putcorrosie.

Het testresultaat wordt weergegeven als een gewichtsafname per tijdseenheid of het aantal afwijkingen per oppervlakte- of volume-eenheid.

12.3.3 Niet gestandaardiseerde beproevingsmethoden

De waarde van niet gestandaardiseerde methoden is bij deklaagen beperkt, doordat de resultaten slechts zeer beperkt met die van andere onderzoekers zijn te vergelijken. Echter, juist vanwege de praktische bezwaren die bij standaardtesten gelden, zullen niet gestandaardiseerde methoden relatief snel worden gebruikt. In dit geval heeft het grote voordelen een opstelling te kiezen, waarbij zoveel parameters kunnen worden gekwantificeerd en waarbij de resultaten

geautomatiseerd worden verwerkt en vastgelegd. Dergelijke opstellingen zijn kostbaar en doorgaans buiten het bereik van de leveranciers en/of ontwikkelafdelingen van bedrijven. Grotere onderzoeksinstituten en universiteiten beschikken vaak wel over geavanceerde tribometers en corrosieopstellingen. Bij de tribometers kunnen in een drie-assig stelsel (zo nodig variabele) belastingen worden aangebracht en gemeten en kan het omgevende medium naar wens worden aangepast in type, druk en temperatuur. Hiermee kan relatief snel de wrijvingscoëfficiënt worden bepaald en het inloopgedrag worden vastgesteld. Bij de corrosieopstellingen kan een veelheid aan monster vormen, media en elektrochemische karakteristieken worden gebruikt. Hiermee kan snel het verschil in gedrag tussen deklagen van verschillende structuur en samenstelling worden gemeten en bijvoorbeeld worden vergeleken met soortgelijk massief materiaal. Door de veelheid aan testen die hierop, onder redelijke condities, worden gedaan, is een zekere gestandaardiseerde aanpak mogelijk. Bovendien beschikt men over de kennis om de verschillen tussen testen te interpreteren. Door de flexibiliteit is het mogelijk, in overleg met de gespecialiseerde onderzoeker, voor eigen gebruik 'standaardtesten' op te zetten en deze voor routinemetingen tegen relatief lage kosten bij herhaling te laten uitvoeren. Op deze manier wordt in de loop van de tijd ervaring opgebouwd die het mogelijk maakt ook gericht kleine variaties in testcondities aan te brengen en te interpreteren.

12.3.4 *Praktijkbeproeving*

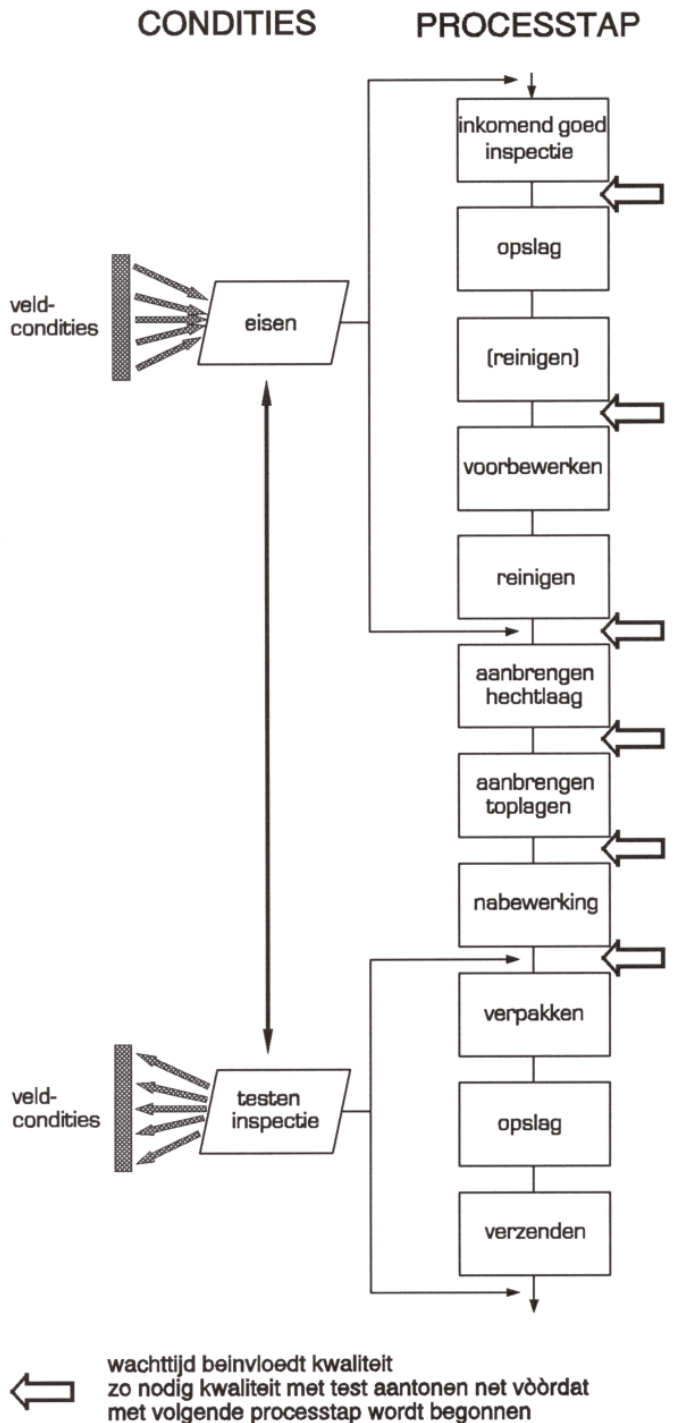
Een nauwkeurige voorspelling van de prestatie van veel oplos- en opspuitlegingen, processen en procedures is nagenoeg onmogelijk. Immers, voor veel toepassingen zullen kleine verschillen in de bedrijfsomstandigheden een significant effect hebben op hun gedrag. Bedrijfsproeven zijn daarom vaak noodzakelijk. Door de grote verscheidenheid aan praktijkomstandigheden en slijtagevariabelen zijn geen van de bestaande testen volledig geaccepteerd en gestandaardiseerd. Vele speciale en relatief eenvoudige testmethoden worden gebruikt bij de ontwikkeling en rangschikking van de oplos- en opspuitmaterialen, vooral op vergelijkingsbasis, ze zijn echter beperkt in hun mogelijkheid om het gedrag onder praktijkomstandigheden te voorspellen. Waar mogelijk moeten ze de praktijkomstandigheden zo dicht mogelijk benaderen en op zijn minst het voornaamste aantastingstype dat tijdens de te verwachten bedrijfsomstandigheden optreedt, dekken.

Doorgaans is het praktischer praktijkproeven te nemen dan laboratoriumproeven uit te voeren met de optimale beproevingsparameters. Gewoonlijk worden "volle schaal"-proeven aanbevolen. Bij de praktijkproeven moet men er absoluut zeker van zijn dat alle te testen materialen in een installatie onder exact dezelfde omstandigheden worden belast. Men moet zich realiseren dat zelfs in één installatie de omstandigheden van plaats tot plaats kunnen variëren. Ook zal bijvoorbeeld het seizoen waarin de proeven plaatsvinden van invloed zijn. Als voorbeeld kan het vervoer van stoffen dienen. 's Winters is de lading bevroren, in de zomer is het stof; echter in het voorjaar kan het gebeuren dat het op de losplaats 20 °C is terwijl de lading - afkomstig uit bijvoorbeeld het noorden van Zweden - nog bevroren is.

12.3.5 *Ontwerpen van testen*

Voor de functies 'meten van functionele eigenschappen' en 'kwaliteitsborging' zal bij deklagen al gauw geen gebruik meer kunnen worden gemaakt van standaardtesten. Figuur 7.1 maakt duidelijk waarom. Het aantal samenwerkende en elkaar beïnvloedende variabelen is veel groter dan bij massieve materialen. De testresultaten van een deklaagsysteem zijn daardoor alleen nog maar te vergelijken met die van een zelfde systeem dat onder gelijke condities werd getest. Dit aspect maakt het nog wel mogelijk voor kwaliteitsborging zelf scherpe testen op te zetten. Figuur 12.10 geeft aan waar in het productieproces zulke kwaliteitstesten op zijn plaats kunnen zijn. Ze kunnen variëren van een simpele

druppeltest om de reinheidsgraad van een oppervlak te controleren tot complexe productietesten waarbij wordt gekeken of een zending nieuw toevoegmateriaal zich normaal gedraagt.



figuur 12.10 Positie kwaliteitstesten in het productieproces

Deze vorm van ingangscontrole door een productietest wordt nog vaak onderschat en daardoor relatief weinig gebruikt. Door het kiezen van standaardinstellingen en standaardproefstukken kan snel worden vastgesteld of het nieuw ontvangen materiaal zich gedraagt, zoals men gewend is. Dit betekent in veel gevallen dat dan ook het eindresultaat van de productie volgens verwachting zal zijn. Voor afnemers betekent dit, dat leveranciers die dergelijke testen gebruiken hun ervaring weten over te brengen op hun toeleveranciers in de vorm van aanvullende eisen. De beoordeling op 'normaal gedrag' kan naar verschillende aspecten gebeuren, die men zo zal kiezen, dat ze gevoelig reageren op afwijkingen. Zo zal bijvoorbeeld het ferrietgehalte bij

austenitische oplossingen gevoelig reageren op kleine verschillen in de samenstelling van het toevoegmateriaal of uitvoeringsomstandigheden. Door de standaardcondities is de opmenging ook gestandaardiseerd. Bij opspuiten kan nabewerken onder standaardcondities, gevolgd door het meten van de ruwheid, duidelijk maken of het poeder een normale korrelgrootte en verdeling heeft.

Bij het opzetten van een test kan voor het bepalen van de belangrijkste testparameters, worden uitgegaan van de figuren 3.2 en 7.1. Hoe testen moeten worden ingericht wordt voornamelijk bepaald door het doel.

Te onderscheiden zijn:

► **Researchtesten**

Deze hebben hoofdzakelijk als doel de haalbaarheid van een nieuwe technologie te onderzoeken en zijn in dit kader niet belangrijk.

► **Ontwikkeltesten**

Deze worden opgezet om technische concepten te evalueren en te verifiëren en leveren daardoor een belangrijke bijdrage aan de betrouwbaarheid van een ontwerp. Door te anticiperen op de resultaten kunnen de kosten worden beheerst door het inrichten van scenario's voor een goed en een slecht resultaat. Zowel de functies 'meten' als 'vergelijken' komen hierin voor.

► **Prototypetesten**

Deze zijn bedoeld om de gekozen technische oplossing te verifiëren onder al of niet gesimuleerde, realistische condities. Ze hebben voornamelijk betrekking op de functie 'meten' maar kunnen een belangrijke aanzet geven voor de functie 'kwaliteitsborging' doordat ervaring wordt opgebouwd.

Dit zijn lange-duur testen onder al of niet (gesimuleerde) bedrijfscondities. Ze worden veel gebruikt voor het testen van de verouderingsgevoeligheid van producten. Bij deze test komen met name de functies "meten" en "kwaliteitsborging" voor. De eisen voor kwaliteitstesten worden vaak gebaseerd op betrouwbaarheidstesten.

► **Testen onder realistische bedrijfscondities**

Dit zijn testen op grote schaal en leiden bij voldoende resultaat tot vrijgave van ontwerpdetails of van fabricageprocessen. De verwachte betrouwbaarheid wordt gedemonstreerd op basis van parameteronderzoek, waarvoor hypothesen worden ontwikkeld. De testresultaten moeten dus aan van tevoren vastgestelde criteria voldoen. Ze kunnen in alle fasen van de levenscyclus van een product voorkomen (ook in de gebruiksfase voor bijvoorbeeld storingsdiagnoses). Alle functies komen voor (zie ook § 12.3.3).

► **Kwalificatietesten**

Om te kunnen bewijzen of componenten/onderdelen aan de kwaliteitscriteria en/of andere voorwaarden voldoen, worden testen opgezet met van tevoren vastgestelde criteria voor acceptatie en verwerping. De uiteindelijk acceptatietest of overdrachttest is een kwalificatietest die bewijst dat het product aan de ontwerpdoelen voldoet.

De ontwerper zal daarom meestal de voorwaarden stellen. Dit type test is dus met name gericht op de functie 'kwaliteitsborging'.

► **Testen op koepdelen**

Bij de fabricage van producten kan de behoefte ontstaan om bepaalde ontbrekende gegevens van standaardcomponenten of -onderdelen te achterhalen. Hiervoor kunnen aangepaste testen worden ingericht die doorgaans onder de verantwoordelijkheid van de betreffende fabrikant vallen. De ontwerper moet er echter voor zorgen dat kan worden vastgesteld of de testcondities voldoende relevant zijn voor het ontwerp. De test heeft vooral waarde voor de functies "vergelijken" en "kwaliteitsborging".

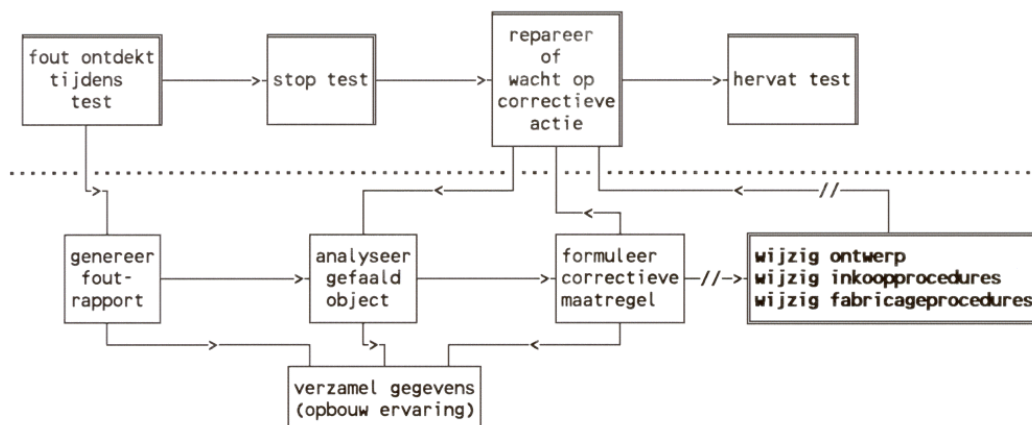
► **Productietesten**

Hieronder vallen alle testen die in het kader van de kwaliteitszorg noodzakelijk zijn om de kwaliteit van componenten en onderdelen te kunnen waarborgen. Het zijn testen met eenduidige en eenvoudig te hanteren criteria. Het belang van deze testen voor de fabricage van dek-lagen is hierboven reeds aangegeven. De functie is voornamelijk 'kwaliteitsborging'.

► **Storingsanalyses**

Deze vormen een belangrijke bron van informatie voor het opbouwen van productervaring. Voor een goede storingsanalyse is veel ervaring in de uitvoering nodig en moet men over goede relaties met afnemers en leveranciers beschikken. Diagnostisch gereedschap zowel in de vorm van meetapparatuur, software routines en beslissingsmodellen zijn onmisbaar. De functie is vooral 'meten'.

Voor elke vorm van onderzoek is het nodig om ervaring op te bouwen met de respons van testen omdat 'normaal gedrag' gebaseerd moet worden op redelijk betrouwbare gemiddelden. Pas dan heeft 'normaal gedrag' voldoende waarde als beoordelingscriterium. Na minimaal 11 testen kunnen redelijk standaarddeviaties worden bepaald, zodat het voordelen heeft een meetbare grootte in de test te hebben. Dit hoeft niet noodzakelijk de waarde van een belangrijke functionele eigenschap te zijn. Zaken als systeemhardheid, aantal poriën of scheuren per oppervlakte-eenheid, ruwheidsprofiel kunnen heel goed bruikbaar zijn. Wijken de resultaten af van de verwachting, of blijkt na een aantal proeven dat de gemeten waarden een grote spreiding vertonen, dan kan met het schema van figuur 12.11 worden nagegaan of alles normaal is verlopen en waar eventueel maatregelen mogelijk of nodig zijn. Het schema is bij alle bovengenoemde testen te gebruiken. Het blok 'fout ontdekt tijdens de test' moet breed worden opgevat. Allereerst kan een 'fout' betrekking hebben op alles wat afwijkt van wat werd verwacht. Ten tweede heeft 'tijdens de test' betrekking op alles wat met de test te maken heeft, dus zowel de uitvoering van één meting, als de uitvoering van een totale testcyclus met de bijbehorende evaluatie. Het kan nodig zijn anderen bij deze analyse te betrekken, zoals een ontwikkelafdeling, een ontwerpafdeling, de opdrachtgever of een specialist.



figuur 12.11 Analyse van de testresultaten

Hoofdstuk 13

Softwarematige ondersteuning

13.1 Algemeen

Tot nu toe is met geen woord gerept over de kostenaspecten van het opbrengen van slijtvaste- en corrosievaste lagen. Het is van het grootste belang eerst het aantastingsprobleem tot een goede oplossing te brengen; daarna pas is het zaak het kostenaspect in ogenschouw te nemen. In de praktijk blijkt dat, wanneer eerst naar de kosten wordt gekeken (dit is berucht in de nieuwbouwfase), men achteraf moet vaststellen dat als gevolg van een snelle aantasting onderdelen voortijdig moeten worden vervangen, dus buiten de geplande stilstanden! Een en ander betekent hogere kosten door:

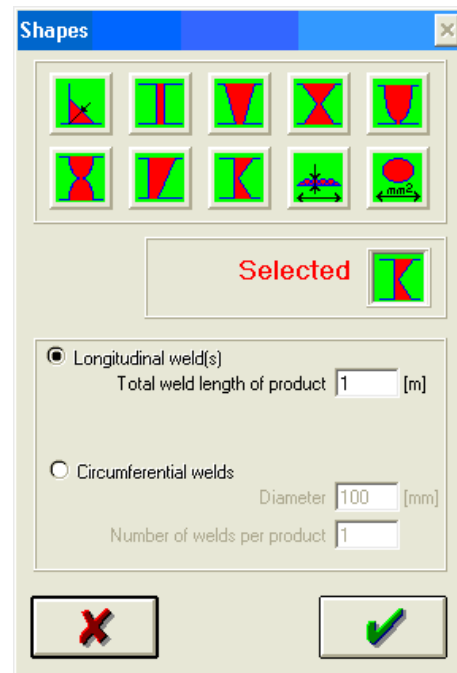
- ▶ productiederving;
- ▶ aanpassing van de installatie om betere beschermingsmiddelen te kunnen toepassen;
- ▶ alsnog kosten voor een duurdere slijt- of corrosievaste laag.

13.2 COSTCOMP (oplossen)

Voor het lassen heeft het Nederlands Instituut voor Las-techniek een software programma ontwikkeld waarmee de laskosten op eenvoudige wijze kunnen worden berekend: COSTCOMP®.

In de meeste gevallen wordt dit programma gebruikt om situaties (lasprocessen, lasnaadvormen en dergelijke) qua uiteindelijke kosten met elkaar te vergelijken. Om dit vergelijken mogelijk te maken, worden op het beeldscherm de twee te vergelijken situaties in kolommen weergegeven. In figuur 13.1 is een voorbeeld van een dergelijk scherm weergegeven. In dit geval betreft het het lassen van een hoeklas met proces 135 (massieve lasdraad met een diameter van 1,0 mm onder menggas) en proces 111 (lassen met beklede elektrode diameter 3,2 mm).

In dit programma heeft men ook de optie "oplossen" opgenomen. Kiest men namelijk de te lassen lasnaadvorm door op het symbool voor de hoeklas te klikken, dan krijgt men een beeldscherm als weergegeven in figuur 13.2.



figuur 13.2 beeldscherm keuze lasnaadvorm op oplossen

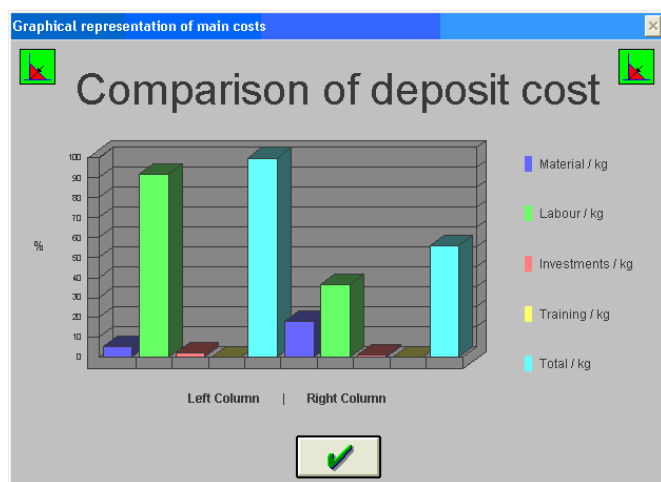
De opلاسprocessen kunnen hiermee qua kosten dus met dit programma met elkaar worden vergeleken. Wil men met behulp van dit programma de kosten van twee verschillende processen vergelijken, dan dient men eerst een aantal basisgegevens in te voeren. Het programma vraagt daarna verdere

COSTCOMP® - SNr: 5.0.0104.3501 - [COSTCOMP.SES]				
Bestand Vergelijk Eigenschappen Lasnaad Set up Help				
Met gebruikmaking van vooraf gedefinieerde data				
		135 M 1.0 mm	111 3.2 mm	
		16,0 mm²	16,0 mm²	
Neersmeltsnelheid	kg/h	3,55	1,35	
Kosten per kg poeder of m³ gas	€	5,04	0,00	
Kosten voor 1000 elektrodes of kg draad	€	1,26	169,76	
Uurtarief (zonder apparatuur overhead)	€	22,90	22,90	
Uren per jaar	h	1500	1500	
Inschakelduur	%	28	22	
Hoeveelheid werk onder keur	%	100	100	
Afkeur percentage	%	5	5	
Totale investeringen	k€	3,389	1,191	
Rente	%	8	8	
Afschrijftermijn	yr	5	5	
Totale kosten per jaar	k€	41,857	41,263	
Neergesmolten lasmetaal per jaar	kg	1416,45	422,48	
Gewicht per meter	kg	0,13	0,13	
Totale kosten per kg lasmetaal	€	29,55	97,67	
Percentage van de totale las	%	100	100	
Kosten voor dit gebied (per meter)	€	3,71	12,27	
Totale kosten voor deze las (per meter)	€	3,71	12,27	
Productiviteit	kg/h	0,94	0,28	
Kosten van 1000 elektrodes (proces 111) of kg draad voor andere processen		NUM	SCR	CAP 2006-06-19#12:56

figuur 13.1 Beeldscherm Costcomp

informatie, bijvoorbeeld over de opslasdikte. Vervolgens wordt de benodigde hoeveelheid lasmetaal per meter bij een opslasbreedte van 1.000 mm berekend. Door de gebruiker kan van tevoren verschillende waarden, zoals de te verwachten neersmeltsnelheid, procentuele inschakelduur, prijzen van de lastoevoegmaterialen (draad, elektroden, gas, poeder, enz.) worden ingevoerd.

Naast dat de totaalkosten per eenheid worden berekend, kunnen de gegevens ook nog grafisch worden weergegeven (zie figuur 13.3).



figuur 13.3 Grafische weergave onderverdeling van de kosten

13.3 Overige selectiehulpen

Er zijn nog enkele commercieel verkrijgbare selectiehulpen, die mogelijk interessant zijn. In het literatuuroverzicht zijn de details opgenomen, zodat de lezer zelf zijn weg hierin kan zoeken.

In toenemende mate kan er echter steeds meer hulp worden gezocht op het 'Internet'. Als voorbeeld willen we hier noemen: <http://www.suppliersonline.com>, waar een formidabele database met materiaalgegevens gratis toegankelijk is (na registratie). Hierna volgen nog enkele programma's die naar het oordeel van de auteurs kunnen bijdragen aan het oplossen van slijtage- en/of corrosieproblemen.

ASM International: Industry Report Series on 'Protective Coating Processes' (opspuiten)

Dit programma is een geautomatiseerd literatuuroverzicht van ASM International dat alle referenties op het gebied van beschermende deklagen bevat. Het programma wordt uitgebracht door Materials Information, een samenwerkingsverband tussen ASM International en het Britse Institute of Materials. Het bestaat uit een klapper en een computerprogramma. Beiden bevatten dezelfde informatie. Het computerprogramma heeft echter meer flexibele zoekmogelijkheden.

SearchMore Thermal Spray CDROM (opspuiten)

Een selectie van de literatuurbestanden METADEX en Engineered Materials Abstracts van Materials Information in Londen is uitgebracht op CD-ROM. Het bestand omvat uittreksels uit ruim 3000 tijdschriften en conferentiebundels vanaf 1966.

Een snelzoekmethode is ook beschikbaar en werkt ongeveer zoals in veel on-line bibliotheekbestanden. Ter ondersteuning zijn een helptekst (formaat Microsoft Windows) en een instructieboek aanwezig.

Apticote Isis (opspuiten en oplossen)

Dit programma is een op Windows gebaseerd expert-systeem voor de selectie van oppervlaktebehandelingen en deklagen voor slijtage en corrosie. Het is ontwikkeld door de Universiteit van Hull in samenwerking met industriële bedrijven. Het programma gaat wel uit van vaktechnische voorkennis en geleidt daarmee een gebruiker stap-voor-stap naar de oplossing. Het vraagt invoer van materialen, (ont-

werp)randvoorwaarden, omgevingscondities en prestatie-eisen. Het programma geeft als antwoord een opsomming van de mogelijke oppervlaktebehandelingen uit een bestand van 200 processen. De rangorde kan worden bepaald naar kosten, slijtagebestendigheid, corrosiebestendigheid, milieubelasting. Van elke oplossing is een uitgebreide datasheet aanwezig in het systeem. Van de uiteindelijk mogelijke oplossingen moeten alle datasheets eerst zorgvuldig worden bekeken, voordat een definitieve keuze wordt gemaakt. Het is ook mogelijk het systeem te voeden met eigen ervaring.

PUBLICAT (oplossen en opspuiten)

PUBLICAT is een eenvoudige index (database) van artikelen en publicaties, die wordt geleverd tezamen met een gelijknamig programma voor het snel opzoeken van de gewenste onderwerpen. PUBLICAT bevat alle publicaties uit het tijdschrift 'Lastetechniek' op het gebied van lassen en thermisch spuiten, NIL-rapporten, referaten van NIL-BIL voorlichtingsdagen en NIL voorlichtingsbladen uit de periode 1-1-1981 tot heden. Daarnaast zijn ook artikelen uit het Belgische 'Lastijdschrift' en tal van andere toonaangevende tijdschriften uit het binnen- en buitenland uit de genoemde periode in de database van PUBLICAT opgenomen.

Het volledige PUBLICAT pakket met meer dan 2400 geïndexeerde artikelen is gratis te 'downloaden' op de NIL-site (<http://www.nil.nl/download.htm>) en wordt permanent onderhouden.

Hoofdstuk 14

Praktijkvoorbeelden

14.1 Oplassen

Voorbeeld 1 (Corrosie en abrasieve slijtage); figuur 14.1

Onderdeel: Geleiderollen van een continue gietmachine voor staalplakken.

Doel: Het geleiden en ondersteunen van een stollende plak staal en verder in de machine het steunen en richten van de plak.

Schadebeeld: Corrosie en slijtage naast scheurvorming door thermische schok.

Milieu: Zeer vochtige omgeving (mist); ijzeroxiden bij temperaturen tot ca. 500 °C.

Basismateriaal: 13CrMo4-5.

Remedie: Oplassen met gevulde draad type X20Cr13, gevolgd door spanningsarmgloeien en afdraaien.

Corus IJmuiden



figuur 14.1 Geleiderollen van een continue gietmachine voor staalplakken

Voorbeeld 2 (Adhesieve slijtage); figuur 14.2

Onderdeel: Geleidebussen van de haspels in walserijen.

Doel: Het geleiden van de gewalste staalplaat.

Schadebeeld: Adhesieve slijtage (groeven).

Milieu: Lucht, wat vettig.

Basismateriaal: C35

Remedie: Oplassen van een massieve cilinder met lasdraad type CuAl 11 (11% aluminiumbrons). Daarna wordt de cilinder in stukken van de juiste lengte gedeeld en gedeeltelijk uitgeboord. De kopse kant wordt eveneens opgelast.

Corus IJmuiden



figuur 14.2 Geleidebussen van de haspels in walserijen

Voorbeeld 3 (Adhesieve slijtage en corrosie); figuur 14.3

Onderdeel: Scharnierpunt van een oliewinningsinstallatie.

Doel: Mogelijk maken dat horizontale leiding om verticale leiding kan scharnieren.

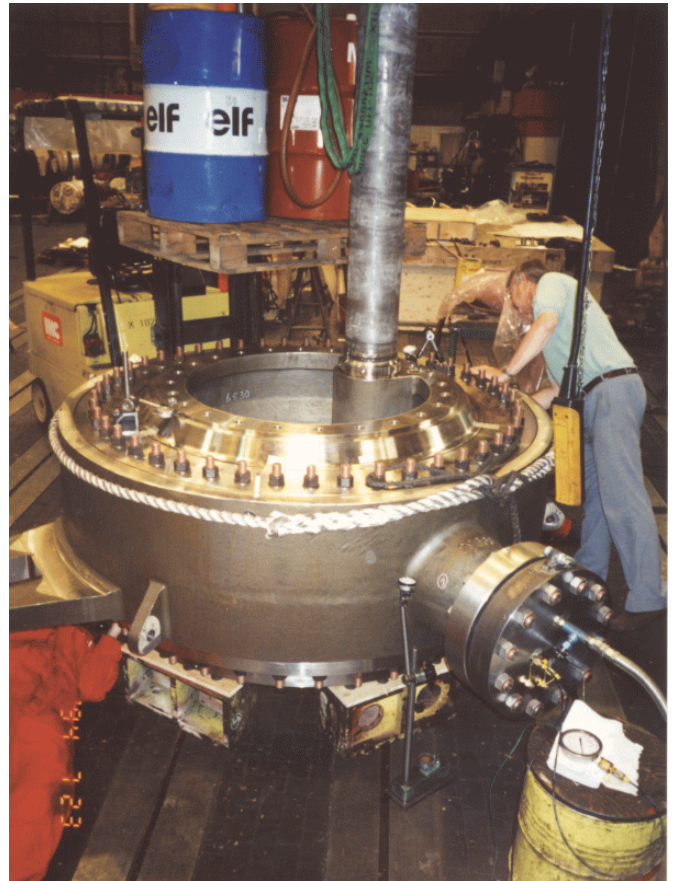
Schadebeeld: Corrosie en adhesieve slijtage.

Milieu: Ruwe olie met zwavel, zeewater.

Basismateriaal: Duplex roestvast staal (Uranus 50).

Remedie: Oplassen met lasdraad type NiCrMo9Nb met als bufferlaag NiCr23Mo16.

IHC Holland (Parts & Services) Kinderdijk



figuur 14.3 Scharnierpunt van een oliewinningsinstallatie

Voorbeeld 4 (Abrasieve slijtage); figuur 14.4

Onderdeel: Kolenmaalrollen van kolen gestookte elektriciteitscentrales.

Doel: Het vergruizen van vuistgrote steenkoolbrokken, ter verkrijging van een grotere verbrandingsintensiteit van de kolen.

Schadebeeld: Abrasieve slijtage (high stress) van de rollen, maar ook van het maalbed.

Milieu: Kolen van omgevings temperatuur.

Basismateriaal: Ni-hard 4 (is gekozen in verband met giet-eigenschappen).

Remedie: Oplassen met gevulde draad type X5Cr27.

Welding Alloys Beverwijk

Voorbeeld 5 (Spanningscorrosie); figuur 14.5

Onderdeel: Bodem van een drukvat voor de chemische industrie.

Doel: Procesfunctie.

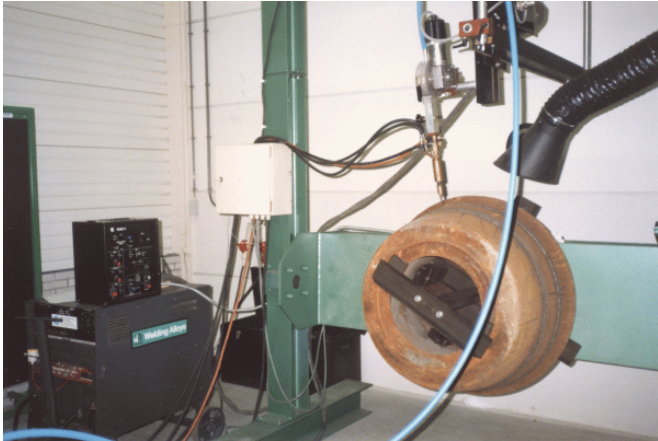
Schadebeeld: Spanningscorrosie.

Milieu: Waterstof houdende atmosfeer.

Basismateriaal: 16Mo3

Remedie: Door middel van elektroslak oplassen in één laag AISI 347 aanbrengen. Oplasmaand type 23.11Nb; band-breedte 30 x 0,5 mm.

Soudokay



figuur 14.4 Kolenmaalrollen van kolen gestookte elektriciteitscentralen



figuur 14.5 Bodem van een drukvat voor de chemische industrie

Voorbeeld 6 (Putvormige corrosie); figuur 14.6

Onderdeel: Bodem van een gaskoeler.

Doel: Het koelen van verbrandingsgassen in de petrochemische industrie.

Schadebeeld: Putvormige corrosie.

Milieu: Zwaar corrosief met chloriden.

Basismateriaal: 16Mo3 (2000 x 400 mm).

Remedie: Het in twee lagen (8,5mm) elektroslak oplassen van alloy 625

Soudokay



figuur 14.6 Bodem van een gaskoeler

Voorbeeld 7 (Algemene corrosie); figuur 14.7

Onderdeel: Kopspoor bij een zuurstof verlaadstation.

Doel: Spoorbaan voor wagons voor vloeibare zuurstof.

Tussen de twee spoorstaven van het spoor staat een spanningsverschil van 6 volt. Door de wielen en de as van de wagon zal het sein op rood springen.

Schadebeeld: Op het rij oppervlak van de spoorstaaf ontstaat door atmosferische corrosie een isolerende roestlaag waardoor de bediening van het sein onbetrouwbaar wordt.

Milieu: Industriële, maritieme atmosfeer.

Basismateriaal: UIC 60 spoorstaven met een minimum treksterkte van 900 N/mm².

Remedie: Het rijoppervlak van de spoorstaafkop zig-zag op te lassen met de gevulde draad type X2CrNi 24 12).

Corus IJmuiden



figuur 14.7 Kopspoor bij een zuurstof verlaadstation

Voorbeeld 8 (Slijtage vermoeïing); figuur 14.8

Onderdeel: Puntstuk van een wissel in de spoorweg bovenbouw.

Doel: Wielgeleiding om van het rechte spoor in de boog te komen of omgekeerd.

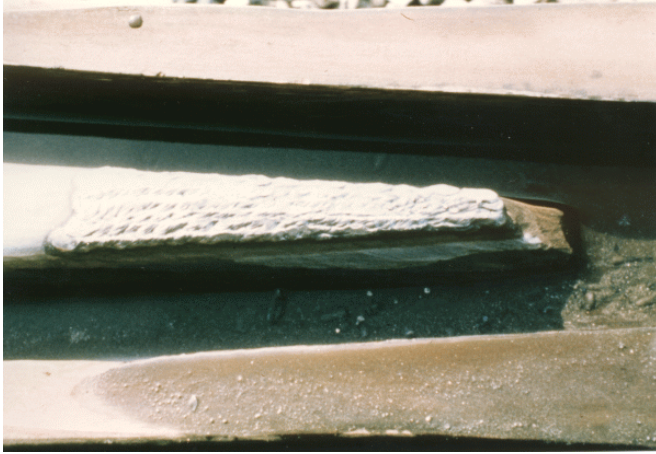
Schadebeeld: Slijtagevermoeïing door de wielen van spoorwagens.

Milieu: Buitenatmosfeer.

Basismateriaal: X110Mn12

Remedie: Oplassen (zo koud mogelijk) met elektrode type X75MnNi14 of met de gevulde draad type X30CrMnNiMoV16 14. Daarna wordt het puntstuk in het juiste profiel geslepen.

Esab Nederland BV Utrecht



figuur 14.8 Puntstuk van een wissel in de spoorweg bovenbouw

Voorbeeld 9 (Slijtagevermoeding); figuur 14.9

Onderdeel: Draagrol voor roterende cementmolen.

Doel: Het ondersteunen van de draaiende cilindervormige droogoven.

Schadebeeld: Slijtagevermoeding

Milieu: Rollen worden bloot gesteld aan langdurige temperatuurbelasting van 400 à 500 °C.

Basismateriaal: 13CrMo4-5

Remedie: Het onder poeder een bufferlaag oplassen met de gevulde draad type 10CrMo6.5. Daarover een toplaag met de gevulde draad type 12CrMo9.7. De rol wordt op 250 °C voorgewarmd. Na het oplassen wordt spanningsarm gegloeid op 600 °C.

Welding Alloys UK



figuur 14.9 Draagrol voor roterende cementmolen

Voorbeeld 10 (Putvormige corrosie); figuur 14.10

Onderdeel: Drukvat voor de aardgasproductie.

Doel: Het raffineren van het residu van aardgasproducten.

Schadebeeld: Putvormige corrosie

Milieu: Het residu bevat o.a. chloriden houdend water.

Basismateriaal: S355

Remedie: Het onder poeder oplassen met gesinterde band 309LMO als bufferlaag en 316L als toplaag. De 309LMO kwaliteit is in gewalste vorm moeilijk te produceren en de verkrijgbaarheid is schaars. Het toepassen van gesinterde band bood hier de oplossing.

Welding Alloys Nederland Beverwijk



figuur 14.10 Drukvat voor de aardgasproductie

Voorbeeld 11 (Abrasieve slijtage); figuur 14.11

Onderdeel: Roterende breker

Doel: Het vermalen van kalk, kunstmest, kolen enz.

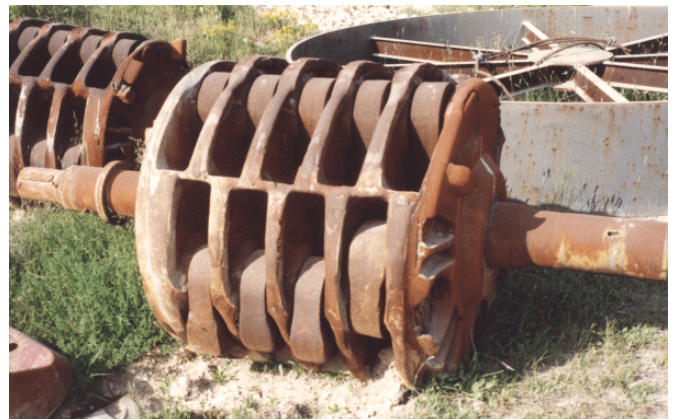
Schadebeeld: Abrasieve slijtage.

Milieu: Omgeving

Basismateriaal: 19Mn5

Remedie: Oplassen met de gevulde, gasloze draad type X5Cr27 of X5CrNb22.6

Welding Alloys UK



figuur 14.11 Roterende breker

Voorbeeld 12 (Abrasieve slijtage); figuur 14.12

Onderdeel: Transportschroef.

Doel: Het transporteren van betonmortel.

Schadebeeld: Abrasieve slijtage.

Milieu: Betonmortel.

Basismateriaal: S355

Remedie: Het autogeen oplassen met 75% WC, korrelgrootte 0,24 0,7 mm, in een matrix van NiCr.

Castolin Benelux, Delft

figuur 14.12 Transportschroef

Voorbeeld 13 (Hoge temperatuur corrosie); figuur 14.13

Onderdeel: Klep van een scheepsmotor.

Doel: Het afsluiten van de verbrandingsruimte.

Schadebeeld: Aantasting door verbrandingsgassen met hoge temperatuur.

Basismateriaal: X50CrMnNiNbN 21 9

Remedie: Onder poeder plasma oplassen met Co CrWNiFeCSi 28 4.

Van West Holland BV IJmuiden/Castolin Benelux N.V. Delft

figuur 14.13 Klep van een scheepsmotor

9.2 Opspuiten**Voorbeeld 14 (Abrasieve slijtage);** figuur 14.14

Onderdeel: Wals van een papiermachine.

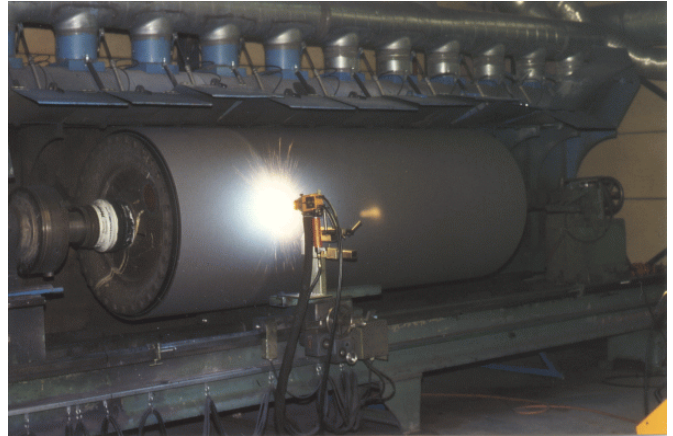
Doel: Het drogen en geleiden van de papierbaan.

Schadebeeld: Abrasieve slijtage.

Milieu: Vochtig product.

Basismateriaal: Gietijzer

Remedie: Met het arc proces opspuiten van Fe Cr 13.

Revamo Vlamspuittechniek Meppel

figuur 14.14 Wals van een papiermachine

Voorbeeld 15 (Abrasieve en erosieve slijtage); figuur 14.15

Onderdeel: Mengschroef.

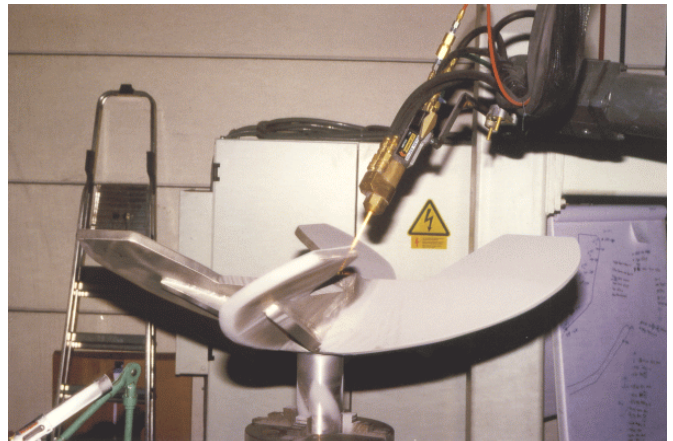
Doel: Mengen van kunststofgranulaat met geregelde kunststof.

Schadebeeld: Erosie en abrasieve slijtage door zand en vulstoffen.

Milieu: Droog.

Basismateriaal: Roestvaststaal

Remedie: Met het HP-HVOF-proces opspuiten met WC-Co 17.

Remavo Vlamspuittechniek Meppel

figuur 14.15 Mengschroef

Voorbeeld 16 (Algemene corrosie); figuur 14.16

Onderdeel: Rubberdoekcilinder voor rotatie offsetmachines.

Doel: Het transporteren van papier en het geven van tegendruk op de plaatcilinder.

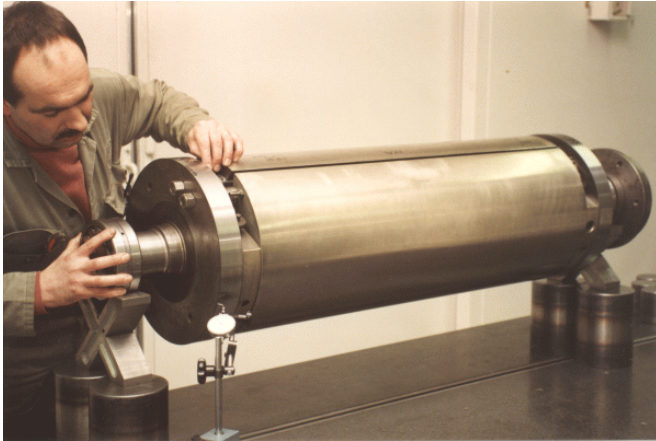
Schadebeeld: Primair een algemene corrosie; secundair beschadigingen door scherpe, harde voorwerpen.

Milieu: Omgeving; echter het reinigen gebeurt met agressieve stoffen.

Basismateriaal: GS 19Mn5 of GS X10Cr13

Remedie: Met het HVOF-proces opspuiten met Ni-CrFeSiBC 12-4. De netto laagdikte is ca. 0,3 mm; grotere laagdikten, indien gewenst zijn mogelijk.

Habets Nuth



figuur 14.16 Rubberdoekcilinder voor rotatie offsetmachines

Voorbeeld 17 (Abrasieve en erosieve slijtage); figuur 14.17

Onderdeel: Slijtplaat van een centrifugaalpomp.

Doel: Bescherming tegen slijtage.

Schadebeeld: Abrasieve en erosieve slijtage.

Milieu: Verontreinigd water (Kiezels en zand).

Basismateriaal: Origineel: GS X200Cr27. Opspuiten maakt het mogelijk GS 20Mn5 als basismateriaal te gebruiken.

Remedie: Dit GS 20Mn5 wordt opgespoten en ingesmolten met Ni CrFeSiBC 14 4,5, de laag heeft een hardheid van 60HRC en de dikte is 3 mm.

Stork MHC Amsterdam



figuur 14.17 Slijtplaat van een centrifugaalpomp

Voorbeeld 18 (Oppervlakte beschadigingen)

Onderdeel: Motorblok van een V 12 scheepsdiesel.

Doel: Het repareren van een hoofdlager boring van een krukas.

Schadebeeld: Oppervlakte beschadigingen door een gebroken krukas.

Milieu: Omgeving.

Basismateriaal: GIJ 12

Remedie: Het autogeen poederspuiten, op locatie, met een zelfhechtend poeder: Ni CrAlMoFe 9 7. Laagdikte ca. 1 mm netto.

Opmerking: Alternatieve reparatie: Het verwijderen van de motor uit het schip, d.w.z. Slopen van de dekplaten, het verwijderen van leidingwerk, enz.

Stork MHC Amsterdam

Voorbeeld 19 (Fretting en adhesieve slijtage); figuur 14.18

Onderdeel: Pers voor de automobiël industrie.

Doel: Het verzorgen van een vaste passing voor een bronzen geleide bus.

Schadebeeld: Fretting en adhesieve slijtage.

Milieu: Omgeving.

Basismateriaal: GS 20Mn5

Remedie: Het op locatie elektrisch draadspuiten met de legering Fe NiMoMn 3,5 2

Stork MHC Amsterdam



figuur 14.18 Pers voor de automobiëlindustrie

Voorbeeld 20 (Algemene corrosie); figuur 14.19

Onderdeel: Hekwerk.

Doel: Erfscheiding.

Schadebeeld: Atmosferische aantasting (roesten).

Milieu: Landelijke omgevingsatmosfeer.

Basismateriaal: S235

Remedie: Het aanbrengen van een autogeen draadgespoten zinklaag (schoperen) in een laagdikte van ca. 80 μm gevolgd door het aanbrengen van een zinkchromaat primer en een verfsysteem.

Stork Aludra B.V. Vlaardingen



figuur 14.19 Hekwerk

Voorbeeld 21 (Hoge temperatuur aantasting); figuur 14.20

Onderdeel: Verbrandingskamer van een gasturbine

Doel: Opwekken van een gasstroom met hoge energie-inhoud.

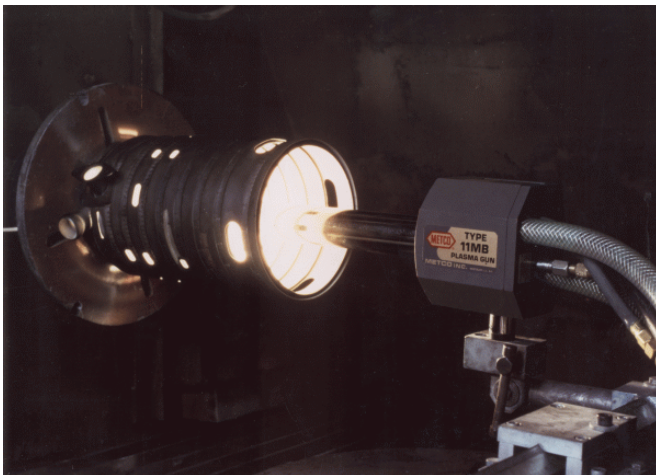
Schadebeeld: Oxidatie en erosie.

Milieu: Rookgassen met temperaturen boven 1500 °C, waardoor kruipschade ontstaat in combinatie met erosie en oxidatie.

Basismateriaal: Superlegering

Remedie: Het aanbrengen van een 'thermal barrier coating' door middel van plasmaspuiten. De coating heeft een complexe opbouw en is voor deze toepassing doorgaans beschermd door patenten. Gebruikelijk is een Ni Cr 80 20 hechtlaag, gevolgd door een MCrAlY tussenlaag en een $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 8.

Stork Aludra B.V. Vlaardingen



figuur 14.20 Verbrandingskamer van een gasturbine

Hoofdstuk 15

Literatuuroverzicht

- [1] Abrasion und Erosion; H. Uetz; Carl Hansen Verlag.
- [2] Materials to resist Wear; (A Guide to their Selection and Use); A.R. Landsdown en A.L. Price; Pergamon Press.
- [3] Surface Engineering for Wear Resistance; K.G.Budinski; Prentice Hall
- [4] Engineering Coatings; Design and Application; Stan Grainger; Abington Publishing.
- [5] Thermisch spuiten; VM 95; Vereniging FME-CWM.
- [6] Inventarisatie slijtage en corrosiebestrijding; C.J. Halkes, februari 1991; IPL TNO. Deelrapport NIL project Oplassen.
- [7] Inventarisatie Slijtvastheid van opaslegeringen; J.W.M. Mens, februari 1994; TNO Industrie. Eindrapport NIL project Oplassen. Nr.OL94 32.
- [8] Bestrijding abrasieve slijtage bij Hoogovens door middel van oplassen. Th.J. Verheiden, Lastechniek, 54, september 1988 pag. 177 183.
- [9] High stress abrasion of carbide hardfacing alloys; P.W.Leech, Surface Engineering 1989 vol 5 No.1 pag 41 44.
- [10] Corporate Engineering Standard CES 23 part 1, April 1978; Applied Surfaces for Wear Protection; Part 1 Weld deposited surfaces; British Steel Corporation, Croydon, UK.
- [11] Metals Handbook; Volume 13, Corrosion; ASM International, 1992.
- [12] Nickel base alloys combat corrosion.; D.G. Agarwal, W. Herda; Advanced Materials & Processes 6/95, pag. 25 28.
- [13] Thermal Spray Technology Course Nr. 51; ASM International 1992.
- [14] Corrosion tables stainless steels; Jernkontoret Stockholm Sweden, 1979.
- [15] Coatings for high Temperature Applications; E. Lang Applied Science Publishers Ltd.; Ripple Road, Barling, Essex, Engeland.
- [16] Lassen van roest- en hittevaststaal; VM 42; Vereniging FME-CWM.
- [17] A practical guide to high temperature Alloys; P. Elliot; Materials & Design, Vol. 12 no. 6 december 1991; pag. 299 307.
- [18] Corrosie van Oplaslegeringen; TNO rapport 94/101750/VUI/SCI, 6 mei 1994; Mw.C. Bauma en J. Vuik.
- [19] Strength of Materials; S. Timoshenko; D. Van Nostrand Company Inc., Princeton, New Jersey.
- [20] Oplassen; W. Pors; Lastechniek 56, februari 1990, pag. 54 63.
- [21] Oplassen (deel 2); W. Pors; Lastechniek 55, februari 1989, pag. 296 309.
- [22] Engineered Materials for Advanced Friction and Wear Applications; Proceedings of an International Conference.; ASM International.
- [23] The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings; L. Pawlowski; John Wiley & Sons, 1995.
- [24] Corrosion Basics, An Introduction; NACE, 1984.
- [25] Corrosion Atlas, vol. 1 & 2; E.D.D. During; Elsevier, 1988.
- [26] Over de afhankelijkheid tussen de slijtbestendigheid van metalen bij wrijving tegen abrasieve oppervlakken en hun hardheid (in Russisch); M.M.Chroescof en M.A. Babicef; Westnik Masinostrojenije 34 (1954):9 pag 3 9.
- [27] COSTCOMP; Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL).
- [28] Slijtagemechanismen en bedekkingslagen; T. Kraak; Lastechniek oktober 2004.
- [29] Slijtvaste platen; M. Kleijkamp; Lastechniek mei 2005.
- [30] Oplassen met band, deel 1: Nieuwe ontwikkelingen; Cobben en Demuzere; Lastechniek december 2008.
- [31] Oplassen met band, deel 2: praktische uitvoering; Cobben en Demuzere; Lastechniek januari 2009.
- [32] NEN-EN 14700:2005 - Welding consumables - Welding consumables for hardfacing.
- [33] VM 128 - "Warmtebehandelingen van staal"; W. Pors IWE (NIL); uitgave FME, dec. 2009.
- [34] VM 129 - "Reparatielassen"; W. Pors IWE (NIL) en Th. Luijendijk (TU-Delft); uitgave FME, dec. 2009.



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

T (079) 353 11 00

F (079) 353 13 65

E alg@fme.nl

I www.fme.nl